

## 菊花风味蛋糕工艺优化及品质分析

邹小欠,王乐成,陈春旭,杜传来\*

(安徽科技学院 食品科学与工程学院,安徽 滁州 239050)

**摘要:**以低筋小麦粉和玉米油为基础原料,选取糖粉、鸡蛋、菊花粉和泡打粉的添加量为关键因素,以感官评分为评价指标,通过单因素实验和正交试验对菊花风味蛋糕的制备工艺进行优化。结果表明,各因素对蛋糕感官品质的影响主次顺序为:菊花粉添加量>糖粉添加量>鸡蛋添加量>泡打粉添加量。经方差分析验证,菊花粉与糖粉的添加量对产品品质有高度显著影响( $P<0.05$ )。通过验证试验与t检验确定最优配方组合为:低筋小麦粉100g、糖粉75g、鸡蛋140g、菊花粉5g、泡打粉2g、玉米油50g、牛奶50g,在155℃烘烤45min。在此条件下制得的蛋糕感官评分达88.4分,总酚含量为256mg/100g,品质上乘。本研究可为菊花的食品化应用及功能性烘焙产品开发提供参考。

**关键词:**菊花;蛋糕;工艺优化

中图分类号:TS213.23

文献标识码:A

文章编号:2095-297X(2026)02-0001-07

### Optimization of Processing Technology and Quality Evaluation of Chrysanthemum-Flavored Cake

ZOU Xiaoqian, WANG Lecheng, CHEN Chunxu, DU Chuanlai\*

(School of Food Science and Engineering, Anhui Science and Technology University, Chuzhou, 239050, Anhui)

**Abstract:** Taking low-gluten wheat flour and corn oil as the basic raw materials, it selected the addition amounts of caster sugar, eggs, chrysanthemum powder, and baking powder as key factors, with sensory score as the evaluation indicators. The preparation process of the chrysanthemum-flavored cake was optimized through single-factor experiments and orthogonal tests. The results indicated that the order of influence of each factor on the sensory quality of the cake was as follows: chrysanthemum powder addition amount > caster sugar addition amount > egg addition amount > baking powder addition amount. Variance analysis confirmed that the addition amounts of chrysanthemum powder and caster sugar had a highly significant impact on product quality ( $P<0.05$ ). Through verification experiments and t-tests, the optimal formulation was determined as follows: low-gluten wheat flour 100 g, caster sugar 75 g, eggs 140 g, chrysanthemum powder 5 g, baking powder 2 g, corn oil 50 g, and milk 50 g, with baking at 155 °C for 45 minutes. Under these conditions, the sensory score of the cake reached 88.4 points, and a total phenol content of 256 mg/100g, indicating superior quality. It provides a reference for the food application of chrysanthemum and the development of functional baked products.

**Key words:** chrysanthemum; cake; process optimization

收稿日期:2025-11-25

\* 通讯联系人

基金项目:安徽省自然科学基金面上项目(2508085MC066);滁州市科技计划项目(2022No13);安徽科技学院引进人才项目(SPYJ202105)。

作者简介:邹小欠(1992-),女,安徽蚌埠人,助教,硕士;杜传来(1969-),男,安徽滁州人,教授,博士。E-mail:545320922@qq.com

菊花(*Chrysanthemum morifolium*),是菊科菊属的多年生草本花卉<sup>[1]</sup>,又名寿客、金英或者黄华。其味甘苦、性寒,具有疏散风热、平肝明目及解毒的功效<sup>[2-3]</sup>。菊花含有黄酮类、挥发性精油和菊糖等活性成分<sup>[4-6]</sup>,在抗炎<sup>[7]</sup>、抗菌、抗氧化<sup>[8]</sup>等领域效果显著,对肿瘤防治、免疫调节和心血管健康等具有潜在应用价值<sup>[9-11]</sup>。当前菊花风味蛋糕的研究鲜有报道,本研究选取糖粉添加量、鸡蛋添加量、菊花粉添加量和泡打粉添加量为主要考察因素,在单因素实验基础上探讨正交优化菊花风味蛋糕的工艺配方,以期今后工业化生产加工提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与仪器

试验所需的基本材料见表1。

表1 试验材料

| 名称   | 规格 | 产地 |
|------|----|----|
| 低筋面粉 | 市售 | 山东 |
| 糖粉   | 市售 | 安徽 |
| 鸡蛋   | 市售 | 安徽 |
| 泡打粉  | 市售 | 湖南 |
| 玉米油  | 市售 | 安徽 |
| 菊花   | 市售 | 浙江 |
| 牛奶   | 市售 | 安徽 |

试验仪器见表2。

表2 试验仪器

| 名称      | 型号           | 生产厂家             |
|---------|--------------|------------------|
| 电子天平    | YP10001B     | 杭州力辰科技有限公司       |
| 电烤箱     | KB-20        | 广州市厨宝烘焙机械设备有限公司  |
| 电动打蛋器   | KD301        | 荣事达集团有限责任公司      |
| 质构仪     | CT3          | 美国 BROOKFIELD 公司 |
| 强制对流干燥箱 | WHL-100      | 德国 WIGGENS 公司    |
| 粉碎机     | Geno/Grinder | 赛默飞世尔科技有限公司      |

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 菊花风味蛋糕制作流程及操作要点

##### 1.2.1.1 基础配方

采用强制对流干燥箱(50 ℃)对菊花全花进行烘干处理至恒重,研磨成粉后过80目筛,所得粉末置于干燥器中备用。本实验以100 g低筋面粉为基准配方,精确称取65 g糖粉、120 g新鲜全蛋液、2 g泡打粉、50 g玉米油和50 g纯牛奶。将混合均匀的面糊倒入模具后,置于预热至155 ℃(上下火)的烤箱中层,烘烤45 min至表面金黄,内部组织完全熟透即可出炉。

##### 1.2.1.2 工艺流程

菊花风味蛋糕制作工艺流程图如图1所示。

##### 1.2.1.3 操作要点

原料预处理:干燥菊花用上乘的精心研磨后细致过筛就能得到细腻粉末,低筋面粉和泡打粉巧妙融合且过筛3次就能保证质地均匀,接着鸡蛋的蛋清蛋黄进行细致分离且存放蛋清的器皿得确保干燥无油渍,还要准备好牛奶和柠檬汁。

制作蛋黄糊:蛋黄和玉米油以及50 g鲜牛奶融合在一起搅拌至完全乳化,质地细腻又无比顺滑,接

着把仔细筛过的低筋面粉、泡打粉和菊花粉混合,用“Z”字形器搅拌或者以轻轻翻拌的方式快速细致拌匀,让面糊细腻无筋且能保持松软质感。

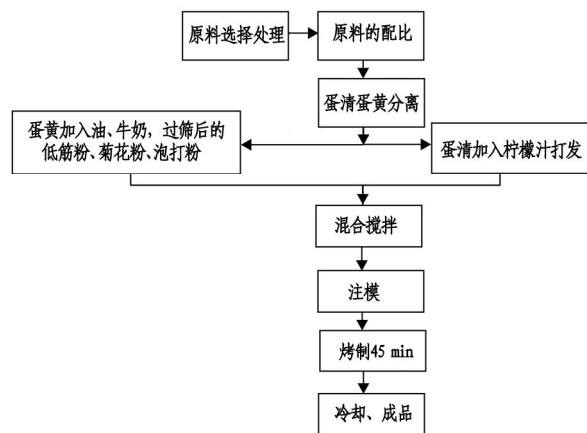


图1 工艺流程图

打发蛋清:干净的蛋清要无水无油,轻轻滴入3滴清新的柠檬汁去掉腥味,糖粉分三次慢慢加入且每次都要充分融合,用电动打蛋器打发至中性发泡状态,此时轻轻提起打蛋器,蛋白会形成短小挺立的尖峰。

面糊混合:轻柔地把打发好的三分之一蛋清与蛋黄糊搅拌均匀融合,接着缓缓倒入余下的蛋清轻柔地持续翻拌,直到整个面糊颜色均匀、质地细腻柔滑,翻拌时动作要轻快流畅以防止气泡消失。

烘烤冷却:烤盘上铺上一层平整的油纸后缓缓倒入细腻的面糊,再用刮刀轻轻将表面抹平且轻震几下排出面糊里的大气泡。烤箱预热到155℃后将铺好面糊的烤盘放中层耐心烤45 min,烘烤后半段要仔细观察,若上色太快就适时盖上一层锡纸防止焦糊。烘烤结束把蛋糕从烤箱拿出并小心移到晾架上自然冷却到室温。

### 1.2.2 菊花风味蛋糕单因素实验设计

前期预备试验后,明确了最终产品受菊花粉添加量<sup>[12]</sup>、糖粉添加量<sup>[13]</sup>、鸡蛋添加量<sup>[14]</sup>和泡打粉添加量<sup>[15]</sup>这些主要因素影响,因此让所有试验配方里的其他基础成分保持不变,以感官评价为主要评判标准,对菊花粉、糖粉、鸡蛋、泡打粉的添加量分别进行单一变量的深入探究。

#### 1.2.2.1 菊花粉添加量

固定低筋小麦粉100 g、糖粉65 g、蛋液120 g、泡打粉2 g、玉米油50 g、牛奶50 g。将菊花粉的添加量设为1、3、5、7、9 g这五个梯度,按既定工艺流程烘焙蛋糕,仔细对比各添加量下成品的外观形态、色泽亮度、口感细腻度与风味层次,选出最佳菊花粉添加量。

#### 1.2.2.2 糖粉添加量

固定低筋小麦粉100 g、蛋液120 g、泡打粉2 g、玉米油50 g、菊花粉5 g、牛奶50 g。分别尝试加入35、45、55、65 g和75 g糖粉来探索其对蛋糕口感的影响,按标准烘焙工艺做蛋糕,对比不同糖粉添加量下蛋糕质地与风味,选出最优糖粉添加量。

#### 1.2.2.3 鸡蛋添加量

固定低筋小麦粉100 g、糖粉65 g、泡打粉2 g、玉米油50 g、菊花粉5 g、牛奶50 g。接着将蛋液添加量设定成110、120、130、140 g和150 g这五个梯度,按既定制作流程烘焙蛋糕并细致比对不同蛋液配比下蛋糕的品质,选出最优鸡蛋添加量。

#### 1.2.2.4 泡打粉添加量

固定低筋小麦粉100 g、糖粉65 g、蛋液120 g、玉米油50 g、菊花粉5 g、牛奶50 g。泡打粉添加量分别设为0、1、2、3 g和4 g并按既定烘焙工艺制作蛋糕,对比不同泡打粉添加量下蛋糕的表现,确定最佳泡打粉添加量。

### 1.2.3 正交试验设计

在单因素实验基础上,选取菊花粉添加量(A)、糖粉添加量(B)、鸡蛋添加量(C)、泡打粉添加量(D)为4个影响因素,每个因素设置三个水平,采用 $L_9(3^4)$ 进行正交试验(见表3),以感官评分为评定指标,确定菊花风味蛋糕的最佳配方方案。

表3 正交试验因素和水平

| 水平 | 因素         |           |           |            |
|----|------------|-----------|-----------|------------|
|    | A 菊花粉添加量/g | B 糖粉添加量/g | C 鸡蛋添加量/g | D 泡打粉添加量/g |
| 1  | 3          | 55        | 130       | 2          |
| 2  | 5          | 65        | 140       | 3          |
| 3  | 7          | 75        | 150       | 4          |

### 1.2.4 测定指标

#### 1.2.4.1 感官评价

菊花风味蛋糕的感官评价方法参考刘畅等<sup>[16]</sup>、

田洁等<sup>[17]</sup>实验方法稍作改动,选择10名接受过感官评价训练的人员组成评价小组,对菊花风味蛋糕的各种特性进行打分评价。具体评分标准见表4。

表4 菊花风味蛋糕感官评分标准

| 项目        | 评分标准                    | 分值/分  |
|-----------|-------------------------|-------|
| 色泽(25分)   | 色泽均匀、外表有自然黄绿色,富有光泽,无焦糊  | 18-25 |
|           | 色泽均匀、外表颜色较自然,光泽暗淡,略无焦糊  | 9-17  |
|           | 色泽局部不均匀,颜色发黑或较浅,无光泽,有焦糊 | 0-8   |
| 组织结构(25分) | 组织均匀细腻,无大气孔;松软有弹性,无硬块   | 18-25 |
|           | 气孔比较均匀,少量大气孔,比较有弹性,稍硬   | 9-17  |
|           | 气孔不均匀,大气孔较多,弹性差,明显硬块    | 0-8   |

续表

表4 菊花风味蛋糕感官评分标准

| 项目           | 评分标准                          | 分值/分  |
|--------------|-------------------------------|-------|
| 气味滋味及口感(30分) | 菊花香和蛋香适宜,甜度适中,口感柔和            | 21-30 |
|              | 菊花香味过浓或过淡,甜度较重或较淡,有少许异味,口感较柔和 | 11-20 |
|              | 无菊花香和蛋香,甜味不足或甜度失调,有明显异味,口感粗糙  | 0-10  |
| 外观形状(20分)    | 壁厚均匀,表面光滑,无斑点,不黏边             | 15-20 |
|              | 壁厚较均匀,表面较光滑,有少量斑点,外侧黏边        | 8-14  |
|              | 壁厚不均匀,表面不光滑,斑点较多,黏边严重         | 0-7   |

### 1.2.4.2 理化指标的测定

损失率参考王颖等<sup>[18]</sup>方法进行测定;比容参考张俊<sup>[19]</sup>方法进行测定;质构特性参考王媛媛等<sup>[20]</sup>方法测定;总酚含量参考陈碧等<sup>[21]</sup>方法进行测定;含水量按照 GB-5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》<sup>[22]</sup>进行测定。

### 1.3 数据处理

采用专业数据处理软件 OriginPro2024、SPSS 和 Excel 进行数据处理,所有试验重复 3 次,确保数据的准确性和可靠性。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素实验结果分析

#### 2.1.1 糖粉添加量对蛋糕感官品质的影响

如图 2 所示,糖粉添加量的递增过程中,感官评分表现出先升高至峰值后逐步下降的趋势,当糖粉添加至 35 g 时,感官评分最低为 73.3 分,这是由于蛋糕甜度不足,美拉德反应不充分,成品色泽较浅,整体风味较淡;当糖粉添加量为 65 g 时,其感官评分最高为 81.8 分,甜度适中,内部组织柔软,弹性较好;当糖粉添加量高于 65 g 时,其甜味越来越重,内部组织逐渐粗糙,口感硬,感官评分逐步下降。糖粉作为甜味剂和风味前体物质,通过焦糖化和美拉德反应参与风味和色泽的形成;其羟基结构能有效束缚水分子,维持体系水分活度;在加工过程中能降低蛋白泡沫的表面张力,提高气泡稳定性<sup>[17]</sup>。因此,选择糖粉的添加量为 55、65、75 g 来进行正交试验。

#### 2.1.2 菊花粉添加量对蛋糕感官品质的影响

如图 3 所示,随着菊花粉添加量的增加,感官评分呈先升后降趋势,当菊花粉添加量为 1 g 时,感官评分最低为 71.8 分,这可能是由于菊花粉添加量过少,未能充分发挥其改善蛋糕风味与质地的作用,蛋糕在色泽、香气和口感方面的特色体现不明显;当菊花粉添加量逐步增加至 5 g 时,感官评分达到最高

为 81.3 分,其蛋糕内部组织较为细腻,色泽更诱人,整体口感与风味达到较佳平衡;当菊花粉添加量高于 5 g 时,其内部组织变得粗糙,口感变差,感官评分逐步下降。菊花粉能显著改善蛋糕品质,其挥发性成分赋予独特菊花香气,天然色素形成诱人金黄色泽。其所含膳食纤维增强持水性,使蛋糕组织更细腻柔软并延缓老化,同时稳定气泡结构。黄酮类活性成分提升营养价值,有助于调节血糖反应<sup>[11]</sup>。与面粉配伍性良好,在烘焙过程中不影响面筋形成,保持产品稳定性。因此,选择菊花粉的添加量为 3、5、7 g 来进行正交试验。

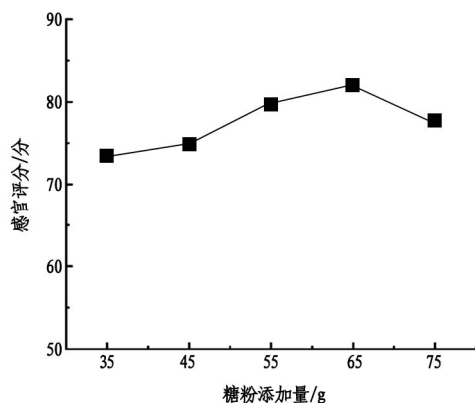


图2 糖粉添加量对蛋糕感官品质的影响

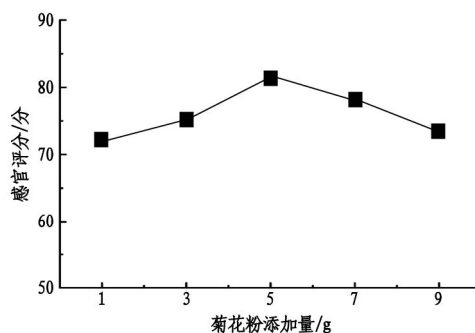


图3 菊花粉添加量对蛋糕感官品质的影响

### 2.1.3 鸡蛋添加量对蛋糕感官品质的影响

如图4所示,随着鸡蛋添加量的增加,感官评分呈先升后降趋势,当鸡蛋添加量为110 g时,感官评分最低为71.3分,这可能是由于鸡蛋添加量不足,无法为蛋糕提供足够的蛋白质来形成良好的结构,导致蛋糕在质地、弹性等方面欠佳,风味也不够浓郁;当鸡蛋添加量为140 g时,其感官评分最高为82.3分,蛋糕内部结构更加细腻、紧实,风味也更加醇厚;当鸡蛋添加量高于140 g时,导致蛋糕中水分含量相对过高,在烘焙后内部结构过于湿润,甚至出现塌陷等问题。同时,过多的鸡蛋可能掩盖了蛋糕其他原料的味道,使整体风味不够协调,进而降低了感官评分。鸡蛋在蛋糕制作中具有多重关键作用:蛋白质热凝固形成稳定的骨架结构,为蛋糕提供必要支撑力;蛋清打发时包裹空气的特性赋予膨发力,确保体积充分膨胀;蛋黄中的卵磷脂发挥乳化功能,实现油水均匀融合,改善组织细腻度,其优异的持水性能有效维持产品湿润口感,延缓淀粉老化,同时通过美拉德反应贡献诱人金黄色泽。鸡蛋特有的风味物质能提升整体香气,所含的优质蛋白、维生素和矿物质还具有营养强化作用<sup>[13]</sup>。这些特性共同作用,使鸡蛋成为蛋糕制作中不可或缺的基础原料。因此,选择鸡蛋的添加量为130、140、150 g进行正交试验。

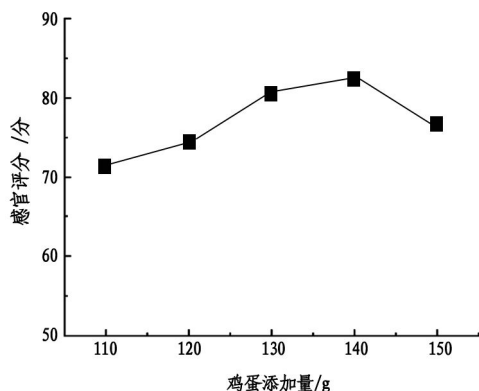


图4 鸡蛋添加量对蛋糕感官品质的影响

### 2.1.4 泡打粉添加量对蛋糕感官品质的影响

如图5所示,随着泡打粉添加量的增加,感官评分呈先升后降趋势,当泡打粉添加量为0 g时,感官评分最低为73.7分,这可能是由于泡打粉作为膨松剂,缺乏它会导致蛋糕无法充分膨胀、不够蓬松;当泡打粉添加量为3 g时,其感官评分最高为81.7分,其膨胀度、质地和口感都达到最佳状态;当泡打粉添加量高于3 g时,其内部气孔过大且不均匀,导致结构不稳定。泡打粉在蛋糕制作中通过产气作用促进面糊膨胀,改善组织结构,提升体积和口感品

质<sup>[14]</sup>。其分解产生的二氧化碳气体使蛋糕形成均匀细密的气孔结构,达到理想的蓬松效果,同时增强质地稳定性和成型性。因此,选择泡打粉的添加量为2、3、4 g来进行正交试验。

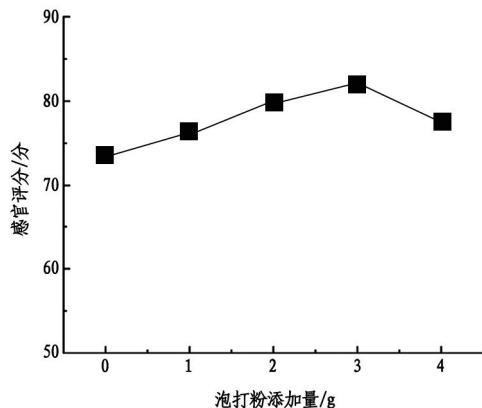


图5 泡打粉添加量对蛋糕感官品质的影响

## 2.2 正交试验结果与分析

### 2.2.1 正交试验结果

结合单因素实验结果,将菊花粉添加量(A)、糖粉添加量(B)、鸡蛋添加量(C)和泡打粉添加量(D)设为关键影响因素开展正交试验,以感官评分为评价依据,最终明确菊花风味蛋糕的最佳制备工艺参数,正交结果如表5所示。为量化各因素的显著性,对正交试验结果进行方差分析,结果如表6所示。

由表5可得,正交结果分析最高感官评分为试验5号组合 $A_2B_2C_2D_1$ ,由极差 $R$ 值可知,对菊花风味蛋糕品质影响顺序是 $A > B > C > D$ ,即影响最大的是菊花粉添加量,其次是糖粉添加量,接着是鸡蛋添加量,最后是泡打粉添加量。根据表中的方差分析计算得出理论最优组合为 $A_2B_3C_2D_1$ 。

由表6方差分析可知,因素A(菊花粉)和因素B(糖粉)的 $F$ 值均大于 $F_{0.05}(2,2) = 19.00$ ,达到高度显著水平( $P < 0.05$ ),证实二者是影响蛋糕感官品质的关键因素。因素C(鸡蛋)的 $F$ 值大于 $F_{0.10}(2,2) = 9.00$ ,在 $P < 0.1$ 水平上显著,表明其影响较为重要。因素D(泡打粉)的 $F$ 值最小且未达到显著水平,说明在本试验水平范围内,其用量变化对结果无显著影响,与前面极差分析结论一致。本试验中,直观最优组合( $A_2B_2C_2D_1$ )与极差分析得出的理论最优组合( $A_2B_3C_2D_1$ )在B因素水平上存在不一致。这可能是由于交互作用的影响,本正交设计未考虑因素间的交互作用。在实际蛋糕制作中,糖粉(B)与鸡蛋(C)、菊花粉(A)等可能存在交互效应,需要通过验证实验进一步验证。

表5 菊花风味蛋糕正交试验结果

| 编号     | A 菊花粉          | B 糖粉           | C 鸡蛋  | D 泡打粉          | 感官评分/分 |
|--------|----------------|----------------|---|----------------|--------|
| 1      | 1              | 1              | 1   | 1              | 74.4   |
| 2      | 1              | 2              | 3   | 2              | 76.1   |
| 3      | 1              | 3              | 2   | 3              | 80.5   |
| 4      | 2              | 1              | 3   | 3              | 78.8   |
| 5      | 2              | 2              | 2   | 1              | 86.2   |
| 6      | 2              | 3              | 1   | 2              | 85.4   |
| 7      | 3              | 1              | 2   | 2              | 81.7   |
| 8      | 3              | 2              | 1   | 3              | 82.1   |
| 9      | 3              | 3              | 3   | 1              | 83.6   |
| $K_1$  | 231            | 234.9          | 241.9   | 244.2          |        |
| $K_2$  | 250.4          | 244.4          | 248.4   | 243.2          |        |
| $K_3$  | 247.4          | 249.5          | 238.5   | 241.4          |        |
| $k_1$  | 77             | 78.3           | 80.6  | 81.4           |        |
| $k_2$  | 83.5           | 81.5           | 82.8  | 81.1           |        |
| $k_3$  | 82.5           | 83.2           | 79.5  | 80.4           |        |
| 极差 $R$ | 6.5            | 4.9            | 3.3   | 1.0            |        |
| 因素主次   |                |                | A > B > C > D   |                |        |
| 优水平    | A <sub>2</sub> | B <sub>3</sub> | C <sub>2</sub>  | D <sub>1</sub> |        |
| 优组合    |                |                | A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub> |                |        |

表6 正交试验结果方差分析表

| 变异来源    | 平方和 SS  | 自由度 $df$ | 均方 MS  | $F$ 值 | 显著性 ( $P < 0.05$ ) |
|---------|---------|----------|--------|-------|--------------------|
| A - 菊花粉 | 68.896  | 2        | 34.448 | 34.45 | **                 |
| B - 糖粉  | 36.649  | 2        | 18.325 | 18.33 | **                 |
| C - 鸡蛋  | 17.209  | 2        | 8.605  | 8.61  | *                  |
| D - 泡打粉 | 1.469   | 2        | 0.735  | 0.74  |                    |
| 误差      | 2.000   | 2        | 1.000  |       |                    |
| 总和      | 126.223 | 8        |        |       |                    |

注: \* 表示显著 ( $P < 0.1$ ), \*\* 表示高度显著 ( $P < 0.05$ )。  $F$  临界值参考:  $F_{0.05}(2,2) = 19.00$ ,  $F_{0.10}(2,2) = 9.00$ 。

### 2.2.2 验证实验

为找出最佳实验配比方案, 将 A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>2</sub>D<sub>1</sub> 与 A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>C<sub>2</sub>D<sub>1</sub> 两组工艺进行平行对比试验 ( $n = 3$ )。对

两组实验成果分别进行质地特性分析与感官品鉴, 最终测定评价结果见表7。

表7 验证试验结果分析表

| 组合  | 样本量 ( $n$ ) | 均值 (Mean) | 标准差 (SD) | $t$ 统计量 | 自由度 ( $df$ ) | $P$ 值 (双尾) |
|---|-------------|-----------|----------|---------|--------------|------------|
| A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub> | 3           | 86.5      | 0.7      | -3.674  | 4            | 0.021      |
| A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub> | 3           | 88.4      | 0.9      |         |              |            |

由表7可知, A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>C<sub>2</sub>D<sub>1</sub>组在质构特性上表现出更优的弹性与更低的硬度, 且其感官评分均值(88.33±0.70)分高于 A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>2</sub>D<sub>1</sub>组(86.50±0.70)分。经独立样本 t 检验分析, 两组感官评分存在显著差异:  $t(4) = -3.674, P < 0.05$ 。因此, 确定 A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>C<sub>2</sub>D<sub>1</sub> 为菊花风味蛋糕的最佳工艺参数组合, 即菊花粉 5 g、糖粉 75 g、鸡蛋 140 g、泡打粉 2 g、低筋小麦粉 100 g、玉米油 50 g、牛奶 50 g。

### 2.2.3 菊花风味蛋糕品质分析结果

最优配方制作的菊花风味蛋糕的品质指标如表8所示。

表8 菊花风味蛋糕品质指标

| 名称   | 含量           |
|------|--------------|
| 损失率  | 15.4%        |
| 比容   | 3.3 mL/g     |
| 总酚含量 | 256 mg/100 g |
| 含水量  | 43%          |

## 3 结论

本研究通过单因素实验与正交试验优化, 明确了菊花风味蛋糕的关键工艺参数。极差分析与方差分析表明, 菊花粉添加量与糖粉添加量是影响蛋糕感官品质的显著性因素。最终确定的最优配方为: 以低筋小麦粉 100 g 为基准, 添加菊花粉 5 g、糖粉 75 g、鸡蛋 140 g、泡打粉 2 g、玉米油 50 g 及牛奶 50 g, 于 155 °C 烘烤 45 min。在此工艺下制得的蛋糕感官评分最高(88.4 分), 质构表现良好, 兼具适宜的弹性与硬度, 且富含总酚活性物质。所得产品外形饱满、色泽自然、菊香清雅、组织细腻, 实现了风味与口感的良好平衡。本研究成功研发出一款品质优良的菊花风味蛋糕, 为菊花在烘焙食品中的高值化应用提供了可行的工艺方案, 也为后续相关功能性产品的开发奠定了技术基础。

## 参考文献:

[1] 张玉, 朱玲敏, 徐颂文, 等. 菊花的营养成分、加工制品及香气成分研究进展[J]. 食品工业, 2020, 41(4): 247-251.

[2] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 2015年版(一部)[M]. 中国: 中国医药科技出版社, 2015: 310-311.

[3] 谢占芳, 张倩倩, 朱凌佳, 等. 菊花化学成分及药理活性研究进展[J]. 河南大学学报: 医学版, 2015, 34(4): 290-300.

[4] LIN L Z, HARNLY J M. Identification of the phenolic components of chrysanthemum flower (chrysanthemum morifolium ramat) [J]. Food Chemistry, 2010, 120(1): 319-326.

[5] 李保利. 超声波法从菊花中提取黄酮的方法研究[J]. 山东化工, 2017, 46(12): 32-34.

[6] 王庆兰, 林慧彬, 张素芹. 不同菊花氨基酸含量的比较研究[J]. 中国中医药科技, 2005, 12(4): 249.

[7] RAJIC A, AKIHISA T, UKIYA M, et al. Inhibition of trypsin and chymotrypsin by anti-inflammatory triterpenoids from compositae flowers [J]. Planta Medica, 2001, 67(7): 599-604.

[8] 王珊. 不同加工工艺对菊花提取物的抗氧化活性的影响[J]. 中南药学, 2016, 14(5): 505-507.

[9] 陈庆蕾, 陈庆国, 赵玉荣. 菊花的功效及其产品开发[J]. 中国果菜, 2023, 43(2): 61-65.

[10] 全文婕, 史晓欣, 熊润德, 等. 野菊花抗肿瘤活性部位筛选研究[J]. 中南医学科学杂志, 2017, 45(3): 242-246.

[11] 王婷婷, 王少康, 黄桂玲, 等. 菊花主要活性成分含量及其抗氧化活性测定[J]. 食品科学, 2013, 34(15): 95-99.

[12] 曲春波, 徐小琴, 刘小杰. 低糖菊粉甜品的研制[J]. 食品工业, 2021, 42(2): 17-19.

[13] 叶淑慧, 彭珩, 詹世雄. 纯素豆乳蛋糕的工艺优化研究[J]. 韩山师范学院学报, 2023, 44(3): 32-36, 80.

[14] 陈秋怡, 王雪菲, 裴丽娜, 等. 板栗全粉戚风蛋糕配方的优化[J]. 黑龙江粮食, 2023, 34(8): 88-90.

[15] 张齐, 李港回, 彭钢. 黑芝麻糯米糕的加工工艺研究[J]. 兰州文理学院学报(自然科学版), 2022, 36(5): 82-87.

[16] 刘畅, 靳羽慧, 张园园. 黑麦红枣低糖蛋糕的制作工艺优化[J]. 食品工业, 2024, 45(8): 1-4.

[17] 田洁, 孙瑞琳, 李俊华, 等. 马铃薯绿茶无糖戚风蛋糕的研制[J]. 食品工业科技, 2022, 43(14): 155-162.

[18] 王颖, 李明娟, 张雅媛, 等. 木薯全粉对蛋糕品质及其质构特性的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(10): 179-183, 189.

[19] 张俊. 发芽对高粱性质的影响及其在无麸质蛋糕中的应用[D]. 成都: 西华大学, 2021.

[20] 王媛媛, 许宝亮, 张歆茹, 等. 黑蒜板栗蛋糕的研制及质构特性分析[J]. 食品科技, 2025, 50(1): 163-171.

[21] 陈碧, 欧小春, 陆雅思, 等. D-最优混料与响应面法优化甜茶无糖抗氧化活性蛋糕配方[J]. 食品工业科技, 2021, 42(14): 153-160.

[22] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB5009.3-2006 食品安全国家标准 食品中水分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. 责任编辑: 汪张贵

# 不同纤维增强材料对高温后混凝土力学性能的影响研究

林新梅

(福建水利电力职业技术学院 建筑工程学院,福建 永安 366000)

**摘要:**混凝土结构在火灾等高温环境下易出现力学性能严重劣化,威胁结构安全。为提升其高温耐受性,探讨了钢纤维(SF)、聚丙烯纤维(PPF)与玄武岩纤维(BF)对混凝土高温后力学性能的影响。通过统一配合比设计,测试了不同掺量(0.5%、1.0%、1.5%)混凝土经历200℃-800℃高温后的表观形态、质量损失、抗压强度、劈裂抗拉强度及抗折强度变化。结果表明:钢纤维可显著提升高温后混凝土的抗压与劈裂抗拉强度,最佳掺量为1.0%;聚丙烯纤维能有效抑制高温爆裂,但对强度改善有限;玄武岩纤维在高温下性能稳定,尤其在400℃以上表现出较高的强度保持率。三种纤维分别通过桥接裂纹、释放蒸汽压力与稳定界面等机制发挥作用,研究结果可为耐火工程中纤维材料的选择与配比设计提供参考。

**关键词:**纤维增强混凝土;高温作用;力学性能;抗压强度;抗拉强度

中图分类号:TU528.01

文献标识码:A

文章编号:2095-297X(2026)02-0008-05

## Study on the Influence of Different Fiber Reinforced Materials on the Mechanical Properties of Concrete after High Temperature

LIN Xinmei

(School of Architecture and Engineering, Fujian College of Water Conservancy and Electric Power, Yong'an, 366000, Fujian)

**Abstract:** Concrete structures are prone to serious deterioration of mechanical properties in high-temperature environments such as fires, threatening structural safety. In order to improve its high temperature resistance, it systematically studied the effects of steel fiber (SF), polypropylene fiber (PPF) and basalt fiber (BF) on the mechanical properties of concrete after high temperature. Based on a uniform mix proportion design, concrete specimens with different fiber contents (0.5%, 1.0%, 1.5%) were tested after being subjected to temperatures ranging from 200 °C to 800 °C. The variations in appearance, mass loss, compressive strength, splitting tensile strength, and flexural strength were measured. The results indicated that the compressive and splitting tensile strengths of concrete after high temperature are significantly improved by steel fiber, with an optimal content of 1.0%. Polypropylene fiber is effective in inhibiting concrete spalling under high temperature, but its contribution to strength enhancement is limited. Basalt fiber can exhibit stable performance at elevated temperatures, demonstrating a relatively high strength retention rate, especially above 400 °C. The three types of fibers functioned through mechanisms such as crack bridging, vapor pressure release, and interface stabilization, respectively. The findings of this study can provide a reference for the selection and mix proportion design of fiber materials in fire-resistant engineering.

**Key words:** fiber reinforced concrete; high temperature effect; mechanical properties; compressive strength; tensile strength

混凝土作为现代建筑结构的主要材料,具有造价低、制作方便、强度高优点。近年来,随着城市化进程的加快以及特殊用途工程的增多,混凝土在高温环境中稳定工作愈加常见。

为改善混凝土的高温性能,掺入纤维增强材料是一个有效途径。纤维通过形成三维网络,有效桥接高温引发的微裂纹,抑制其扩展,从而提升混凝土的力学性能<sup>[1-2]</sup>。目前,工程中常用的纤维主要有钢纤维、聚丙烯纤维、玄武岩纤维等,在高温下的行为及其对混凝土的增强机制不同。钢纤维具有高熔点和高强度,依靠自身的力学性能在高温后提供持续的桥接作用<sup>[3]</sup>;而聚丙烯纤维熔点较低,借助火灾初期熔融形成连通的微孔道,有效释放混凝土内部蒸汽压力,防止爆裂,但其在更高温度下将失去增强作用<sup>[4]</sup>;玄武岩纤维则具有优异的耐高温性和与混凝土相近的热膨胀系数,在高温下能保持较好的性能稳定性<sup>[5]</sup>。近年来,为了综合利用不同纤维的优势,混杂纤维混凝土的使用逐渐增多,并在提升混凝土高温综合性能方面展现出潜力<sup>[6-7]</sup>。

关于纤维混凝土在高温下的性能,国内外研究人员做了很多研究。早期的研究,只关注单一类型的纤维。蒋迎指出混凝土经过高温后变差的程度,会受温度、材料成分等多种因素一起作用<sup>[8]</sup>。王鑫通过试验发现,在混凝土中掺入0.9%的碳纤维,能

很好地提高它高温后的密实度和强度保留率<sup>[9]</sup>。在研究多种纤维时,李焱龙发现,在超高地聚物混凝土中,用玄武岩纤维部分代替钢纤维,经过800℃高温后,能得到更高的残余强度<sup>[10]</sup>。罗伊明等还发现,不同尺度的纤维一起用,能很好地提升混凝土基体在高温下的性能<sup>[11]</sup>。不过,现在的大多数研究都只针对一种或两种特定的纤维,在相同的试验条件下,对比不同类型纤维性能的研究还比较少,没法直接判断它们增强混凝土性能的效果。本文通过试验,研究钢纤维、聚丙烯纤维和玄武岩纤维这三种常见的纤维增强材料,对高温后混凝土力学性能的影响。对比分析不同纤维掺量下,混凝土在高温作用后的抗压强度、劈裂抗拉强度,以及表观质量损失的变化情况,从而给耐火工程提供不同纤维材料选择和优化的参考。

## 1 纤维增强材料特性及高温作用机理

### 1.1 纤维材料的基本特性

本研究选取工程中常用的三种纤维作为增强材料:钢纤维、聚丙烯纤维和玄武岩纤维。其基本物理性质如表1所示,其中钢纤维与聚丙烯纤维参数参照行业标准与产品资料,玄武岩纤维数据则基于实验室实测结果。

表1 纤维材料基本性质

| 纤维类型       | 密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ | 熔点/软化点/ $^{\circ}\text{C}$ | 抗拉强度/ $\text{MPa}$ | 弹性模量/ $\text{GPa}$ | 典型尺寸(直径×长度)                        |
|------------|-------------------------------------|----------------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|
| 钢纤维(SF)    | -7.8                                | >1500                      | >1000              | -200               | (0.5-1.0) mm × (30-60) mm          |
| 聚丙烯纤维(PPF) | -0.91                               | 160-170                    | 300-700            | 3-10               | (20-50) $\mu\text{m}$ × (12-20) mm |
| 玄武岩纤维(BF)  | 2.6-2.8                             | -750(软化点)                  | 3000-4800          | 80-110             | (13-20) $\mu\text{m}$ × (12-18) mm |

由表1可知:三类纤维的化学稳定性与高温行为存在显著差异。钢纤维在高温有氧环境下表面易氧化,生成疏松氧化铁层,可能削弱其与基体的粘结并减小有效截面。聚丙烯纤维热稳定性差,达到熔点后迅速熔融、收缩或汽化,在混凝土内留下微通道。玄武岩纤维化学性质较稳定,耐酸碱腐蚀,高温下其晶体结构虽会变化,但力学性能在800℃以上才发生显著劣化,且其热膨胀系数与水泥基体相近,这有利于减少热应力<sup>[12]</sup>。

### 1.2 纤维在混凝土高温环境下的作用机理

纤维在混凝土高温劣化过程中发挥增强作用,其效果取决于纤维类型。混凝土受热和冷却时,内部因为热应力、水分移动等原因,会产生很多细微裂纹。纤维能跨过裂纹,产生桥接力,阻止裂纹变大,

从而提高混凝土的抗断裂能力,保持高温后的整体完好,避免脆性破坏<sup>[13]</sup>。

纤维与混凝土基体间的界面粘结性能对其应力传递行为具有重要影响,而高温作用往往会显著弱化该界面连接。对于钢纤维,高温导致的水泥浆体脱水收缩及其自身氧化,会削弱机械咬合与化学粘结,使界面劣化<sup>[14]</sup>。聚丙烯纤维的熔融性质虽破坏了物理粘结,但留下的微孔通道改变了界面区结构,为内部蒸汽逸出提供路径。玄武岩纤维的热膨胀系数与基体接近,因此界面热应力较小,即使基体疏松,仍能维持一定的界面粘结力。

## 2 试验概况

### 2.1 原材料及配合比设计

为系统对比钢纤维、聚丙烯纤维及玄武岩纤维对混凝土高温后力学性能的影响,试验选用普通硅酸盐水泥、5-25 mm连续级配碎石、天然河砂及减水剂作为基本原料。增强材料分别采用剪切型钢纤维(长度33 mm,直径0.5 mm)、单丝聚丙烯纤维

(长度15 mm,直径25  $\mu\text{m}$ ,熔点约167  $^{\circ}\text{C}$ )及短切玄武岩纤维(长度6-18 mm,直径7-15  $\mu\text{m}$ )。以C40混凝土为基准,纤维掺量按体积分数设定为0%(基准组)、0.5%、1.0%和1.5%四个水平,具体配合比如表2所示。试验所用原材料技术指标均符合国家相关标准,配合比设计依据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55-2011)进行。

表2 混凝土配合比设计

$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

| 组别编号    | 水泥  | 水   | 砂   | 碎石   | 减水剂 | 纤维类型及体积掺量  |
|---------|-----|-----|-----|------|-----|------------|
| PC      | 420 | 168 | 720 | 1080 | 4.2 | —          |
| SF-0.5  | 420 | 168 | 720 | 1080 | 4.2 | 钢纤维,0.5%   |
| SF-1.0  | 420 | 168 | 720 | 1080 | 4.2 | 钢纤维,1.0%   |
| SF-1.5  | 420 | 168 | 720 | 1080 | 4.2 | 钢纤维,1.5%   |
| PPF-0.5 | 420 | 168 | 720 | 1080 | 4.2 | 聚丙烯纤维,0.5% |
| PPF-1.0 | 420 | 168 | 720 | 1080 | 4.2 | 聚丙烯纤维,1.0% |
| PPF-1.5 | 420 | 168 | 720 | 1080 | 4.2 | 聚丙烯纤维,1.5% |
| BF-0.5  | 420 | 168 | 720 | 1080 | 4.2 | 玄武岩纤维,0.5% |
| BF-1.0  | 420 | 168 | 720 | 1080 | 4.2 | 玄武岩纤维,1.0% |
| BF-1.5  | 420 | 168 | 720 | 1080 | 4.2 | 玄武岩纤维,1.5% |

### 2.2 试件制备与养护

试验采用150 mm立方体试件。将干料与纤维混合搅拌均匀,再加入水和减水剂继续搅拌至纤维分散。随后,于室温下静置24 h脱模,之后移入标准养护室养护28 d,使其达到设计强度。

### 2.3 高温试验方案

高温试验在箱式电阻炉中进行。设定200、400、600、800  $^{\circ}\text{C}$ 温度等级。升温速率为10  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ ,达到目标温度后恒温1 h,使试件内外温度均匀,之后随炉自然冷却至室温后取出。

### 2.4 力学性能测试方法

试件冷却后,进行力学性能测试,分别采用0.5  $\text{MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 和0.05  $\text{MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 的加载速率。每组配合比在每个温度点下测试3个试件,结果取其算术平均值,以获得可靠的力学性能数据。

## 3 试验结果与分析

根据试验方案,对经200、400、600、800  $^{\circ}\text{C}$ 高温作用后的素混凝土、钢纤维混凝土、聚丙烯纤维混凝土以及玄武岩纤维混凝土试件进行表观观察与力学性能测试。系统分析高温作用后混凝土的表观特征、质量损失与各项力学性能指标的变化规律,分析

不同类型纤维对混凝土高温性能的改善效果及其作用机制。

### 3.1 高温后混凝土表观现象与质量损失分析

高温作用后,不同类型纤维增强混凝土试件的表观形态均发生显著改变,且其变化特征受纤维种类影响明显。采用ZWSP-3800CH型光学显微镜,在物镜下观察样品表面形貌,选取代表性区域拍摄图像。

随着温度升高,试件颜色由常温时的青灰色逐渐变浅,至400  $^{\circ}\text{C}$ 时呈现淡红色或暗红色,600  $^{\circ}\text{C}$ 以上则进一步转为灰白色或灰褐色。该颜色变化主要源于水泥浆体中氢氧化钙的脱水以及含铁化合物的氧化过程。试件的表观形态变化如图1所示,而不同纤维增强混凝土的质量损失率与温度的关系如图2所示。

由图1可知:在裂缝与剥落方面,不同纤维混凝土表现出明显差异。素混凝土在400  $^{\circ}\text{C}$ 开始出现可见微裂纹,600  $^{\circ}\text{C}$ 以上裂纹迅速扩展、增宽,并伴有表面起皮与边角剥落,800  $^{\circ}\text{C}$ 时表面疏松并形成严重网状裂缝。相比之下,钢纤维混凝土因纤维的桥接作用有效抑制了宏观裂缝扩展与剥落,即使经历800  $^{\circ}\text{C}$ 高温,试件仍保持较好完整性,仅出现较多微

裂纹,边角剥落程度远轻于素混凝土。聚丙烯纤维混凝土的显著特点是能有效防止高温爆裂,当温度超过 300 °C 时,高强混凝土试件易发生严重爆裂,而掺有 0.1% 以上体积率聚丙烯纤维的试件均保持完整,这是因为聚丙烯纤维在 160 °C - 170 °C 熔化后形成内部孔道,释放了蒸汽压力。玄武岩纤维混凝土

土则因纤维本身具有一定耐高温性能,在高温下仍可提供约束作用,其裂缝发展介于素混凝土与钢纤维混凝土之间,剥落程度较素混凝土更轻;但在 600 °C 以上,玄武岩纤维可能出现部分熔融或性能退化,其对裂缝的抑制效果整体上仍优于普通混凝土,但弱于钢纤维。

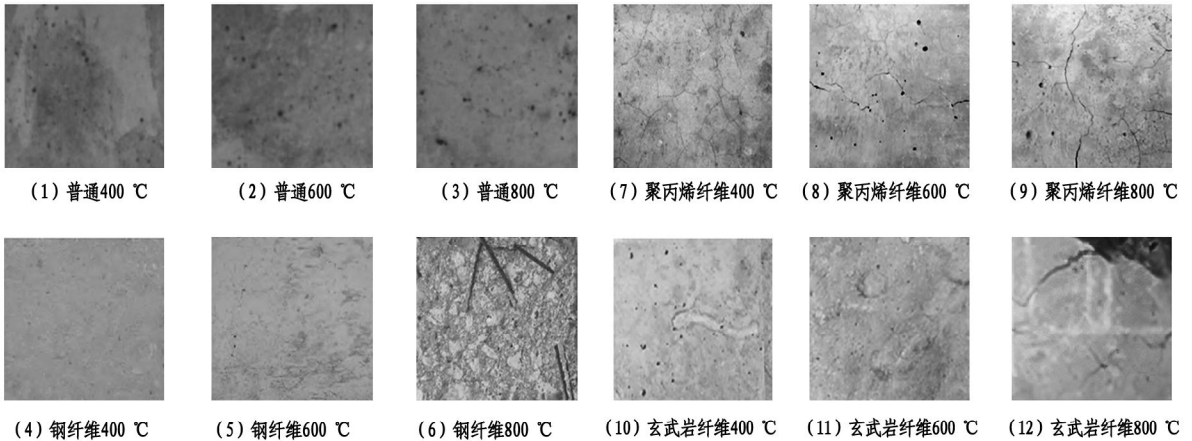


图1 不同纤维混凝土表面观形貌

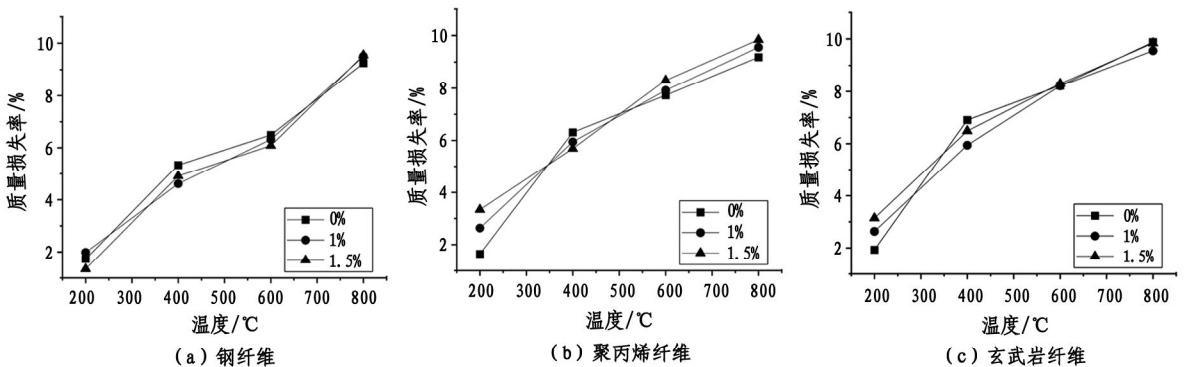


图2 质量损失率与温度关系

由图2可知,混凝土试件的质量损失率随温度升高呈阶段性变化,且不同条件组的损失幅度存在差异。室温至 200 °C 阶段,主要由自由水与少量吸附水蒸发引起,损失率缓慢增长至 1% - 3%; 200 °C - 600 °C 阶段,因 C - S - H 凝胶和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  等化学结合水大量脱失,曲线斜率显著增大,400 °C 时损失率达 4% - 7%, 600 °C 时升至 7% - 12%; 温度超过 600 °C 后,水化产物完全分解并伴随碳酸钙分解,质量损失剧增,至 800 °C 时损失率已达到 9% - 18%。图中三组数据变化趋势的一致性,进一步印证了温度阶段与质量损失原因及幅度之间的对应关系。

就纤维材料的影响而言,不同纤维的作用机制有所区别。聚丙烯纤维在高温下熔融形成孔隙,导致中低温阶段的质量损失略高于素混凝土试件。钢

纤维与玄武岩纤维则主要通过抑制表面剥落,减少因表层物质脱落所引起质量损失;然而在高温深层分解阶段,纤维对整体质量损失的影响相对较小。

### 3.2 高温后抗压强度性能分析

高温后混凝土的抗压强度呈现出显著的非线性变化,受温度与纤维类型的共同影响较为复杂,具体结果如图3所示。观察不同温度作用后的强度变化规律可知,各类混凝土的残余抗压强度整体呈现“先回升 - 后剧降”的趋势,而纤维的掺入则在各温度阶段体现出差异化的增强或调节作用。

分析图3可以发现,200 °C - 400 °C 区间,强度出现回升,并在 300 °C - 400 °C 达到峰值,可比常温强度高出 0% - 10%,此时“二次水化”与内部结构致密化效应占主导。温度超过 400 °C 后,随着 C-S-H 凝胶脱水分解、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  脱水以及骨料 - 浆体界

面因热膨胀不匹配产生微裂纹,强度急剧下降,800℃时残余强度仅为常温的20%–40%。在纤维影响方面,钢纤维(SF)主要通过桥接与阻裂作用显著提升中高温区(400℃–600℃)的残余强度,最佳掺量约为1.0%,过量则易导致团聚而削弱效果。聚丙烯纤维对抗压强度提升有限,中低温阶段甚至

因引入孔隙而略低于素混凝土,其主要贡献在于防止爆裂、维持试件完整性,为其他力学性能存续提供基础。玄武岩纤维在高温下表现稳定,400℃以上强度保持率优于素混凝土,推荐掺量为1.0%–1.5%,其抗压强度峰值有时出现在200℃左右,可能与纤维基体界面特性有关。

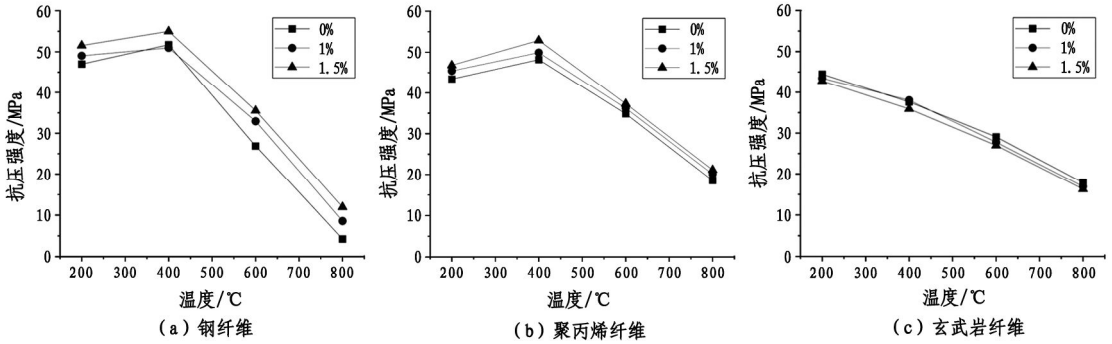


图3 抗压强度与温度关系

### 3.3 高温后劈裂抗拉强度分析

为进一步分析高温下不同纤维材料的力学性能,分析了高温后劈裂强度与温度的关系,具体结果如图4所示。劈裂抗拉强度随温度升高呈现单调下

降的总体规律,且不存在如抗压强度般的回升阶段。这主要是由于拉应力对微裂纹极为敏感,高温引发的微损伤会直接削弱材料的抗拉承载能力。

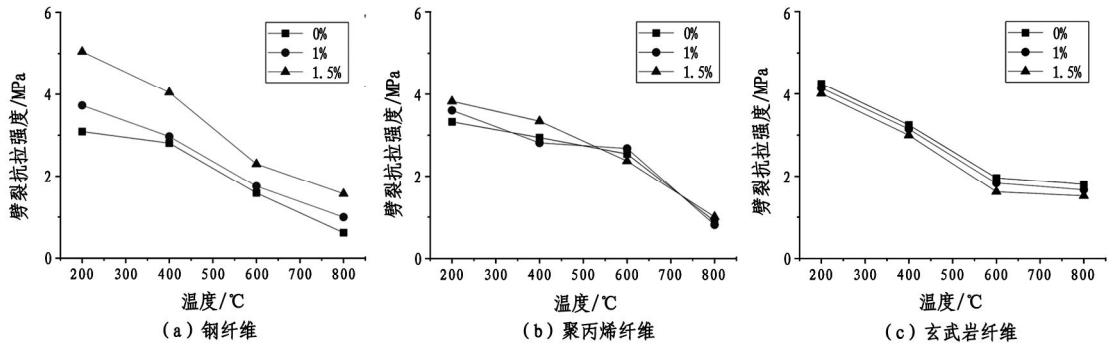


图4 劈裂抗拉强度与温度关系

观察图4可以发现,在300℃以后劈裂抗拉强度下降显著加速,800℃时残余强度普遍低于常温的20%。不同纤维的掺入对这一性能的影响各有特点:钢纤维因能有效桥接并传递拉应力,可显著提升各温度段下的残余劈裂抗拉强度,例如掺入1.0%钢纤维混凝土其高温后劈拉强度可达同温度下素混凝土的数倍。聚丙烯纤维的作用主要集中于防止高温爆裂,一旦纤维熔化,其对残余抗拉强度的直接贡献即消失,因此高温后聚丙烯纤维混凝土的劈拉强度多与素混凝土相当,甚至因孔隙增多而略有降低。玄武岩纤维在高温下仍保持稳定,能继续传递部分拉应力,使劈裂抗拉强度优于素混凝土,但其增强幅度一般小于钢纤维。

## 4 结论

对比钢纤维、聚丙烯纤维与玄武岩纤维在高温环境下对混凝土力学性能的影响,总结出以下结论:钢纤维靠高温下的桥接和阻裂作用,保持试件的整体性,能提高混凝土在400℃–600℃温度范围内的抗压强度和劈裂抗拉强度;聚丙烯纤维能有效避免300℃以上高温导致的爆裂,但由于其熔点较低,会熔化,留下孔隙,对提高强度帮助不大,适合用在以防爆裂为主要目的的地方;玄武岩纤维在高温下稳定性较好,温度超过400℃后还能保持较高的强度和韧性,建议掺量在1.0%–1.5%之间;这三种纤维增强混凝土的原理差别很大,实际施工时,要根据耐火要求,选择纤维的类型和掺量。

# 冷冻干燥保存时间对重组磷脂酶A<sub>2</sub>蛋白稳定性及酶活性的影响

林美枝, 吴敏, 仪明君\*

(福州理工学院 计算与信息科学学院, 福建 福州 350506)

**摘要:**蛋白质在长期保存过程中易发生结构降解与活性丧失,是重组蛋白质储存中的常见问题。实验以重组磷脂酶A<sub>2</sub>蛋白为对象,于冷冻干燥条件下保存0 d、7 d和14 d后,采用傅里叶变换红外光谱(Fourier transformation infrared spectroscopy, FT-IR)分析其二级结构变化,并通过薄层色谱(Thin-layer chromatography, TLC)检测酶促反应产物以评价活性。结果显示,冻存14 d后,重组蛋白质的 $\alpha$ -螺旋与 $\beta$ -折叠含量分别显著降低1.94%和2.59%,无规则卷曲含量增加4.19%;酶活性显著下降,TLC显示仅生成微量产物。结果表明,冷冻干燥保存时间的延长可引起蛋白质二级结构发生无序化转变,进而导致酶活性丧失。研究从构效关系角度揭示了冻存时间对蛋白质稳定性与功能的影响,为重组蛋白质保存工艺的优化提供了理论依据和实践参考。

**关键词:**傅里叶变换红外光谱;薄层色谱;冻干保存时间;蛋白质二级结构;酶活性

中图分类号:Q55;Q814

文献标识码:A

文章编号:2095-297X(2026)02-0013-05

## Impact of Lyophilization Storage Duration on Recombinant phospholipase A<sub>2</sub> Protein Stability and Enzymatic Activity

LIN Meizhi, WU Min, YI Mingjun\*

(School of Computing and Information Science, Fuzhou Institute of Technology, Fuzhou, 350506, Fujian)

**Abstract:** Structural degradation and loss of activity during long-term storage are common challenges in the preservation of recombinant proteins. Using recombinant phospholipase A<sub>2</sub> (rMiPLA<sub>2</sub>) as a model protein, samples stored under lyophilized conditions for 0, 7, and 14 days were analyzed by Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) to monitor changes in secondary structure, and thin-layer chromatography (TLC) was employed to evaluate enzymatic activity by detecting reaction products. The results showed that after 14 days of storage, the  $\alpha$ -helix and  $\beta$ -sheet contents of the protein decreases significantly by 1.94% and 2.59%, respectively, while the random coil content increases by 4.19%. Concurrently, enzyme activity decreased markedly, with only trace amounts of products detected by TLC. These findings indicate that extended lyophilization storage induces disorderes transformation of the protein's secondary structure, leading to a loss of enzymatic activity. From a structure-activity relationship perspective, it reveals the impact of storage time on protein stability and functionality, providing a theoretical basis and practical insights for optimizing the storage protocols of recombinant proteins.

**Key words:** Fourier transform infrared spectroscopy; thin-layer chromatography; lyophilized storage duration; protein secondary structure; enzymatic activity

蛋白质作为生命活动的主要执行者,其功能多样性源于独特的结构与空间构象特征<sup>[1]</sup>。然而,生物体内复杂的环境因素(如代谢产物、分子互作网络)常对蛋白质功能产生多重干扰,限制了其作用机制的精准解析<sup>[2]</sup>。通过构建体外重组蛋白体系,可在严格控制实验条件(如 pH 值、离子浓度等)下排除生物体内复杂因素的干扰,从而精准解析目标蛋白的功能特性与分子机制。值得注意的是,纯化后的重组蛋白常需储存备用,而作为依赖构象完整性维持活性的生物大分子,其活性易受保存条件的显著影响。研究证实,不当的保存温度、pH 值或反复冻融均可破坏蛋白质的空间构象,进而导致其活性降低甚至失活<sup>[3-4]</sup>。目前,冷冻干燥(lyophilization)技术通过去除水分,抑制化学降解与微生物生长,已成为维持重组蛋白活性的常用方法<sup>[5]</sup>。但该技术的工艺参数(如冻存时间、预冻速率、保护剂选择等)可能通过改变蛋白质的空间构象间接影响其活性<sup>[6]</sup>。因此,可结合冻存效果的测定方法<sup>[7]</sup>,检测蛋白质在冻存过程中的构象变化,进而优化冻存方法,最大程度降低冻存过程对蛋白质活性的影响。

蛋白质空间构象的稳定性直接决定其生理功能<sup>[4]</sup>。其中,二级结构(如 $\alpha$ -螺旋、 $\beta$ -折叠和 $\beta$ -转角等规则结构,无规则卷曲等不规则结构)作为空间构象的基础单元<sup>[8]</sup>,其动态变化可能显著影响蛋白功能。目前,用于解析蛋白质二级结构的方法主要有核磁共振、荧光光谱法、X 射线衍射、圆二色谱和傅里叶变换红外光谱(FT-IR)等。因 FT-IR 具有分辨率高、测定所需样品少、操作简便且测量速度快等特点<sup>[9]</sup>,被广泛用于研究蛋白质二级结构。酰胺 I 带(1600–1700  $\text{cm}^{-1}$ )是红外光谱中研究蛋白质二级结构变化的关键区域,通过分析该区域的峰位偏移和峰形变化,可以定量评估蛋白质二级结构的相对含量<sup>[10]</sup>。

现有研究多聚焦不同条件对蛋白质二级结构的影响,但缺乏对蛋白质构象-活性耦联关系进行系统性验证<sup>[8]</sup>。本研究以缺刻缘绿藻(*myrmecia incisa*)磷脂酶 A<sub>2</sub>(phospholipase A<sub>2</sub>, PLA<sub>2</sub>)为对象,该酶为本实验室已构建的菌株所表达的重组蛋白质(rMiPLA<sub>2</sub>)<sup>[11]</sup>。PLA<sub>2</sub>能够特异性水解磷脂酰胆碱(phosphatidyl choline, PC)的 sn-2 位,释放出游离脂肪酸(free fatty acid, FFA)和溶血磷脂酸胆碱(lysophosphatidyl choline, LPC)<sup>[12]</sup>。本研究整合 FT-IR 技术与体外酶活检测体系,通过测定不同冻存时间下 rMiPLA<sub>2</sub> 二级结构动态变化及其催化活性,阐明构象稳定性与功能维持的关系,验证了蛋白质二级结

构改变后实际生理活性的变化,为重组蛋白活性保存工艺优化提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

纯化的 rMiPLA<sub>2</sub> 为本实验室已构建好的重组 *E. coli* BL21(DE3) 菌株所表达<sup>[11]</sup>, TLC 薄层硅胶板购自格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司, PC 和 LPC 标准品均购自 Avanti 公司。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 样品处理

将纯化后的 rMiPLA<sub>2</sub> 分装于 50 mL 离心管中,经液氮速冻后,迅速转移至预冷的冷冻干燥机样品架。在真空条件下持续干燥,直至样品形成稳定的多孔海绵状固体。将冷冻干燥后的样品密封保存于 -80 °C 冰箱,分别于保存 0、7、14 天时取样,复溶后进行 FT-IR 分析及体外酶活性检测。

#### 1.2.2 样品蛋白二级结构测定

将 rMiPLA<sub>2</sub> 蛋白样品与适量溴化钾充分研磨成均匀的粉末并压制成片。通过 FT-IR/NIR Spectrometer(PerkinElmer 公司)进行全波段(4000–600  $\text{cm}^{-1}$ )扫描,扫描次数为 30 次,分辨率 4  $\text{cm}^{-1}$ ,每一个样品进行 3 次平行实验。

#### 1.2.3 FT-IR 谱图处理

采用 Omnic 8.2 软件初步处理谱图,用 Peakfit Version4.12 软件在谱带范围内(酰胺 I 带 1700–1600  $\text{cm}^{-1}$ )进行基线校正后,对其进行高斯去卷积处理,然后对二阶导数曲线进行多次求取拟合,直到拟合的相关系数  $R^2 \geq 0.998$ ,使得重叠谱带可完全分辨<sup>[13]</sup>。再依据蛋白质二级结构单光谱范围判断出每个子峰和各二级结构单元之间的对应关系之后,以峰面积为基础,计算出各个二级结构单元相对百分含量<sup>[14]</sup>。

#### 1.2.4 体外酶活反应检测

以 PC 为底物,参照 Lin<sup>[11]</sup>的方法构建 rMiPLA<sub>2</sub> 体外酶活反应体系,对照 LPC 标样,利用薄层色谱技术(TLC)检测该反应是否产生 LPC<sup>[15]</sup>。

#### 1.2.5 数据处理

上述所有的实验,至少进行 3 次重复,用“平均值 $\pm$ 标准差”来表示结果,利用 IBM 公司的 SPSS Statistics 25 软件对数据进行分析,采用方差分析(ANOVA)进行检验,以  $P < 0.05$  为差异有统计学意义,并使用 Origin2021 软件完成图形绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 傅里叶变换红外一阶图谱分析

蛋白质的理化性质及生理功能与其空间构象密切相关,而蛋白质二级结构作为空间构象的基本单元,其动态变化直接影响蛋白质的功能特性<sup>[16]</sup>。因此,测定重组蛋白质二级结构含量随冻存时间的变化,对解析其功能稳定性具有重要意义。纯化后不同冻存时间的 rMiPLA<sub>2</sub> 的红外光谱见图 1。由图 1 可知,不同冻存时间下 rMiPLA<sub>2</sub> 的 FT-IR 谱图变化趋势没有有明显差异。

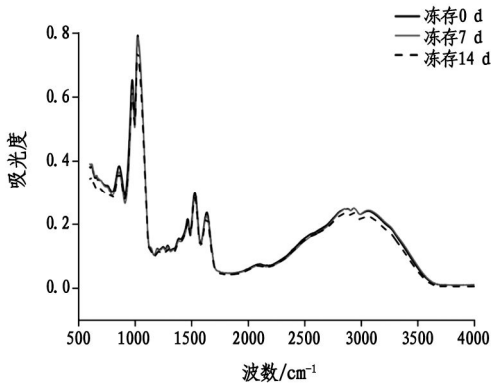


图 1 不同冻存时间下 rMiPLA<sub>2</sub> 的红外谱图

由于酰胺 I 带对多肽构象变化敏感,因此常通过分析蛋白酰胺 I 带的变化,来解析蛋白质的二级结构<sup>[17]</sup>。图 2 的蛋白酰胺 I 带(1600 - 1700 cm<sup>-1</sup>)的峰形可以清楚地表明,随着冻存时间延长, rMiPLA<sub>2</sub> 蛋白的红外光谱中特征峰的光吸收明显减弱,并且峰位发生移动,这表明纯化的 rMiPLA<sub>2</sub> 在冻存过程中蛋白质结构发生了改变。冻存 0 d 的 rMiPLA<sub>2</sub> 酰胺 I 带峰位为 1635 cm<sup>-1</sup>,冻存时间为 7 d 和 14 d 的酰胺 I 带都向低波数方向发生了一定程度的位移,即从 1635 cm<sup>-1</sup> 移至 1634 cm<sup>-1</sup>。这是由于:当形成分子间氢键时,氢键的作用会增强<sup>[18]</sup>,C=O 电子云密度降低<sup>[14]</sup>,从而导致吸收峰位向低波数方

向移动<sup>[19]</sup>。由此推断随着冻存时间延长,蛋白质结构开始展开并暴露出疏水性氨基酸<sup>[20]</sup>,游离的氨基酸形成分子间氢键<sup>[14]</sup>,从而引起吸收峰位下降。

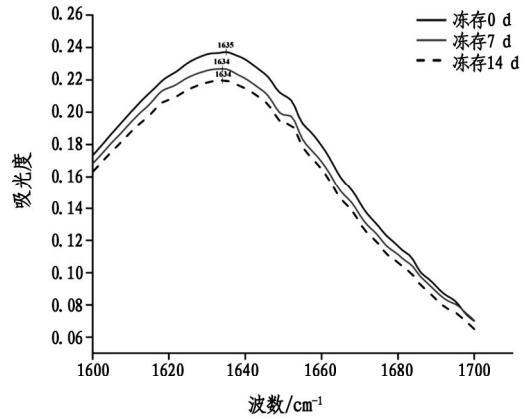


图 2 不同冻存时间下 rMiPLA<sub>2</sub> 酰胺 I 带的红外谱图

### 2.2 酰胺 I 带谱图的高斯拟合定量分析

依据 Long<sup>[13]</sup>的研究方法,将酰胺 I 带的光谱进行各峰归属,见表 1。将 FT-IR 得到的谱图进行高斯去卷积,再多次求二阶导数曲线拟合,可以获得各子峰与蛋白二级结构单元的相应关系。图 3 为不同冻存时间下 rMiPLA<sub>2</sub> 酰胺 I 带高斯拟合红外谱图。不同冻存时间下 rMiPLA<sub>2</sub> 的酰胺 I 带分别经去卷积和多次二阶导数曲线拟合后,重叠的峰图将会分解成各个子峰的高斯曲线拟合图。将获得的各子峰依据蛋白二级结构单元的光谱范围进行分类,见表 2。

表 1 酰胺 I 带二级结构的光谱范围

| 光谱范围/cm <sup>-1</sup> | 二级结构     |
|-----------------------|----------|
| 1600 - 1625           | 分子间 β-折叠 |
| 1626 - 1640           | 分子内 β-折叠 |
| 1641 - 1650           | 无规则卷曲    |
| 1651 - 1660           | α-螺旋     |
| 1661 - 1685           | β-转角     |
| 1686 - 1700           | 反向平行-折叠  |

表 2 不同冻存时间下 rMiPLA<sub>2</sub> 二级结构的含量变化

| 纯化完蛋白状态 | 二级结构含量/%                  |                           |                           |                           |
|---------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|         | 总 β-折叠                    | 无规则卷曲                     | α-螺旋                      | β-转角                      |
| 冻存 0 d  | 37.46 ± 0.33 <sup>a</sup> | 24.28 ± 0.06 <sup>b</sup> | 20.47 ± 0.16 <sup>a</sup> | 18.10 ± 0.23 <sup>a</sup> |
| 冻存 7 d  | 37.36 ± 0.15 <sup>a</sup> | 24.28 ± 0.03 <sup>b</sup> | 20.34 ± 0.40 <sup>a</sup> | 18.02 ± 0.28 <sup>a</sup> |
| 冻存 14 d | 34.87 ± 0.30 <sup>b</sup> | 28.47 ± 0.30 <sup>a</sup> | 18.53 ± 0.17 <sup>b</sup> | 18.13 ± 0.18 <sup>a</sup> |

注:在同一列中,具有相同小写字母上标表示无显著差异( $P > 0.05$ ),具有不同小写字母上标表示有显著差异( $P < 0.05$ )。

由表2可以看出冻存7 d的 rMiPLA<sub>2</sub> 与冻存0 d的状态相比,二级结构含量没有发生显著变化;而冻存14 d的 rMiPLA<sub>2</sub> 则有着显著性差异( $P < 0.05$ ),主要反应在总 $\beta$ -折叠含量减少、无规则卷曲含量增加以及 $\alpha$ -螺旋含量减少,而 $\beta$ -转角则变化不显著。 $\alpha$ -螺旋是蛋白质最稳定的二级结构<sup>[21]</sup>,随着冻存时间

延长, rMiPLA<sub>2</sub> 的结构稳定性开始下降,导致 $\alpha$ -螺旋中的氢键逐渐断裂,发生解螺旋。在总 $\beta$ -折叠和 $\alpha$ -螺旋含量减少的同时,无规则卷曲含量增加,说明随着冻存时间延长,蛋白质的结构发生了变化,即由有序的紧密结构变为无序的松散结构,蛋白质的稳定性发生下降<sup>[22]</sup>。

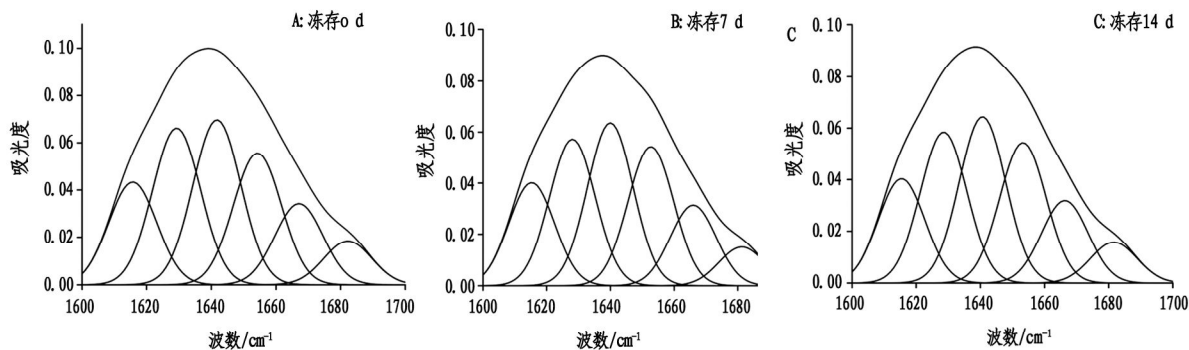


图3 不同冻存时间下 rMiPLA<sub>2</sub> 酰胺 I 带的红外谱图

### 2.3 体外酶活性检测

PLA<sub>2</sub> 能够作用于底物 PC 的 sn-2 位,释放出 FFA 和 LPC。通过 TLC 分离反应物,以已知标准品作为对照,通过比对样品与标准品的位置及斑点显色强度,可以对 PLA<sub>2</sub> 的催化活性进行定性和半定量分析<sup>[23-24]</sup>。根据图4(A) - 图4(C)的 TLC 显示,经不同冻存时间处理的 rMiPLA<sub>2</sub> 均能有效催化 PC 生成 LPC 产物。不同的是,与实验组1和实验组2相比,实验组3产生的 LPC 的量明显少于前2个处理组,而实验组1和实验组2产生的 LPC 量没有明显区别。结合表2的 FT-IR 数据可以发现,上述现象与蛋白质二级结构变化密切相关。实验组3中所检测的为冻存14 d的 rMiPLA<sub>2</sub>,可以发现其 $\alpha$ -螺旋(从20.47%降至18.53%)和总 $\beta$ -折叠(从37.46%降至34.87%)含量均显著下降。这种二级结构的衰减表明,蛋白质的催化结构域可能因冻存时间的延长,导致空间构象稳定性降低<sup>[25-27]</sup>,引发局部结构域的松散,进而影响其催化活性<sup>[28]</sup>。而 PLA<sub>2</sub> 家族的活性中心通常由高度保守的 His-Asp 催化二元体及 Ca<sup>2+</sup> 结合位点构成,而底物结合口袋则依赖于由 $\alpha_3$  螺旋与 $\beta$ -wing 形成的疏水通道<sup>[29-30]</sup>。这种结构特征使得 PLA<sub>2</sub> 能够特异性地识别和结合 PC,发挥其水解功能。随着冻存时间的延长, $\alpha$ -螺旋和 $\beta$ -折叠的减少可能导致 rMiPLA<sub>2</sub> 对 PC 的识别能力下降,从而影响 LPC 生成。这与二级结构改变会直接影响蛋白质稳定性和酶活性这一假设相符<sup>[31]</sup>。

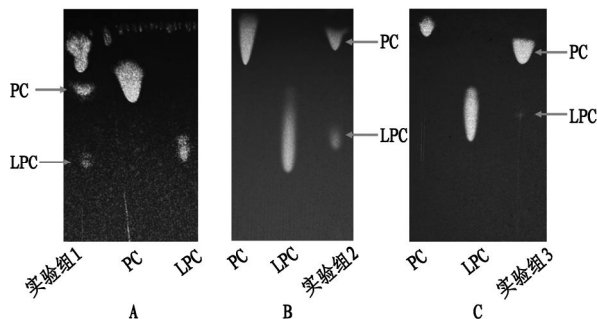


图4 不同冻存时间下 rMiPLA<sub>2</sub> 酶活性反应的薄层色谱图  
A: 实验组1为冻存0 d; B: 实验组2为冻存7 d; C: 实验组3为冻存14 d。  
注:未带箭头PC和LPC为标准品,带箭头PC和LPC为反应过程产生。

图4 不同冻存时间下 rMiPLA<sub>2</sub> 酶活性反应的薄层色谱图

### 3 结论

本研究通过 FT-IR 与酶活性分析,系统探究了冻存时间对 rMiPLA<sub>2</sub> 蛋白结构与功能的影响。结果表明,随冻存时间延长(0 d 至 14 d),酰胺 I 带逐渐向低波数偏移(从 1635 cm<sup>-1</sup> 至 1634 cm<sup>-1</sup>),揭示分子间氢键网络发生重构,蛋白质发生部分去折叠。二级结构定量结果显示,冻存14 d组 $\alpha$ -螺旋与总 $\beta$ -折叠含量较新鲜(冻存0 d)组显著降低( $P < 0.05$ ),无规卷曲比例显著上升。酶活检测结果一致显示,冻存14 d后 rMiPLA<sub>2</sub> 活性明显下降。以上结果说明,长期冻存可诱导 rMiPLA<sub>2</sub> 发生二级结构改变,进而导致其酶活性降低,该发现对重组蛋白保存策略的优化具有参考意义。

### 参考文献:

[1] 杨帆,杨巍. 结构生物学研究热点[J]. 浙江大学学报

- (医学版),2019,48(1):1-4.
- [2] 安宸毅,费攀宇,陈伟. 见微知著:单分子力谱技术窥探蛋白质分子动态功能[J]. 中国生物化学与分子生物学报,2017,33(10):965-978.
- [3] 孟丹阳,杜艳,陈复生. 微藻中蛋白质的提取方法研究进展[J]. 食品与发酵工业,2023,49(21):346-357.
- [4] 易薇,胡一桥. 差示扫描量热法在蛋白质热变性研究中的应用[J]. 中国药学杂志,2004(6):1-3.
- [5] 李辉,果双双,施振旦. 重组猪抑制素蛋白冻干保护剂的筛选[J]. 江苏农业科学,2016,44(4):291-293.
- [6] 于亚云,段姚尧,崔颖. 蛋白类药物冷冻干燥技术的研究进展[J]. 武警医学院学报,2010,19(1):78-80,84.
- [7] MANNING M C, CHOU D K, MURPHY B M, et al. Stability of protein pharmaceuticals: An update[J]. *Pharmaceutical Research*, 2010, 27(4):544-575.
- [8] 苏靖,石晶红,王金帅,等. 基于红外光谱分析河套春小麦储藏期蛋白质二级结构变化[J]. 粮食与油脂,2021,34(11):24-27,35.
- [9] 刘斌,马海乐,李树君,等. 应用 FTIR 研究超声对牛血清白蛋白二级结构的影响[J]. 光谱学与光谱分析,2010,30(8):2072-2076.
- [10] 胡立新,熊倩,陈晓雯,等. FTIR 在环境毒理学研究中的应用[J]. 生态毒理学报,2021,16(3):107-114.
- [11] LIN M Z, BI Y H, LI S Q, et al. The enzyme encoded by *Myrmecia incisa*, a green microalga, phospholipase A<sub>2</sub> gene preferentially hydrolyzes arachidonic acid at the sn-2 position of phosphatidylcholine[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2024, 213:108806.
- [12] DENNIS E A, CAO J, HSU Y H, et al. Phospholipase A<sub>2</sub> enzymes: Physical structure, biological function, disease implication, chemical inhibition, and therapeutic intervention [J]. *Chemical Reviews*, 2011, 111(10):6130-6185.
- [13] LONG G, JI Y, PAN H, et al. Characterization of thermal denaturation structure and morphology of Soy Glycinin by FTIR and SEM[J]. *International Journal of Food Properties*, 2015, 18(4):763-774.
- [14] 顾佳丽,伊鲁东,李东玲,等. 光谱法研究小分子与蛋白质间相互作用的进展[J]. 科学技术与工程,2018,18(14):85-90.
- [15] FUCHS B, SüSS R, TEUBER K, et al. Lipid analysis by thin-layer chromatography-a review of the current state[J]. *Journal of Chromatography A*, 2011(19):2754-2774.
- [16] 丁静,钱俊青. 蛋白质二级与三级结构的表征方法[J]. 浙江化工,2020,51(11):49-54.
- [17] 史浩川,杨梦瑞,王敏,等. 蜂毒肽的分离纯化及结构鉴定[J]. 食品安全质量检测学报,2023,14(9):26-33.
- [18] MORZEL M, GATELLIER P, SAYD T, et al. Chemical oxidation decreases proteolytic susceptibility of skeletal muscle myofibrillar proteins[J]. *Meat Science*, 2006, 73(3):536-543.
- [19] 阎微. 高压和热处理对蛋黄体系中蛋白质的影响[D]. 无锡:江南大学,2009:38-45.
- [20] RICCIO A, GRAZIANO G. A simple model of protein cold denaturation [J]. *Chemical Physics Letters*, 2022, 794:139504.
- [21] LIU H, ZHANG H, LIU Q, et al. Solubilization and stable dispersion of myofibrillar proteins in water through the destruction and inhibition of the assembly of filaments using high-intensity ultrasound [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 67:105160.
- [22] 陈中,卢星宇. 基于蛋白质二级结构热稳定性的正交方法[J]. 生物技术通报,2021,37(2):236-245.
- [23] 王钦,李建林,唐永凯,等. 鲤鱼 PLA2g3a1 催化活性区的原核表达及酶活性分析[J]. 南京农业大学学报,2020,43(2):339-346.
- [24] 李斯琪,毕燕会,周志刚. 缺刻缘绿藻磷脂酶 A<sub>2</sub> (PLA<sub>2</sub>) 的基因特征与功能[J]. 水生生物学报,2023,47(7):1042-1051.
- [25] 孙圳,杨方威,李侠,等. ATR-FTIR 分析冻结-解冻后的牛肉蛋白二级结构变化[J]. 光谱学与光谱分析,2016,36(11):3542-3546.
- [26] MOUCLIS V D, DENNIS E A. Phospholipase A<sub>2</sub> catalysis and lipid mediator lipidomics [J]. *Biochimica et Biophysica Acta. Molecular and Cell Biology of Lipids*, 2019(6):766-771.
- [27] JENA S, SAHU S, NAYAK S. Effect of storage on stability of lyophilized recombinant human growth hormone[J]. *Biologicals*, 2016, 44(3):143-151.
- [28] 翦英田. 西班牙糖丝菌 PLA<sub>2</sub>-SE 酶学特性表征及其结构解析研究[D]. 广州:华南理工大学,2023.
- [29] 蓝蔚青,孙雨晴,肖蕾,等. 冻融循环对大目金枪鱼质构与蛋白质特性变化的影响[J]. 食品科学,2021,42(7):240-246.
- [30] MOUCLIS V D, CHEN Y, MCCAMMON J A, et al. Membrane allostery and unique hydrophobic sites promote enzyme substrate specificity [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2018, 140(9):3285-3291.
- [31] 曹锟,王若男,方雅莉,等. 基于分子动力学模拟研究温度对乳酸脱氢酶活性的影响[J]. 食品工业科技,2022,43(1):134-140.

## 粉尘环境下机电系统可靠性综合设计技术及应用

李刚\*, 陈飞, 邓志旭

(滁州学院 机械与电气工程学院, 安徽 滁州 239000)

**摘要:**以PVC塑胶板材加工的自动化搬运装置机电系统为例,针对恶劣粉尘环境下工作的机电系统,从电气设计、软件设计、结构设计等多个方面综合采取可提高工作可靠性的设计方案,对可能影响机电系统正常工作的多个因素采取了有针对性的措施。采用有限元分析方法对设计结果进行力学仿真分析,进一步确保设计结果的高可靠性。该研究可以作为同类机电产品设计的理论指导,用于更多恶劣工况环境下的机电系统设计工作。

**关键词:**机电系统;可靠性;综合设计

中图分类号:TH122;TB115

文献标识码:A

文章编号:2095-297X(2026)02-0018-06

## Comprehensive Design Technology and Application of Reliability of Electromechanical Systems in Dust Environment

LI Gang\*, CHEN Fei, DENG Zhixu

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Chuzhou University, Chuzhou, 239000, Anhui)

**Abstract:** Taking the electromechanical system of an automated handling device for PVC plastic panel processing as an example, it addressed the challenges faced by electromechanical systems operating in harsh dusty environments in the paper. Comprehensive design techniques to enhance operational reliability were implemented from multiple perspectives, including electrical design, software design, and structural design. Targeted measures were applied to address various factors that may affect the normal operation of the electromechanical system. Finite element analysis was employed to conduct mechanical simulation analysis of the design results, thereby further ensuring the high reliability of the design outcomes. It can be utilized as theoretical guidance for the design of similar electromechanical products and can be applied to the design of electromechanical systems in more harsh working environments.

**Key words:** mechanical and electrical systems; reliability; comprehensive design

机电一体化设备结构相对复杂,在实际使用过程中往往故障率较高<sup>[1]</sup>。据统计,产品可靠性问题的80%均来源于产品的设计阶段<sup>[2]</sup>,因此在机电一体化设备研制过程中,可靠性设计与产品功能设计需要同步进行<sup>[3]</sup>。用于PVC塑胶板材加工的自动化搬运装置是一种典型的机电一体化设备,其主要用途是抓取PVC塑胶板材送入打毛机并将处理好的板材自动取出码垛。打毛机在板材打毛过程中会产生大量粉尘,自动化搬运装置工作现场每天积尘

厚度可达1 mm以上。因此,自动化搬运装置在设计时,除了功能满足使用要求以及工业化制造的低成本因素外,还必须能够在大量粉尘以及长期的粉尘积累环境下能够实现高可靠的工作。

以往机电系统或设备的可靠性设计,多是从机械结构、电子系统或者软件系统的某一角度进行研究<sup>[4-6]</sup>。但机电系统是集众多结构、系统于一身,协同工作的复杂系统,通常的可靠性设计方案往往达不到满意的效果。

收稿日期:2025-09-18 \* 通讯联系人

基金项目:安徽省高等学校科学研究项目(2024AH051411)。

作者简介:李刚(1979-),男,安徽滁州人,副教授,博士。E-mail:tongnian77@sina.com

本研究在自动化搬运装置设计时,从总体设计、结构设计、控制系统设计、软件设计等多个方面进行了高可靠性综合设计研究,采用多种方法和技术综合可提高自动化搬运装置在恶劣粉尘环境中的可靠性,以实现较好的效果。

## 1 系统设计

### 1.1 系统总体设计

自动化搬运装置在总体设计上分为机械结构与电气控制两个部分,并采用“自上而下”的设计顺序。在分别完成两个部分的功能设计和可靠性设计后,再“自下而上”进行系统的可靠性验证分析,最终确保系统总体设计的可靠性。

自动化搬运装置电气控制部分分为5个电气分系统,机械结构部分分为4个主体机械结构,如图1所示。电气分系统分别为:主控制及扩展控制电气分系统、横移伺服电气分系统、起落吊装电气分系统、负压吸取气动电气分系统、安全及位置感知传感器反馈电气分系统。主体机械结构分别为:整体支撑龙门框架结构、伺服横移行走机构、起落吸取吊架结构、机械限位安全结构、机械限位安全结构。

主控制及扩展控制电气分系统负责控制横移伺服电气分系统、起落吊装电气分系统、负压吸取气动

电气分系统的运动和动作,并接收来自安全及位置感知传感器反馈电气分系统送来的传感器信号,做好控制闭环;接收操作人员点按屏幕送来的控制指令,实现“抓、拿、放”的板材搬运工作流程;同时还负责及时感知发现系统意外情况或操作人员错误操作导致的非法运行行为,并予以安全处置,确保机器稳定运行及操作人员安全。横移伺服电气分系统负责受控驱动且悬挂有起落吸取吊架结构的伺服横移行走机构,在整体支撑龙门框架结构上做定位横移运动。起落吊装电气分系统负责驱动起落吸取吊架结构在伺服横移行走机构框架内做上下运动。负压吸取气动电气分系统负责驱动负压机提供或关闭负压,使吸盘可以吸取或释放待搬运板材。

在系统的总体设计中,安全及位置感知传感器反馈电气分系统和机械限位安全结构,分别从电气角度和机械角度提供安全保护措施,在功能设计上实现机电系统工作时的高可靠性和安全性。这些功能设计,可以防止伺服横移行走机构横移失控,或起落失控发生撞击主框架的运动行为。其中包含的气压传感器用于防止板材放置位置异常,进而发生“空吸”现象;钢丝绳张力传感器用于防止下落过快时钢丝绳松弛导致钢丝绳缠绕情况发生。

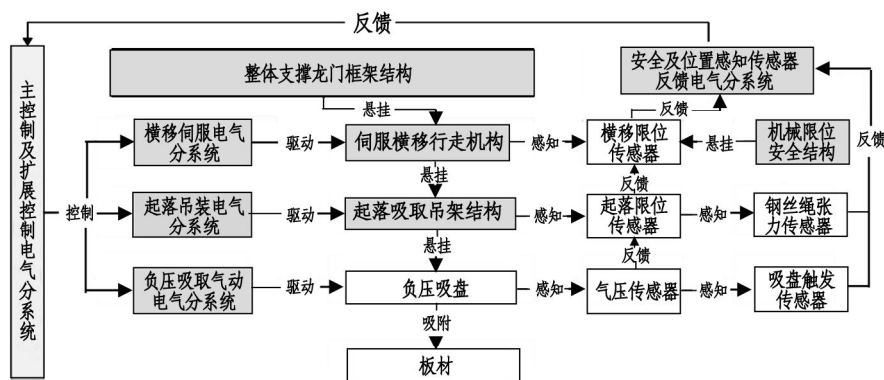


图1 系统总体设计结构框图

### 1.2 控制系统设计

#### 1.2.1 隔离安全设计

主控电路板提供外部按键输入接口,接口与微控制器(microcontroller Unit, MCU)之间采用光耦隔离,避免线路上电机系统高频电磁辐射对MCU的正常工作产生干扰。主控电路板提供传感器输入反馈接口,采用NPN型直流三线传感器,在断电或线路断裂情况下,传感器输出线保持“悬空”状态,确保安全。

一个可靠的工业控制系统,需要全方位隔离来

自接口的外部干扰,其中隔离电源端来自电网的高频串扰尤为重要,否则会影响控制系统控制芯片的正常工作,严重时会导致控制系统死机。因此本研究在控制系统设计时,选用了隔离降压稳压电源,将工业控制系统常用的24V控制电压隔离转换为5V电压输出,实现稳定可靠的印制电路板(printed Circuit board, PCB)供电。

#### 1.2.2 扩展性设计

系统在设计时,须充分考虑后期功能拓展、设计修改等情况所导致的传感器添加需求,因此一般应

设有扩展备份接口电路,可以与后加入系统的协控制器(扩展控制器)通讯、交换数据、命令和状态,从而实现功能扩展。在本系统中,设计了5线制扩展接口,分别定义为2线的RS485串行通讯总线、1线的直连主控制器IO、2线的24V扩展供电电源。此5线接口可以额外支持一个直连主控制器的NPN型传感器,避免通过总线通讯带来的较高时延,且适合需要及时响应的传感器信号直接触发主控制器中

断机制。同时RS485总线可以连接到协控制器,借用协控制器扩展出更多功能和接口,且能在2ms内上报状态至主控制器。此接口设计既兼顾了扩展性,又兼顾了实时性,提高了总体方案的可靠性。

### 1.2.3 总控系统设计

总控系统使用STM32F407VET6为主控芯片进行运动控制,并通过RS485总线进行数据传输,主控原理图如图2所示,PCB板图如图3所示。

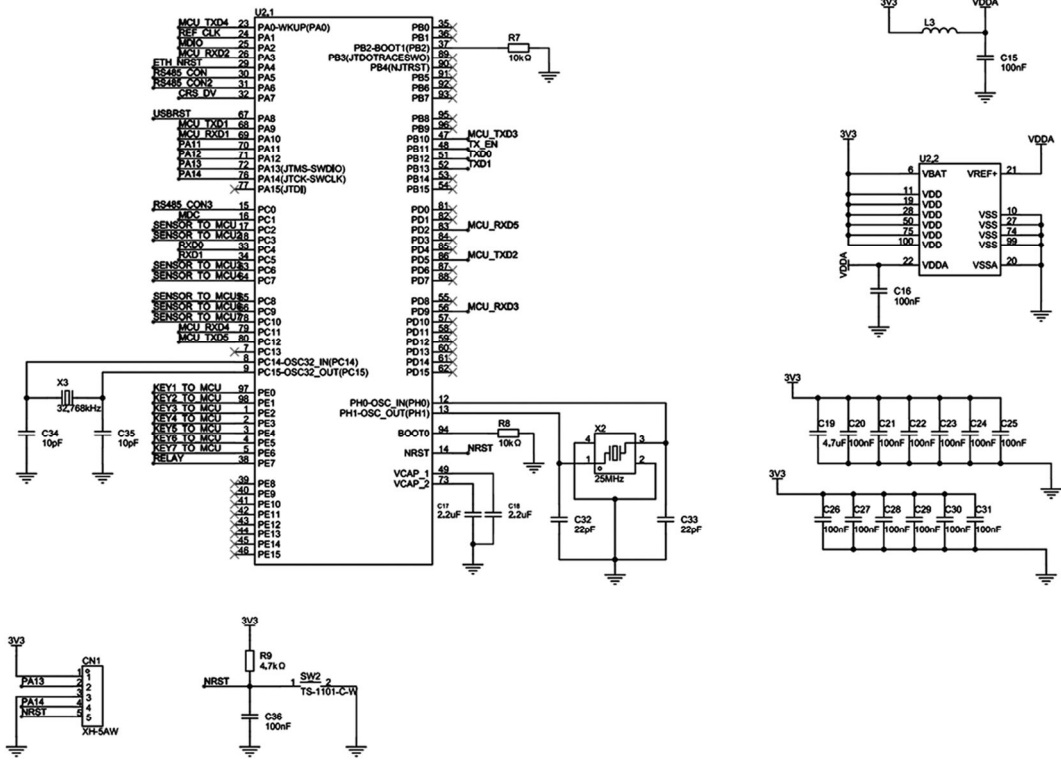


图2 总控原理图

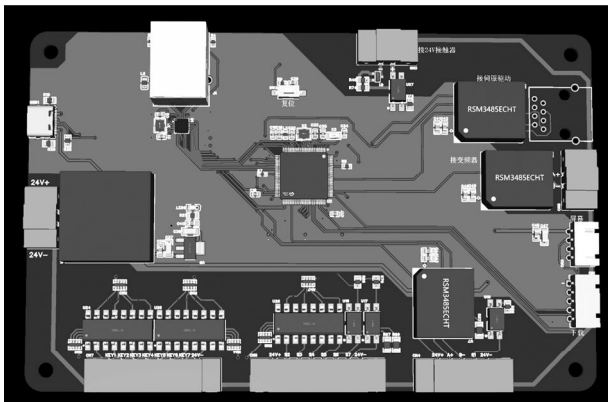


图3 PCB控制板

## 2 软件设计

系统控制软件要确保使用稳定可靠,在设计时需确保软件总体结构简洁,具有较好的可读性和可

靠清晰的逻辑性。本系统软件设计时,采用自上而下的方式拆分软件需求,然后再自下而上分块设计并做逻辑验证,以确保设计的软件系统逻辑正确,稳定可靠。

软件整体结构采用“前后台系统”方式的循环顺序执行+中断机制。系统基本功能业务采用“状态机”方式循环执行,任务执行顺序严格按从上向下执行,然后采用定时器中断及外部中断,不断更新传感器实时状态并在程序中所定义的变量内保存。其中包括气压传感器,限位传感器,电机状态数据等信息,用于判断系统运行状态是否正常。如遇异常,立即执行对应的异常处理函数;如遇故障发生则执行运动停止命令,主动切断动力电源使机械结构部分断电自动落锁,确保安全;并在屏幕上给出故障提示,便于快速排除故障。

为防止软件程序运行过程中出现突然停止响

应、死循环等意外情况,在软件程序中设置软件看门狗。在程序出现以上情况时,看门狗机制将重启系统,系统重新复位并获取当前设备状态从断点处继续执行,避免系统失去控制。

### 3 其他软、硬件可靠性设计

#### 3.1 成熟设计

要尽可能采用成熟的模块来搭建电路。使用成熟工艺、技术和经过大量市场验证的方案,能够降低因局部模块不可靠而导致的全局不稳定性和不可控风险,提升产品一致性。

#### 3.2 简化设计

尽量采用简单结构实现必须的功能。结构越复杂,越容易受到粉尘、油水等混合物影响导致卡死故障,也更容易受环境温、湿度变化产生形变异常。采用已有高集成度子系统成熟方案,以降低系统构成层级复杂度。

#### 3.3 过盈设计

对于所采用的材料、器件、模块等进行额定参数降额使用。如电机降额使用额定力矩;金属承重钢梁降额使用额定载荷;微控制器降额使用算力负载等。这样各器件、材料在受到额外应力、负载冲击时,将会有足够的余量可以用来抵消冲击,避免产生失效、不可逆损伤或发生严重后果。过盈设计可借鉴参考 GJB/Z 35A-2006《元器件降额准则》、GB/T 38036-2019《航天产品结构应力分析要求》、GJB 450A-2004《装备可靠性工作通用要求》等相关标准。如针对承重钢梁,根据 GB/T 38036-2019 进行应力分析,其在最恶劣工况下安全裕度不低于 0.5。降额并非越大越好,过度降额可能对可靠性提升有限且导致设备重量、体积和成本显著增加。具体设计中,需综合考虑使用环境、成本、可靠性要求、行业规范等,合理选择降额等级,规避过度设计,确保在可靠性、结构紧凑性及成本控制之间取得最佳平衡。

#### 3.4 冗余设计

并联冗余是一种常用的可靠性提升方法<sup>[7]</sup>,其核心是通过多个独立模块的并联,将系统整体可靠度从单一模块的  $R$  提升至  $1 - (1 - R)^n$ 。本研究在搬运装置的安全保护系统设计中采用了该技术,构建了软件、电气和机械三重安全防护的冗余体系。通过可靠性建模分析,在设定单措施可靠度为 0.95 的条件下,系统整体安全防护的可靠度可由 95% 提升至 99.9875% 以上,可靠性得到了质的飞跃。

具体措施包括:软件安全防护通过程序监控传感器并及时告警或停机;电气安全防护通过独立电

路实现自动断电与刹车;机械安全防护则采用限位结构作为终极保障。这三重措施并行工作,在其中一种甚至前两种防护措施失效时,第三重措施依然能提供有效防护,确保了极高的系统安全性。

#### 3.5 容差设计

数据计算和系统通讯过程采用校验和多次验证技术,在出现通讯干扰和信息传送偶发异常时,确保计算和通讯结果不会导致系统运行出错和设备失控。在机械结构设计方面,构件结构、尺寸、工艺等均进行容差设计,例如采用“腰孔”代替“圆孔”,扩大孔径尺寸并利用垫片补偿误差等措施,减小可能出现的实际装配、加工等误差。

## 4 机械结构设计

#### 4.1 结构设计

自动搬运装置的整体结构框架采用无导轨轮式设计。伺服横移行走机构采用同步轮、同步带,伺服电机作为横移驱动动力源,以轮式结构在龙门框架横梁上支撑滚动。不同于齿轮、齿条或导轨结构形式,此结构为开放结构,在粉尘环境下,不易积尘,避免了运动机构被积尘卡死的风险,使得维护保养时清理积尘也更加容易。此设计不仅提高了设备运行的可靠性,还降低了维护频率,适宜于设备长期在粉尘环境中工作。另外,在龙门框架整体支撑结构横梁上配置了 U 型卡箍式可调限位结构,可以在软件安全保护、电气安全保护均失效时,起到最后的机械结构限位保护功能,增加设备运行时的可靠性和安全性。

#### 4.2 力学仿真建模分析

有限元分析是用数学近似方法对真实物理系统进行模拟,其基本原理是建立在结构力学离散化思想基础之上,把一个复杂连续体问题分散成有限多个简单单元体,并通过对逐个单元体的分析解决整个结构力学行为问题<sup>[8-9]</sup>。其用较简单的问题代替复杂问题后再求解,将求解域看成是由许多有限元的小的互连子域组成,对每一单元假定一个合适的(较简单的)近似解,然后推导求解这个域总的满足条件(如结构的平衡条件),从而得到问题的解。

##### 4.2.1 有限元单元分析

确定单元位移函数:

$$\{f\} = [N] \{\delta\}^e \quad (1)$$

其中: $\{f\}$  为单元内部任意一点的位移; $\{\delta\}^e$  为单元节点位移; $[N]$  为单元形函数矩阵。

计算单元刚度矩阵:

单元应变(几何方程)为

$$\{\varepsilon\} = [B]\{\delta\}^e \quad (2)$$

其中： $\{\varepsilon\}$ 为单元应变； $[B]$ 为单元矩阵。

单元应力(物理方程)为

$$\{\sigma\} = [B][D]\{\delta\}^e = [S]\{\delta\}^e \quad (3)$$

$$(\{\delta^*\}^e)^T \{F\}^e = \iiint_v (\{\varepsilon^*\}^e)^T \{\sigma\} dx dy dz \quad (4)$$

将单元应变和单元应力方程代入上式可得：

$$\{F\}^e = [K]^e \{\delta^*\}^e \quad (5)$$

其中,单元刚度矩阵  $[K]^e = \iiint_v [B]^T [D] [B] dx dy dz$ 。

#### 4.2.2 有限元整体分析

结构整体刚度方程为：

$$[K]\{\delta\} = \{P\} \quad (6)$$

其中： $\{\delta\}$ 为结构节点位移； $\{P\}$ 为结构节点荷载；整体刚度矩阵  $[K] = \sum_{e=1}^m [K]^e$ 。

结构节点荷载：

$$\{P\} = \{P\}_d + \{P\}_e \quad (7)$$

其中： $\{P\}_d$ 为直接作用在节点上的结构点荷载； $\{P\}_e$ 为结构等效节点荷载。

整体刚度方程：

$$\{\delta\} = [K]^{-1} \{P\} \quad (8)$$

#### 4.2.3 有限元仿真建模

由于大多数实际问题难以得到准确解,而有限元不仅计算精度高,而且能适应各种复杂形状,因而成为行之有效的工程分析手段。在基于有限元分析进行建模时,需要对其进行适当的简化和理想化处理<sup>[10-13]</sup>。本研究在建模时,综合考虑建模复杂性、求解结果的正确性,并进行了相应简化<sup>[14]</sup>,如去除对结构力学性能影响较小的组件及其固定件,非承力部件采用质量单元点进行代替。在此基础上,建

其中： $\{\sigma\}$ 为单元应力； $[S]$ 为单元应力矩阵； $[D]$ 为弹性矩阵。

根据虚位移原理得单元刚度矩阵：

立了相应的仿真分析模型。模型共包含 2 541 738 个单元,3 604 892 个节数。在自重条件下自动搬运装置应力云图如图 4 所示。

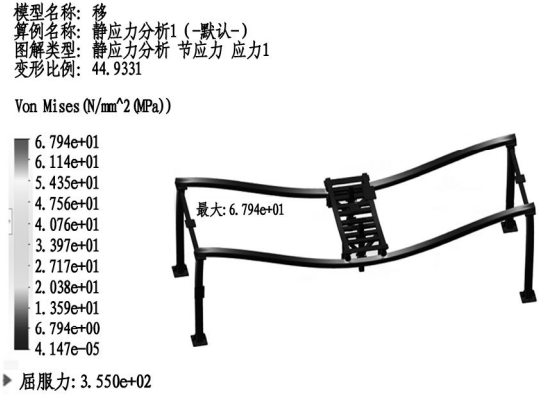


图 4 自重条件下自动搬运装置应力云图

在实际工程应用中,结构、材料、载荷和环境等诸多因素都会对机械系统的可靠性产生影响,这些因素在实际应用中表现出较大的随机性。在系统设计中,往往通过引入经验安全系数  $f$  来考虑这些不确定性,使失效率达到一个可接受的水平<sup>[15]</sup>。为确保结构件在实际使用应力条件下能够高可靠的工作,国家军用标准和型号规范均规定装备的可靠性预计结果应至少满足合同规定值 1 - 1.5 倍的要求<sup>[16]</sup>。本研究设计的自动搬运装置结构整体采用 Q355 钢,材料参数如表 1 所示。

表 1 材料力学性能表

| 材料名称   | 弹性模量    | 泊松比  | 密度  | 屈服极限    |
|--------|---------|------|---|---------|
| Q355 钢 | 210 GPa | 0.30 | $7.9 \times 10^{-9} \text{ t} \cdot \text{mm}^{-3}$ | 355 MPa |

根据产品强度校核要求,按照屈服强度进行校核,在安全系数取  $f = 1.5$  的情况下,要求安全裕度  $M_s > 0$ ,即:

$$M_s = \frac{\sigma_{\text{屈服}}}{f \times \sigma_{\text{计算}}} - 1 > 0 \quad (9)$$

其中： $\sigma_{\text{屈服}}$ 为材料的屈服极限； $\sigma_{\text{计算}}$ 为材料设计最大应力。

根据仿真分析结果,在负载状态下,材料最大应力为 128.6 MPa,位于滚轮与支撑横梁接触点附近,

按照材料 Q355 钢的屈服强度 355 MPa 校核,安全裕度为  $0.84 > 0$ ,强度满足设计要求。

负载条件下,当运动部位于横梁中间时,搬运设备达到最大变形为 2.602 mm。本设备跨度 7 m,按照 GB50017 - 2017 钢结构设计标准,最大挠度应小于横梁跨度  $7000/900 = 7.77$  mm。由  $2.602 < 7.77$  可知,本设计满足标准要求。

自动搬运装置典型工况结构强度分析结果如表 2 所示。

表2 典型工况结构强度分析结果表

| 序号 | 工况        | 框架最大应力/MPa | 安全裕度 |
|----|-----------|------------|------|
| 1  | 自重        | 67.94      | 2.48 |
| 2  | 负载 540 kg | 128.6      | 0.84 |

所有工况中,框架最大应力为 128.6 MPa,位于滚轮与支撑横梁接触面附近。按照 Q355 钢的屈服强度 355 MPa 计算校核,安全裕度为 0.84 > 0,满足强度可靠性要求,可以确保设备安全可靠运行。

## 5 实物测试

根据以上结构设计和有限元分析结果,设计了一套测试设备。横梁长度 7 m,梁上带有吸盘架的伺服横移行走机构重 460 kg,并可以携带 100 kg 重物。控制 8 个吸盘的电机采用了配备过滤器的高压旋涡式气泵。经长时间连续测试,整套系统在粉尘环境下能够安全稳定运行,并且横梁强度足够,未出现安全问题,实物装置如图 5 所示。



图5 实物测试图

## 6 结论

本研究针对 PVC 塑胶板材加工现场高粉尘、易积尘的恶劣工况,设计了一套高可靠性的自动化搬运装置机电系统。与常规设计相比,本研究在电气、软件及机械结构等多个层面进行了综合性的可靠性强化。在电气与控制设计方面,通过采用多种隔离安全设计,有效抵御了粉尘环境下电网波动与电机电磁干扰的影响;扩展接口设计兼顾了功能拓展需求与实时响应能力,提升了系统的适应性与整体可靠性。在软件设计方面,构建了以“状态机”为核心的“前后台”软件架构,并结合定时器、外部中断机制、软件看门狗、异常处理函数等实现了程序跑飞或死循环等故障下的系统自恢复与安全停机的功能,显著增强了软件在长期运行中的鲁棒性。在机械结构设计方面,创新性地采用了无导轨轮式行走机构,

有效避免了粉尘堆积导致的卡死风险,兼具高可靠性与易维护性。通过引入软件、电气、机械三重独立并联的冗余安全防护体系,实现了安全性能的质的飞跃。本研究论述的恶劣粉尘工况下搬运装置的高可靠性设计是一次有效的尝试,可为同类恶劣工况下机电系统的高可靠性设计提供明确的理论指导与工程实践参考。

## 参考文献:

- [1]冯志杰,王煜阳,周昊.某型飞机起落架机电液一体化可靠性分析[J].兵器装备工程学报,2018,39(1):29-33.
- [2]田学华,张志毅,吴向阳,等.机电系统可靠性分析规范性方法研究[J].中国标准化,2022(5):219-222.
- [3]阎涛,胡章咏,赵宝琴.小型零件自动上料系统的可靠性设计[J].内燃机与配件,2018(22):6-7.
- [4]艾学忠,翟玉文,杨潇.智能机电系统可靠性设计[J].吉林化工学院学报,2006,23(4):38-40.
- [5]徐锦顺,胡亮,卢小军.机载机电参数显示控制装置可靠性提升研究[J].电子技术与软件工程,2022(4):142-145.
- [6]卢二宝,闫丽媛,于志远,等.航空航天机电伺服系统可靠性设计综述[J].导航定位与授时,2016,3(4):53-57.
- [7]袁礼朝,谭逢富,黄志刚,等.探测器阵列靶电路系统的可靠性设计[J].量子电子学报,2024,41(6):881-890.
- [8]艾散·阿卜杜喀迪尔.有限元分析在工装设计中的运用分析[J].中国机械,2024(22):31-34.
- [9]杨云辉.机械加工中有限元技术的计算精度优化研究[J].电子科技,2024,37(3):98-102.
- [10]李鹏程.基于有限元分析的机械零部件设计方法[J].现代制造技术与装备,2025,61(1):37-39.
- [11]王志朋.有限元分析技术在起重机升级改造中的应用[J].工程机械与维修,2024(8):7-9.
- [12]刘洋.基于有限元方法的门式起重机电学特性分析[J].自动化与仪器仪表,2024(2):73-76.
- [13]曹岩.基于有限元的堆垛机立柱结构分析[J].今日制造与升级,2024(12):1-3.
- [14]周斌,曹安港.轻量化双目头戴夜视系统壳体结构可靠性设计[J].半导体光电,2023,44(3):444-449.
- [15]刘勤,姬广振,曹璞琳,等.基于故障物理的复杂机械系统可靠性设计分析技术[J].兵工学报,2022,43(S1):189-195.
- [16]胡昕春,孙宇锋,赵广燕.武器装备可靠性设计保证系数取值方法[J].兵工学报,2021,42(12):2753-2761.

## 教学型全向移动机器人设计与运动控制

孙辉辉<sup>1,2</sup>, 张婷婷<sup>1</sup>, 刘亚军<sup>1,3\*</sup>, 陆博硕<sup>1,3</sup>, 刘锦康<sup>1,3</sup>

1. 淮南师范学院 机械与电气工程学院, 安徽 淮南 232038;
2. 安徽省机器视觉检测与感知重点实验室, 安徽 芜湖 241000;
3. 人机协作机器人安徽省联合共建学科重点实验室, 安徽 淮南 232038)

**摘要:**为解决当前全向移动机器人所面临的结构复杂、成本较高、控制逻辑冗余以及难以适配教学场景等问题,研究设计了一款适用于教学场景的轻量级全向移动机器人,并提出了一种“上层指令解析+下层PID闭环控制”的分层控制架构。仿真与实物实验结果表明,所设计研发的机器人能够稳定地实现直行、横移、旋转及复合运动,PID速度跟踪稳态误差保持在3%以内,控制系统具备良好的高效性与精确性。该研究为机器人技术辅助教学提供了高适配性、低成本的实验平台。

**关键词:**全向移动机器人;PID 双层环控制;教学平台

中图分类号:TP24

文献标识码:A

文章编号:2095-297X(2026)02-0024-08

## Design and Motion Control of Teaching-oriented Omnidirectional Mobile Robot

SUN Huihui<sup>1,3</sup>, ZHANG Tingting<sup>1</sup>, LIU Yajun<sup>1,3\*</sup>, LU Boshuo<sup>1,3</sup>, LIU Jinkang<sup>1,3</sup>

1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Huainan Normal University, Huainan, 232038, Anhui;
2. Anhui Provincial Key Laboratory of Machine Vision Detection and Perception, Wuhu, 241000, Anhui;
3. Anhui Provincial Key Laboratory of Human-Robot Collaboration and Joint Construction, Huainan, 232038, Anhui)

**Abstract:** To address the current issues faced by omnidirectional mobile robots, such as complex structure, high cost, redundant control logic, and difficulty in adapting to teaching scenarios, a lightweight omnidirectional mobile robot suitable for teaching scenarios was designed and developed in this study. A hierarchical control architecture of “top-level command parsing with bottom-level PID closed-loop control” was proposed. Simulation and physical experiments showed that the designed robot can stably perform straight-line movement, lateral movement, rotation, and compound motion. The steady-state error of PID speed tracking is kept within 3%. The control system has good efficiency and accuracy. This research provides a highly adaptable and low-cost experimental platform for robot technology teaching.

**Key words:** omnidirectional mobile robot; PID dual-loop control; teaching platform

全向移动机器人凭借其无需转向即可在平面内实现任意方向移动(包括直行、横移、旋转及复合运动)的独特特性,在工业搬运、教育科研、服务领域等多个场景中得到了广泛应用<sup>[1-3]</sup>。尤其是在教学场景中,全向移动机器人能够为学生提供直观且丰

富的机器人运动控制理论与实践机会,有助于培养学生的工程实践能力和创新思维<sup>[4-6]</sup>。教学型全向移动机器人作为机器人技术教学和实践训练的核心载体,必须满足结构简洁、成本可控、控制逻辑清晰、便于拆装调试以及功能可扩展的特殊需求<sup>[7-10]</sup>。

收稿日期:2025-11-10 \* 通讯联系人

基金项目:淮南师范学院重点教育教学改革研究项目(2024hsjyxm05);淮南师范学院新建专业质量提升项目(2025hszyts01)。

作者简介:孙辉辉(1989-),男,江苏徐州人,副教授,博士;刘亚军(1991-),男,安徽淮南人,讲师,博士。E-mail:liuyajun0803@163.com

然而,当前市场上主流的全向移动机器人产品多面向工业级应用,普遍存在结构复杂、成本高昂、控制逻辑冗余等问题,难以直接适配教学场景的核心需求。例如,部分工业级机器人采用多轴伺服驱动系统与高精度传感器阵列,虽能实现毫米级定位精度,但高昂的硬件成本与复杂的调试流程使其在教学场景中难以推广<sup>[11-13]</sup>;另一些简化版教学机器人则因过度简化机械结构与控制算法,导致运动稳定性不足、功能扩展受限,无法满足机器人技术综合实验的教学要求<sup>[14-16]</sup>。

针对上述问题,提出了一种适用于教学场景的轻量型全向移动机器人设计方案。该方案通过优化机械结构和控制架构,在确保运动性能的基础上,实现了成本和复杂度的双重降低,为机器人技术辅助教学提供了高度适配的实验平台。教学型全向移动机器人采用麦克纳姆轮四轮对称布局,提升了运动灵活性,保持了原理的直观性<sup>[17-20]</sup>;构建了“上层指令解析+下层PID控制”的轻量化架构,有效降低了算法学习门槛;通过模块化设计,实现了硬件成本控制与功能扩展。通过仿真分析与实物实验,验证了该结构设计的合理性与控制算法的准确性,最终打造出兼具理论演示价值与实践操作价值的教学平台。

## 1 机器人结构设计

教学型全向移动机器人的结构设计以“模块化可拆装、参数透明化、成本可控化”为核心原则,围绕机械本体的运动稳定性与硬件系统的教学适配性展开,具体分为机械本体设计、硬件系统设计、实验优化设计三部分<sup>[21]</sup>。

### 1.1 机械本体设计

全向移动机器人机械本体采用模块化布局,主要包括车架、轮系组件与驱动模块,兼顾运动稳定性与教学可操作性。全向移动机器人的结构平台如图1所示。

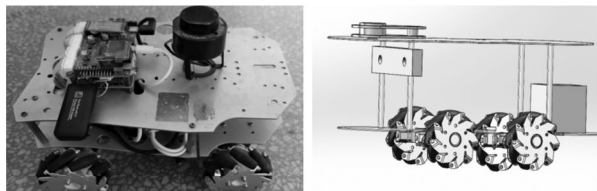


图1 全向移动机器人结构平台

车架结构:选用6061铝合金型材搭建框架,尺寸设计为400 mm × 300 mm × 150 mm,兼顾轻量化与结构强度。车架采用镂空设计,预留传感器安装

接口与电池仓,方便学生扩展避障、定位等功能模块。轮系布局:采用四轮麦克纳姆轮对称布局,前轮与后轮分别向相反方向倾斜45°安装。该布局可通过四车轮的速度合成实现全向运动,结构对称且运动原理直观,适合教学演示与理论推导。麦克纳姆轮选用8英寸聚氨酯材质,兼具减震性与耐磨性,降低了教学场景中的维护成本。驱动模块:每个车轮配置独立的直流减速电机与编码器,减速比1:30,能够满足机器人低速平稳运动需求。编码器分辨率为1000线,实时反馈电机转速,为速度闭环控制提供数据支撑。

### 1.2 硬件系统设计

全向移动机器人硬件系统采用“主控制器+功能模块”的架构,核心组件选型兼顾性价比与教学适配性。机器人主控制器平台是树莓派4B版,如图2所示。智能机器人的全向移动需要各轮的转速和转向的配合,采用搭载STM32的ROS机器人控制板,如图3所示。该控制板集成了STM32核心控制单元,同时提供四路独立编码器电机驱动、四路PWM舵机接口、串行总线舵机、RGB灯条等外设接口,具体参数如表1所示。

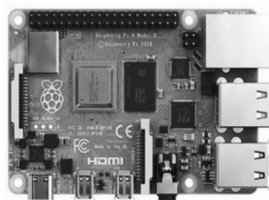


图2 树莓派4B实物图及板载接口

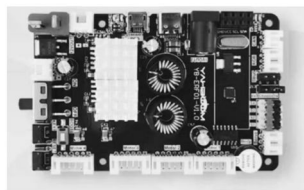


图3 STM32 ROS机器人控制板外观

表1 STM32 ROS机器人控制板参数

| 项目      | 参数            |
|---------|---------------|
| 板载单片机型号 | STM32F103RCT6 |
| 控制板尺寸   | 85 mm × 56 mm |
| 编码器电机   | 支持4路12 V电机    |
| 待机电流    | 约50 mA        |
| 数据接口    | microUSB数据接口  |
| 电机驱动型号  | AM2857驱动芯片*4  |
| 工作电压    | DC 12 V输入     |

产品重量

约 46 g

机器人外部传感器采用思岚 RPLIDAR A1 激光雷达,如图 4 所示。该雷达性能指标如表 2 所示。机器人平台所采用的惯性单元为 MPU6050,该传感器通过 IIC 总线将测得的重力加速度和角速度数据传输至底层控制板。为了满足系统要求,需要对其进行标定,如图 5 所示。



图 4 思岚 RPLIDAR A1 激光雷达

表 2 思岚 RPLIDAR A1 激光雷达性能指标

| 项目     | 单位 | 典型值               | 备注                     |
|--------|----|-------------------|------------------------|
| 测距范围   | 米  | 0.15 - 12         | 基于白色高反光物体测得            |
| 扫描角度   | 度  | 0 - 360           | /                      |
| 测距分辨率  | 毫米 | <0.5<br><实际距离的 1% | 物体在 0.5 m 内<br>全部量程范围内 |
| 角度分辨率  | 度  | ≤1                | 5.5 Hz 扫描时             |
| 单次测距时间 | 毫秒 | 0.5               | /                      |
| 测距扫描频率 | 赫兹 | 4000 ≤ f ≤ 8000   | /                      |
| 角度扫描频率 | 赫兹 | 5.5 - 16          | /                      |

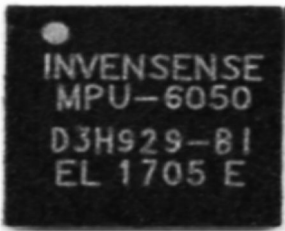


图 5 惯性单元 MPU6050

## 2 运动控制方法架构

教学型全向移动机器人运动控制架构以“易理解、易实现、可扩展”为原则,分为运动学建模、分层式控制架构设计两部分,兼顾理论教学与实践操作。

### 2.1 运动学模型建立

全向移动机器人具有三个自由度,分别是沿着其运动平面的  $X$  和  $Y$  轴进行平移,以及绕垂直于其所在平面的轴进行旋转。由于它是通过关节与地面接触而进行工作,因而要考虑到环境对机器人所产生的影响,即如何使机器人能适应各种复杂情况下的移动要求。为了模拟机器人的运动并确定其在三维空间中的位置和方向,必须构建一个坐标系,如图 6 所示。

如图 6 所示,惯性坐标系表示为  $X_W O_W Y_W$ ,机器人本体坐标系表示为  $x_R O_R y_R$ 。坐标系原点  $O_R$  为机

器人的几何中心,  $x_R$  是机器人运动的前进方向。机器人的位姿可以用元素  $x, y, \varphi$  组成的向量表示,如式(1)所示。其中,  $x, y$  表示机器人在惯性坐标系中的平面位置,  $\varphi$  表示机器人的姿态角度,用来描述机器人本体坐标系  $x_R$  和惯性坐标系  $X_W$  轴之间的夹角,从而描述机器人的运动方向。

$$\xi = [x \quad y \quad \varphi]^T \quad (1)$$

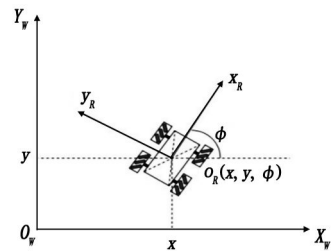


图 6 惯性坐标系与机器人局部坐标

通常情况下,采用一个正交旋转矩阵来映射机器人在惯性坐标系中的运动以及机器人身体在坐标系中的运动。如果要使机器人能够以任意精度地完成的话,必须把这两个转动变换到相同的轴上。该正交旋转矩阵可表示为如下  $3 \times 3$  矩阵:

$$R(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

在此矩阵中,  $\varphi$  是机器人所处位置的角度。利用这一变换可使一个给定位置和姿态下的关节转角得到精确估计。该矩阵实现了将机器人在惯性坐标系中的坐标转换为机器人原坐标系中的坐标,并详细描述了机器人在固定坐标系中的运动轨迹。即:

$$\xi_R = \mathbf{R}(\varphi)\xi = \begin{pmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ \varphi \end{bmatrix} \quad (3)$$

为了便于分析,建立机器人的运动学模型之前,作如下假设:(1)机器人、全向轮均为刚体,机器人运动局限在平面上;(2)全向轮的厚度暂忽略不计;(3)机器人运动过程中,轮子与接触面不产生相对滑动,从动轮、主动轮只发生纯滚动;(4)机器人底盘重心在电机轴线中心上,各个全向轮的中心在同一分布圆上。接着将针对逆运动学求解进行分析和计算。此处,我们将底盘的运动状态合并到中心点处,将A、B、C、D四个轮子分别编号为1、2、3、4,如图7所示的关系图:

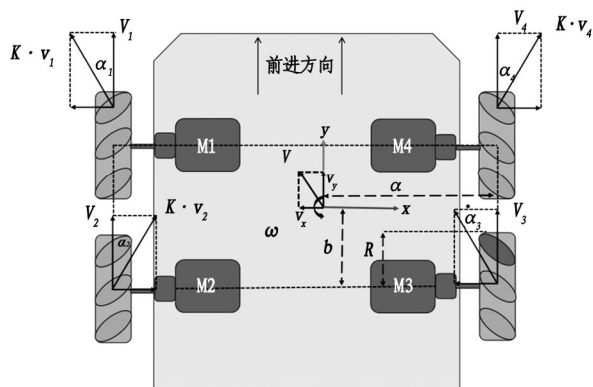


图7 全向移动机器人分析模型

给定  $xoy$  坐标系如图7所示,其中  $y$  轴的正方向表示机器人向正前方运动,  $x$  轴的正方向表示机器人向正右方运动。所有与  $x$  轴、 $y$  轴正方向同向的量的符号都为正,反之则为负,所有的角度旋转方向的定义遵循右手定则,则底盘的中心点运动情况可以分解为中心点沿  $x$  方向运动的速度,沿  $y$  轴方向运动的速度和绕中心点旋转的角速度为:  $(v_x, v_y, \omega)$ ,  $v_x = v\sin\varphi$ ,  $v_y = v\cos\varphi$ 。

以M1电机带动的轮子的运动情况为例,求解中心点的运动状态与四个轮子的运动状态之间的关系。对于该轮子来说,电机可以控制它向前后反向旋转,同时,由于麦克纳姆轮的特性,它在前后运动时也会同时向侧向移动,在向前运动的时候也同时向左运动,向后运动的时候也同时向右运动,而且侧向运动的速度与前后运动的速度有一定的比例关

系,这里我们假设轮子向前运动,速度为  $V_1$ ,则其向前运动的速度和侧向运动的速度合成为一个速度  $kV_1$ 。由于中心点的运动状态与四个轮子的运动状态为线性关系,因此有等式:

$$\begin{cases} v_i + kv_i\cos\alpha_i = v_y + \alpha_i\omega \\ kv_i\sin\alpha_i = v_x + b_i\omega \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $\alpha_i$  代表轮毂和辍子之间的夹角,  $i$  为轮子的编号,  $i=1,2,3,4$ 。

将公式(4)变换形式可以推导出:

$$\tan\alpha_i = \frac{kv_i\sin\alpha_i}{kv_i\cos\alpha_i} = \frac{v_x + b_i\omega}{-v_i + v_y + \alpha_i\omega} \quad (5)$$

再次变换可以得到:

$$v_i = v_y + \alpha_i\omega - \frac{v_x + b_i\omega}{\tan\alpha_i} \quad (6)$$

对于移动机器人的麦克纳姆轮来说,其侧向角度为45度,因此在  $xoy$  构成的坐标系中,有:

$$\begin{cases} a_i: \{a_i, -a_i, -a_i, a_i\} \\ b_i: \{b_i, -b_i, -b_i, b_i\} \\ \alpha_i: \{\frac{\pi}{4}, -\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}, -\frac{\pi}{4}\} \\ \tan\alpha_i: \{1, -1, 1, -1\} \end{cases} \quad (7)$$

然后可以得到:

$$\begin{cases} v_1 = v_y - v_x + a\omega + b\omega \\ v_2 = v_y + v_x - a\omega - b\omega \\ v_3 = v_y - v_x - a\omega - b\omega \\ v_4 = v_y + v_x + a\omega + b\omega \end{cases} \quad (8)$$

最后,可以得到四个轮子的转动速度与中心点的运动状态的关系为:

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} -1 & 1 & (a+b) \\ 1 & 1 & -(a+b) \\ -1 & 1 & -(a+b) \\ 1 & 1 & (a+b) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} \quad (9)$$

所以当已知机器人底盘的基本尺寸  $a$  和  $b$  的大小以及4个轮子的半径  $R$  时,就可以通过中心点的运动状态来计算各个轮子的转动速度了。

## 2.2 分层式控制架构

全向移动机器人控制系统设计为“上层指令解析+下层电机控制”的分层式架构,简化控制逻辑,便于学生分模块学习与调试。

首先是上层指令解析模块:接收用户输入的期望运动指令(如直行速度、横移速度、旋转角速度),通过运动学逆解算法,将期望运动状态分解为四个车轮的目标速度。同时,该模块可接收传感器避障信号,对运动指令进行修正(如遇到障碍物时自动

减速或停止)。

定义机器人直行速度  $v_x$ 、横移速度  $v_y$ 、旋转角速度  $\omega$ 、车轮目标速度为:  $v_{i,\text{ref}}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ , 分别表示左前、右前、右后、左后)

$$\begin{cases} v_{1,\text{ref}} = v_x - v_y - \omega(L + W) \\ v_{2,\text{ref}} = v_x + v_y + \omega(L + W) \\ v_{3,\text{ref}} = v_x + v_y - \omega(L + W) \\ v_{4,\text{ref}} = v_x - v_y + \omega(L + W) \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $L$ 、 $W$  分别为平台轮距、轴距的一半。

其次是下层电机控制模块: 采用 PID 控制算法实现电机速度闭环控制。通过编码器采集电机的实际转速, 与目标速度进行对比, 计算速度偏差, 再通过 PID 调节输出 PWM 信号, 控制电机转速跟踪目标值。PID 参数(比例系数  $K_p$ 、积分系数  $K_i$ 、微分系数  $K_d$ ) 可通过教学实验中的调试过程确定, 帮助学生理解闭环控制原理。

车轮线速度转电机转速( $r$  为车轮半径):

$$n_{\text{ref}} = \frac{60v_{i,\text{ref}}}{2\pi r} \quad (11)$$

编码器算实际转速( $P$  为编码器每转脉冲数,  $\Delta N$  为采样周期  $T_s$  内的脉冲数):

$$n_{\text{act}} = \frac{60\Delta N}{P \cdot T_s} \quad (12)$$

PID 控制( $e = n_{\text{ref}} - n_{\text{act}}$  为偏差):

$$U = K_p e + K_i \sum e \cdot T_s + K_d \frac{e_k - e_{k-1}}{T_s} \quad (13)$$

PWM 限幅(驱动电机用):

$$U_{\text{PWM}} = \begin{cases} 100\% & U \geq 100\% \\ U & -100\% < U < 100\% \\ -100\% & U \leq -100\% \end{cases} \quad (14)$$

### 3 仿真实验

为验证机器人结构设计的合理性与运动控制的有效性, 分别开展 ROS 仿真分析与实物试验测试, 测试内容覆盖核心运动功能与控制性能。机器人运动仿真实验环境如图 8 所示。

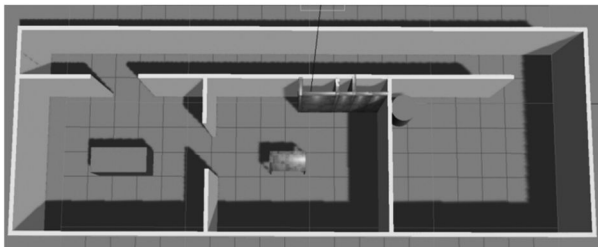


图 8 机器人运动仿真实验环境

### 3.1 仿真地图的建立

为了实现机器人的实时定位和映射, 仿真实验中利用传感器数据进行采样, 通过对这些采样值计算距离、角度等参量, 从而得到当前时刻机器人所处的状态以及相应的空间坐标。在机器人的 SLAM 过程中, A 是与物体碰撞的激光点所呈现的边界信息, B 代表了激光雷达扫描所产生的环境特征, C 代表了雷达未扫描的区域, D 则代表了障碍物和墙壁的边界。通过对这些图像进行处理, 得到相应的二维点云数据集。机器人被安置于起始位置(见图 9(a)), 以控制其在房间内的移动, 并利用激光雷达对整个房间进行扫描(见图 9(b)和图 9(c)), 最终完成扫描并生成地图(见图 9(d))。

上述机器人环境地图构建主要依赖于概率栅格地图与同步定位与建图(SLAM)算法的结合。概率栅格地图将环境离散化为若干栅格, 每个栅格赋予一个占用概率值, 通过贝叶斯更新规则融合多帧激光数据, 逐步估计各栅格的占用状态。同时, SLAM 算法通过扩展卡尔曼滤波(EKF-SLAM)或粒子滤波(如 FastSLAM)实现对机器人位姿与环境地图的联合估计。在本次仿真中, 系统通过激光点云的匹配与优化, 在定位的同时完成了环境地图的同步构建。上述过程可表述为:

$$P(m | z_{1:t}, x_{1:t}) = \prod_i P(m_i | z_{1:t}, x_{1:t}) \quad (15)$$

其中:  $m$  表示地图,  $m_i$  为第  $i$  个栅格,  $z_{1:t}$  为从时刻 1 到时刻  $t$  的观测数据,  $x_{1:t}$  为机器人轨迹。通过激光雷达的测距模型, 将观测数据转化为栅格概率更新, 逐步区分出自由区域、障碍区域及未知区域。

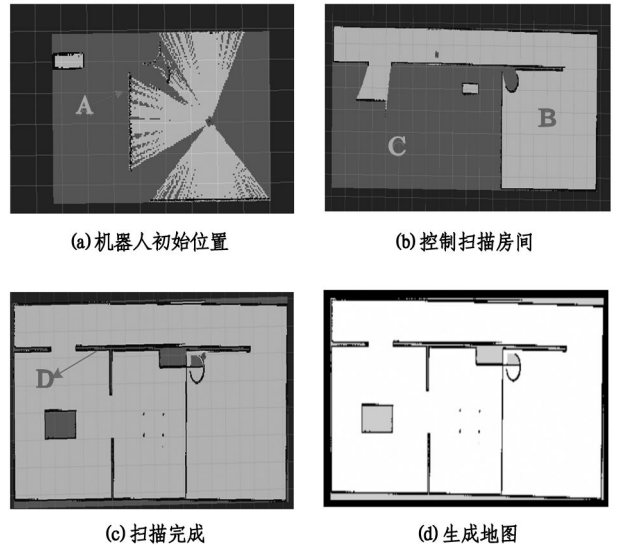


图 9 机器人 SLAM 扫描过程

### 3.2 路径规划

仿真地图建立后,在仿真环境中对机器人的运动控制能力进行分析。本实验首先基于已构建的静态地图进行全局路径规划,生成一条参考轨迹;随后在机器人沿该轨迹运动过程中,通过局部规划器实时处理激光雷达检测到的未知或动态障碍,进而实现对机器人安全、平滑的运动控制。如图 10 所示。

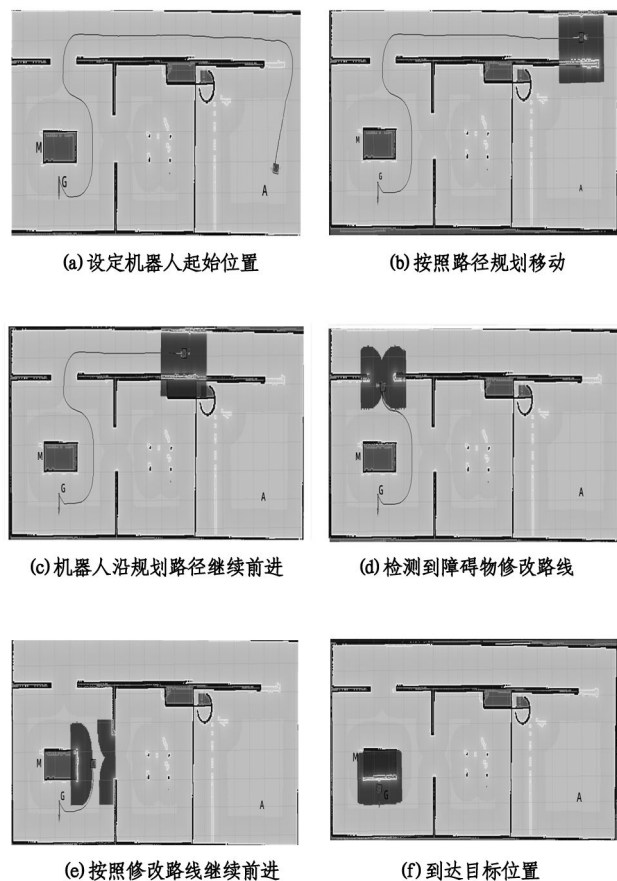


图 10 有固定障碍物情况下的路径规划

由图 10 可知,机器人起始位置与目标点 A 之间存在一条预设的路径,但在路径中段设置了固定障碍物 M。图 10(b) 显示机器人启动后按照全局路径规划开始移动,初始阶段沿直线向目标点行进。当机器人运动至图 10(c) 所示位置时,其搭载的激光雷达传感器检测到前方障碍物 M 的存在,此时局部路径规划模块立即触发避障机制。从图 10(d) 可以观察到,机器人在接近障碍物约 0.5 m 处停止前进,并重新规划局部路径,原有的轮廓虚线局部路径在障碍物前方发生明显偏转,形成一条绕过障碍物左侧的新轨迹。随后在图 10(e) 中,机器人按照修改后的路径向右侧调整方向,成功避开障碍物后继续向目标点移动,运动过程中速度保持稳定,未出现明显震荡或停滞。最终在图 10(f) 中,机器人准确

到达目标位置,整个避障过程耗时约 8 s,路径偏移量控制在 0.2 m 以内,验证了运动控制模型在动态障碍物环境下的实时响应能力和轨迹修正精度。

### 4 实物实验

为了继续验证运控控制模型在现实环境中的有效性,在平整地面搭建 1.5 m × 2 m 实验场地,标记起始点 O 与目标点(直行终点 A、横移终点 B)如图 11 所示。

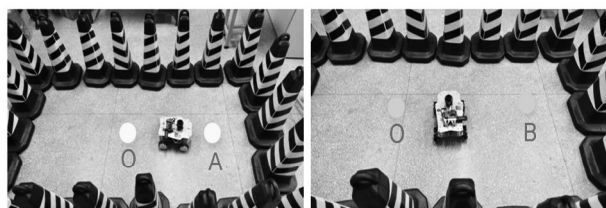


图 11 实物实验场地

机器人初始化:将机器人置于起始点 O,校准编码器与姿态传感器,确保 PID 参数加载完成。

分场景测试:直行测试发送指令  $v_x = 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $v_y = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $\omega = 0 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ,控制机器人沿 OA 方向直行,到达目标区域后停止。横移测试发送指令  $v_x = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $v_y = 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $\omega = 0 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ,控制机器人沿 OB 方向横移,到达目标区域后停止。旋转测试发送指令  $v_x = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $v_y = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $\omega = 0.5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ,控制机器人绕几何中心旋转  $90^\circ$  后停止。复合运动测试发送指令  $v_x = 0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $v_y = 0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $\omega = 0.3 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ,控制机器人完成“直行 + 横移 + 旋转”复合运动。不同运动类型平均速度对比如图 12 所示。

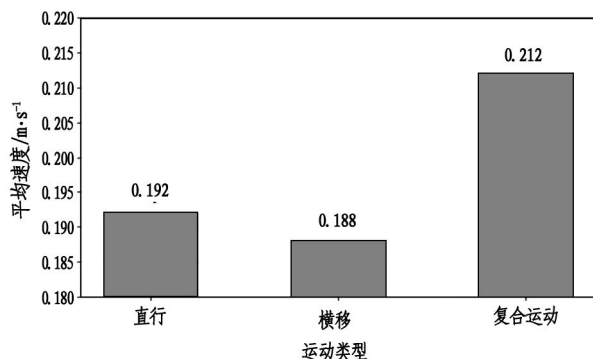


图 12 不同运动类型平均速度对比

由图 12 可知,机器人具备良好的全向运动性能,能够精准达成直行、横移、旋转及复合运动。在复合运动模式下,机器人平均速度达到最高值,为  $0.212 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;直行模式平均速度为  $0.192 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;

横移模式平均速度最低,为  $0.188 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。其运动过程平稳,无卡顿现象,能够满足教学中对运动学原理验证的需求。

数据采集:每场景重复测试 5 次,用激光测距仪记录实际位移,角度仪记录旋转角度,秒表记录运动时间。实验结果如图 13 至图 15 所示。

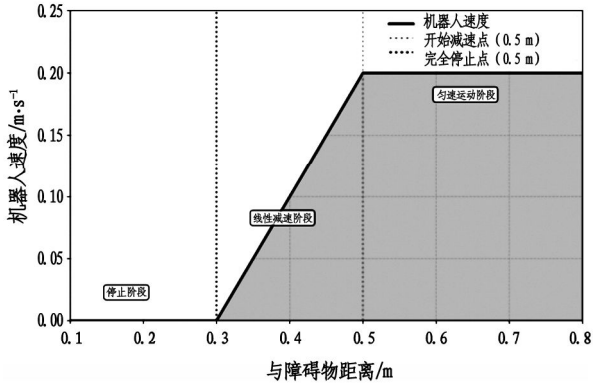


图 13 避障响应速度 - 距离曲线

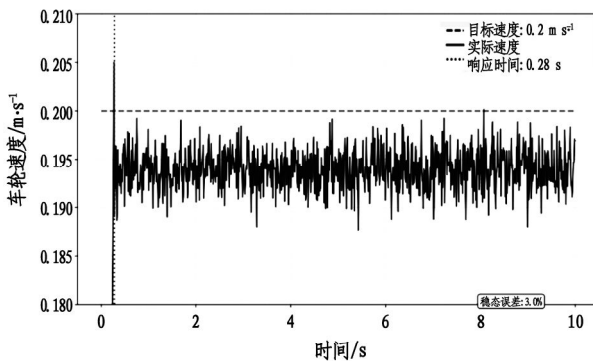


图 14 PID 速度闭环控制跟踪曲线(目标速度  $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

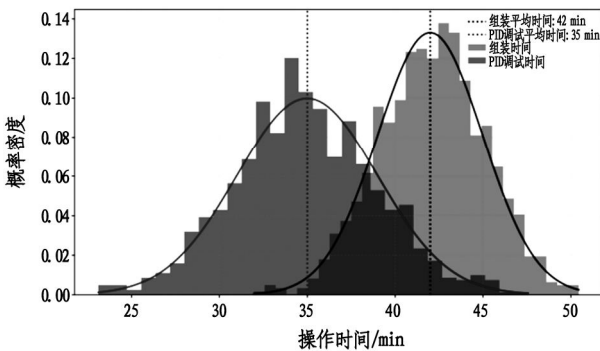


图 15 学生操作时间分布曲线

由图 13 的避障响应速度 - 距离曲线可知,当遭遇障碍物时,机器人能够在较短时间内对障碍物作出响应。在距离障碍物 0.5 m 时,机器人开始减速;至距离障碍物 0.3 m 时,其速度已显著降低,平均响应时间  $\leq 0.21 \text{ s}$ 。停止时,机器人与障碍物保持安全距离 ( $\geq 0.2 \text{ m}$ ),功能可靠性满足基础教学实验

要求,可有效避免碰撞,保障机器人运行安全。通过对图 14 的 PID 速度跟踪曲线进行分析,发现电机转速控制精度较高,实际转速与目标转速的偏差控制在  $\pm 3\%$  以内,响应时间  $\leq 0.32 \text{ s}$ ,超调量  $\leq 3.5\%$ ,闭环控制效果稳定。这一特性适合学生理解闭环控制思想,同时验证了双层 PID 控制算法的有效性。由图 15 中的学生操作时间分布曲线能够看出,85% 的测试者可在 77 分钟内完成基础组装和调试,90% 的学生可独立完成基础编程。这表明分层式控制架构降低了操作复杂度,模块化设计显著提高了教学效率,为后续复杂场景实验预留了充足时间,适用于本科教学的实践训练场景。

## 5 结论

本研究设计了一款面向教学场景的全向移动机器人,通过模块化结构与分层式运动控制架构,实现了结构简洁性、控制易实现性与教学适用性的有效融合。在结构设计方面,采用麦克纳姆轮四轮对称布局,并配备树莓派 4B 主控制器与 STM32 控制板,既保证了系统计算资源的充足性,又实现了成本的合理管控,有助于学生进行拆卸、组装及功能拓展操作。在运动控制领域,基于麦克纳姆轮全向机器人的运动学模型,构建了“上层指令解析 + 下层 PID 速度控制”的架构,简化了控制逻辑,使机器人能够精确实现直行、横移、旋转等全向运动。通过多组仿真实验与实物测试,结果表明,该机器人具有较高的速度跟踪精度、避障响应快速,且组装调试便捷,能够充分满足机器人技术教学中的理论验证与实践训练需求。

## 参考文献:

- [1] 于腾,赵连玉. 可变形全向移动机器人的自适应鲁棒 PID 控制研究[J]. 天津理工大学学报,2024,40(6):21-28.
- [2] AL-JODAH A,ABBAS S J,HASAN A F, et al. PSO-based optimized neural network PID control approach for a four wheeled omnidirectional mobile robot[J]. International Review of Applied Sciences and Engineering, 2023, 14(1): 58-67.
- [3] 林叶贵,戴志坚,何德峰,等. 具有速度突变抑制的全向移动机器人视觉伺服预测控制[J]. 计算机科学,2024, 51(S02):53-58.
- [4] 吴蕊,李振华,蔡宇鑫. 基于 ROS 的视觉导航机器人设计[J]. 物联网技术,2025,15(12):74-77.
- [5] 唐英,张靖,吴官政. 全向轮式分拣装置货物移动轨迹模块化设计[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),

2024,47(9):1153-1158.

- [6] 阮学云,陈迎冬,龚莹,等. 基于全向轮的无人供包装置设计与研究[J]. 机械设计,2024,41(5):115-120.
- [7] 苑朝,张耀,赵亚冬,等. 基于全向轮的排管电缆巡检机器人建模及仿真[J]. 系统仿真学报,2024,36(9):2100-2112.
- [8] 章志凯. 面向恶劣工况的重载全向轮式移动机器人关键技术研究[D]. 苏州:苏州大学,2023.
- [9] 简傲,闵华松,黄文晖. 三轮全向移动机器人里程计在线校正方法研究[J]. 机床与液压,2022,50(3):1-9.
- [10] 李硕,汪伟. 多全向轮协同分拣平台的路径规划[J]. 系统仿真学报,2021,33(3):698-709.
- [11] 刘葵,池明,毛焕滔,等. 基于强化学习的多机器人路径规划虚实结合实验平台设计[J]. 实验技术与管理,2025(10):114-121.
- [12] 孙曾辉,朱华炳,张涛,等. 基于 ROS2 的矿山环境下阿克曼 AGV 机器人的设计及控制[J]. 机床与液压,2025,53(9):8-15.
- [13] 古训,孙阔梅,沈丽东,等. 基于 ROS 的空地协同智能消防系统设计与实现[J]. 消防科学与技术,2025,44(3):388-395.
- [14] 杨洛辰,陈思鲁,肖峥,等. 带有解耦式主动脚轮的全向移动机器人模型预测控制[J]. 机械制造,2025,63(9):39-44.
- [15] 张海鹏. 基于多源视觉融合的移动机器人研发[D]. 邯郸:河北工程大学,2025.
- [16] 段俊帅. 安全避障和性能约束下的移动机器人编队控制研究[D]. 广州:广州大学,2025.
- [17] 王国华,李政霖,龚丹宇,等. 专利视角下全向移动机器人技术趋势研究[J]. 中国发明与专利,2025,22(4):30-38.
- [18] 鹿昆磊,韩振浩,朱立成,等. 可变轮轴距全向移动大田作物表型信息获取机器人底盘设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(3):27-38.
- [19] 陈诗苹,李星虹,宋华. 警用全向移动机器人底盘设计及应用[J]. 科技与创新,2025(3):62-65.
- [20] 张振. 麦克纳姆轮移动机器人局部路径规划与跟踪控制研究[D]. 杭州:浙江科技大学,2024.
- [21] 郑素娟. 面向服务机器人的全向移动底盘结构设计[J]. 机器人技术与应用,2024(5):48-53.

责任编辑:李云

(上接第 12 页)

## 参考文献:

- [1] 李国琿,张丽娟,赵军,等. 再生陶粒混凝土高温后力学性能研究[J]. 混凝土,2025(7):180-184,191.
- [2] 马加涛,高立堂,赵长勇,等. 高温后纤维混凝土钢筋黏结性能试验研究[J]. 四川建筑科学研究,2025,51(3):73-81,98.
- [3] 田帅帅,陶俊林. 钢纤维陶瓷骨料混凝土高温后静态劈拉性能研究[J]. 新型建筑材料,2023,50(3):1-6.
- [4] 周浩南. 高温后聚丙烯纤维混凝土粘结性能试验研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2023:45-46.
- [5] 许昊,王晓磊,刘历波. 高温后玄武岩纤维混凝土抗压强度与孔隙结构变化规律研究[J]. 粉煤灰综合利用,2024,38(1):77-81,87.
- [6] 冉秋硕,徐泽辉,齐文超,等. 高温后钢-玄武岩混杂纤维混凝土动态力学性能研究[J]. 硅酸盐通报,2025,44(1):69-80.
- [7] 罗伊明. 混杂纤维增强超高性能混凝土的高温性能多尺度研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2024:34-35.
- [8] 蒋迎. 高温混凝土力学性能研究综述[C]//北京力学学会,天津市力学学会,山东省力学学会,等. 第二十届北方七省市力学学会学术会议论文集. 焦作:河南理工大学土木工程学院,2025:63-68.
- [9] 王鑫. 碳纤维掺量对混凝土耐火性能的影响研究[J]. 水利科学与寒区工程,2025,8(9):10-13.
- [10] 李焱龙. 钢-玄武岩纤维增强超高性能地聚物混凝土高温后力学性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2024:45-46.
- [11] 罗伊明,张博,刘彦钰,等. 混杂纤维增强超高性能混凝土的高温性能试验研究[J]. 硅酸盐通报,2024,43(3):825-832.
- [12] 徐冬梅. 高温条件下玄武岩纤维混凝土性能研究[J]. 建筑与预算,2024(2):67-69.
- [13] 戎虎仁,王海龙,褚少辉,等. 高温作用下不同掺量玄武岩纤维混凝土力学性能研究[J]. 粉煤灰综合利用,2020,34(1):56-60.
- [14] 彭帅,李亮,吴俊,等. 高温条件下钢纤维混凝土动态抗压性能试验研究[J]. 振动与冲击,2019,38(22):149-154.

责任编辑:李云

# 矢量推进轴系纵向振动分析与模糊自适应 PID 控制

陈征宇\*, 王波, 佟默, 苏金文

(滁州学院 机械与电气工程学院, 安徽 滁州 239000)

**摘要:** 针对矢量推进轴系 (VPSS) 建立纵向振动数学模型, 模型考虑了扭转变形、螺旋桨交变推力与扭矩、电机扭矩波动等因素。分析了不同工作角速度条件下的纵向动力学响应特性, 提出将模糊自适应 PID 控制方法用于降低纵向振动幅值, 并将其引入系统动力学方程进行控制仿真。结果表明, 该控制方法使 VPSS 纵向振动抑制率超过 40%, 有效提升了系统运行的稳定性和安全性。

**关键词:** 矢量推进轴系; 螺旋桨; 纵向振动; 模糊自适应 PID

中图分类号: U664.21; TH113.1

文献标识码: A

文章编号: 2095-297X(2026)02-0032-11

## Longitudinal Vibration Analysis of Vector Propulsion Shaft System and Fuzzy Adaptive PID Control

CHEN Zhengyu\*, WANG Bo, TONG Mo, SU Jinwen

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Chuzhou University, Chuzhou, 239000, Anhui)

**Abstract:** A longitudinal vibration model for the vector propulsion shaft system (VPSS) was established, in which torsional deformation, alternating propeller thrust, torque, and motor torque fluctuations were incorporated. The longitudinal dynamic response characteristics at various operating angular velocities were analyzed, and a fuzzy adaptive PID control strategy was proposed and integrated into the system dynamic equations for control simulation. The simulation results showed that the longitudinal vibration amplitude of the VPSS was reduced by more than 40%, and the operational stability and safety of the system were effectively enhanced.

**Key words:** vector propulsion shaft system; propeller; longitudinal vibration; fuzzy adaptive PID

当今海洋作为资源丰富但未得到充分开发的领域, 正逐渐成为全球关注的焦点。水下航行器作为海洋资源勘探与开发的重要装备, 其安全性、可靠性以及其他性能指标在航行过程中受到了广泛关注, 其中, 推进系统的稳定性与可靠性尤为关键, 直接关系到航行器的作业效率与运行安全。作为水下航行器动力装置的核心组成部分, 矢量推进轴系在推进系统中发挥着至关重要的作用。该轴系主要由电机输出端法兰、传动轴、轴承以及万向节联轴器等关键部件构成, 负责将电机输出的动力高效传递至螺旋桨, 以确保水下航行器的稳定推进与精确操控。

在早期航海事故中, 由于推进轴系纵振诱发的

问题并不多见, 因此, 该方面研究相对较少。然而, 随着推进系统设计的复杂化, 纵向振动逐渐受到重视。李渊博等<sup>[1]</sup>建立桨-轴-艇耦合系统纵向振动动力学模型, 研究了螺旋桨激励下推进轴系纵向振动响应机理。刘义峰等<sup>[2]</sup>为了准确预测推进轴系纵向振动的固有频率, 开发了预报软件, 并通过该软件研究了不同结构参数对振动的影响。上述研究结果表明, 轴系纵振固有特性的主要影响参数包括曲拐半径、曲臂厚度、推力轴承刚度以及材料的弹性模量。Zhang 等<sup>[3]</sup>通过解析法建立了壳体与轴系的纵向振动模型, 综合考虑螺旋桨和壳体上的外部激励, 系统分析了耦合效应、流体载荷及轴承刚度等因

素对轴系纵向振动的影响。结果表明,低频激励下,壳与轴系耦合效应最为明显。Chu 等<sup>[4]</sup>搭建了测试台,系统分析了静态推力和动态推力对推进轴系纵向振动的作用,并给出了力传递率的定量结果。

在深入研究推进轴系振动特征的基础上,一些学者逐步将研究重点转向振动控制,致力于开发高效的控制策略,以减少振动对系统性能和结构安全可能造成的破坏性影响。黄修长等<sup>[5]</sup>设计了一款负刚度动力吸振推力轴承,并开展不同转速、静推力和负刚度下的振动响应试验,结果表明能够有效抑制推进轴系的纵向振动。韩金昌等<sup>[6]</sup>提出了一种采用电磁轴承支承的推进轴系结构,可有效抑制变刚度推进轴系纵向振动。Duan 等<sup>[7]</sup>基于 PST 开发了一种自适应前馈控制算法,并用实验的方式验证了此算法能有效抑制轴系的横向振动。Chen 等<sup>[8]</sup>基于主动抗扰控制提出了一种多变量解耦控制,用于抑制轴系扭转振动的幅值,提高系统的稳定性。

已有研究对推进轴系的振动问题进行了广泛探讨,但多集中于直线轴系,而对含万向节连接的复杂轴系关注不足。同时,现有纵向振动模型普遍忽略了扭转变形的影响。在此基础上,本研究以矢量推进轴系(VPSS)为对象,建立了纵向振动的集中质量简化模型,并系统引入扭转效应、螺旋桨交变推力与扭矩以及电机扭矩波动等关键外部激励因素,分析不同角速度条件下 VPSS 的纵向振动响应及其演化

规律。为抑制过大振动引发的疲劳破坏,本研究进一步提出并验证了一种模糊自适应 PID 控制方法,以有效降低 VPSS 的纵向振幅并提升系统运行的稳定性与安全性。

## 1 运动性能分析

本研究将具有准等角速传动特点的新型三叉式万向节应用到 VPSS 系统中。为了验证新型三叉式万向节在 VPSS 系统中的结构优越性,首先对传统十字轴万向节和新型三叉式万向节的瞬时传动比及附加力矩系数进行对比分析,为新型三叉式万向节在 VPSS 系统中的成功应用提供理论依据。

### 1.1 瞬时传动比分析

传统十字轴万向节的输入轴和输出轴之间的瞬时传动比<sup>[9]</sup>可表示为:

$$i_1 = \frac{\dot{\theta}_3}{\dot{\theta}_2} = \frac{\cos\beta}{1 - \sin^2\beta\cos^2\theta_2} \quad (1)$$

新型三叉式万向节的输入轴和输出轴之间的瞬时传动比<sup>[10]</sup>可表示为:

$$i_2 = \frac{\dot{\theta}_3}{\dot{\theta}_2} = 1 - \frac{3R}{2L_3}\tan\beta\tan^2\frac{\beta}{2}\sin 3\theta_2 \quad (2)$$

其中: $\dot{\theta}_2$  为输入轴角速度; $\dot{\theta}_3$  为输出轴角速度; $\theta_2$  取值为  $0^\circ$  至  $360^\circ$ ; $\beta$  为工作轴线夹角,取值为  $0^\circ$  至  $30^\circ$ , $R$  和  $L_3$  的取值见表 1。

表 1 振动模型的参数

| 参数说明   | 数值                 | 参数说明  | 数值                    |
|--|--------------------|---|-----------------------|
| 法兰 - 输入端转动惯量 $J_1/\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$                         | $9 \times 10^{-3}$ | 输出轴 - 螺旋桨转动惯量 $J_4/\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$                             | $3.65 \times 10^{-2}$ |
| 三叉式万向节转动惯量 I $J_2/\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$                         | $1 \times 10^{-3}$ | 三叉式万向节转动惯量 II $J_3/\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$                             | $1 \times 10^{-3}$    |
| 法兰 - 输入轴扭转刚度 $k_1/\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$         | 48000              | 输入轴扭转刚度 $k_2/\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$                   | 45000                 |
| 输出轴扭转刚度 $k_3/\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$              | 46000              | 法兰 - 输入轴阻尼 $c_1/\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$ | 0.05                  |
| 输入轴阻尼 $c_2/\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$ | 0.05               | 输出轴阻尼 $c_3/\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$      | 0.05                  |
| 法兰 - 输入轴 $m_1/\text{kg}$   | 18                 | 三叉式万向节 II $m_3/\text{kg}$   | 1.08                  |
| 三叉式万向节 I $m_2/\text{kg}$   | 1.08               | 输出轴 - 螺旋桨 $m_4/\text{kg}$   | 23.96                 |
| 法兰 - 输入轴的刚度 $k_1/\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$                           | $3.86 \times 10^8$ | 输入轴的刚度 $k_2/\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$                                     | $3.71 \times 10^8$    |
| 轴承 I 的刚度 $k_5/\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$                              | $3 \times 10^6$    | 轴承 II 的刚度 $k_6/\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$                                  | $3 \times 10^6$       |
| 阻尼系数 $c_1/\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$                   | 1333.67            | 阻尼系数 $c_2/\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$                        | 320.27                |
| 阻尼系数 $c_4/\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$                   | 15                 | 轴承 I 的阻尼 $c_5/\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$                    | 0.9                   |
| 三叉式万向节内部刚性体的刚度 $k_3/\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$                        | $1.0 \times 10^7$  | 三叉式万向节内部刚性体的阻尼系数 $c_3/\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$            | 52.58                 |
| 输出轴的刚度 $k_4/\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$                                | $3.82 \times 10^8$ | 轴承 II 的阻尼系数 $c_6/\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$                 | 1.198                 |
| 三叉式万向节半径 $R/m$   | 0.035              | 输出轴长度 $L_3/m$   | 1.06                  |

传统十字轴万向节瞬时传动比随工作轴线夹角 $\beta$ 和输入轴转角的变化曲线如图1(a)所示。由图1(a)可知,当 $\beta$ 为 $15^\circ$ 时,传统十字轴的传动比变化量在 $\pm 0.03$ 以内,当 $\beta$ 增大到 $30^\circ$ 时,其传动比变化量在 $\pm 0.13$ 以内。图1(b)为新型三叉式万向节瞬时传动比随工作轴线夹角 $\beta$ 和输入轴转角的变化曲线。其中,当 $\beta$ 为 $15^\circ$ 时,其传动比变化量在 $\pm 5.4 \times 10^{-4}$ 以内,与传统十字轴万向节相比降低了98.20%,当 $\beta$ 增大到 $30^\circ$ 时,三叉式万向节的瞬时传动比变化量在 $\pm 3.9 \times 10^{-3}$ 以内,与传统十字轴万向节相比降低了96.46%,验证了新型三叉式万向节具有准等角速传动的特点。

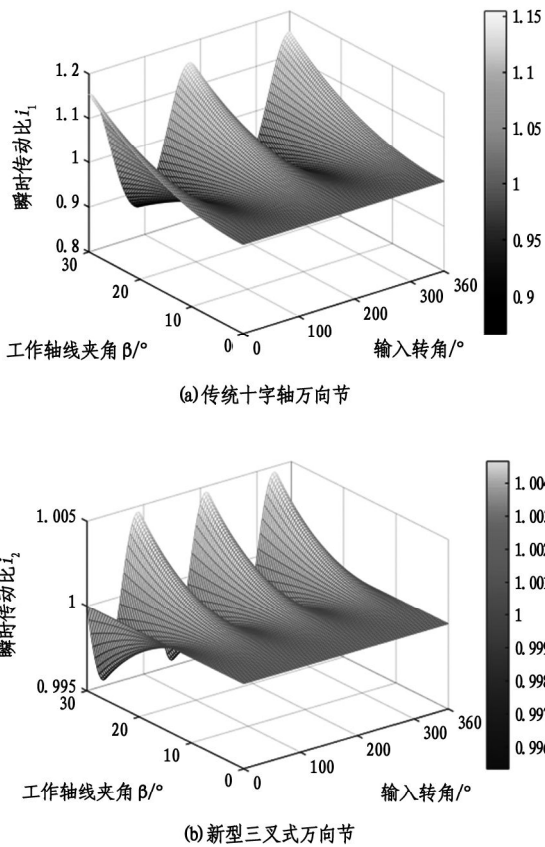


图1 瞬时传动比值的变化趋势

## 1.2 附加力矩系数分析

传统十字轴万向节接头处产生的附加力矩<sup>[9]</sup>可表示为:

$$\Delta T_1 = \left(1 - \frac{1 - \sin^2 \beta \sin^2 \theta_2}{\cos \beta}\right) T = n_1 T \quad (3)$$

新型三叉式万向节接头处产生的附加力矩<sup>[10]</sup>可表示为:

$$\Delta T_2 = \left(1 - \frac{2L_3}{2L_3 - 3R \tan^2 \frac{\beta}{2} \tan \beta \cos 3\theta_2}\right) T = n_2 T \quad (4)$$

其中: $n_1$ 和 $n_2$ 均为附加力矩系数, $T$ 为输入端的恒定扭矩; $\theta_2$ 、 $\beta$ 、 $R$ 、 $L_3$ 取值同贵公式(2)。

图2(a)为传统十字轴万向节的附加力矩系数 $n_1$ 随工作轴线夹角 $\beta$ 和输入轴转角的变化曲线。由图可知,附加力矩系数 $n_1$ 随 $\beta$ 的增大而逐渐增大。当 $\beta$ 为 $15^\circ$ 时,力矩系数 $n_1$ 最大值为0.059,当 $\beta$ 继续增大到 $30^\circ$ 时,力矩系数 $n_1$ 最大值为1.33。图2(b)为新型三叉式万向节的附加力矩系数 $n_2$ 随工作轴线夹角 $\beta$ 和输入轴转角的变化曲线。对比图2(a)可知,附加力矩系数 $n_2$ 的变化趋势与传统十字轴万向节类似。当 $\beta$ 为 $15^\circ$ 时,力矩系数 $n_2$ 最大值仅为 $4.5 \times 10^{-4}$ ,与传统十字轴万向节相比降低了99.23%。当 $\beta$ 继续增大到 $30^\circ$ 时,力矩系数 $n_2$ 最大值为 $2.0 \times 10^{-3}$ ,与传统十字轴万向节相比降低了99.84%。

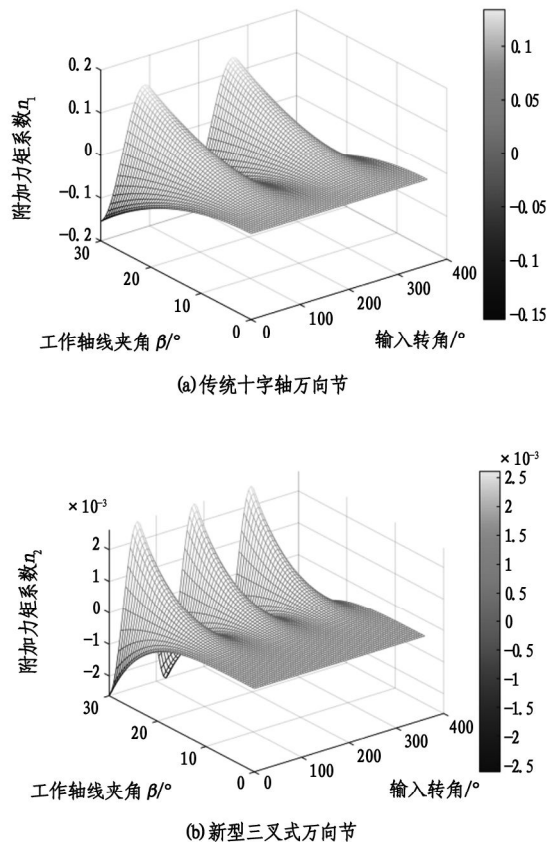


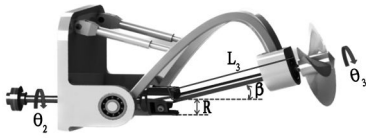
图2 附加力矩系数值的变化趋势

综上所述,新型三叉式万向节在工作轴线夹角 $\beta$ 为 $30^\circ$ 以内,其运动性能和力学性能均优于传统十字轴万向节。因此本研究将新型三叉式万向节应用于VPSS中,并分析其振动特性。

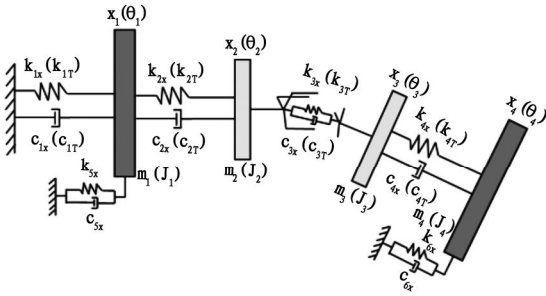
## 2 VPSS 动力学模型的建立

### 2.1 系统描述

VPSS 主要由输入轴、新型三叉式万向节、输出轴和螺旋桨组成,如图 3(a)所示。在工作运行中,由于螺旋桨产生的推力以及附加轴向激励的作用,使得 VPSS 极易发生纵向振动。为了准确地研究 VPSS 系统的纵向振动特性,采用集中质量法,将 VPSS 简化为由多个集总质量组成的系统,如图 3(b)所示。



(a) VPSS 的结构模型



(b) VPSS 的纵向振动模型

图 3 VPSS 的结构模型及振动模型

设定法兰-输入轴的质量集中到输入端,质量为  $m_1$ ,转动惯量为  $J_1$ 。将输出轴和螺旋桨的质量集中到输出端,质量为  $m_4$ ,转动惯量为  $J_4$ 。将三叉式万向节等效为两个集中质量块,质量分别为  $m_2$  和  $m_3$ ,转动惯量分别为  $J_2$  和  $J_3$ 。 $k_{1x}$ 、 $k_{2x}$  和  $k_{1T}$ 、 $k_{2T}$  分别为输入轴、输出轴的轴向刚度和扭转刚度; $k_{3x}$  和  $k_{3T}$  为三叉式万向节内部刚性体的刚度; $k_{5x}$  和  $k_{6x}$  分别为轴承 I 和轴承 II 的轴向刚度; $c_{nx}$  和  $c_{nT}$  ( $n=1,2,3,4$ ) 为系统的阻尼系数。

### 2.2 纵向振动方程建立

$$D_x = \begin{bmatrix} c_{1x} + c_{2x} + c_{5x} & -c_{2x} & 0 & 0 \\ -c_{2x} & c_{2x} + c_{3x} \cos^2 \beta & -c_{3x} \cos^2 \beta & 0 \\ 0 & -c_{3x} \cos^2 \beta & c_{4x} + c_{3x} \cos^2 \beta & -c_{4x} \\ 0 & 0 & -c_{4x} & c_{4x} + c_{6x} \end{bmatrix} \quad (8)$$

VPSS 的纵向振动可分为两部分:一部分是由外部激励引起,另一部分是由 VPSS 的扭转振动导致。由于 VPSS 在实际工作中存在轻微弯曲以及扭转过程中对主轴线方向的偏离,造成其在产生扭转变形的同时,必然耦合出纵向变形。具体表现为,当正向扭转变形开始时,纵向收缩也随之产生;当扭转变形达到正向最大值时,纵向收缩达到了峰值;同理,在反向扭转变形过程中,纵向收缩的变化趋势与正向扭转是相同的。

基于上述基本理论,并结合集中质量法,可以得到离散后含扭转变形影响的纵向振动数学模型为:

$$M \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \\ \ddot{x}_4 \end{bmatrix} + D_x \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} + K_x \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} - K_{xT} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{x_1} \\ Q_{x_2} \\ Q_{x_3} \\ Q_{x_4} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$J \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_4 \end{bmatrix} + D_T \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} + K_T \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix} - K_{Tx} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{T_1} \\ Q_{T_2} \\ Q_{T_3} \\ Q_{T_4} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中: $M$  为质量矩阵; $J$  为转动惯量矩阵; $D_x$  和  $D_T$  分别为纵向和扭转阻尼矩阵; $K_x$  和  $K_T$  分别为纵向和扭转刚度矩阵; $K_{xT}$  和  $K_{Tx}$  分别为纵扭耦合和扭纵耦合刚度矩阵; $Q_{x_i}$  ( $i=1,2,3,4$ ) 和  $Q_{T_i}$  ( $i=1,2,3,4$ ) 分别为振动模型的广义力。

根据图 3(b) 确定振动模型的质量矩阵  $M$  和转动惯量矩阵  $J$  为:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} J_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

耦合振动模型的纵向阻尼<sup>[11]</sup>矩阵  $D_x$  和扭转阻尼矩阵  $D_T$  为:

$$\mathbf{D}_T = \begin{bmatrix} c_{1T} + c_{2T} & -c_{2T} & 0 & 0 \\ -c_{2T} & c_{2T} + c_{3T} & -c_{3T} & 0 \\ 0 & -c_{3T} & c_{4T} + c_{3T} & -c_{4T} \\ 0 & 0 & -c_{4T} & c_{4T} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{K}_x = \begin{bmatrix} k_{1x} + k_{2x} + k_{5x} & -k_{2x} & 0 & 0 \\ -k_{2x} & k_{2x} + k_{3x} \cos^2 \beta & -k_{3x} \cos^2 \beta & 0 \\ 0 & -k_{3x} \cos^2 \beta & k_{4x} + k_{3x} \cos^2 \beta & -k_{4x} \\ 0 & 0 & -k_{4x} & k_{4x} + k_{6x} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{K}_T = \begin{bmatrix} k_{1T} + k_{2T} & -k_{2T} & 0 & 0 \\ -k_{2T} & k_{2T} + k_{3T} & -k_{3T} & 0 \\ 0 & -k_{3T} & k_{4T} + k_{3T} & -k_{4T} \\ 0 & 0 & -k_{4T} & k_{4T} \end{bmatrix} \quad (11)$$

耦合振动模型的耦合纵扭刚度矩阵和耦合扭转刚度矩阵可表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{K}_{xT} = \varepsilon \mathbf{K}_x \\ \mathbf{K}_{Tx} = \varepsilon \mathbf{K}_T \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $\varepsilon$  为耦合刚度系数, 定义为:

$$\varepsilon = \frac{m_c^2}{mJ} \quad (13)$$

式中,  $m_c$  为惯性耦合, 其产生的轴向力和力矩分别与  $\ddot{\theta}$  和  $\ddot{x}$  成正比。  $m_c$  与轴系的扭转角和纵向变形有关。由于在理论上很难直接确定耦合项  $m_c$ , 因此 Parsons<sup>[12]</sup> 基于一系列实验确定耦合刚度系数  $\varepsilon$  小

$$\mathbf{Q}_x = [F_1 \sin(\omega_1 t), F_1 \sin(\omega_1 t), F_1 \sin(\omega_1 t), F_1 \sin(\omega_1 t) + F_T]^T \quad (18)$$

$$\mathbf{Q}_T = [T_m + T_1 \sin(\omega_2 t), T_1 \sin(\omega_2 t), T_1 \sin(\omega_2 t) + M_Q]^T \quad (19)$$

其中:  $F_1 \sin(\omega_1 t)$  和  $T_1 \sin(\omega_2 t)$  分别为系统整体受到的周期性轴向激励和附加扭矩激励;  $F_T$  和  $M_Q$  分别为螺旋桨在尾部不均匀半流场中运行时产生的交变推力激励和交变扭矩激励;  $T_m$  为电机扭矩波动。

交变推力激励定义为:

$$\begin{cases} F_T = \sum_{k=1}^{\infty} \lambda T \sin(kZ_p \omega_b t + \varphi_{z_p}) \\ T = \frac{K_T \rho \omega^2 D^4}{4\pi^2} \\ \omega_b = \frac{\omega Z_p}{60} \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $T$  为螺旋桨的定常推力;  $Z_p$  为螺旋桨叶片数;  $\varphi_{z_p}$  为初相位, 一般给予忽略; 参数  $\lambda$  为经验系数, 对于一阶谐波,  $\lambda$  的取值一般在 0.01 至 0.07 之间, 而倍阶的激励经验系数通常更小;  $\omega_b$  为螺旋桨叶片的圆频率;  $\omega$  为工作角速度;  $D$  为螺旋桨直径;  $\rho$  为流

式中,  $c_{nx}$  和  $c_{nT}$  ( $n=1, 2, 3, 4$ ) 为系统阻尼系数。

耦合振动模型的纵向刚度<sup>[11]</sup> 矩阵  $\mathbf{K}_x$  和扭转刚度矩阵  $\mathbf{K}_T$  为:

于 0.1。Huang 等<sup>[13]</sup> 在上述  $\varepsilon$  的范围内进一步与试验结合, 确定了  $\varepsilon$  在 0.02 - 0.06 之间更为合适。因此, 本研究选取  $\varepsilon$  为 0.02。

将式(7)至式(13)进行矩阵组合和计算, 得到矢量推进轴系含扭转变形影响的纵向振动微分方程。由于三叉式万向节的输入与输出的转角和角速度存在一定的关系, 其关系为:

$$\theta_3 - \theta_2 = \frac{R}{2L_3} \tan \beta \tan^2 \frac{\beta}{2} \cos 3\theta_2 \quad (14)$$

$$\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2 = -\dot{\theta}_2 \frac{3R}{2L_3} \tan \beta \tan^2 \frac{\beta}{2} \sin 3\theta_2 \quad (15)$$

因此, 系统的广义坐标进一步表示为:

$$\mathbf{q}_x = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T \quad (16)$$

$$\mathbf{q}_T = [\theta_1, \theta_2, \theta_4]^T \quad (17)$$

系统的广义力可写为:

体密度;  $K_T$  为推力系数。

交变扭矩激励定义为:

$$\begin{cases} M_Q = \sum_{k=1}^{\infty} \tau Q \sin(kZ_p \omega_b t + \varphi_{z_p}) \\ Q = \frac{K_Q \rho \omega^2 D^5}{4\pi^2} \\ \omega_b = \frac{\omega Z_p}{60} \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $Q$  为螺旋桨的定常扭矩; 参数  $\tau$  为经验系数, 对于一阶谐波,  $\tau$  的取值一般在 0.03 至 0.07 之间, 而倍阶的激励经验系数通常更小;  $K_Q$  为扭矩系数。

关于电机中的扭矩波动  $T_m$ , 目前, 一些文献中有关电机扭矩激励的幅值, 通常取电机额定扭矩的 3% 至 5%。激励频率为电机级数与轴频  $f$  的乘积, 即级数与  $f_i$  的乘积。因此, 电机运转时所引起的扭矩波动可表示为:

$$\begin{cases} T_m = vM_e \sin(pft + \varepsilon) \\ f = \frac{\omega}{2\pi} \end{cases} \quad (22)$$

初始相位;  $p=3$  为级数对。

综上所述,矢量推进轴系的振动微分方程可进一步表示为:

式中:  $v$  为系数,取值范围为 0.03 至 0.05;  $\varepsilon$  为

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + (k_{1x} + k_{2x} + k_{5x})x_1 - k_{2x}x_2 + (c_{1x} + c_{2x} + c_{5x})\dot{x}_1 - c_{2x}\dot{x}_2 - \varepsilon(k_{1x} + k_{2x} + k_{5x})\theta_1 + \varepsilon k_{2x}\theta_2 = F_1 \sin(\omega_1 t) \\ m_2 \ddot{x}_2 - k_{2x}x_1 + (k_{2x} + k_{3x} \cos^2 \beta)x_2 - k_{3x} \cos^2 \beta x_3 - c_{2x}\dot{x}_1 + (c_{2x} + c_{3x} \cos^2 \beta)\dot{x}_2 - (c_{3x} \cos^2 \beta)\dot{x}_3 + \\ \varepsilon k_{2x}\theta_1 - \varepsilon(k_{2x} + k_{3x} \cos^2 \beta)\theta_2 + \varepsilon k_{3x} \cos^2 \beta(\theta_2 + n_2) = F_1 \sin(\omega_1 t) \\ m_3 \ddot{x}_3 - k_{3x} \cos^2 \beta x_2 + (k_{4x} + k_{3x} \cos^2 \beta)x_3 - k_{4x}x_4 - c_{3x} \cos^2 \beta \dot{x}_2 + (c_{4x} + c_{3x} \cos^2 \beta)\dot{x}_3 - c_{4x}\dot{x}_4 \\ + \varepsilon k_{3x} \cos^2 \beta \theta_2 - \varepsilon(k_{4x} + k_{3x} \cos^2 \beta)(\theta_2 + n_2) + \varepsilon k_{4x}\theta_4 = F_1 \sin(\omega_1 t) \\ m_4 \ddot{x}_4 - k_{4x}x_3 + (k_{4x} + k_{6x})x_4 - c_{4x}\dot{x}_3 + (c_{4x} + c_{6x})\dot{x}_4 + \varepsilon k_{4x}(\theta_2 + n_2) - \varepsilon(k_{4x} + k_{6x})\theta_4 = F_1 \sin(\omega_1 t) + F_T \\ J_1 \ddot{\theta}_1 + (k_{1T} + k_{2T})\theta_1 - k_{2T}\theta_2 + (c_{1T} + c_{2T})\dot{\theta}_1 - c_{2T}\dot{\theta}_2 - \varepsilon(k_{1T} + k_{2T})x_1 + \varepsilon k_{2T}x_2 = T_m + T_1 \sin(\omega_2 t) \\ [J_2 + J_3(1 - n_1)]\ddot{\theta}_2 - 3J_3\theta_2^2 n_1 - k_{2T}(\theta_1 - \theta_2) + k_{4T}(\theta_2 + n_2 - \theta_4) - c_{2T}(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) + c_{4T}(\dot{\theta}_2(1 - n_1) - \dot{\theta}_4) \\ + \varepsilon k_{2T}(x_1 - x_2) - \varepsilon k_{4T}(x_3 - x_4) = T_1 \sin(\omega_2 t) \\ J_4 \ddot{\theta}_4 - k_{4T}(\theta_2 + n_2) + k_{4T}\theta_4 - c_{4T}\dot{\theta}_2(1 - n_1) + c_{4T}\dot{\theta}_4 + \varepsilon k_{4T}x_3 - \varepsilon k_{4T}x_4 = T_1 \sin(\omega_2 t) + M_Q \end{cases} \quad (23)$$

$$\text{其中, } n_1 = \frac{3R}{2L_2} \tan\beta \tan^2 \frac{\beta}{2} \sin 3\theta_2; n_2 = \frac{R}{2L_2}$$

$$\tan\beta \tan^2 \frac{\beta}{2} \cos 3\theta_2。$$

### 3 矢量推进轴系纵向振动响应分析

#### 3.1 仿真参数

VPSS 振动模型的参数在表 1 中列出,  $K_T$  和  $K_Q$  的取值在表 2 中列出。

表 2 不同工作转速下螺旋桨的  $K_T$  与  $K_Q$

| 转速/ $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ | 30    | 40    | 80    | 120   | 160   | 200   |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 推力系数 $K_T$                           | 0.032 | 0.145 | 0.313 | 0.369 | 0.403 | 0.408 |
| 扭矩系数 $10K_Q$                         | 0.125 | 0.292 | 0.519 | 0.596 | 0.642 | 0.654 |

#### 3.2 工作角速度对系统纵向振动的影响

在水下航行器执行探测任务涉及加速或减速阶段,尤其是在存在工作轴线夹角  $\beta$  的情况下,角速度的变化将引起不同的耦合振动特征。因此,设系统的工作轴线夹角  $\beta$  为  $5^\circ$ ,系统整体受到的周期性轴向激励和附加扭矩幅值分别为 100 N 和 50 N·m,频率均为  $\pi \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ,且螺旋桨的交变轴向激励和交变扭矩激励均考虑  $k=1$ ,即一阶谐波。采用高阶 Runge-Kutta 法对式(23)进行数值求解。结果如图 4 所示。

图 4 展示了在最大工作角速度  $\omega$  范围内,输入端和输出端的稳态纵向位移和速度幅值变化曲线。由图可知,随着  $\omega$  的增加,输入端和输出端的纵向位移和速度幅值均呈现非线性增长特征。其中,输出端纵向位移和速度幅值均大于输入端,这主要由于输出端处于悬臂状态,更容易发生剧烈振动。此

外,当  $\omega$  小于  $80 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  时,输入端和输出端的纵向位移和速度幅值增长较为缓慢;而当  $\omega$  超过  $80 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  后,幅值增长显著增加。

图 5 显示了输入和输出端纵向振动响应过程。由图 5(a) 和图 5(d) 可见,输入端和输出端纵向位移在时间历程上均近似围绕 0 m 附近轻微地不等幅振动。其中,纵向位移分别为  $-6.352 \times 10^{-5} \text{ m}$  至  $6.352 \times 10^{-5} \text{ m}$  和  $-1.469 \times 10^{-4} \text{ m}$  至  $1.470 \times 10^{-4} \text{ m}$ 。图 5(b) 和图 5(e) 显示了输入和输出端纵向振动速度的响应过程。速度曲线均清晰地分为瞬态和稳态两个阶段,表现出受迫振动的特征。瞬时纵向速度分别为  $5.689 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $1.075 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由于阻尼效应持续作用,导致输出端的速度响应均于 1.5 s 后逐渐趋于稳定,最终稳态后的纵向速度在范围分别为  $-2.142 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  至  $2.151 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $-4.722 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  至  $4.918 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  间

进行不等幅振动。图5(c)和图5(f)为输入和输出端纵向振动稳态相轨迹图。从图中可看出,耦合振动的相轨迹均由多个闭合的轨迹重叠形成粗状环状

分布在相平面中。然而,曲线存在轻微波动,这主要由低频振动引起。上述特征表明,系统的纵向稳态振动处于多周期运动状态。

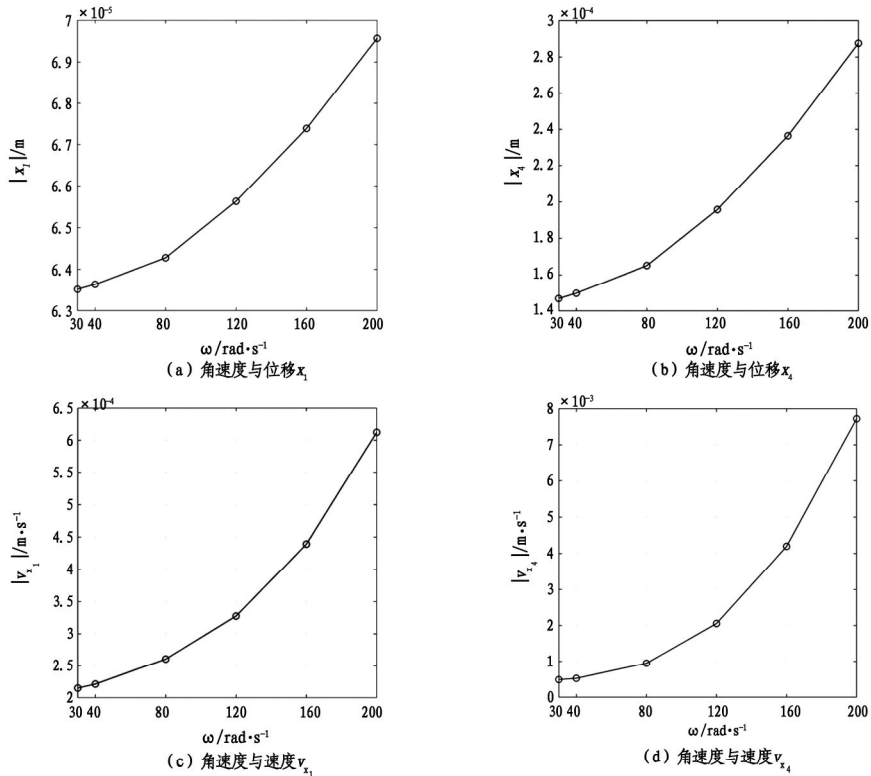


图4  $\omega$  为  $30 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  至  $200 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  时的稳态纵向位移和速度变化曲线

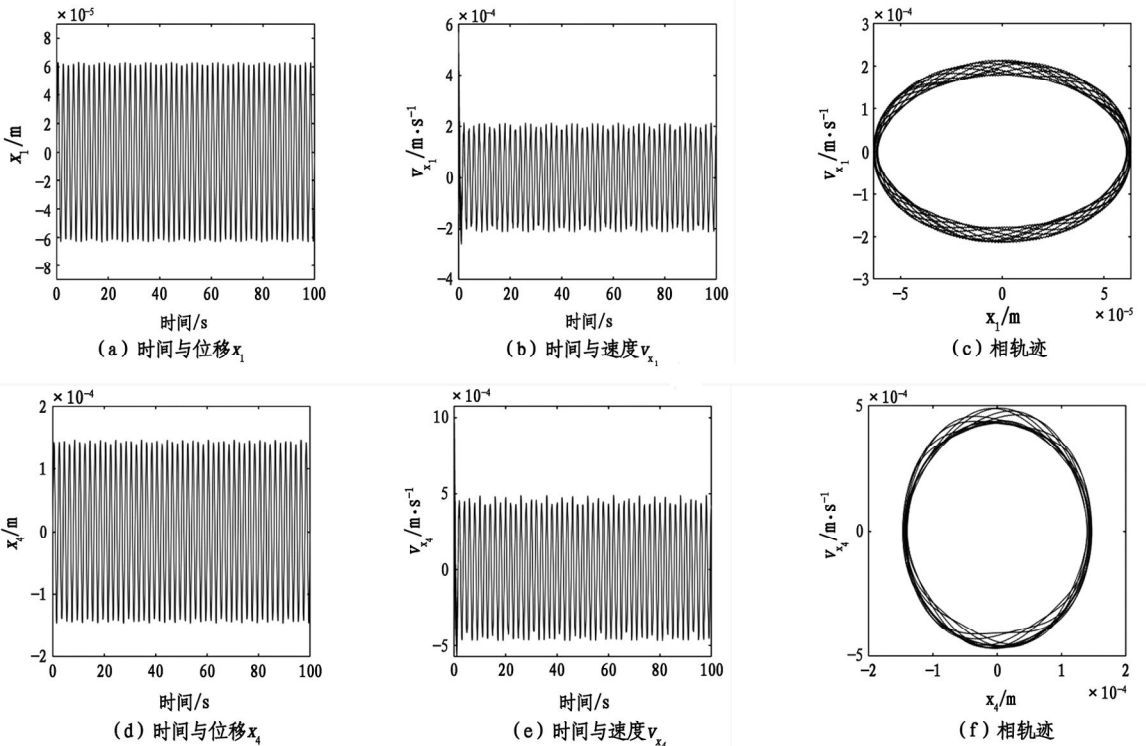


图5 工作角速度为  $30 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  时输入端、输出端纵向振动响应和相图

图6展示了当工作角速度  $\omega$  增加到  $120 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  时,矢量推进轴纵向振动的响应过程以及稳态相

轨迹图。图6(a)和图6(d)显示了输入和输出端纵向位移过程。由图可见,输入和输出端纵向位移与

$\omega = 30 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  时耦合振动曲线特性相似,但耦合振动加剧。纵向位移范围分别增长为  $-6.563 \times 10^{-5} \text{ m}$  至  $6.552 \times 10^{-5} \text{ m}$  和  $-1.957 \times 10^{-4} \text{ m}$  至  $1.954 \times 10^{-4} \text{ m}$ 。图 6(b) 和图 6(e) 显示了输入和输出端纵向振动速度响应过程。速度曲线清晰地分为瞬态和稳态两个阶段,表现出受迫振动的特征。瞬时纵向速度分别增长至  $6.705 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $4.080 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由于阻尼效应,导致输入端的速度响应均于 1.7 s 后逐渐趋于稳定。稳态阶段,耦合速度曲线相比图 5(b) 和图 5(e) 更加密集,并且整体呈现明显的波动现象,表明振动频率加快,稳定性下降。稳态后的

纵向振动速度分别在范围为  $-3.273 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  至  $3.275 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $-2.055 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  至  $2.056 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  间进行不等幅振动。图 6(c) 和图 6(f) 为输入和输出端纵向振动稳态相轨迹图。从图中可看出,输入端纵向振动的相轨迹均呈现多圈锯齿状的闭合曲线,并伴随较大的波动,表明振动幅度存在不均匀性且缺乏明显的规律性。输出端纵向稳态相轨迹由多个相互交织的闭合曲线组成,呈现螺旋状分布在相平面内。结果表明,系统处于混沌运动状态。与图 5 对比发现,此时系统的纵向振动稳定性下降。

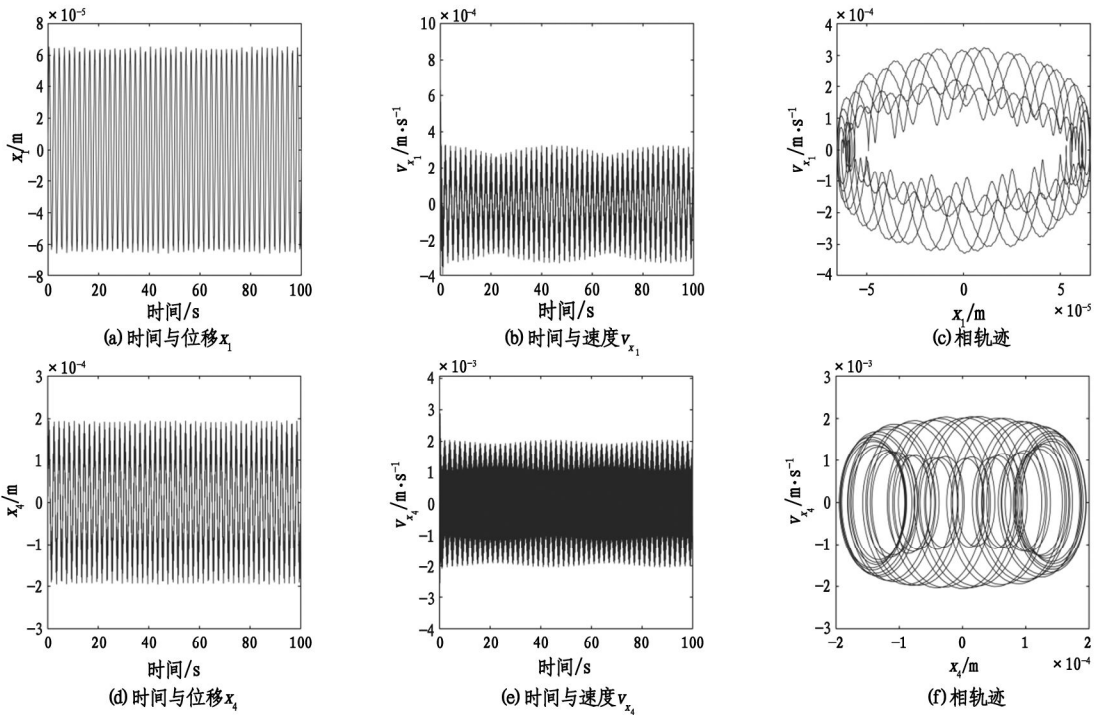


图 6 工作角速度为  $120 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  时输入端、输出端纵向振动响应和相图

图 7 展示了当工作角速度  $\omega$  进一步增加到  $200 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  时矢量推进轴系纵向振动的响应过程以及稳态相轨迹图。图 7(a) 和图 7(d) 显示了输入和输出端的响应过程。由图可见,纵向位移曲线峰值均出现复合谐波成分,表明耦合振动稳定性进一步下降。纵向位移进一步增长为  $-6.957 \times 10^{-5} \text{ m}$  至  $6.948 \times 10^{-5} \text{ m}$  和  $-2.875 \times 10^{-4} \text{ m}$  至  $2.876 \times 10^{-4} \text{ m}$ 。图 7(b) 和图 7(e) 显示了输入和输出端纵向振动速度的响应过程。速度曲线均清晰地分为瞬态和稳态两个阶段,表现出受迫振动的特征。瞬时纵向速度分别增长至  $1.385 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $1.487 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由于阻尼效应,导致输入端的速度响应均于 2.1 s 后逐渐趋于稳定。稳态阶段,纵向速度曲线相比图 6(b) 和图 6(e) 更加密集,表明振动频率进一步加快。稳态后的纵向振动速度分别在  $-6.099 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

至  $6.124 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $-7.719 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  至  $7.723 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  间进行不等幅振动。图 7(c) 和图 7(f) 为输入和输出端的纵向振动稳态相轨迹图。从图中可看出,纵向振动相轨迹分布混乱且密集,表明耦合振动仍处于混沌运动。与图 6(c) 和图 6(f) 对比发现,尽管运动状态相同,但此时整体复杂性进一步增加,稳定性下降。

综上所述,随着工作角速度  $\omega$  的增加,系统的纵向振动幅值和速度幅值均呈现增长趋势。同时,瞬态速度振动的衰减时间也有所延长。通过对比增长率发现,相较于输入端,输出端的纵向振动幅值增量和速度增量对  $\omega$  的变化更为敏感。通过相平面分析可得,随着工作角速度  $\omega$  的增加,系统的纵向振动稳态相轨迹形状愈发复杂和无序,运动状态由多周期运动向混沌运动演化。这表明系统的动态稳

定性下降,建议推进轴系系统在工作角速度  $\omega$  不超过  $80 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  的范围内运行,以确保较为稳定的动态性能。

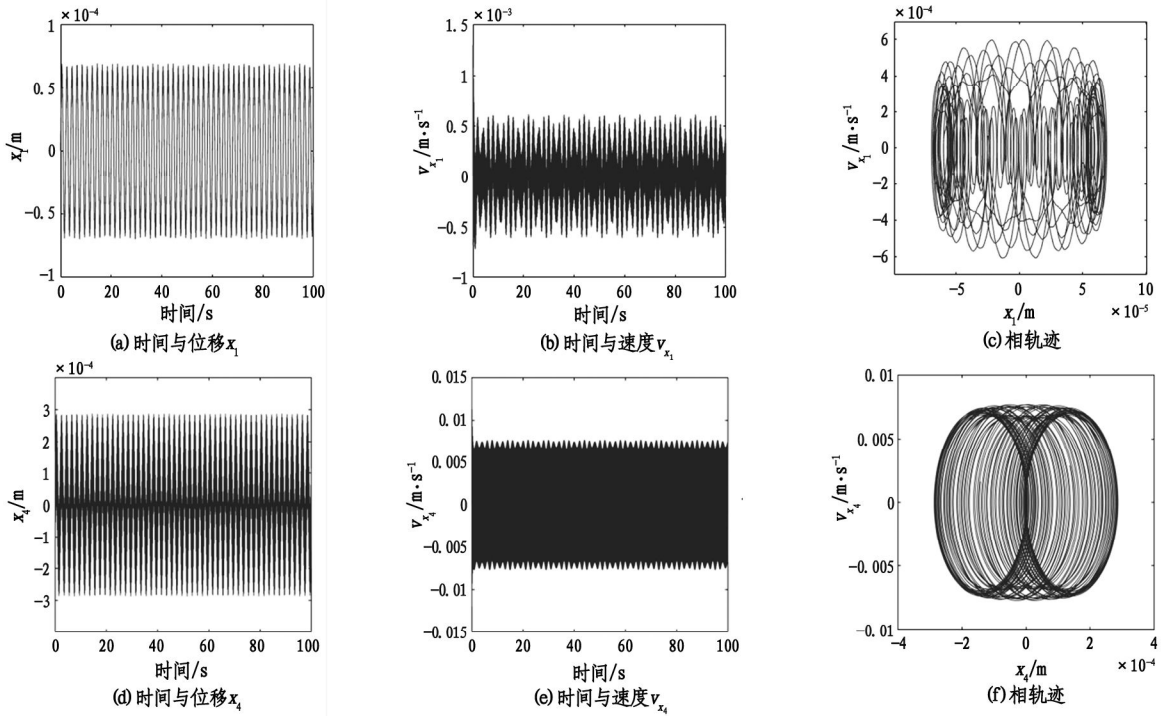


图7 工作角速度为  $200 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  时输入端、输出端纵向振动响应和相图

### 4 VPSS 的自适应模糊 PID 控制

传统 PID 控制方法通常依赖于预设的静态控制参数,在系统动态变化时,这些参数可能无法提供足够的适应性和控制精度。相比之下,自适应模糊 PID 控制利用模糊数学实现智能控制,能够根据系统状态的变化实时调整 PID 参数,从而提高了控制系统的适应性和控制精度。因此,这种方法有效克服了传统 PID 控制在复杂环境中的局限性。

#### 4.1 控制原理

图8中的  $E$  为实时系统误差,  $EC$  为误差率,  $e_1$

$$u(t) = (K_p + \Delta K_p)e(t) + (K_i + \Delta K_i) \int_0^t e(t) dt + (K_d + \Delta K_d) \frac{de(t)}{dt} \tag{27}$$

其中:  $t$  为时间;  $u(t)$  为模糊 PID 的输出;  $e(t)$  为模糊 PID 的输入。

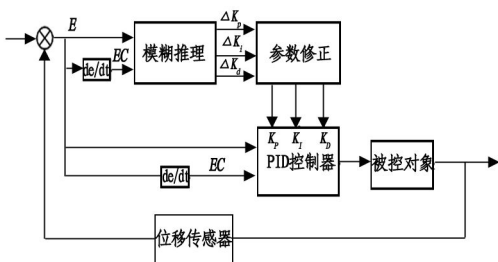


图8 模糊自适应 PID 控制的原理

#### 4.2 模糊化

为目标值,  $e_2$  为实际值<sup>[14]</sup>。模糊自适应 PID 利用实时系统误差  $E = e_1 - e_2$  及其误差率  $EC$  作为模糊控制器的输入,产生 PID 增量值作为输出。  $\Delta K_p$ ,  $\Delta K_i$ ,  $\Delta K_d$  分别为模糊控制产生的 PID 比例调节系数增量,积分调节系数增量和微分调节系数增量。  $K_p$ ,  $K_i$  和  $K_d$  为 PID 参数,其具体可以表示为:

$$K_p = K_p + \Delta K_p \tag{24}$$

$$K_i = K_i + \Delta K_i \tag{25}$$

$$K_d = K_d + \Delta K_d \tag{26}$$

模糊自适应 PID 控制器的输出算法如下:

模糊化模块的作用是将精确的输入数据转化为模糊集合,从而使控制系统能够利用模糊规则进行推理和决策。在转化过程中,隶属度函数是表示模糊量与离散化的精确量之间关系的一种函数。隶属度函数划分等级的详细程度决定着控制效果。为此,在模糊控制器中设计输入和输出变量均采用三角形隶属度函数,函数式为式(28),并划分7个等级来表示它们的模糊子集,即负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(O)、正小(PS)、正中(PM)和正大(PB)。

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & x \geq c \end{cases} \quad (28)$$

$\Delta K_i$  和  $\Delta K_d$  三个控制参数的模糊控制规则表,如表 3 所示。

表 3  $\Delta K_p, \Delta K_i$  和  $\Delta K_d$  模糊控制规则表

| E  | EC       |          |          |          |          |          |          |
|----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|    | NB       | NM       | NS       | ZO       | PS       | PM       | PB       |
| NB | PB/NB/PS | PB/NB/NS | PM/NM/NB | PM/NM/NB | PS/NS/NB | ZO/ZO/NM | ZO/ZO/PS |
| NM | PB/NB/PS | PB/NB/NS | PM/NM/NB | PS/NS/NM | PS/NS/NM | ZO/ZO/NS | NS/ZO/ZO |
| NS | PM/NB/ZO | PM/NM/NS | PM/PS/NM | PS/NS/NM | ZO/ZO/NS | NS/PS/NS | NS/PS/ZO |
| ZO | PM/NM/ZO | PM/NM/NS | PS/NS/NS | ZO/ZO/NS | NS/PS/NS | NM/PM/NS | NM/PM/ZO |
| PS | PS/NM/ZO | PS/NS/ZO | ZO/ZO/ZO | NS/PS/ZO | NS/PS/ZO | NM/PM/ZO | NM/PB/ZO |
| PM | PS/ZO/PB | ZO/ZO/NS | NS/PS/PS | NM/PS/PS | NM/PM/PS | NM/PB/PS | NB/PB/PB |
| PB | ZO/ZO/PB | ZO/ZO/PM | NM/PS/PM | NM/PM/PM | NM/PM/PS | NB/PB/PS | NB/PB/PB |

#### 4.4 去模糊化

去模糊化的作用是将模糊推理过程中得到的模糊输出转换为明确的精确值,以便适用于实际系统。在多种去模糊化方法中,质心法考虑了所有模糊输出的权重和隶属度分布,能够提供更平滑且稳定的控制输出,其数学表达式如下:

$$u_c = \frac{\sum_{j=1}^n u_j A(u_j)}{\sum_{j=1}^n A(u_j)} \quad (29)$$

#### 4.3 模糊推理

模糊推理的作用是将模糊化后的输入变量与控制规则库相结合,通过逻辑推断生成合理的控制输出。本研究参考已有控制工程经验,得到了  $\Delta K_p$ ,

其中,  $u_c$  为去模糊化后的真实值,  $A(u_j)$  为  $u_j$  处的隶属度。

#### 4.5 矢量推进轴系振动控制效果仿真

为验证模糊自适应 PID 控制方法在矢量推进轴系振动控制中的有效性,选用  $\omega = 200 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  时的振动响应,与传统 PID 进行了仿真对比,系统地验证了模糊自适应 PID 控制方法的有效性与优越性。

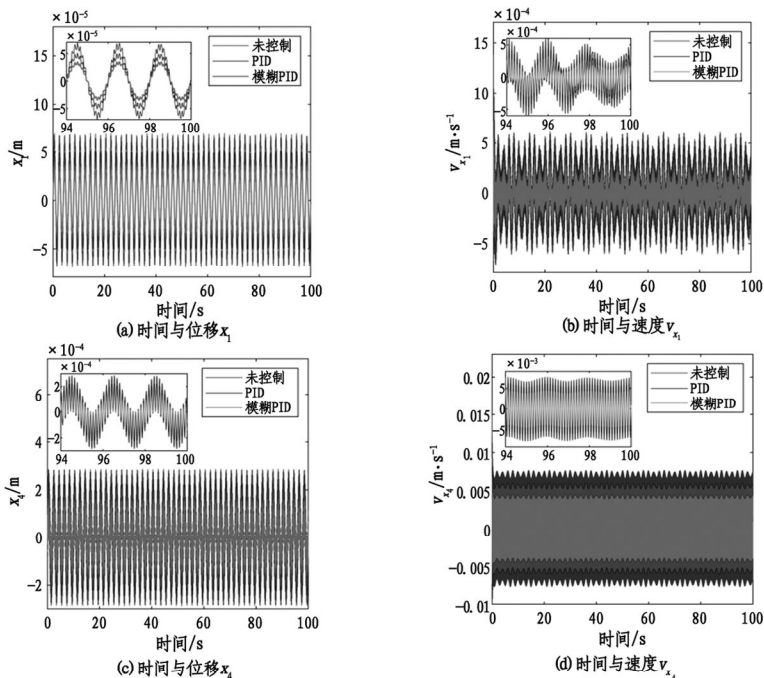


图 9  $\omega = 200 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  时输出端纵扭耦合振动控制过程

图9展示了 $\omega$ 为 $200 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 时输出端的纵向振动控制图。由图可知,在传统PID和模糊自适应PID控制下,系统的纵向瞬态振动和稳态振动均得到了抑制。但控制效果方面,模糊自适应PID的控制效果均优于传统PID。具体而言,引入模糊自适应PID控制后,输入和输出端的最大纵向位移抑制率分别为47.86%和41.48%;瞬时纵向速度抑制率分别为47.50%和37.44%;稳态后的纵向振动速度抑制率分别为46.96%和41.43%。

通过上述分析表明,模糊自适应PID控制后与控制前相比,系统的振动平均抑制率达到40%以上,显著减少了因过大振动幅值带来的潜在危害。

## 5 结论

为研究VPSS的纵向振动特性,综合考虑扭转变形、螺旋桨交变推力和扭矩、电机扭矩波动的影响,采用影响系数法建立其纵向振动的简化集中质量模型。基于Runge-Kutta算法对所得微分方程进行数值求解,分析了在激励条件下,不同工作角速度对VPSS纵向振动特性的影响。同时,为了进一步降低VPSS的纵向振幅,开发出一种模糊自适应PID控制方法对VPSS进行了振幅的调节,旨在提高水下航行器的安全性能。综合分析得出以下结论:

随着工作角速度 $\omega$ 的增加,系统的纵向振动幅值和速度幅值均呈现增长趋势。同时,瞬态速度振动的衰减时间也有所延长。通过对比增长率发现,相较于输入端,输出端的纵向振动幅值增量和速度增量对 $\omega$ 的变化更为敏感。通过相平面分析可知,随着工作角速度 $\omega$ 的增加,系统的纵向振动稳态相轨迹形状愈发复杂和无序,运动状态由多周期运动向混沌运动演化。

针对VPSS的纵向振动控制,设计并应用了模糊自适应PID控制方法,并通过仿真验证其调控效果,发现VPSS输出端的振动水平平均抑制率在40%以上。结果表明,模糊自适应PID控制在提高系统适用性和鲁棒性方面具有有效性。

## 参考文献:

[1] 李渊博,霍睿,解晓娇,等.带螺旋桨激振力的轴系耦合纵向振动特性分析[J].舰船科学技术,2021,43(9):34-37.

[2] 刘义峰,李解,卢闫,等.船舶轴系纵向振动特性预报软

件设计与实现[J].船舶,2024,35(4):75-84.

- [3] ZHANG C, TIAN Y Q, YANG L, et al. Analytical study on longitudinal vibration characteristics of the coupled shaft and conical-cylindrical shell [J]. Ocean Engineering, 2021, 223: 108691.
- [4] CHU W, ZHAO Y, ZHANG G B, et al. Longitudinal vibration of marine propulsion shafting: Experiments and analysis [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(9): 1173.
- [5] 黄修长,苏智伟,郑智伟,等.推进轴系纵向振动负刚度动力吸振器试验研究[J].中国舰船研究,2023,18(2):227-234.
- [6] 韩金昌,李彦,张能,等.电磁轴承支承的船舶推进轴系纵向振动变刚度控制方法研究[J].推进技术,2023,44(9):274-281.
- [7] DUAN N Y, WU C, HUANG Y, et al. Lateral vibration analysis and active control of the propeller-shafting system using a scaled experimental model [J]. Ocean Engineering, 2023, 267: 113285.
- [8] CHEN Z Y, JU Y P, JIA Y C, et al. Torsional vibration analysis and active anti-disturbance decoupling control of duplex trident universal joints [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2024, 38(4): 1693-1702.
- [9] FISCHER I S, PAUL R N. Kinematic displacement analysis of a double-cardan-joint driveline [J]. Journal of Mechanical Design, 1991, 113(3): 263-271.
- [10] WANG X F, CHANG D G, WANG J Z. Kinematic investigation of tripod sliding universal joints based on coordinate transformation [J]. Multibody System Dynamics, 2009, 22(1): 97-113.
- [11] LIN C G, YANG Y N, CHU J L, et al. Study on nonlinear dynamic characteristics of propulsion shafting under friction contact of stern bearings [J]. Tribology International, 2023, 183: 108391.
- [12] PARSONS M. Mode coupling in torsional and longitudinal shafting vibration [J]. Journal of Marine Science and Technology, 1983, 20(3): 257-271.
- [13] HUANG Q W, YAN X P, WANG Y K, et al. Numerical modeling and experimental analysis on coupled torsional-longitudinal vibrations of a ship's propeller shaft [J]. Ocean Engineering, 2017, 136: 272-282.
- [14] 张瑞东.基于自适应模糊PID方法的动车组横向振动控制研究[D].兰州:兰州交通大学,2021.

责任编辑:刘娟

## 二级增压复合容积泵的设计及其特性研究

杨子钊<sup>1</sup>, 孟利民<sup>1,2\*</sup>, 李 双<sup>1</sup>

(1. 安徽理工大学 机电工程学院, 安徽 淮南 232001; 2. 流体动力与机电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310000)

**摘要:** 针对内啮合齿轮泵工作压力受限、双作用叶片泵自吸能力弱的单级泵局限, 提出二级增压复合容积泵模型。其将二级双作用叶片泵集成于一级内啮合齿轮泵小齿轮内, 通过两级串联实现高效增压。通过原理分析、建模、流量方程推导及 PumpLinx 流体域仿真, 获取压力云图与流量脉动曲线, 并分析一级泵小齿轮数、二级泵叶片数对整体输出特性的影响。结果表明, 该设计有效实现增压目的, 突破传统单级泵局限, 为高压液压系统提供了新型方案, 其结构优化策略对多级增压泵研发具有重要参考价值。

**关键词:** 液压容积泵; 齿轮泵; 叶片泵; 增压; 流量脉动

中图分类号: TH137.51

文献标识码: A

文章编号: 2095-297X(2026)02-0043-09

## Design and Characteristics Study of A Two-stage Supercharging Composite Positive Displacement Pump

YANG Zizhao<sup>1</sup>, MENG Limin<sup>1,2\*</sup>, LI Shuang<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, 232001, Anhui;  
2. State Key Laboratory of Fluid Power and Electromechanical Systems, Hangzhou, 310000, Zhejiang)

**Abstract:** Aiming at the limitations of single-stage pumps, such as the restricted working pressure of internal gear pumps and the weak self-priming capacity of double-acting vane pumps, a two-stage boosting compound positive displacement pump model was proposed. In this model, the secondary double-acting vane pump was integrated into the pinion of the primary internal gear pump, and efficient pressure boosting was realized through the series connection of the two stages. Principle analysis, modeling, derivation of flow equations, and fluid domain simulation via PumpLinx were carried out to obtain pressure contour maps and flow pulsation curves. Meanwhile, the effects of the number of pinion teeth in the primary pump and the number of vanes in the secondary pump on the overall output characteristics were analyzed under various conditions. The results indicated that this design effectively achieves the pressure boosting objective, breaks through the limitations of traditional single-stage pumps, and provides a new solution for high-pressure hydraulic systems. Its structural optimization strategy holds significant reference value for the research and development of multi-stage boosting pumps.

**Key words:** hydraulic positive displacement pump; gear pump; vane pump; pressure boosting; flow rate pulsation

由于液压传动的独特优点, 从民用到国防, 从一般传动到高精度控制系统, 液压传动系统在各领域都得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。

齿轮泵主要包括内啮合齿轮泵和外啮合齿轮泵两种类型, 相对而言, 外啮合齿轮泵加工简单, 制造难度小, 但振动噪声也更大; 内啮合齿轮泵体积紧

收稿日期: 2025-07-11 \* 通讯联系人

基金项目: 安徽理工大学研究生创新基金资助项目(2024cx2053)。

作者简介: 杨子钊(1998-), 男, 山西忻州人, 硕士研究生。E-mail: lmmen@aust.edu.cn

凑,具备更低的噪声、更小的流量脉动及更好的吸油能力。为提升工作性能、降低振动噪声水平,越来越多的场合将外啮合齿轮泵替换,改用内啮合齿轮泵<sup>[2]</sup>。徐学忠等<sup>[3]</sup>用复数矢量法建立了直线共轭齿廓内啮合齿轮泵的齿廓曲线方程和啮合线方程,验证得到相同齿数下直线共轭内啮合齿轮泵的流量脉动率要比其他内啮合齿轮泵小。范宏权等<sup>[4]</sup>基于齿轮啮合原理得出齿轮转角与啮合点的运动学关系,提出精确化排量计算方法。Chai 等<sup>[5]</sup>研究了直线共轭内啮合齿轮泵齿轮的几何参数对理论流量和流量脉动率的影响规律,提出应在设计计算允许的范围内尽可能增加外齿轮的齿顶圆半径的策略。

叶片泵具有结构紧凑、瞬时流量脉动小、效率高、噪声小等优点,被广泛用于车辆的液压助力转向系统中<sup>[6]</sup>。根据叶片泵吸排油频率与转子转速的关系,叶片泵可分为单作用叶片泵(即转子转动一周,每个叶片间的容腔吸排油一次)和双作用叶片泵(即转子转动一周,每个叶片间的容腔吸排油两次)。郑澈<sup>[7]</sup>通过数学分析和作图法结合的手段研究了采用偶数和奇数叶片的变量双作用叶片泵的瞬时流量,得出奇数叶片会使叶片泵瞬时流量脉动性较小的结论。王马林等<sup>[8]</sup>提出了一种双作用变量叶片泵结构原理,通过改变配流盘配流窗口的大小实现双作用叶片泵的流量控制调节。

孙远敬等<sup>[9]</sup>针对双级高压内啮合齿轮泵因高压产生不平衡径向力及泄露等问题,采用流体仿真的方法对双级高压内啮合齿轮泵的性能进行研究,提出加大吸油管直径或提高进口压力可以有效控制吸油腔在第一次升压中出现的气穴现象。安蕾等<sup>[10]</sup>进行了多级内啮合摆线齿轮泵的总体结构设计,然后基于泛摆线形成原理和内转子摆线齿形曲线参数方程,提出多级齿轮泵能够在单级较小的压差下实现多级增压,并且泄漏量小、压力负载低、泵的容积效率高。

上述学者们的研究主要是针对单级内啮合齿轮泵和双作用叶片泵,还有一些学者对多级液压泵进行结构设计后研究其性能,但对于两种不同类型的液压泵通过串联增压的研究相对较少。

针对以上情况,研究设计出一种新的二级增压复合容积泵,并利用内啮合齿轮泵自吸能力强和双作用叶片泵流量脉动低的特点以实现液压泵低流量脉动率和高压化的目的。

以二级增压复合容积泵为研究对象,基于二级增压复合泵结构,分别推导出一级内啮合齿轮泵和二级双作用叶片泵的瞬时流量方程;同时利用

PumpLinx 软件对增压复合泵进行数值模拟,分析一级泵小齿轮数和二级泵叶片数相同和不同两种情况下对整体输出特性的影响,为不同类型液压泵搭配组成的多级增压泵研究工作提供参考。

## 1 二级增压复合容积泵的设计与工作原理

### 1.1 结构与工作原理

为实现液压泵高压化且解决叶片泵自吸性能差的问题,本课题设计了一种二级复合式容积泵,由内啮合齿轮泵和双作用叶片泵复合安装组成,双作用叶片泵位于内啮合齿轮泵的小齿轮内。首先由内啮合齿轮泵吸油一级增压后将液压油输送至双作用叶片泵进口,经过叶片泵二级增压后将液压油排出泵体,这种组合方式可以使液压泵同时拥有小体积、高压输出的优势并能有效解决叶片泵自吸性能差的问题。

液压泵的工作原理是将原动机输入的机械能转换为液体的压力能,为整个液压系统提供动力,液压泵依靠密封容积的变化来实现吸油和排油过程。增压复合泵的吸油和排油过程分为两个部分,第一部分为一级内啮合齿轮泵的吸油和排油过程,其具体为在一级泵吸油腔内随着内外齿廓逐渐脱离啮合,一级泵泵腔的容积逐渐增大,产生真空,油液在大气压力的作用下填满齿凹空间,在一级泵高压腔内随着内外齿廓逐渐进入啮合,容积逐渐减小,产生压力把油液挤出。第二部分为二级双作用叶片泵的吸油和排油过程,当转子旋转时,位于配流盘吸油窗口处的两相邻叶片与配流盘定子内壁所组成的封闭容积增大,此时二级泵吸油腔吸油,位于配流盘排油窗口处的两相邻叶片与配流盘定子内壁所组成的封闭容积减小,产生压力将油液排出增压复合泵排油口。由于一级泵的进油口和二级泵的排油口相连,一级泵排出的中压油(12 MPa)进入二级泵吸油口,油液由配流盘排油窗口输出高压油(24 MPa),此时完成二级增压,达到增压效果。

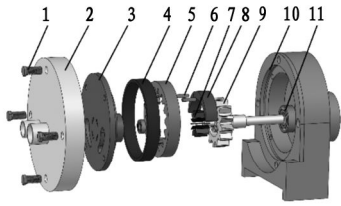
增压复合泵是在内啮合齿轮泵和双作用叶片泵串联的理论基础上设计的,如图 1 所示,其具体结构为两泵复合设计,主要由转子、配流盘和内齿圈等主要部件构成。

### 1.2 关键零件设计

增压复合泵的核心部件为配流盘和转子,其中转子的结构如图 2 所示,将一级齿轮泵小齿轮、主动轴和二级叶片泵转子集成于一体。

增压复合泵的配流盘如图 3 所示,配流盘共计开设六个吸排油窗口(内啮合齿轮泵两个,双作用

叶片泵四个),此外还将双作用叶片泵的定子外壁一体式设计在配流盘中心位置。



1-螺栓;2-前泵壳;3-配流盘;4-滑动轴承;5-内齿圈;6-弹性圆柱销;7-叶片;8-月牙块;9-转子;10-后泵壳;11-滚动轴承

图1 二级增压复合容积泵三维结构图

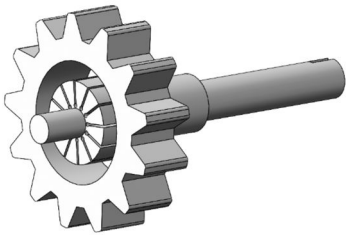


图2 二级增压复合容积泵转子结构图

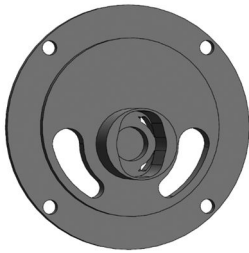


图3 二级增压复合容积泵配流盘结构图

### 1.3 结构参数确定

双作用叶片泵的叶片按布置方式有径向安置和倾斜安置两种结构形式,叶片采用径向安装有利于减小定子、叶片和转子槽的磨损,防止排油区叶片运动自锁<sup>[11]</sup>,同时双作用叶片泵采用0°叶片倾角和定子六次曲线组合时可以使叶片的受力状况最佳<sup>[12]</sup>。因此双作用叶片泵叶片采用径向安置的形式,定子过渡曲线采用六次曲线,增压复合泵的额定压强初步设计为24 MPa,其出口流量为123 L·min<sup>-1</sup>,双作用叶片泵其余参数如表1所示。

内啮合齿轮泵的齿轮齿形分为直线共轭齿形和渐开线齿形,相较于渐开线齿形的内啮合齿轮泵,直线共轭形内啮合齿轮泵困油容积更小、结构强度更大且加工简单<sup>[3]</sup>。所以增压复合泵的一级内啮合

齿轮泵齿形选择直线共轭齿形,其具体参数如表2所示。

表1 二级增压复合容积泵二级泵参数设置

| 参数    | 物理意义  | 数值  | 单位 |
|-------|-------|-----|----|
| $M$   | 叶片数   | 12  | -  |
| $S$   | 叶片厚度  | 1.3 | mm |
| $B_1$ | 叶片宽度  | 33  | mm |
| $R$   | 定子长半径 | 32  | mm |
| $r$   | 定子短半径 | 24  | mm |
| $r_d$ | 转子半径  | 22  | mm |

表2 二级增压复合容积泵一级泵参数设置

| 参数       | 物理意义     | 数值   | 单位  |
|----------|----------|------|-----|
| $m$      | 齿轮模数     | 8    | mm  |
| $Z$      | 小齿轮齿数    | 13   | -   |
| $Z_1$    | 内齿轮齿数    | 17   | -   |
| $\alpha$ | 压力角      | 20   | °   |
| $r_1$    | 外齿轮分度圆半径 | 52   | mm  |
| $r_2$    | 内齿轮分度圆半径 | 68   | mm  |
| $r_{a1}$ | 外齿轮齿顶圆半径 | 60   | mm  |
| $r_{a2}$ | 内齿轮齿顶圆半径 | 60   | mm  |
| $r_{f1}$ | 外齿轮齿根圆半径 | 42   | mm  |
| $r_{f2}$ | 内齿轮齿根圆半径 | 78   | mm  |
| $B_2$    | 齿宽       | 22   | mm  |
| $\alpha$ | 中心距      | 16   | mm  |
| $n$      | 转速       | 1500 | rpm |
| $\beta$  | 齿形半角     | 8.74 | °   |

## 2 内啮合齿轮泵和双作用叶片泵瞬时流量

### 2.1 内啮合齿轮泵瞬时流量

对内啮合齿轮泵而言,齿轮齿廓形状直接决定其流体流动特性,根据内啮合齿轮副的几何特性计算啮合特性<sup>[13]</sup>推导出主动齿轮、从动齿圈中心到啮合点的距离,也就是啮合点处主动齿轮和从动齿圈的啮合半径 $R_1$ 和 $R_2$ ,根据几何关系可得:

$$R_1^2 = r_1^2 \sin^2(\beta + \theta) + r_1^2 \cos^2(\beta - \varphi_1) \quad (1)$$

$$R_2^2 = [a \sin(\beta - \varphi_1) + r_1 \sin(\beta + \theta)]^2 + r_2^2 \cos^2(\beta - \varphi_1) \quad (2)$$

式中,  $\varphi_1$  为主动齿轮的转角, rad;  $\theta$  为主动齿轮节圆处齿厚所对应圆心角的一半, rad。

应用扫过面积法推导内啮合齿轮泵的瞬时流量方程<sup>[14]</sup>。

假设流体不可压缩、齿轮泵内无泄漏以及元件不发生变形, 则齿轮副在转过一个微小角度时, 排出的液体体积等于输入体积  $dV_i$  和输出体积  $dV_o$  的差, 即:

$$dV = dV_i - dV_o = dV_1 + dV_2 \quad (3)$$

式中,  $dV_1, dV_2$  分别是主动齿轮和从动齿轮排出的油液体积。

根据几何关系推导主动齿轮的排油体积  $dV_1$  和

$$\varphi_{\min} = \beta - \arcsin\left(\frac{ar_1 \sin(\theta + \beta) + \sqrt{a^2 \sin^2(\theta + \beta) - (a - r_2^2)(\sin^2(\theta + \beta) + r_2^2 - r_{a2}^2)}}{r_2^2 - a^2}\right) \quad (7)$$

$$\varphi_{\max} = \frac{2\pi}{Z} + \varphi_{\min} \quad (8)$$

在直线共轭内啮合齿轮泵转动过程中, 随着齿轮副啮合点位置的变化, 瞬时流量数值在平均流量  $Q_{m1}$  附近脉动, 为了评估其瞬时流量脉动程度, 定义流量脉动率:

$$\gamma_q = \frac{\max(Q_1) - \min(Q_1)}{Q_{m1}} \quad (9)$$

其中,  $\max(Q_1)$  和  $\min(Q_1)$  分别为瞬时流量的最大值和最小值。

通过积分的方法计算瞬时流量的平均值  $Q_{m1}$ , 并计算理论排量:

$$V_1 = \frac{Q_{m1}}{n} \quad (10)$$

## 2.2 双作用叶片泵瞬时流量

首先计算单个工作腔的排油瞬时流量, 再将同时处于排油的工作腔的流量进行叠加, 便可得到整个叶片泵出口处的理论瞬时流量<sup>[15]</sup>, 双作用叶片泵瞬时流量的计算公式为:

$$Q_2 = \frac{dV}{dt} = B_1 \omega (R^2 - r^2) - \frac{2B_1 S}{\cos\theta_1} \sum v_i \quad (11)$$

式中:  $\omega$  为转子角速度,  $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\theta_1$  为叶片的倾斜角度, rad;  $v_i$  为叶片在定子曲线上的径向速度,  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 且

$$\omega = d\varphi/dt \quad (12)$$

式中,  $\varphi$  为转子转角。

又因为:

$$v_i = \left(\frac{d\rho}{d\varphi}\right)_i \omega \quad (13)$$

式中,  $\rho$  为定子曲线的矢径, 公式(11)可变为:

$$Q_2 = B_1 \omega \left[ R^2 - r^2 - \frac{2S}{\cos\theta} \sum \left(\frac{d\rho}{d\varphi}\right)_i \right] \quad (14)$$

从动齿轮的排油体积  $dV_2$ :

$$dV_1 = \frac{B_1}{2} [(r_{a1}^2 - r_{f1}^2) d\varphi_1 - (r_{a2}^2 - r_{f2}^2) d\varphi_2] \quad (4)$$

$$dV_2 = \frac{B_2}{2} [(R_1^2 - r_{f1}^2) d\varphi_1 - (r_{a2}^2 - R_2^2) d\varphi_2] \quad (5)$$

计算齿轮泵瞬时流量  $Q_1$  为:

$$Q_1 = \frac{dV}{dt} = \frac{B_2}{2} [(r_{a1}^2 - R_1^2) \omega_1 - (R_2^2 - r_{f2}^2) \omega_2] \quad (6)$$

将公式(1)、公式(2)代入公式(6)即可求得  $\varphi_{\min} \leq \varphi_1 \leq \varphi_{\max}$  范围内的齿轮泵瞬时流量, 其中  $\varphi_{\min}$ 、 $\varphi_{\max}$  分别为起始啮合角和终止啮合角。

起始、终止啮合角由公式(7)、公式(8)给出。

在双作用叶片泵转动过程中, 随着叶片位置的变化, 二级泵的瞬时流量数值在平均流量  $Q_{m2}$  附近脉动, 为评估其瞬时流量脉动程度, 定义流量脉动率:

$$\gamma_{q1} = \frac{\max(Q_2) - \min(Q_2)}{Q_{m2}} \quad (15)$$

双作用叶片泵的理论排量  $V_2$  与上述齿轮泵计算方法类似。

## 3 二级增压复合容积泵的压力特性研究

### 3.1 二级增压复合容积泵的压力仿真

首先将 SolidWorks 建立的三维模型导入 Ansys 软件进行流体域抽取并将螺栓缝隙、密封间隙、轴径向间隙等部分忽略简化, 然后将流体域模型导入 PumpLinx 软件进行网格划分, 通过调整几何曲面的单元尺寸和最大单元尺寸获得六面体的笛卡尔网格, 网格数为 387 999。最后选择各部分相接触的表面制作交互面, 这样在各连接部分、边界区域和转子工作区域都能生成加密网格, 且各部分间加密网格都会平滑生成, 解决了网格变形的问题。得到的加密网格是结构化的六面体笛卡尔网格, 计算的误差更小, 模拟结果的质量较高, 对于三维流场的仿真计算会更加精确, 生成的三维流场网格如图 4 所示。

设置进口压力为一个标准大气压 0.101 325 MPa, 出口压力为 24 MPa, 转速为 1500 rpm, 流体密度为  $800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 流体粘度为  $0.007 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

在增压复合泵的过渡油道和排油口处设置监测点用来观察一级泵和二级泵的压力波动, 监测点设置如图 5 所示。

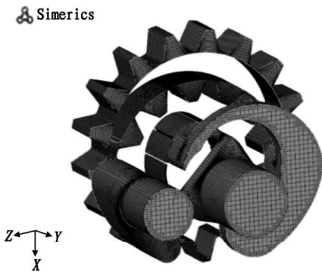


图 4 二级增压复合容积泵网格划分

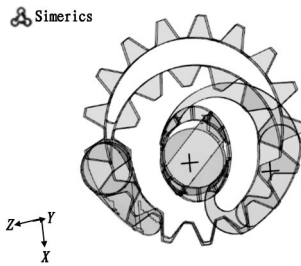


图 5 监测点设置

在周期时间 0.04 s 内,经过 PumpLinx 数值模拟得到了增压复合泵内部压力的分布云图和监测点压力随时间变化的曲线图分别如图 6 和图 7 所示。

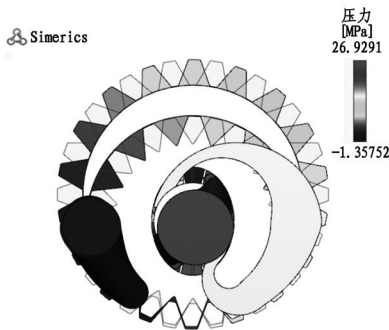


图 6 二级增压复合容积泵的压力分布云图

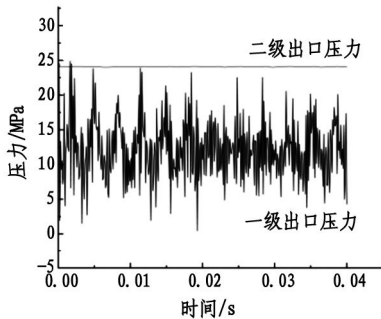


图 7 监测点压力随时间变化的曲线图

由图 6 可知,增压复合泵中油液所受压力从一级泵进口到二级泵出口逐步升高,一级进口口处的压力最小,二级排油口处的压力最大,油液从一级泵

出口到二级泵入口的位置处压力在 12 MPa 左右波动。增压复合泵的出口压力为二级泵出口压力,由图 7 可知,二级泵出口压力波动幅度很小是因为其出口压力由负载决定,而一级泵出口压力波动幅度较大有多个原因,首先为齿轮泵瞬时排量受啮合点位置影响呈非线性波动,叶片泵排量近似正弦波动,两者曲线不匹配导致流量变化率突变,引发压力剧烈波动;其次过渡油道内的沿程阻力与局部阻力导致压力损失周期性变化,加剧波动。

### 3.2 二级增压复合容积泵的压力仿真对比

为了研究一级泵与二级泵吸排油频率不同时增压复合泵内部油液压力变化情况,选取一级泵小齿轮齿数为 14,大齿轮齿数为 18,分别组合二级泵叶片数为 12 和 14 的两种情况来进行研究,并通过改变叶片宽度来控制一级泵和二级泵的平均流量相同。首先是一级泵齿轮齿数比为 14:18,二级泵叶片数为 12 时的压力分布云图如图 8 所示。

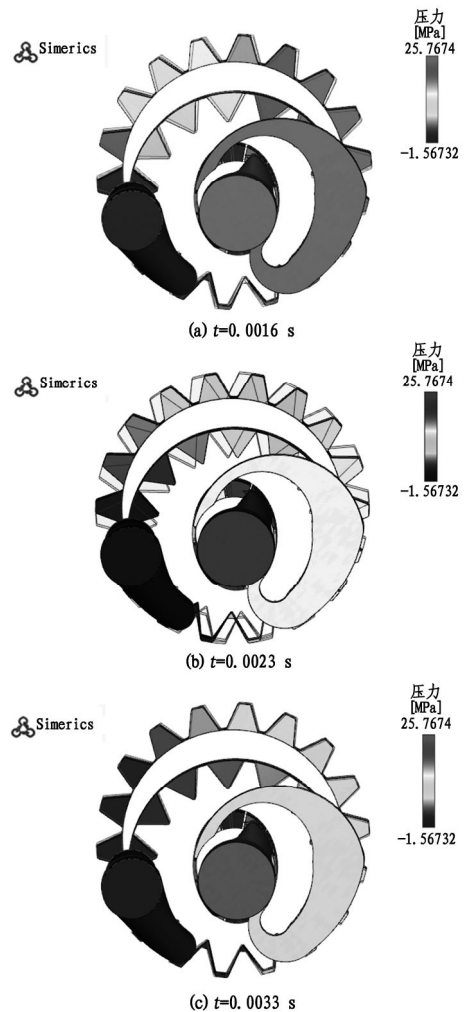


图 8 一级泵和二级泵吸排油频率不同时的压力分布云图

由图 8 可知当一级泵和二级泵吸排油频率不同时,流场内压力随着转子的转动不断变化,且变化幅度较大。在  $t=0.0016\text{ s}$  时一级齿轮泵的齿间密闭工作腔与过渡油道相连,随着转子的继续转动,齿轮泵开始排油,但因一级泵与二级泵吸排油频率不同导致二级叶片泵此时没有及时充分吸油,最终造成过渡油道内油液压力急剧升高的现象。在  $t=0.0023\text{ s}$  时二级叶片泵的一组叶片进入吸油区,叶片泵工作腔容积迅速扩张而吸油量瞬间增大,过渡油道内压力开始降低。在  $t=0.0033\text{ s}$  时二级叶片泵工作腔容积扩张即将扩张到最大容积,二级叶片泵的吸油量大于一级齿轮泵排油量导致过渡油道内压力骤降。一级泵齿轮齿数比为 14:18,二级泵叶片数为 14 时的压力分布云图如图 9 所示。

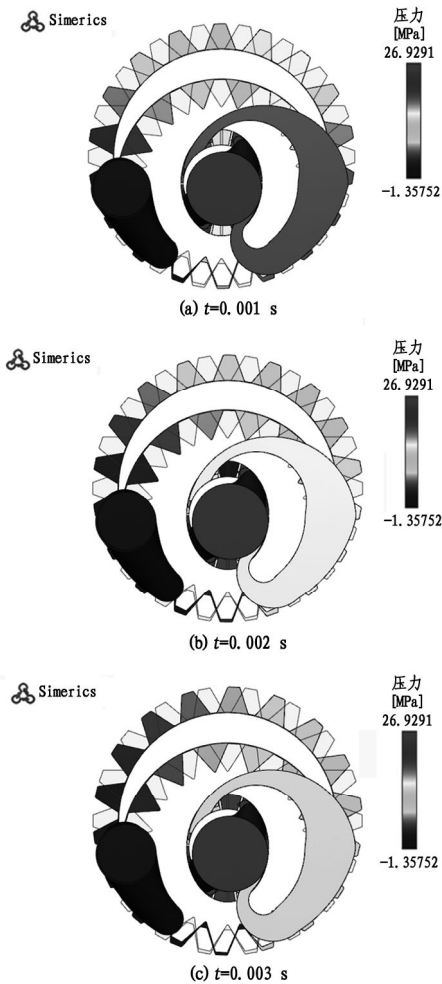


图 9 一级泵与二级泵吸排油频率相同时的压力分布云图

由图 9 可知当一级泵与二级泵吸排油频率相同时,流场内压力随着转子的转动变化幅度较小。当增压复合泵内的一级齿轮泵的齿间密闭工作腔与过渡油道连通开始排油时,由于一级泵和二级泵的吸排油频率相同,且二级叶片泵工作腔容积迅速扩张

并及时吸油,因此可最大程度避免过渡油道内油液没有及时排出而造成压力急剧升高的情况。但是随着转子旋转,一级齿轮泵的齿间容积随啮合点移动呈现非均匀变化,导致齿轮泵的瞬时流量波动较大,而二级叶片泵由于定子内壁的过渡曲线段为六次曲线,叶片伸出和缩回的速度变化平滑,使密封容积呈线性扩张和收缩,正因如此二级叶片泵的瞬时流量波动较小,一级泵与二级泵的瞬时吸排油流量不完全相同导致了连接一级泵和二级泵的过渡油道内压力呈现出波动现象。

通过对比图 8 和图 9 可知,当一级泵与二级泵的吸排油频率相同时过渡油道内的压力波动幅度会显著降低,压力波动幅值由不同频率时的 24 MPa 左右降低至相同频率时的 14 MPa 左右。

## 4 二级增压复合容积泵流量特性研究

### 4.1 二级增压复合容积泵的流量特性仿真

流量特性是评价液压力容积泵性能好坏的重要指标,为了研究增压复合泵增压过程中的流量脉动性,首先通过扫过面积法推导的内啮合齿轮泵的瞬时流量方程和双作用叶片泵的瞬时流量方程来验证一级泵和二级泵几何模型的合理性,然后分析仿真所得到的增压复合泵流量曲线。通过 Matlab 绘制出理论瞬时流量曲线,通过 PumpLinx 仿真模拟出仿真瞬时流量曲线,对比图如图 10、图 11 所示。

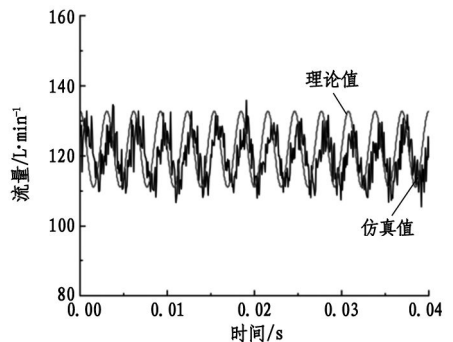


图 10 一级内啮合齿轮泵瞬时流量

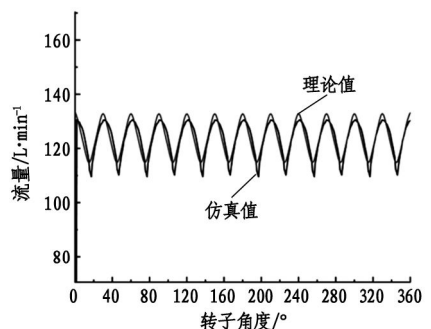


图 11 二级双作用叶片泵瞬时流量

一级内啮合齿轮泵旋转一周的时间为一个周期,即0.04 s,其理论瞬时流量和仿真瞬时流量在一个周期内变化都为13次,这是因为小齿轮齿数为13,内啮合齿轮泵在一个周期内共吸排油13次,在齿轮副旋转一周的时间内小齿轮和内齿轮之间的各个容积经历先变大后变小的过程,从而引起一次又一次流量的变化。

二级双作用叶片泵的转子和一级内啮合齿轮泵的小齿轮为一体式设计,其旋转一周的时间相同,在转子旋转一周的过程中,叶片与泵体所构成的密封容腔分别经历先变大再变小的过程共计两次。当两叶片间的容腔正好落在定子大径范围内时,容腔最大。叶片随着转子从定子大径范围开始经过过渡曲线段向定子小径范围运动时,容腔开始变小,对油液挤压,此时开始排油。当叶片间的容腔落在定子小径范围内时,形成最小容腔,排油结束,理论排油腔也在此终止,其余容腔的吸排油规律同样如此。

在一个周期内,分别对比分析内啮合齿轮泵和双作用叶片泵的理论流量和仿真流量,可以看出其仿真得到的瞬时流量曲线的平均流量均要比理论计算得到的瞬时流量曲线的平均流量要低一些,并且达到最大流量处的时间点均略微延后一点,这是因为仿真过程中流体具有黏性并且进出口流道存在局部阻力损失,可能会导致理论瞬时流量曲线和仿真瞬时流量曲线有细微差别。

#### 4.2 关键参数对流量特性影响研究

对增压复合泵流量脉动影响最直接的参数为一级泵的小齿轮数和二级泵的叶片数。本研究根据增压复合泵在一定工况下分别选取一级泵小齿轮数和二级泵叶片数多种搭配情况来研究其对容积泵流体流量脉动的影响,参数如表3所示。

表3 二级增压复合容积泵多种情形下的参数

| 分类  | 小齿轮数 | 内齿轮数 | 叶片数 |
|-----|------|------|-----|
| 情形一 | 10   | 14   | 12  |
| 情形二 | 13   | 17   | 12  |
| 情形三 | 14   | 18   | 12  |
| 情形四 | 13   | 17   | 10  |
| 情形五 | 13   | 17   | 14  |
| 情形六 | 12   | 16   | 12  |
| 情形七 | 14   | 18   | 14  |
| 情形八 | 16   | 20   | 16  |

#### 4.2.1 情形一、二和三的流量脉动率对比分析

情形一、二和三中的二级双作用叶片泵叶片数固定为12,一级内啮合齿轮泵取小齿轮数分别为10齿、13齿、14齿,内齿轮与小齿轮齿数差固定为4,通过调整齿轮副齿宽来控制一级泵与二级泵理论平均流量相同,其余参数保持不变,仿真得到不同配比情况下小齿轮齿数对增压复合泵流量脉动的影响,仿真结果如图12所示。流量脉动数值和流量脉动率如表4所示。

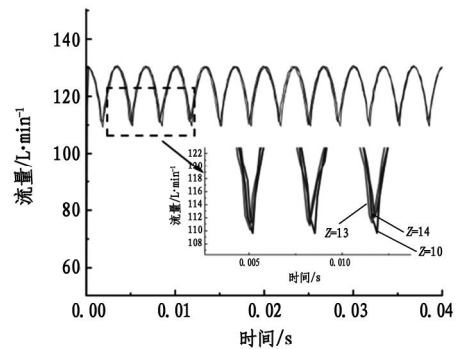


图12 情形一、二和三的二级增压复合容积泵流量脉动曲线图

表4 情形一、二和三的二级增压复合容积泵流量脉动数值和流量脉动率

| 齿数 | 最大流量 /L·min <sup>-1</sup> | 最小流量 /L·min <sup>-1</sup> | 平均流量 /L·min <sup>-1</sup> | 流量脉动率/% |
|----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------|
| 10 | 130.67                    | 109.22                    | 122.95                    | 17.4    |
| 13 | 130.58                    | 109.54                    | 122.97                    | 17.1    |
| 14 | 130.47                    | 110.03                    | 122.96                    | 16.6    |

由图12和表4可知,当增压复合泵在小齿轮数和叶片数不同的情况下,增加小齿轮数会略微减小其流量脉动率,这是因为增压复合泵的流量脉动率主要由二级双作用叶片泵决定,一级内啮合齿轮泵小齿轮齿数的变化主要会改变过渡油道内的吸排油规律,但是对容积泵流量脉动率的影响很小,所以只改变小齿轮齿数的情况下增压复合泵的流量脉动率变化很小。

#### 4.2.2 情形二、四和五的流量脉动率对比分析

情形二、四和五中的一级内啮合齿轮泵齿数比固定为13:17,二级双作用叶片泵取叶片数分别为10、12、14,通过调整叶片宽度来控制一级泵与二级泵理论平均流量相同,其余参数保持不变,仿真得到增压复合泵流量脉动的结果如图13所示。流量脉动数值和流量脉动率如表5所示。

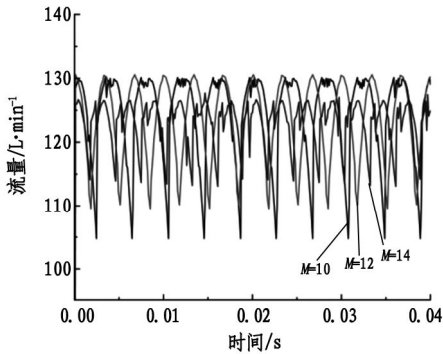


图 13 情形二、四和五的二级增压复合容积泵流量脉动曲线图

表 5 情形二、四和五的二级增压复合容积泵流量脉动数值和流量脉动率

| 叶片数 | 最大流量 /L · min <sup>-1</sup> | 最小流量 /L · min <sup>-1</sup> | 平均流量 /L · min <sup>-1</sup> | 流量脉动率/% |
|-----|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------|
| 10  | 130.92                      | 104.75                      | 122.85                      | 21.3    |
| 12  | 130.58                      | 109.54                      | 122.97                      | 17.11   |
| 14  | 127.71                      | 113.06                      | 122.77                      | 11.93   |

由图 13 和表 5 可知,当增压复合泵在小齿轮数和叶片数不同的情况下,增加二级双作用叶片泵叶片数会导致增压复合泵的流量脉动率减小,这是因为随着叶片数的增加,单位时间内参与吸油和排油的密封容腔数量增多,每个叶片间的密封容积变化量相对减小,并且相邻叶片的容积变化在时间上相互交错,这样的容积变化过程使流量波动被分散和叠加,整体流量更加平滑,从而降低脉动率,因此增加二级双作用叶片泵的叶片数可以有效降低增压复合泵的流量脉动率。

#### 4.2.3 情形六、七和八的流量脉动率对比分析

在一级内啮合齿轮泵小齿轮数和二级双作用叶片泵叶片数相同,同时改变小齿轮齿数和叶片数分别为 12、14、16,内齿轮齿数与小齿轮齿数差值固定为 4,其余参数保持不变的情况下,仿真得到增压复合泵流量脉动的结果如图 14 所示。流量脉动数值和流量脉动率如表 6 所示。

由图 14 和表 6 可知,当增压复合泵的小齿轮数与叶片数同步增加时,其流量脉动率减小。这是因为叶片数增加使单位时间内参与吸排油的密封容腔数量增多,各叶片间容积的流量波动相互分散叠加,让整体流量更平滑,进而降低了脉动率,还因为增压复合泵的小齿轮数和叶片数相同,使一级内啮合齿轮泵和二级双作用叶片泵在一个周期内吸排油次数相同,使一级泵与二级泵的吸油频率相同,避免了因

为吸排油频率不同导致过渡油道中油液堆积或者油液供应不足的情况,因此增压复合泵在小齿轮数和叶片数相同的情况下增加二级双作用叶片泵叶片数可以有效降低增压复合泵的流量脉动率。

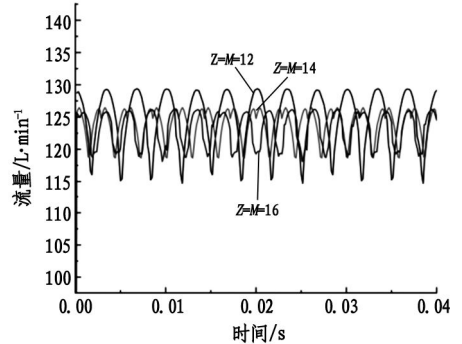


图 14 情形六、七和八的二级增压复合容积泵流量脉动曲线图

表 6 情形六、七和八的二级增压复合容积泵流量脉动数值和流量脉动率

| 叶片齿数 | 最大流量 /L · min <sup>-1</sup> | 最小流量 /L · min <sup>-1</sup> | 平均流量 /L · min <sup>-1</sup> | 流量脉动率/% |
|------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------|
| 12   | 129.386                     | 114.72                      | 122.54                      | 11.96   |
| 14   | 126.462                     | 118.67                      | 122.90                      | 6.33    |
| 16   | 126.211                     | 118.55                      | 122.78                      | 6.23    |

#### 4.3 现有商用液压泵的对标分析

将结构参数为齿轮泵齿数比为 14:18 叶片泵叶片数为 14 的增压复合泵对比国内商用单级液压泵,如恒立液压 CBG 系列(单级外啮合齿轮泵)和力源液压 CB 系列(单级内啮合齿轮泵)产品的性能,根据现有公开技术资料和行业测试数据,恒立液压 CBG 系列齿轮泵在 24 MPa 级压力下的流量脉动率约为 10.2%,力源液压 CB 系列齿轮泵采用斜齿设计和浮动侧板补偿,在 24 MPa 级压力下将脉动率控制在 8% 左右。而增压复合泵通过双泵串联的设计可以在同等压力下将流量脉动率降低到 6.33%。

在商用二级泵领域,恒立液压 CBG1 系列(二级外啮合齿轮泵)是中高压齿轮泵领域的经济性主力产品,其在 20 MPa 工况下实现 7% 左右的流量脉动率。对于商用二级叶片泵则存在自吸能力不足的问题,工业现场最主流的方案是增加辅助吸油泵或者需要优化吸油系统。

对于轴向柱塞泵,谢海波等<sup>[16]</sup>基于遗传算法的多目标参数寻优计算,得到优化结构参数后的轴向柱塞泵仍存在较高脉动率(12.02%),而增压复合泵流量脉动率更低,能为对流量稳定性要求严苛的

场景(如精密液压控制、高精度流体输送)提供更平稳的输出,有效减少因流量波动引发的系统振动、噪音及设备损耗。同时在成本层面,轴向柱塞泵内部结构复杂,包括多个高精度配合的柱塞、缸体和配流盘等部件,制造工艺要求高使得制造成本居高不下,而增压复合泵采用转子一体式设计,减少了零部件数量从而降低了制造成本。

通过对比可以得出增压复合泵因为内啮合齿轮泵和双作用叶片泵的串联式设计拥有较强的自吸能力,不仅在相同工况下拥有更低的流量脉动率,并且在流量相同的情况下结构更加紧凑,具有一定体积优势。

## 5 结论

本研究以二级增压复合容积泵为研究对象,利用仿真分析软件 PumpLinx 对其流量特性和升压过程中的压力脉动展开了研究,经过分析得出该增压复合泵可输出中高压液压油,兼具低流量脉动率的特点,在出口流量  $123 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  的情况下达到 24 MPa 的出口压力,并且得出小齿轮数或叶片数多种搭配情形对泵输出特性的影响。

在一级泵小齿轮数和二级泵叶片数不同的情况下增加叶片数对增压复合泵的流量脉动率有较大幅度降低,其中叶片数为 14 时流量脉动率最低为 11.93%,而增加小齿轮数对二级复合容积泵的流量脉动率影响较小,降低幅度为 0.3% - 0.5%。

在一级泵小齿轮数和二级泵叶片数相同的情况下增压复合泵的流量脉动率很大程度降低,通过对比分析得出增加叶片数对其流量脉动率有较大幅度降低,其中叶片数为 16 时流量脉动率最低为 6.23%。通过对比国内主流商用一二级液压泵得出在相同工况下增压复合泵的流量脉动率更低且在流量相同时结构更加紧凑。

对比一级泵和二级泵吸排油频率相同和不同两种情况,得出当其吸排油频率相同时也就是一级泵小齿轮数与二级泵叶片数相同时可显著降低升压过程中的压力波动,压力波动幅值由不同频率时的 24 MPa 左右降低至相同频率时的 14 MPa。

## 参考文献:

- [1] 王天义,田勇,赵莺慧,等. 工程机械液压传动系统节能技术综述[J]. 机械设计与制造工程,2022(12):1-5.
- [2] 王迎春,张艳涛. 国产内啮合齿轮泵的对比测试研究[J]. 重型机械,2021(5):69-74.
- [3] 徐学忠,宋天麟. 直线共轭齿轮泵的流量特性分析与仿真[J]. 煤矿机械,2008(7):47-49.
- [4] 范宏权,徐彦,李晓东,等. 基于转角和啮合点关系的内啮合齿轮泵排量精确计算[J]. 液压与气动,2019(11):125-129.
- [5] CHAI H Q, YANG G L, WU G G, et al. Research on flow characteristics of straight line conjugate internal meshing gear pump[J]. Processes, 2020, 8(3):269.
- [6] 朱诗顺,欧阳熙,朱道伟,等. 车辆液压助力转向泵故障模拟实验[J]. 军事交通学院学报,2015(3):57-61.
- [7] 郑澈. 变量双作用叶片泵瞬时流量研究[J]. 液压与气动,2004(5):29-32.
- [8] 王马林,唐坤,郝跃跃,等. 新型双作用式叶片泵的理论研究[J]. 机械,2012(10):68-70.
- [9] 孙远敬,李鑫,郭鹰,等. 双级高压内啮合齿轮泵性能研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2022(6):539-543.
- [10] 安蕾,程小慷. 一种多级内啮合航空齿轮泵设计与仿真[J]. 流体机械,2016(1):49-53.
- [11] 杨桃月,曹阳. 双作用叶片泵叶片安装倾角的分析[J]. 装备制造技术,2018(11):147-150.
- [12] 刘潇潇,任牟华,车军,等. 叶片泵叶片倾角和定子内曲线对叶片受力的影响[J]. 兰州交通大学学报,2015(6):126-130.
- [13] 高铭良,崔建昆,黄冬平,等. 直线共轭内啮合齿轮传动重合度的计算分析[J]. 流体机械,2017(2):28-31.
- [14] 段佳浩,何俊,史正强,等. 双泵源变转角压力脉动抑制研究[J]. 导弹与航天运载技术,2021(3):83-88.
- [15] 王峥嵘,那焱青,李少年,等. 高压叶片泵瞬时流量分析[J]. 西华大学学报(自然科学版),2006,25(3):46-47,64,115.
- [16] 谢海波,洪昊岑,王柏村,等. 基于多目标遗传算法的斜盘式轴向柱塞泵低脉动结构优化设计[J]. 工程设计学报,2024(2):160-167.

责任编辑:李壮

## 基于变分模态分解算法的肌电信号去噪研究

凌六一<sup>1,2\*</sup>, 赵博洋<sup>2</sup>, 韦利余<sup>2</sup>, 刘一铭<sup>2</sup>, 冯彬<sup>1,2</sup>

(1. 安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学 人工智能学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:**为了解决表面肌电(sEMG)信号采集易受环境影响,使采集到的肌电信号干扰多、噪声大的问题,提出一种变分模态分解(VMD),鲸鱼优化算法(WOA)与小波阈值去噪(WTD)相结合的方法,通过WOA优化VMD的分解参数,以实现sEMG信号的最佳分解;然后利用最大相关系数法筛选出有效的分量;最后,采用WTD对筛选后的分量进一步去除噪声,并将这些分量叠加得到最终的去噪后肌电信号。通过对八组数据的对比实验可知,所提出的WOA-VMD-WTD算法不仅显著降低了sEMG信号中的高频噪声,还在信噪比改善方面,平均提升了1.97 dB。实验结果显示,在时域和频域分析中,以及在信噪比改善和均方根误差控制方面,该算法均优于其他现有方法。

**关键词:**鲸鱼优化算法;变分模态分解;肌电信号;小波阈值去噪;相关系数;信噪比;均方根误差

中图分类号:TN911.7

文献标识码:A

文章编号:2095-297X(2026)02-0052-07

## Research on Denoising of Electromyography Signals Based on Variational Mode Decomposition Algorithm

LING Liuyi<sup>1,2\*</sup>, ZHAO Boyang<sup>2</sup>, WEI Liyu<sup>2</sup>, LIU Yiming<sup>2</sup>, FENG Bin<sup>1,2</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, 232001, Anhui;  
2. School of Artificial Intelligence, Anhui University of Science and Technology, Huainan, 232001, Anhui)

**Abstract:** To address the issue of surface electromyography (sEMG) signal acquisition being easily affected by environmental factors, leading to collected EMG signals with much interference and high noise levels, a method combining the variational mode decomposition (VMD), whale optimization algorithm (WOA), and wavelet threshold denoising (WTD) has been proposed in the paper. This method optimizes the decomposition parameters of VMD using WOA to achieve optimal decomposition of sEMG signals. Then, it selects effective components using the maximum correlation coefficient method. Finally, WTD is applied to further remove noise from the selected components, and these components are superimposed to obtain the final denoised EMG signal. Through comparative experiments with eight sets of data, the proposed WOA-VMD-WTD algorithm not only significantly reduced the high-frequency noise in sEMG signals but also achieved an average signal-to-noise ratio (SNR) improvement of 1.97 dB. The experimental results show that in time-domain and frequency-domain analysis, as well as in SNR improvement and root mean square error (RMSE) control, this algorithm outperforms other existing methods.

**Key words:** whale optimization algorithm; variational mode decomposition; electromyography signal; wavelet threshold denoising; correlation coefficient; signal to noise ratio; mean square error

肌电信号在人体机理检测中是一种常见的信号,其基本原理是检测肌肉在收缩时产生的电位,以

收稿日期:2025-08-25 \* 通讯联系人

基金项目:安徽理工大学环境友好材料与职业健康研究院(芜湖)研发专项(ALW2022YF06);安徽高校协同创新项目(GXXT-2022-053)。

作者简介:凌六一(1980-),男,安徽枞阳人,教授,博士;赵博洋(2001-),男,安徽合肥人,硕士研究生。E-mail:lyling@aust.edu.cn

此记录肌肉的电活动。在肌电信号中,较为常见的是表面肌电信号:在人体皮肤表面通过电极直接采集到的肌电信号<sup>[1]</sup>。在肌电信号处理领域,已有多项技术被提出并应用于提升信号质量。传统的去噪方法包括傅里叶变换(Fourier Transform, FT)<sup>[2]</sup>、小波变换(wavelet transform, WT)<sup>[3]</sup>、独立成分分析(independent component analysis, ICA)<sup>[4]</sup>以及自适应滤波<sup>[5]</sup>等。这些方法各有优劣:例如傅里叶变换对于线性信号的处理效果较好,然而在处理非线性信号时,其效果较差;小波变换在处理多分辨率问题时,存在边界效应的弊端;独立成分分析在分离混合信号方面表现出色,但对信号的非高斯分布有较高的要求;自适应滤波则能根据环境变化自动调整滤波器参数,但其收敛速度较慢且容易陷入局部最优。在近几年中,随着机器学习与深度学习技术的进步,利用这些先进技术提升肌电图信号处理性能的研究日益增多。例如,卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)<sup>[6]</sup>和长短期记忆(long short-term memory, LSTM)<sup>[7]</sup>网络等深度学习模型已被应用于肌电信号的特征提取和分类任务中,显现出了较好的应用前景。但这类方法依然存在一些弊端,如在标注数据不足时,上述方法的效果会大打折扣;深度学习模型的黑箱特性也制约了其在某些领域的推广使用。

除了上述提及的方法外,变分模态分解能够将信号分解成若干固有模态函数(intrinsic mode function, IMFs),并且保持各分量间的正交性,进而受到广泛关注<sup>[8]</sup>。在信号分解方面,分解后分量的中心频率和带宽是由VMD算法的优化过程来确定的,但VMD算法中参数的选择对结果有着重要影响,不当的参数设置可能会导致分解结果出现过分割或欠分割的问题。因此,如何高效地选择VMD参数成为了研究的重点之一。

针对这一挑战,粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)<sup>[9]</sup>、遗传算法(genetic algorithm, GA)<sup>[10]</sup>等被引入来优化VMD参数,并取得了较好的成果。本研究提到的鲸鱼优化算法<sup>[10]</sup>,由于其独特的搜索机制和较强的全局搜索能力,在优化VMD参数方面展现出了显著的优势<sup>[11]</sup>。其结合智能优化算法与VMD的肌电图信号处理方法不仅能够提高信号的去噪效果,还能增强信号分析的准确性和可靠性<sup>[12]</sup>。

## 1 去噪算法设计

本研究提出一种将变分模态分解(VMD)、鲸鱼优化算法(WOA)、小波阈值去噪(WTD)三者相结合的方法,用于sEMG信号的去噪处理。使用变分模态分解对肌电原始信号进行分解,通过鲸鱼优化算法获得VMD参数的最优解,对每个分解后的信号计算其相关系数(correlation coefficients, CC),选取相关系数大于0.3的分解信号,再对这部分信号采取小波阈值去噪,将输出的各分量进行叠加,得到最终的滤波后信号。去噪过程框图如图1所示。

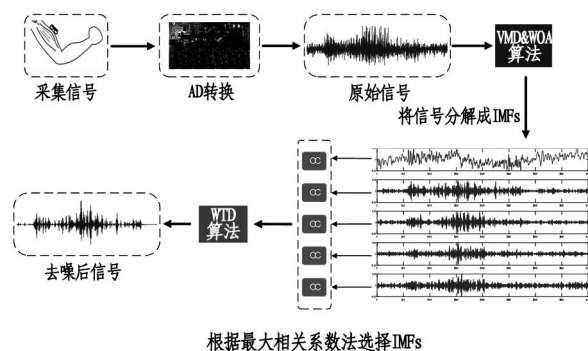


图1 去噪过程框图

### 1.1 变分模态分解

人体表面肌电信号较为微弱,且容易受到环境干扰,使信号含有多种噪声,为提升最终输出肌电信号的质量,引入VMD算法对原始sEMG进行信号分解。在VMD对信号进行分解的过程中,其约束变分问题为<sup>[13]</sup>:

$$\min_{\{u_k\}, \{w_k\}} \left\{ \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[ (\delta(t) + \frac{j}{\pi t}) * u_k(t) \right] e^{-jw_k t} \right\|_2^2 \right\} \quad (1)$$

s. t.  $\sum_{k=1}^K u_k = x$

式中: $u_k(t)$ 为VMD分解后第 $k$ 个IMF分量; $w_k$ 为第 $k$ 个IMF分量的瞬时频率; $\delta(t)$ 为狄拉克函数; $*$ 为卷积符号; $(\delta(t) + \frac{j}{\pi t}) * u_k(t)$ 为希尔伯特变换。

VMD算法可以很好地避免信号分解时模态混叠和端点效应等情况,且分解重构后的信号具有良好的抗噪声性和非平稳性。在本研究中,引入鲸鱼优化算法来优化VMD算法的重要参数,以达到最优的参数和分解效果。分解后的各个分量还需要进一步地选择,这里采用最大相关系数法。相关系数CC的计算公式为<sup>[14]</sup>:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

其中: $X_i$ 和 $Y_i$ 分别是 $X$ 和 $Y$ 的第 $i$ 个观测值; $\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$

分别是  $X$  和  $Y$  的平均值;  $n$  是观测值的数量。

一般认为, IMF 分量同原始信号的相关系数与其噪声含量成反比。中心频率最高的分量 IMF 与分解后信号的相关系数一般低于 0.3, 表现出弱相关性, 表明其噪声成分最显著。因此, 对于分解得到的 IMFs, 仅选取相关系数高于 0.3 的分量用于后续的小波阈值去噪。

## 1.2 鲸鱼优化算法

VMD 算法的参数设置和最终分解效果密切相关, 为提升其有效性, 本研究引入 WOA 算法。该算法由包围猎物、螺旋捕食、随机搜索三个主要阶段所构成, 其流程图如图 2 所示。

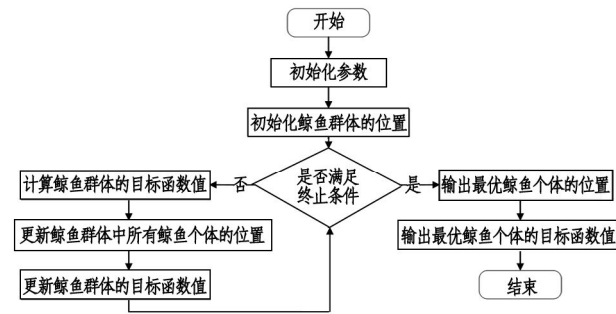


图2 鲸鱼优化算法流程图

### 1.2.1 包围猎物

假设有一个  $d$  维空间, 当前最佳鲸鱼个体  $X^*$  的位置为  $(X_1^*, X_2^*, \dots, X_d^*)$ , 鲸鱼的独立个体  $X^j$  的位置为  $(X_1^j, X_2^j, \dots, X_d^j)$ , 则鲸鱼个体  $X^j$  在最佳鲸鱼个体的影响下位置  $X^{j+1} (X_1^{j+1}, X_2^{j+1}, \dots, X_d^{j+1})$  的计算公式为<sup>[15]</sup>:

$$\begin{cases} X_k^{j+1} = X_k^* - A_1 \cdot D_k \\ D_k = |C_1 \cdot X_k^* - X_k^j| \\ C_1 = 2r_2 \\ A_1 = 2a \cdot r_1 - a \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $X_k^{j+1}$  表示空间坐标  $X^{j+1}$  的第  $k$  个分量;  $D_k$  计算公式中  $| \cdot |$  表示求绝对值的含义;  $a$  是随着迭代次数的增加, 从 2 至 0 线性递减;  $r_1$  和  $r_2$  都是 0 到 1 之间的随机数。

### 1.2.2 螺旋捕食

螺旋捕食模拟了座头鲸特有的气泡网捕食方式, 为实现在该行为的数学建模, 本研究设计了两种不同的数学模型来分别描述这一过程。依旧假设在  $d$  维空间中, 当前最佳鲸鱼个体  $X^*$  的位置为  $(X_1^*, X_2^*, \dots, X_d^*)$ , 鲸鱼个体  $X^j$  的位置为  $(X_1^j, X_2^j, \dots, X_d^j)$ 。

(1) 收缩包围。收缩包围将  $A_1$  的取值范围从

原来的  $[-a, a]$  调整为  $[-1, 1]$ , 其余公式保持不变。

(2) 螺旋式位置更新。当前鲸鱼个体通过一个螺旋式的轨迹向最优个体靠近, 其数学模型为:

$$\begin{cases} X_k^{j+1} = X_k^* + D_k \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) \\ D_k = |X_k^* - X_k^j| \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $b$  为对数螺旋形状常数,  $l$  为  $-1$  到  $1$  之间的随机数。

自然界中, 当座头鲸捕食时, 并不确定是选择收缩包围还是螺旋路径。因此, 算法以 50% 的概率在两种策略间进行选择, 收缩包围或螺旋接近, 其数学模型为:

$$X_k^{j+1} = \begin{cases} X_k^* - A_1 \cdot D_k & p < 0.5 \\ X_k^* + D_k \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) & p \geq 0.5 \end{cases} \quad (5)$$

### 1.2.3 随机搜索

假设在  $d$  维空间中, 当前鲸鱼群体中随机出现一个鲸鱼个体  $X^{\text{rand}}$  的位置为  $(X_1^{\text{rand}}, X_2^{\text{rand}}, \dots, X_d^{\text{rand}})$ , 鲸鱼个体的位置为  $(X_1^j, X_2^j, \dots, X_d^j)$ , 则搜索捕食行为的模型为:

$$\begin{cases} X_k^{j+1} = X_k^{\text{rand}} - A_1 \cdot D_k \\ D_k = |C_1 \cdot X_k^{\text{rand}} - X_k^j| \\ C_1 = 2r_2 \\ A_1 = 2a \cdot r_1 - a \end{cases} \quad (6)$$

本研究以 IMF 分量的熵值作为目标函数的构建依据。熵是信息论中用于度量信号不确定性和混乱程度的指标, 熵值越低, 表明该 IMF 分量的瞬时频率分布越集中, 所含噪声也越少<sup>[16]</sup>。

## 1.3 去噪指标

为了定量分析算法的去噪效果, 考虑到表面肌电信号属于非平稳随机信号, 单一评价指标不能全面、准确地表征去噪效果, 需要选取多个指标组成综合评价指标, 客观地分析去噪效果<sup>[17]</sup>。本研究采用信噪比 (SNR) 和均方根误差 (RMSE) 来综合评估算法的去噪效果。其中, SNR 表示有用信号功率与噪声功率之比, 单位为分贝 (dB), 其与信号中的噪声含量呈反比。值越高, 说明信号中的噪声越小, 信号质量越好; RMSE 用于衡量去噪结果与原始数据之间的偏差, 数值越低表明去噪精度越高, 信号中特征保留的越充分, 其公式为<sup>[18]</sup>:

$$\text{SNR} = 10 \lg \left( \frac{\sum_{j=1}^n [f(j)]^2}{\sum_{j=1}^n [f(j) - \tilde{f}(j)]^2} \right) \quad (7)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n [f(j) - \tilde{f}(j)]^2} \quad (8)$$

式中: $n$ 为信号长度; $f(j)$ 为原始信号的 $j$ th采样点; $\hat{f}(j)$ 为算法处理后信号的 $j$ th采样点;信噪比的单位为dB。

## 2 数据采集

本研究采用自主设计的多通道表面肌电信号采集电路系统进行数据的采集。在肌肉位置选取方面,本实验取下肢三组肌肉位置:针对膝关节伸展动作,采集股四头肌中的股直肌(rectus femoris, RF)和股内侧肌(vastus medialis muscle, VM);针对踝关节背屈动作,采集胫骨前肌(tibialis anterior muscle, TA)。图3展示了三块肌肉的大致位置。通过触诊法进一步确定肌肉的具体位置,再将电极贴附上去。

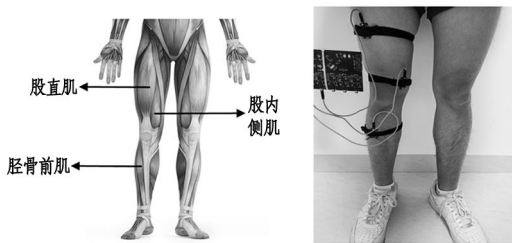


图3 肌肉位置示意图及实验实物图

为了保证所采集到的EMG信噪比,在实验中采用酒精对受试者的手臂做表面消毒处理。采样频率为1 kHz,实验时让被测试者坐在椅子上,以均匀的速度重复坐站动作,一组动作持续时间为60 s;每次做完一个周期后给予一定时间(约10-15 min)的休息<sup>[19]</sup>。

## 3 结果分析

### 3.1 数据分析

对于最终采集到的数据,随机选取不同通道,不同时间段的4000个样本点的肌电信号作为去噪算法的输入信号。本研究选择4000作为样本点间隔,是因为按照采集到的肌电信号时域图,4000个样本点刚好是包含波峰和波谷的完全周期,便于去噪效果的定性和定量分析。对采集到的下肢表面肌肉肌电信号数据进行频域和时域分析,其频域图和时域图如图4所示。表面肌电信号以交流电压形式呈现,其正负波动特性使其更易受到外界干扰。

在图4(a)的原始信号频域图中,可以清楚地看到,信号的频谱主要分布在50-300 Hz内。在低频段和高频段均存在明显的干扰以及噪声。此外,人体出汗、电极移动等因素会引入干扰,心电信号干扰和工频噪声也较为常见<sup>[20]</sup>。如图4(b)所示,可以

看到信号的波形特点符合坐站动作下的表面肌电信号变化趋势,但存在个别采样点偏移基线的情况。因此,引入基于WOA-VMD-WTD的去噪算法,以有效抑制信号噪声,提高信号质量。

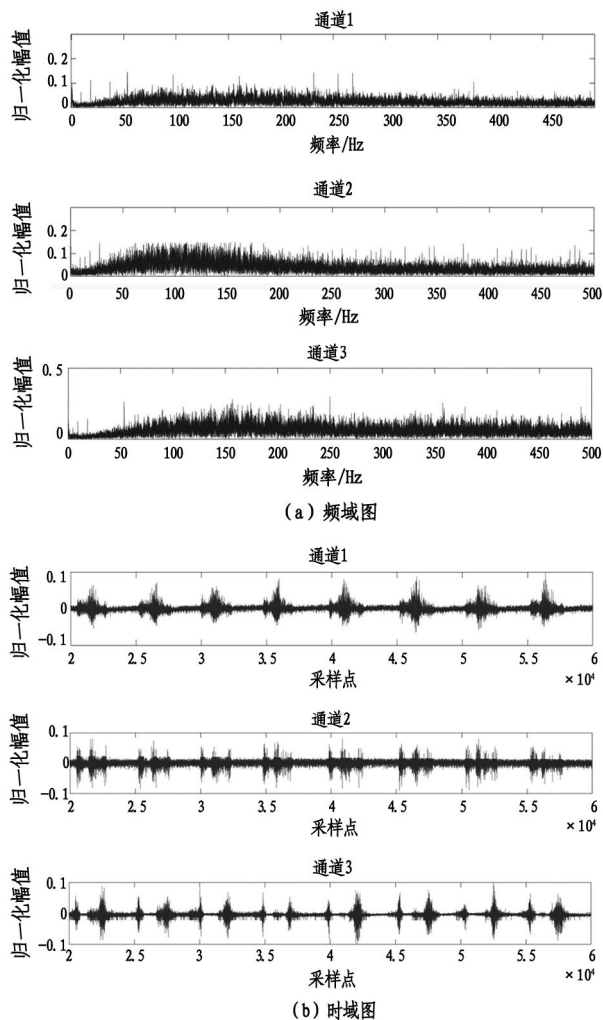


图4 原始肌电信号频域及时域分析图

### 3.2 算法参数确定

VMD在进行信号分解时需设置六个参数,包括噪声容忍度、无直流量、中心频率初始化方式、收敛判据容忍度、惩罚因子 $\alpha$ 以及模态分解数 $K$ 。前四项使用默认值即可,后两项通过VMD算法确定。若 $K$ 值过大,易导致过分解,造成计算资源浪费; $K$ 值至少应为2,若过小则分解效果不佳,适应度通常较差,同样容易在优化过程中被筛选掉。而惩罚因子 $\alpha$ 过大会导致搜索空间过大,不利于算法的计算效率<sup>[21]</sup>。经过综合考虑, $K$ 的搜索范围设置为 $[2, 10]$ , $\alpha$ 的搜索范围设置为 $[10, 300]$ 。

在实施WOA-VMD-WTD混合算法时,必须预先配置最大循环次数参数。经过多次实验验证,当算法的迭代次数达到20次时,算法终止。为评估该参

数取值的有效性,实验选取了6组原始肌电信号样本,运用该算法进行信号分解处理。图5是多次试验中适应度随迭代次数变化的迭代图,其中适应度为基于信息熵计算的无量纲指标。结果显示,第1至第6组信号分别在第4、12、10、2、5和9代达到最优适应度,均在20代内收敛。对应的最优参数组合

分别为 $[9.92, 1462.15]$ 、 $[7.52, 702.08]$ 、 $[6.50, 2881.91]$ 、 $[6.31, 2384.11]$ 、 $[9.36, 278.34]$ 和 $[8.50, 713.07]$ 。实验结果表明,将最大迭代次数设为20是合理、可靠的,且能够在保证计算效率的同时有效寻得最优参数组合<sup>[22]</sup>。

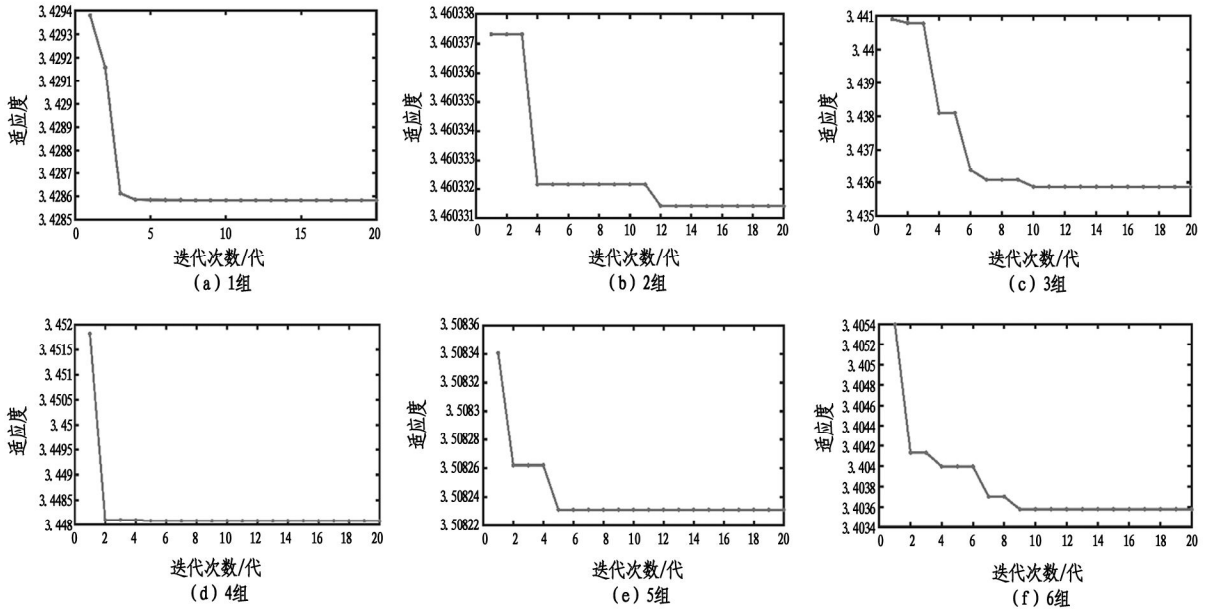


图5 适应度随迭代次数变化的迭代图

### 3.3 结果分析

#### 3.3.1 IMFs 筛选

将采集的原始肌电信号截取一个周期,共4000个采样点作为WOA-VMD-WTD去噪算法的输入,并对其进行分解,结果如图6所示。

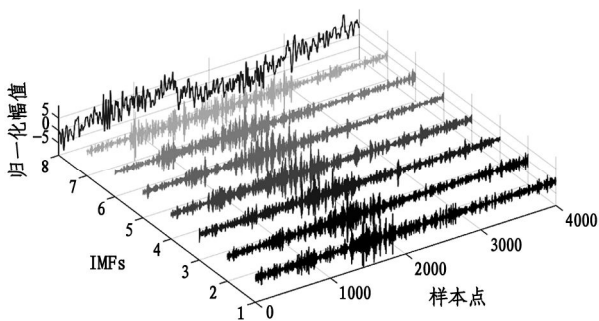


图6 肌电信号分解后的IMFs图

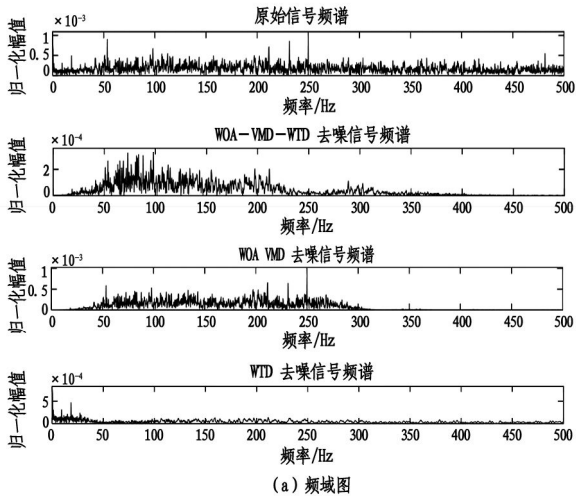
其中,VMD的参数由鲸鱼优化算法(WOA)优化确定,最终将信号分解为8个IMF分量。依据式(2)计算出各个分量与原始信号的相关系数分别为:0.32079、0.36114、0.37893、0.43208、0.47377、0.47786、0.48498、0.2832。依据最大相关系数准则,选取相关系数大于0.3的前7个分量(IMF1-IMF7)

进行小波阈值去噪处理,将各个分量进行叠加,得到去噪后的肌电信号。

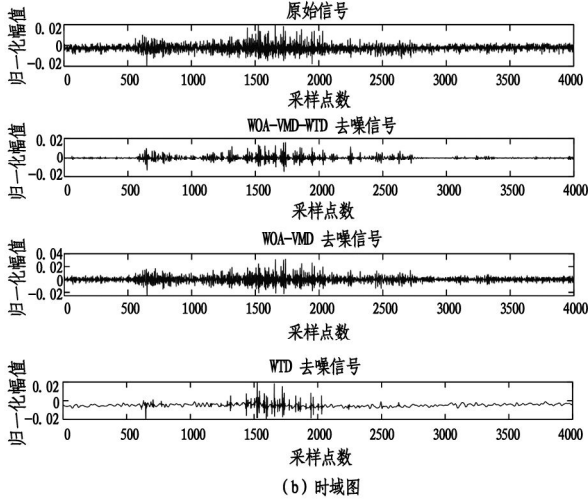
#### 3.3.2 结果定性分析

对于采集到的肌电原始信号数据,应用本研究提出的WOA-VMD-WTD算法。为增强结果的可信度,采用控制变量法,将三种不同的去噪方法应用于同一段原始肌电信号进行处理,具体策略如下:使用本研究提出的WOA-VMD-WTD算法、使用WOA-VMD算法、单独使用小波阈值算法。对去噪结果进行频域和时域分析,其结果如图7所示。

图7(a)是三种去噪策略去噪后信号同原始肌电信号的频域图对比,由图可知,采集到的肌电原始信号频率在20-500 Hz之间,但在高频部分仍有较大噪声;直接使用小波阈值去噪对于肌电信号的频谱并没有明显的改善;而应用WOA-VMD-WTD算法将去噪后肌电信号的频谱改善到集中在20-300 Hz之间,并且效果明显优于WOA-VMD算法。图7(b)是三种去噪策略去噪后信号同原始肌电信号的时域图对比,从图中可以看出,WOA-VMD-WTD算法的去噪效果明显有效且优于其他两种去噪策略。



(a) 频域图



(b) 时域图

图7 原始肌电信号及三种去噪策略去噪后信号的频域及时域分析图

### 3.3.3 结果定量分析

本节采用信噪比(SNR)和均方根误差(RMSE)作为量化指标,对本研究所提方法进行进一步的定量分析。对采集到的信号以每4000个样本点截取8组原始肌电信号数据,应用本研究提出的WOA-VMD-WTD去噪算法进行处理,其处理前后的SNR值变化如图8所示。可以看出,采用WOA-VMD-WTD去噪算法能明显提高信号的信噪比,其中去噪前的平均信噪比为5.46 dB,而去噪后的平均信噪比为7.43 dB,平均信噪比提升1.97 dB。

除了去噪前后的信噪比变化外,采用控制变量法论证算法融合的有效性。采用三种去噪方法对同一段原始肌电信号进行处理,分别为使用本研究提出的WOA-VMD-WTD算法、使用WOA-VMD算法、单独使用小波阈值算法。计算去噪前后的信噪比提升量( $\Delta$ SNR)和RMSE,结果如图9所示。由图可见,WOA-VMD-WTD算法的 $\Delta$ SNR明显高于其他两

种去噪方法;而均方根误差三种去噪策略相差不大并且都处于较小的范围。由这两种指标变化情况可以综合看出,WOA-VMD-WTD融合算法提升了去除信号噪声的效果并且去噪后的数据与原始信号误差值小,降噪精度较高。

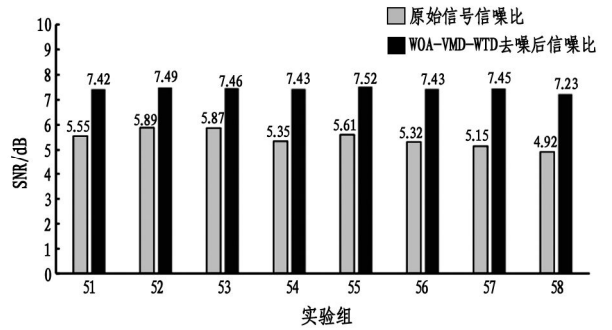


图8 去噪前后 SNR 值对比柱状图

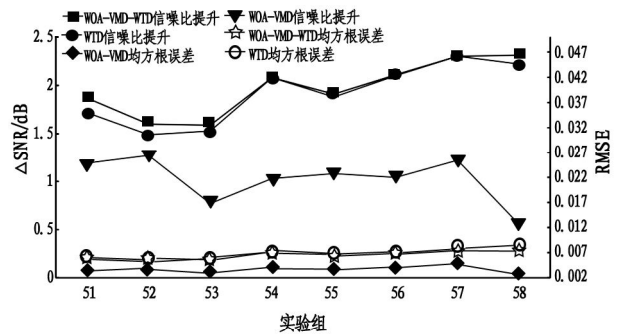


图9 不同去噪策略指标对比

除了选取小波阈值作为VMD分解后的进一步去噪方法外,本研究还选取了另外四种去噪方法分别为巴特沃斯低通滤波器<sup>[23]</sup>、无限冲激响应滤波器(infinite impulse response, IIR)<sup>[24]</sup>、有限冲激响应带阻滤波器(finite impulse response, FIR)<sup>[25]</sup>、有限冲激响应S-G法滤波器(Savitzky-Golay, S-G)<sup>[26]</sup>。将这四种去噪方法分别同基于WOA的VMD去噪算法结合,并选取8组数据进行去噪处理,计算去噪前后的 $\Delta$ SNR和RMSE,并求取其平均值,结果如表1所示。

表1 不同滤波方法融合算法去噪效果对比表

| 算法                  | $\Delta$ SNR/dB | RMSE   |
|---------------------|-----------------|--------|
| WOA-VMD-WTD         | 1.96            | 0.0093 |
| WOA-VMD-Butterworth | 1.56            | 0.0079 |
| WOA-VMD-IIR         | 0.92            | 0.0329 |
| WOA-VMD-FIR         | 0.81            | 0.1168 |
| WOA-VMD-S-G         | 1.69            | 0.0083 |

由表中数据可知,在信噪比增加方面,融合小波阈值与基于 WOA 优化的 VMD 去噪方法,其性能显著优于其他四种对比方法。从数据中还可以看出,该方法的 RMSE 数值较低,表明在去噪后原始信号的特征信息依然有效。由此可知,选取小波阈值去噪方法同基于 WOA 的 VMD 算法相结合进行去噪处理是一个行之有效的融合方法。

## 4 结论

本研究创新性地提出了一种混合去噪技术,整合了变分模态分解(VMD)、鲸鱼优化算法(WOA),以及小波阈值去噪(WTD)三种方法。采用 WOA 对 VMD 的关键参数进行智能调优,显著改善了信号分解的精确度;基于最大相关系数原则筛选有效模态分量,并融合 WTD 实现多层次噪声抑制,最终获得更高质量的信号重建效果。实验数据证实,该方案能有效消除高频干扰成分,平均信噪比改善幅度达到 1.97 dB,在时频特性分析方面均超越传统技术。研究不仅证实了 WOA 在 VMD 参数优化中的实用价值,同时揭示了结合 WTD 进行双重降噪的独特优势,可广泛应用于各类生物电信号处理领域。但算法运算效率的优化以及适用范围的扩展仍需后续深入研究。这项成果为表面肌电信号处理提出了新的技术思路,为相关学科的科研与实践提供了重要参考依据。

## 参考文献:

- [ 1 ] BOYER M, BOUYER L, ROY J S, et al. Reducing noise, artifacts and interference in single-channel EMG signals: A review [ J/OL ]. *Sensors*, 2023, 23( 6 ): 2927.
- [ 2 ] LIN Y, TAN P, LI D, et al. An FFT-based beam profile denoising method for beam profile distortion correction [ J/OL ]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2023, 1047: 167781.
- [ 3 ] 王振宇, 向泽锐, 支锦亦, 等. 多谱自适应小波和盲源分离耦合的生理信号降噪方法 [ J/OL ]. *北京航空航天大学学报*, 1 - 14 [ 2024 - 11 - 27 ].
- [ 4 ] RIEGLER C, VON RENNENBERG R, BOLLWEG K, et al. Endovascular therapy in patients with internal carotid artery occlusion and patent circle of willis [ J/OL ]. *Journal of NeuroInterventional Surgery*, 2024, 16( 7 ): 644 - 651.
- [ 5 ] LEE H, CHO S. Locally adaptive channel attention-based network for denoising images [ J/OL ]. *IEEE Access*, 2020, 8: 34686 - 34695.
- [ 6 ] ZHANG K, ZUO W, ZHANG L. FFDNet: Toward a fast and flexible solution for CNN-based image denoising [ J/OL ]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2018, 27 ( 9 ): 4608 - 4622.
- [ 7 ] CHAN D Y, WANG J F, CHIN H T. A new speaker-diarization technology with denoising spectral-LSTM for online automatic multialogue recording [ J/OL ]. *Multimedia Tools and Applications*, 2023, 83( 15 ): 45407 - 45422.
- [ 8 ] HUA T, DAI K, ZHANG X, et al. Optimal VMD-based signal denoising for laser radar via hausdorff distance and wavelet transform [ J/OL ]. *IEEE Access*, 2019, 7: 167997 - 168010.
- [ 9 ] DJEMAME S, BATOUCHE M, OULHADJ H, et al. Solving reverse emergence with quantum PSO application to image processing [ J/OL ]. *Soft Computing*, 2019, 23( 16 ): 6921 - 6935.
- [ 10 ] LIU J, ASHRAF M A. Face recognition method based on GA-BP neural network algorithm [ J/OL ]. *Open Physics*, 2018, 16( 1 ): 1056 - 1065.
- [ 11 ] 常留红, 李晨玉, 曾子彬, 等. 基于 WOA-VMD-XGBoost 的混凝土坝变形预测 [ J ]. *水利水运工程学报*, 2024 ( 3 ): 146 - 157.
- [ 12 ] RANI G J, HASHMI M F, MUHAMMAD G. Variational mode decomposition and empirical wavelet transform-based feature extraction and ensemble classifier for lower limb movement prediction with surface electromyography signal [ J/OL ]. *IEEE Access*, 2024, 12: 55201 - 55217.
- [ 13 ] 宋永献, 王祥祥, 夏文豪. 基于 VMD-HDNLM 的下肢肌电噪声信号处理方法研究 [ J ]. *电子测量技术*, 2023, 46 ( 14 ): 53 - 58.
- [ 14 ] HAN J, TIAN Y, WANG H, et al. Continuous limb joint angle prediction from sEMG using SA-FAWT and conv-BiLSTM [ J/OL ]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2024, 97: 106681.
- [ 15 ] 胡锐, 乔加飞, 李永华, 等. 基于 WOA-VMD-SSA-LSTM 的中长期风电预测 [ J ]. *太阳能学报*, 2024, 45 ( 9 ): 549 - 556.
- [ 16 ] 娄智, 邓浩, 陈香, 等. 基于自适应阈值处理的表面肌电信号小波去噪研究 [ J ]. *生物医学工程学报*, 2014, 31 ( 4 ): 723 - 728.
- [ 17 ] LU W, GONG D, XUE X, et al. Improved multi-layer wavelet transform and blind source separation based ECG artifacts removal algorithm from the sEMG signal; In the case of upper limbs [ J/OL ]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2024, 12: 1367929.
- [ 18 ] AIT YOUS M, AGOUNAD S, ELBAZ S. Automated detection and removal of artifacts from sEMG signals based on fuzzy inference system and signal decomposition methods [ J/OL ]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2024, 94: 106307.

# 基于树莓派的自动驾驶小车设计与实现

郝志廷

(安徽电子信息职业技术学院 机电工程学院,安徽 蚌埠 233030)

**摘要:** 阐述了一款基于树莓派的自动驾驶小车设计与实现过程,涵盖了从硬件选型搭建,包括树莓派、传感器与执行器的适配,到软件架构设计,利用 PyTorch 训练模型实现环境感知与决策,再到系统集成、测试优化的全流程。研究旨在通过低成本硬件平台树莓派结合先进软件算法,打造具有一定自动驾驶能力的智能小车,为相关领域研究与教育提供参考范例,推动自动驾驶技术在小型移动平台的应用探索。

**关键词:** 树莓派;自动驾驶;传感器;PyTorch 框架

中图分类号: TP24

文献标识码: A

文章编号: 2095-297X(2026)02-0059-06

## Design and Implementation of an Autonomous Driving Vehicle Based on Raspberry Pi

HAO Zhiting

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Vocational College of Electronics and Information Technology, Bengbu, 233030, Anhui)

**Abstract:** It presented the design and implementation process of an autonomous driving small car based on Raspberry Pi in the paper. It covers the entire workflow, from hardware selection and setup including the integration of Raspberry Pi, sensors, and actuators to software architecture design, which employs PyTorch for training models to achieve environmental perception and decision-making, and then it is further refined through integration, testing and optimization. This research is intended to create an intelligent car with certain autonomous driving capabilities by combining the low-cost hardware platform Raspberry Pi with advanced software algorithms, providing a reference example for research and education in related fields and promoting the exploration of autonomous driving technology applications in small-scale mobile platforms.

**Key words:** Raspberry Pi; autonomous driving; sensors; PyTorch framework

随着全球经济的飞速发展和工业自动化水平的不断提高,高精度、高效率、高性能已是高端装备制造业的必然发展趋势。自动导引车(automated guided vehicle, AGV)被应用在智能制造、仓储运输等行业中<sup>[1]</sup>。自动导引车(AGV)是采用自动或人工方式装载货物,按设定的路线自动行驶或牵引着载货台车至指定地点,再用自动或人工方式装卸货物的工业车辆<sup>[2]</sup>。如今,AGV被广泛运用于仓储物流、码头搬运和智能制造等各个领域<sup>[3-4]</sup>。树莓派诞生以来历经多代更迭,具备丰富 GPIO(通用输入

输出)接口、USB接口、以太网接口等<sup>[5]</sup>,其运行基于Linux的Raspbian系统,对Python语言天然友好,为自动驾驶小车开发提供坚实软件和硬件协同基础<sup>[6]</sup>。近年来,基于树莓派的小型自动驾驶平台成为研究热点,但现有研究仍存在一定的不足,比如依赖单一传感器将会导致复杂场景时鲁棒性差;强光下目标识别准确率不足70%<sup>[7]</sup>;传感器盲区问题,近距离障碍漏检率有时可达15%<sup>[8]</sup>;实时性不足,复杂环境下路径规划平均耗时超1.2s<sup>[9]</sup>等。

本研究设计了一款基于树莓派的自动驾驶小

收稿日期:2025-08-03

基金项目:安徽高校自然科学研究重点项目(2024AH050098);安徽省质量工程项目(2023sdx231)。

作者简介:郝志廷(1980-),男,安徽界首人,副教授,硕士。E-mail:haozt0045@163.com

车,此车采用树莓派为中控电脑,结合 PyTorch 训练深度学习模型实现环境感知与决策,实现自动运输功能,并具有避障能力。通过仿真和实际场景实验证明,研究设计的小车能够完成仓储中的搬运工作。

## 1 整体架构

小车整体架构如图 1 所示。树莓派分别从摄像头及其他传感器获取数据,并进行运算。将运算结果发送给电机,驱动电机运动,从而实现小车的行走和转向。同时,树莓派可以和上位机进行数据交换,操作人员使用手机 APP 或者计算机直接控制树莓派,进而对小车发出指令。

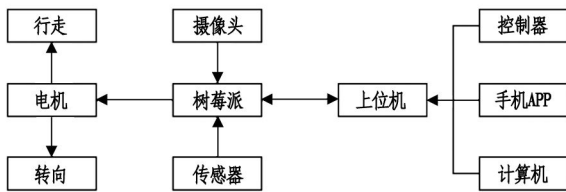


图 1 树莓派驱动小车流程图

## 2 基于树莓派的自动驾驶小车硬件设计

### 2.1 硬件选型

在智能小车的硬件选型中,选用树莓派 4B 作为主控单元,它能够多传感器数据实时处理和深度学习模型推理的需求,同时其成本较低,并且功耗可通过电源管理优化<sup>[10]</sup>。为方便接线与电压控制,选用集成电源模块、稳压模块、电机驱动模块等功能的控制扩展主板,树莓派通过 I2C 协议与该扩展主板进行通信交互。在传感器选型方面,选用谷客 HD91 1080P 摄像头,其分辨率高、照度低,可用于识别复杂场景,导航雷达选用 RPLIDAR A3 激光雷达,该雷达结构小、价格低,可有效满足小车近距离高精度避障需求;同时选用 HC-SR04 型超声波传感器,用以弥补近距离盲区,并搭配里程计和 IMU 等相关传感器,从而实时获取小车运动数据。在执行器选型方面,选用直流减速电机平衡扭矩输出与转速控制精度,适配小车不同速度工况,并配套电机驱动板实现树莓派弱电控制强电驱动。电机驱动芯片选用 2 个 TB6612 芯片,这是一款双路 H 桥型的直流电机驱动芯片,通过改变 MOSFET 管的开关状态,实现电机的正转、反转和制动等功能,同时内置的 PWM 控制器可根据输入的 PWM 信号调节电机转速。

### 2.2 硬件架构搭建

#### 2.2.1 硬件连接原理

树莓派通过 GPIO 口与控制扩展板连接,使用 I2C 协议进行交互,如图 2 所示,控制板接收树莓派 PWM 信号分别接 TB6612 驱动芯片的 PWMA、AIN1、AIN2; PWMB、BIN1、BIN2; PWMC、CIN1、CIN2;PWMD、DIN1、DIN2,每组三个引脚对应控制四个轮子,TB6612 驱动芯片的 AO1、AO2; BO1、BO2;CO1、CO2;DO1、DO2;每组两个引脚接线到对应四个电机上,通过 USB 接口,将摄像头和激光雷达连接到树莓派<sup>[11]</sup>。超声波传感器 HC-SR04 的 VCC 连接树莓派的 5 V 引脚,GND 连接树莓派的 GND 引脚,Trig 连接树莓派的 GPIO22 引脚,Echo 通过分压电路连接树莓派的 GPIO17 引脚。

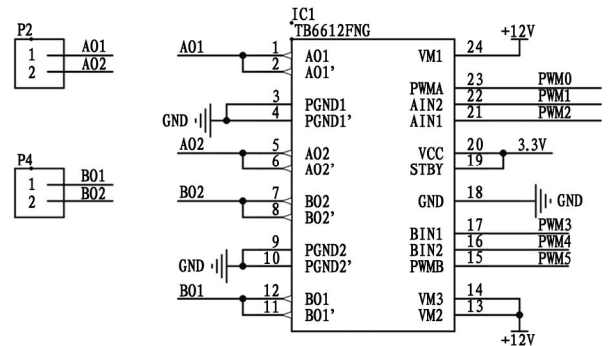


图 2 TB6612 芯片接线图

#### 2.2.2 电源管理系统

采用大容量锂电池组作为电源,经 LM2596 稳压模块为树莓派、传感器、执行器分别供电,确保各组件工作电压稳定;配置一个电压表实时掌控电压,低电压预警保障小车持续运行,接线图如图 3 所示。

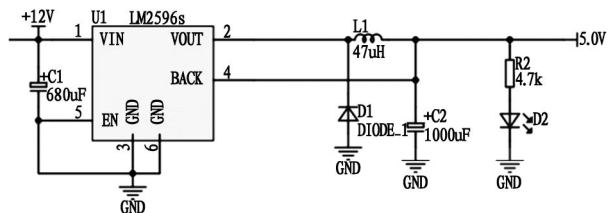


图 3 LM2596 稳压模块接线图

## 3 基于树莓派的自动驾驶小车软件设计

### 3.1 软件开发环境搭建

在树莓派上安装最新版 Raspbian 系统,更新并升级系统软件,保证依赖环境完整;利用 pip 工具安装 PyTorch 框架版本,同步安装 OpenCV、numpy 等基础图像处理与数值计算库,搭建起涵盖深度学习模型训练部署、图像数据处理的完整开发环境。

### 3.2 传感器数据采集与处理

#### 3.2.1 摄像头图像采集

基于 OpenCV 库函数开启摄像头视频流捕获,运用 cvtColor 函数将彩色图像灰度化降低数据量, GaussianBlur 滤波去除噪声, undistort 函数依据相机标定参数校正镜头畸变,预处理后图像送入深度学习模型进行目标识别,提取关键环境信息。

#### 3.2.2 其他传感器数据处理

通过激光雷达读取原始点云信息,经坐标转换、滤波算法去除噪点与地面杂波,构建小车周边二维或三维地图;超声波传感器触发测距获取近距离障碍距离值,以简单阈值判断触发避障预警,多传感器数据经时间同步、空间配准后融合,为决策提供精准输入。

### 3.3 路径规划算法实现

以 PyTorch 构建基于深度学习的路径规划模型,收集大量模拟或实际场景地图数据标注起点和终点,并以可行路径作为训练集,设计编码-解码结构网络,编码器提取地图特征,解码器生成路径坐标序列。训练时优化交叉熵损失函数使模型预测路径逼近真实最优,部署于树莓派后,实时输入感知地图即可快速规划适配小车行驶路径。路径规划采用 A\* 算法, A\* 算法是一种典型的启发式算法,其主要基于评价函数公式来搜寻最短路径,评价函数如公式(1)所示。

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (1)$$

其中,  $f(n)$  为节点  $n$  的估价函数,  $g(n)$  是从起点到节点  $n$  的实际代价,  $h(n)$  是节点  $n$  到目标节点的估计代价,也被称为启发函数。

路径规划流程图如图 4 所示,具体步骤如下:

(1) 初始化两个集合: 开放列表(openList) 和关闭列表(closedList)。将起始节点放入开放列表, 开放列表用于存储待扩展的节点, 通常使用优先队列实现, 以便快速获取  $f(n)$  值最小的节点。关闭列表, 用于存储已扩展过的节点。

(2) 开放列表非空时执行以下操作: 若开放列表不为空, 从开放列表中取出  $f(n)$  值最小的节点  $n$ , 将其从开放列表移除, 并加入关闭列表, 检查节点  $n$  是否为目标节点, 如果是, 则找到了最短路径, 算法结束。如果邻居节点已在开放列表中, 但通过节点  $n$  到达该邻居节点的路径代价更小(即新的  $g(n)$  值更小), 则更新该邻居节点的父节点为节点  $n$ , 并重新计算其  $g(n)$ 、 $h(n)$  和  $f(n)$  值。

重复步骤(2), 直至其满足条件(启发式函数  $h(n)$  是可接受的, 即  $h(n) \leq h^*(n)$ , 其中  $h^*(n)$  是从节点  $n$  到目标节点的实际最小代价), 寻路完成。

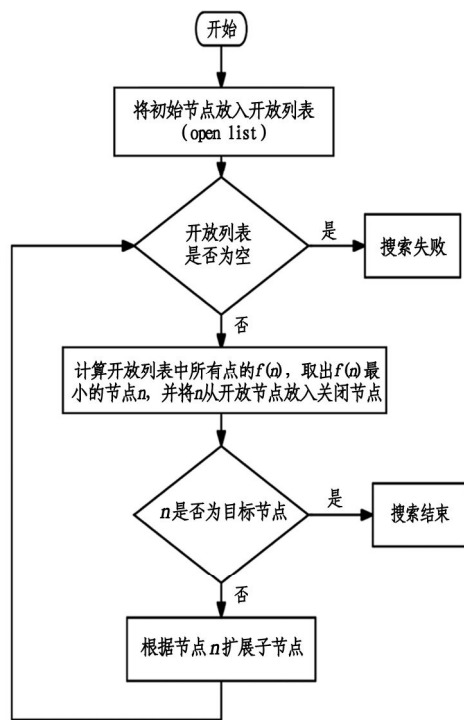


图 4 A\* 算法流程图

A\* 算法能够保证找到从起始节点到目标节点的最短路径。使用 Matlab 软件对路径规划进行仿真, 仿真结果如图 5 所示。图中为  $80 \times 80$  区域, 区域中黑色为障碍物, 起始节点坐标为 (17, 42), 目标节点坐标为 (61, 15)。最短路径长度为 55.18, 路径规划用时 0.7 s。路径优化结果如图 6 所示。

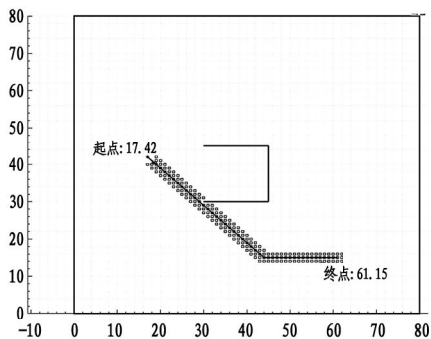


图 5 路径规划结果

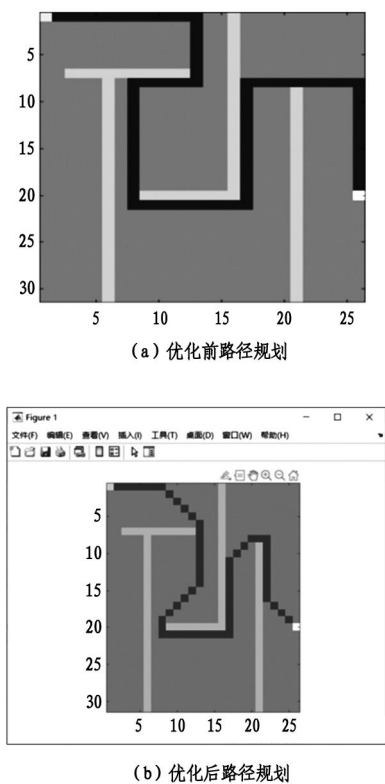


图6 路径优化结果

### 3.4 决策控制算法实现

#### 3.4.1 基于规则的决策控制

编写 Python 脚本,依据传感器融合数据制定规则。如当摄像头识别到红灯,触发停车指令使电机停止、舵机保持原位;超声波检测到前方近距离障碍,依障碍方位驱动舵机转向避让同时控速倒退,简单直接规则保障基础驾驶安全。

#### 3.4.2 基于PID的无人车速度控制

无人车采用PID控制策略控制车辆速度,PID公式为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

其中, $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 分别代表比例、积分和微分系数,经多次调试优化,本研究中取值为  $K_p = 0.8$ 、 $K_i = 0.1$ 、 $K_d = 0.05$ ,该参数组合可平衡系统响应速度与稳定性; $e(t)$ 代表误差,即实际速度与期望速度之差,实际速度由里程计等传感器实时获取,期望速度来自于路径规划需求(范围  $0.2 - 0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); $u(t)$ 为PID控制输出值,代表小车马达输出转矩。

为实现PID控制,采用了软件实现的方式,并在无人车的中央控制单元上编写了PID控制算法。该算法通过实时读取传感器数据来获取实际速度,并与路径规划模块提供的期望速度进行比较,计算出

$e(t)$ 。然后,根据公式(2)计算出PID控制输出值  $u(t)$ ,并将其发送给马达控制器,以调节小车的马达输出转矩,从而实现速度的精确控制<sup>[12]</sup>。

#### 3.4.3 基于机器学习的决策控制

利用 PyTorch 搭建卷积神经网络(CNN)分类模型,对预处理后的图像进行交通标志和车道线状态的识别。所构建的CNN模型主要包括以下结构:输入层后接3个卷积块(每个卷积块由一个卷积层、ReLU激活函数和最大池化层组成),随后是2个全连接层和一个Softmax输出层,用于多类别分类。卷积层的通道数依次为32、64和128,卷积核大小均为  $3 \times 3$ ,步长为1,池化层采用  $2 \times 2$  最大池化。整个网络使用ReLU作为激活函数,以交叉熵(cross-entropy)作为损失函数进行多类分类任务的优化,并根据不同识别结果定义对应决策分支,如识别到直行标志则激活直线行驶控制逻辑;同时,通过手机APP手动遥控驾驶车辆在不同道路环境下行驶,记录摄像头图像、激光雷达和超声传感器采集的环境信息以及对应的转向和速度信息,并将这些数据保存到指定文件夹中用于模型训练;训练完成后,将模型部署到树莓派上,车辆加载训练好的模型,根据摄像头图像、激光雷达和超声传感器的数据自动进行转向和速度控制,实现自动驾驶功能。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 实验环境搭建

在室内外空旷场地布置模拟道路,铺设不同颜色胶带模拟车道线,设置交通标志模型、模拟障碍物;配备无线数据采集设备、上位机监控软件,实时记录小车运行数据,全方位复现真实驾驶场景挑战。

场地参数。室内场地:  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ ,水泥地面,无遮挡物;室外场地:  $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ ,沥青地面,周围无高大建筑物遮挡。

干扰条件。光照强度:强光环境( $\geq 80001 \text{ ux}$ ,正午晴天)、阴天环境( $2000 - 40001 \text{ ux}$ );障碍物类型:长方体纸箱( $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ )、圆柱塑料桶(直径  $20 \text{ cm}$ ,高  $40 \text{ cm}$ ),随机布置3-5个;交通标志模型:直行、左转、红灯标志,均为  $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ ,摆放距离小车  $5 \text{ m}$  处。

### 4.2 试验验证

将小车放置在实验场景中,启动小车,打开摄像头,从上位机中获得摄像头数据,小车启动程序如图7所示。

```

/home/wheeltec/ /home/wheeltec/wheeltec_robot/src/xf_mic_asr_offline/launch/base.launch.t
File Edit View Search Terminal Help
started roslaunch server http://192.168.0.100:35157/

Edit View Terminal Tabs Help

SUMMARY
=====
CLEAR PARAMETERS
* /amcl/

PARAMETERS
* /A_position_x: 2.0
* /A_position_y: 2.0
* /A_position_z: 0.0
* /B_position_x: 2.0
* /B_position_y: -2.0
* /B_position_z: 0.0
* /C_position_x: -2.0
* /C_position_y: -2.0
* /C_position_z: 1.0
* /D_position_x: -2.0
* /D_position_y: 2.0
* /D_position_z: 0.0
* /E_position_x: 0.3
* /E_position_y: 0.0
* /E_position_z: 0.0
* /I_orientation w: 1

##! /bin/bash

### BEGIN INIT
sleep 10
gnome-terminal -- bash -c "source /opt/ros/melodic/setup.bash;source /home/wheeltec/wheeltec
xf_mic_asr_offline base.launch"
    
```

图7 小车启动程序

```

Terminal - wheeltec
* /wheeltec_robot/serial_baud_rate: 115200
* /wheeltec_robot/user_port_name: /dev/wheeltec.con...

wheeltec:~$ chmod 777 test.sh
wheeltec:~$ ./test.sh
wheeltec:~$
wheeltec:~$

NODES
/
  amcl (amcl/amcl)
  base_to_camera (tf/static_transform_publisher)
  base_to_gyro (tf/static_transform_publisher)
  base_to_laser (tf/static_transform_publisher)
  base_to_link (tf/static_transform_publisher)
  call_recognition (xf_mic_asr_offline/call_recognition)
  car_node_feedback (xf_mic_asr_offline/car_node_feedback)
  command_recognition (xf_mic_asr_offline/command_recognition)
  joint_state_publisher (joint_state_publisher/joint_state_publisher)
  laser_tracker (simple_follower/laserTracker.py)
  lsn10 (lsn10/lsn10)
  map_server_for_test (map_server/map_server)
  motion_control (xf_mic_asr_offline/motion_control)
  move_base (move_base/move_base)
  point_navigation (xf_mic_asr_offline/point_navigation)
  refresh_mic (xf_mic_asr_offline/refresh_mic)
  robot_pose_ekf (robot_pose_ekf/robot_pose_ekf)
  robot_state_publisher (robot_state_publisher/robot_state_publisher)
  wheeltec_robot (turn_on_wheeltec_robot/wheeltec_robot_node)

##! /bin/bash

# BEGIN INIT
sleep 10
gnome-terminal -- bash -c "source /opt/ros/melodic/setup.bash;source /home/wheeltec/wheeltec_robot/develop
mic_asr_offline base.launch"
    
```

图8 小车运行程序

启动树莓派,对小车四周采集数据进行匹配和运输,小车运行程序如图8所示。执行结果如图9所示。

### 4.3 实验结果量化分析

#### 4.3.1 核心功能测试数据

设计功能测试表,对小车关键功能进行重复测试,如表1所示。

#### 4.3.2 对比实验分析

将本研究设计的树莓派多传感器融合自动驾驶小车,与两类同类研究方案进行对比,对比指标包括核心功能成功率、平均耗时、硬件成本,如表2所示。

```

view Go Help
/home/wheeltec/
File Edit View Search Terminal Help
wheeltec:~$ chmod 777 test.sh
wheeltec:~$ ./test.sh
wheeltec:~$

小车前进 ->向前
小车后退 ->后退
小车左转 ->左转
小车右转 ->右转
小车停止 ->停止
小车休眠 ->休眠,等待下一次唤醒
小车过床 ->寻找床源
小车去1点 ->小车自主导航至1点
小车去2点 ->小车自主导航至2点
小车去4点 ->小车自主导航至4点
小车雷达跟随 ->小车打开雷达跟随
关闭雷达跟随 ->小车关闭雷达跟随
关闭视觉跟随 ->小车关闭视觉跟随
打开自主建图 ->小车打开自主建图
关闭自主建图 ->小车关闭自主建图
开始多点导航 ->小车开始导航
关闭多点导航 ->小车关闭导航

##! /bin/bash

# BEGIN INIT
sleep 10
gnome-terminal -- bash -c "source /opt/ros/melodic/setup.bash;source /home/wheeltec/wheeltec_robot/develop
mic_asr_offline base.launch"
sleep 15
    
```

图9 执行结果

表1 核心功能测试表

| 测试项目           | 测试次数 | 成功次数 | 成功率/% | 平均耗时/s |
|----------------|------|------|-------|--------|
| 室内自主路径规划(10 m) | 30   | 29   | 96.7  | 8.2    |
| 室外自主路径规划(20 m) | 30   | 27   | 90.0  | 15.6   |
| 近距离避障(≤50 cm)  | 20   | 20   | 100.0 | 1.8    |
| 交通标志识别(直行)     | 20   | 19   | 95.0  | 0.5    |
| 交通标志识别(左转)     | 20   | 18   | 90.0  | 0.6    |
| 交通标志识别(红灯)     | 20   | 20   | 100.0 | 0.4    |
| 仓储模拟搬运(5 m往返)  | 15   | 14   | 93.3  | 12.3   |

表2 不同方案对比表

| 方案类型                          | 核心功能成功率/% | 平均路径规划耗时/s | 硬件成本/元 | 优势亮点        |
|-------------------------------|-----------|------------|--------|-------------|
| 本研究方案(树莓派+多传感器)               | 93.5      | 0.7        | 850    | 多传感器融合,鲁棒性强 |
| 基于 Arduino 的小车 <sup>[7]</sup> | 82.0      | 1.5        | 600    | 成本低,入门门槛低   |
| 树莓派单传感器小车 <sup>[8]</sup>      | 78.3      | 0.9        | 700    | 结构简单,部署快速   |

对比结果表明,本研究方案在核心功能成功率上较基于 Arduino 的小车提升 11.5 个百分点,较树莓派单传感器小车提升 15.2 个百分点;路径规划耗时较前两者分别缩短 0.8 s 和 0.2 s。虽硬件成本略高于后两者,但通过多传感器融合(激光雷达+超声波+摄像头)解决了单传感器鲁棒性差、盲区漏检等问题,结合优化的 A\* 算法与 PID 控制,实现了精度与实时性的平衡,更适用于仓储搬运等对可靠性要求较高的场景。

#### 4.4 结论与展望

实验结果显示,本研究设计的基于树莓派的自动驾驶小车在室内外场景中均能稳定完成自主导航、避障、交通标志识别及仓储搬运任务,核心功能平均成功率达 93.5%,路径规划平均耗时 0.7 s,满足小型移动平台自动驾驶的基本需求。多传感器融合方案有效提升了复杂环境的适应能力,强光、阴天等不同光照条件下仍能保持较高识别准确率;优化的 PID 参数使小车速度控制平稳,无明显抖动或超调现象。

#### 参考文献:

[ 1 ] ZHAO Y, XIU S, HONG Y, et al. Study on automated guided vehicle navigation method with external computer vision[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2025, 239(5): 635 - 647.

[ 2 ] 刘建锋, 张长胜. 基于单频电磁制导方式的 AGV 小车

[J]. 微型机与应用, 2011, 30(3): 18 - 21.

[ 3 ] 周滢. 基于仓储搬运 AGV 的技术分析与应用[J]. 数字技术与应用, 2023, 41(5): 137 - 139.

[ 4 ] 魏涛. AGV 路径规划在智慧工厂中的应用[J]. 智能计算机与应用, 2023, 13(11): 192 - 196.

[ 5 ] 林辰玮. 基于树莓派的智能停车管理系统设计与实现[J]. 工业控制计算机, 2025, 38(2): 141 - 142.

[ 6 ] 高艳, 王龙, 韩芳. 基于 Python 和树莓派 4B 的智能门禁系统[J]. 自动化应用, 2025, 66(4): 232 - 235.

[ 7 ] 闫冠宇, 蔡泽平, 梁家海, 等. 一种基于全局视觉的 AGV 目标检测与定位算法[J]. 北部湾大学学报, 2024, 39(4): 68 - 75.

[ 8 ] 滕开雯, 丁康, 王硕. 基于树莓派的智能自动驾驶系统设计与实现[J]. 科技与创新, 2023(2): 19 - 22.

[ 9 ] 李承泽. 基于树莓派和 GPS 导航的智能避障小车设计[J]. 河南科技, 2023(17): 31 - 34.

[ 10 ] SINGHPANNU G, DAWUD ANSARI M, GUPTA P. Design and implementation of autonomous car using Raspberry Pi [J]. International Journal of Computer Applications, 2015, 113(9): 22 - 29.

[ 11 ] TAYEB S, PIROUZ M, LATIFI S. A Raspberry-Pi Prototype of Smart Transportation[C]. Proceedings of the 25th International Conference on Systems Engineering (ICSEng), 2017: 176 - 182.

[ 12 ] 余娜娜, 李铁克, 王柏琳, 等. 自动化分拣仓库中多 AGV 调度与路径规划算法[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(1): 171 - 180.

责任编辑:李壮

#### (上接第 58 页)

[ 19 ] SADI M S, NAHAR N, KUMPIKAITE E. Multifunctional cu/poplar-PLA conductive nonwoven fabric for electromyography (EMG) sensing, pressure sensing, and thermal heating applications[J/OL]. Journal of Materials Science, 2024, 59(16): 6861 - 6878.

[ 20 ] SAPINA E A, BAZANOVA O M. Using the scalp tension EMG control for the increasing neurofeedback efficiency in ADHD children[J/OL]. International Journal of Psychophysiology, 2023, 188: 62.

[ 21 ] BAI Y, ZHANG X, WANG Y, et al. Residual current detection method based on improved VMD-BPNN[J/OL]. PLOS ONE, 2024, 19(2): e0289129.

[ 22 ] CHI D. Research on electricity consumption forecasting model based on wavelet transform and multi-layer LSTM model[J/OL]. Energy Reports, 2022, 8: 220 - 228.

[ 23 ] POHL A J, SCHOFIELD M R, EDWARDS W B, et al. Adaptive P-Splines for challenging filtering problems in biomechanics[J/OL]. Journal of Biomechanics, 2024, 167: 112074.

[ 24 ] ASLANKAYA E, YILMAZ A, BAYRAK G. Enhancing power quality in vehicle-to-grid (V2G) operations of FCEVs through the integration of real-time digital IIR filters in power calculations[J/OL]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 75: 47 - 63.

[ 25 ] KHOSRAVI M, SMITH R S. Kernel-based impulse response identification with side-information on steady-state gain[J/OL]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2023, 68(10): 6401 - 6408.

[ 26 ] FÁBIÁN G. Generalized savitzky-golay filter for smoothing triangular meshes[J/OL]. Computer Aided Geometric Design, 2023, 100: 102167.

责任编辑:李壮

## 车载触控系统抗干扰协同优化设计研究

潘正辉

(上海长城汽车科技有限公司, 上海 200335)

**摘要:**针对车载触控系统在复杂电磁环境中易受干扰,导致性能下降的问题,提出一种多层次协同优化设计方法。通过系统分析整车电磁干扰源、耦合路径及失效机理,构建了融合硬件电路、软件算法与机械结构的协同抗干扰架构。硬件层面优化滤波、布局与接地设计;软件层面引入自适应滤波、动态阈值调整与干扰识别算法;结构层面实施屏蔽与布线协同优化,并通过闭环调控实现跨层级信息交互与参数自适应。实验结果表明,该方法显著提升了系统抗干扰能力,误触率降至1.5%以下,定位误差不超过 $\pm 1.5$  mm,响应延迟稳定在 $20$  ms  $\pm 3$  ms,为高可靠车载触控系统开发提供了有效解决方案。

**关键词:**车载触控系统;抗干扰设计;协同优化;电磁兼容;多层次架构;闭环调控

中图分类号:U463.6;TN911.4

文献标识码:A

文章编号:2095-297X(2026)02-0065-09

## Collaborative Optimization Design for Anti-Interference in Vehicle Touch Control Systems

PAN Zhenghui

(Shanghai Great Wall Motor Technology Co., Ltd, 200335, Shanghai)

**Abstract:** Aiming at the performance degradation of vehicle touch control systems caused by complex electromagnetic interference, a multi-level collaborative optimization design method was proposed. Through systematic analysis of vehicle interference sources, coupling paths, and failure mechanisms, a collaborative anti-interference architecture integrating hardware circuits, software algorithms, and mechanical structures was constructed. Hardware optimizations include filtering, layout, and grounding strategies; software incorporates adaptive filtering, dynamic threshold adjustment, and interference identification algorithms; structural improvements involve shielding and wiring coordination. Closed-loop regulation enables cross-level information interaction and parameter adaptation. Experimental results demonstrated that the proposed method significantly enhances anti-interference performance, reducing the false touch rate to below 1.5%, limiting positioning error within  $\pm 1.5$  mm, and stabilizing response delay within  $20$  ms  $\pm 3$  ms, providing an effective solution for highly reliable vehicle touch systems.

**Key words:** vehicle touch control system; anti-interference design; collaborative optimization; electromagnetic compatibility; multi-level architecture; closed-loop regulation

随着汽车智能化与网联化技术的深度融合,车载人机交互(human-machine interaction, HMI)系统已成为提升用户体验与保障行车安全的关键组成部分<sup>[1]</sup>。触控交互技术凭借其布局灵活、操作直观及集成度高等优势<sup>[2]</sup>,被广泛应用于中控显示屏、副驾娱乐屏等座舱电子设备中。然而,整车环境中存

在大量电力电子装置及高频通信模块,形成了频谱范围宽、能量强的复杂电磁干扰,易引发触控误触发、响应延迟、坐标漂移等功能异常,严重影响了交互系统的可靠性与安全性。因此,提升车载触控系统的抗干扰能力,对保障智能汽车的整体性能具有重要的工程实际意义。

在现有研究中,车载触控系统的电磁兼容性设计主要围绕硬件与软件两个层面展开。硬件措施通常包括滤波电路设计<sup>[3]</sup>、屏蔽结构优化<sup>[4]</sup>、合理布线<sup>[5]</sup>及接地策略<sup>[6]</sup>等,旨在从物理路径上抑制干扰传播;软件方法则侧重于信号处理算法<sup>[7]</sup>,如数字滤波<sup>[8]</sup>、动态阈值调整<sup>[9]</sup>与基线校准<sup>[10]</sup>等技术,以提升信号信噪比。尽管上述方法在一定程度上增强了系统的抗干扰能力,但仍存在明显局限,如硬件方案受限于安装空间与成本,难以全面覆盖多变的车载干扰频谱;在面对高强度瞬态干扰时软件处理效果有限,且可能引入额外处理延迟。究其根本,现有抗干扰策略多呈现“孤岛式”优化特征,缺乏硬件、软件与结构层面的深度协同,未能形成系统级的综合防护体系,导致在严峻电磁环境中系统整体性能仍不尽如人意。

针对上述问题,本研究提出一种面向车载触控系统的抗干扰协同优化设计方法。通过系统分析车载典型干扰源特性与耦合路径,构建融合硬件电路、智能算法与机械结构的多层级协同架构,实现抑制干扰能力的有机整合与全面提升;并搭建符合车规标准的测试环境,对系统性能进行实验验证与量化评估。本研究旨在突破传统单点优化模式的局限,为高可靠性车载触控系统的开发提供理论支持与工程实践参考。

## 1 车载触控系统干扰机理分析

在深入剖析车载触控系统面临的电磁干扰挑战及其研究现状后,为实现系统级抗干扰性能的突破,需首先从根本上厘清干扰的作用机制。下面将系统探究车载复杂电磁环境中干扰的产生、传播及其对触控系统的具体影响路径与失效模式,为后续构建协同优化设计体系奠定坚实的理论基础。

### 1.1 车载典型电磁干扰源分析

车载电磁环境复杂多变,其干扰源种类繁多、频谱分布广泛,对触控系统的稳定运行构成严峻挑战<sup>[11]</sup>。通过对整车电气架构及典型工况的系统分析,可将主要干扰源归纳为以下三类。

其一,动力系统干扰。主要包括电机驱动单元、DC-DC转换器及高压线束等部件工作时产生的高频开关噪声与宽频谱谐波<sup>[12]</sup>。此类干扰具有瞬态能量高、频谱范围广的特点,易通过传导或辐射耦合至邻近电子系统,影响其正常工作。其二,通信与娱乐系统干扰。主要来源于车载T-Box、Wi-Fi/蓝牙模块、音响功放等设备。这些模块在信号发射或接收过程中会产生电磁辐射,尤其在频段重叠或功率突

变时,可能对触控信号造成串扰,导致误触发或信号失真<sup>[13]</sup>;其三,环境及附属电子设备干扰,包括雨刮电机、车窗升降器、空调压缩机等感性负载启停时引发的脉冲群干扰,以及来自外部基站、雷达等无线设备的带外干扰<sup>[14]</sup>。这类干扰往往具有随机性和突发性,进一步增加了系统抗干扰设计的难度。

上述干扰源普遍具有时变、宽带和随机等特征,其复合作用使车载触控系统面临多重电磁应力,因此必须从干扰源特性出发,实施针对性的抑制策略。

### 1.2 干扰耦合路径建模

电磁干扰对触控系统的影响不仅取决于干扰源本身的特性,更与干扰传播路径密切相关。准确理解干扰耦合机制是制定有效抑制策略的基础。依据车载系统结构与电磁传播特性,干扰耦合路径主要可分为以下三类。

其一,传导耦合。干扰通过公共阻抗路径(如电源线、信号线等)直接侵入触控系统电路。典型表现为动力系统的高频开关噪声经由供电网络传导,造成电源质量下降,进而引起触控芯片工作电压波动或模数转换器(analog-to-digital converter, ADC)采样基准漂移,严重影响信号采集精度。

其二,辐射耦合。高频干扰源(如通信模块、高压逆变器等)通过空间电磁场对触控传感器及连接线束产生近场或远场辐射耦合。此类耦合易引入共模噪声,导致触控信号信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)降低,进而引发坐标误判或触点抖动等现象。

其三,电容与电感耦合。其属近场耦合范畴,多发生于布线间距较近或平行走线的部件之间。例如,当大电流线缆与触控信号线并行布置时,可通过互感耦合引入瞬态脉冲干扰;高 $dv/dt$ 节点则经寄生电容耦合至敏感电路,造成信号畸变<sup>[15]</sup>。

为定量评估不同耦合路径的影响程度,可结合电路理论与电磁场分析方法,建立包含分布参数与频变特性的耦合模型,从而为后续的硬件布局优化、滤波电路设计及屏蔽策略制定提供理论依据与设计指导。

### 1.3 触控系统受干扰机理与失效模式

在复杂电磁干扰作用下,车载触控系统常出现性能退化甚至功能失效,其内在机理与系统信号链结构及干扰特性密切相关。下面结合电容触控技术的工作原理,系统分析干扰引发系统异常的作用机制与典型失效模式,分析如下。

模式一,信号采集失真。干扰通过传导、辐射等耦合路径叠加于原始触控信号,导致采集端信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)显著下降。具体表现为

信号基线漂移、波形畸变或采样值跳变,致使真实触控动作难以被准确捕获<sup>[16]</sup>。尤其在高频噪声或瞬态脉冲干扰下,模拟前端(analog front-end, AFE)易发生饱和与非线性的失真的问题。模式二,误报与漏报现象。持续宽带噪声或周期性干扰可能被系统误判为有效触控事件,造成误报(ghost touch);而强瞬态干扰则可能淹没真实触控信号,或在处理算法中触发噪声抑制功能,导致真实触控无响应,即漏报(missing touch)。这两类失效模式严重降低了交互的可靠性与安全性<sup>[17]</sup>。模式三,坐标计算异常。干扰可引起电容感应阵列中各通道数据不一致,导致坐标解算算法产生偏差,其表现为光标漂移、触点跳跃或轨迹中断等现象,严重影响触控操作的准确性与流畅度<sup>[18]</sup>。

上述失效模式常同时存在,且随干扰强度、频谱特性和系统容限动态变化。准确理解不同干扰条件下的失效特征,是制定针对性抑制策略、提升系统整体鲁棒性的关键基础。

## 2 抗干扰协同优化设计

基于前述车载触控系统干扰机理的深入分析,可知单一层面的抗干扰措施难以应对复杂电磁环境下的系统可靠性挑战。为此,将从系统整体出发,提出一种硬件、软件与机械结构协同优化的抗干扰设计架构,旨在通过多层级协同与闭环调控,全面提升系统的电磁兼容性与鲁棒性。

### 2.1 框架总体架构设计

针对车载触控系统在复杂电磁环境中面临的干扰问题,传统单一层面的抗干扰措施常因缺乏协同而效果受限。为实现系统级抗干扰性能的实质性提升,本研究提出一种融合硬件电路、软件算法与机械结构的多层次协同防护架构(见图1)。该架构通过各层级间的优势互补与动态联动,构建覆盖干扰抑制、信号恢复与系统容错的一体化解决方案。所提架构自上而下分为三个核心层级。

第一层级,硬件层优化。作为抗干扰体系的第一道防线,重点从电路设计与物理布局入手,包括采用低阻抗接地策略、优化电源滤波网络、提升接口电磁敏感度(electromagnetic susceptibility, EMS)等级,以及选用高抗扰型器件,从物理层面抑制干扰的侵入与传播。第二层级,软件算法层优化。在信号处理层面引入智能抗干扰机制,涵盖自适应数字滤波、动态阈值调整、实时基线校准及干扰事件识别算法等,旨在提升信号信噪比,有效识别并剔除干扰导致的异常数据,确保触控信息的准确性与稳定性。第

三层级,机械结构层优化。通过电磁屏蔽罩设计、敏感线路隔离、连接器选型与接地策略优化,减少空间辐射耦合与传导干扰,为触控系统提供洁净的物理工作环境<sup>[19]</sup>。

该协同架构强调各层级并非孤立运作,而是通过跨层级信息交互与策略联动实现整体效能最大化。硬件层提供的预处理信号为软件算法的高效执行奠定基础;软件层识别出的干扰特征可反馈至硬件配置(如可调滤波器参数);结构设计则为系统提供稳定的电磁屏蔽与统一的接地参考。借助上述多闭环协同机制,系统能够在宽频带、高强度干扰环境下保持稳定可靠的触控性能。

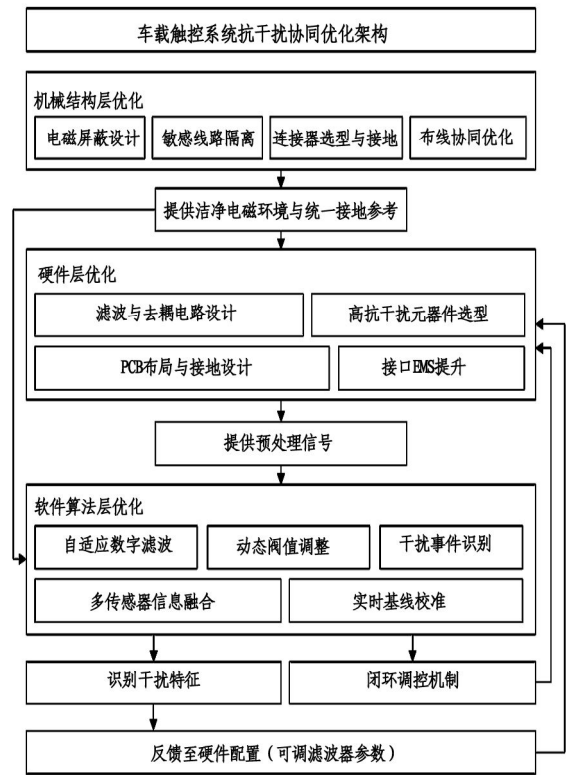


图1 框架总体架构设计

### 2.2 硬件层优化设计

硬件层是提升系统电磁兼容性(electromagnetic compatibility, EMC)与抗干扰能力的基础环节。本节围绕电路设计、元器件选型与布局布线等关键方面,提出针对性优化措施,旨在从物理层面有效抑制干扰的传导与辐射,为后续信号处理提供高质量的电信号基础。主要优化设计内容如下。

第一,滤波与去耦电路设计。在系统电源入口及关键IC电源引脚处布置多级滤波网络。采用磁珠(bead)与不同容值电容(如 $10\ \mu\text{F}$ 、 $0.1\ \mu\text{F}$ 、 $100\ \text{pF}$ )构成 $\pi$ 型滤波器,以抑制宽频带电源噪声;对高

频噪声敏感电路(如触控芯片模拟电源)增设 RC 滤波或采用低压差线性稳压器(low dropout regulator, LDO)稳压,以降低电源纹波;在信号线接口处布置静电放电(electrostatic discharge, ESD)保护器件和共模扼流圈,有效抑制瞬态脉冲和共模干扰。

第二,PCB 布局与接地优化。遵循“分区、分层、分段”原则进行 PCB 设计。将数字电路、模拟电路与高频电路进行物理隔离,并采用单点接地或混合接地策略,避免地环路引入共模噪声;增大敏感信号线(如电容感应线)与干扰源(如时钟线、电源线)的间距,在相邻层布置接地屏蔽层;对关键高频信号实施阻抗匹配与包地处理,减少信号反射与辐射耦合。

第三,高抗干扰元器件选型。优选具有高 ESD 等级、宽工作电压范围及强抗扰能力的触控芯片与微控制单元(microcontroller unit, MCU);接口器件选用具有隔离功能或高共模抑制比(common-mode rejection ratio, CMRR)的型号;连接器选用带屏蔽外壳类型,并确保其与机壳实现低阻抗搭接。

通过上述硬件层面的综合优化,可显著抑制干扰能量的侵入,提升系统固有抗扰度,为软件层信号处理提供更为洁净的原始信号,构成协同抗干扰体系中的第一道有效屏障。

### 2.3 软件算法层优化设计

软件算法层是提升系统抗干扰能力、实现智能抑制与自适应决策的核心环节。其核心任务在于基于硬件层预处理后的信号,通过先进信号处理与动态决策机制,进一步识别并抑制干扰,确保触控信息的准确性、实时性与鲁棒性。本研究构建了一套多层次、自适应的软件抗干扰算法体系,其核心处理流程如图 2 所示,主要包括以下四个功能模块。

模块一,自适应数字滤波与信号增强。如图 3 所示,在传统有限脉冲响应(finite impulse response, FIR)与无限脉冲响应(infinite impulse response, IIR)滤波基础上,引入自适应滤波算法(如最小均方(least mean squares, LMS)算法),依据实时噪声频谱动态调整滤波器参数,有效抑制特定频段窄带干扰。同时,采用滑动窗口平均与中值滤波相结合的策略,在平滑信号波形的同时保留跳变边缘特征,进一步提升信号质量与稳定性。

模块二,动态阈值调整与基线校准。触控判断阈值根据环境噪声水平进行动态调整,避免固定阈值导致的误判。系统实时监测无触控状态下的信号基线,一旦检测到因温度变化或低频干扰引起的基线漂移,立即触发自动校准流程,有效避免误触发与

漏检现象。引入迟滞比较机制,防止阈值附近信号抖动,提升判决稳定性。

模块三,干扰事件识别与异常点剔除。构建基于规则与轻量级机器学习(如决策树、简单贝叶斯分类)的干扰事件识别模块。该模块通过分析信号幅值、变化率、持续时间等多维特征,准确区分真实触控与干扰脉冲。对识别出的异常信号点或序列予以剔除或标记,避免其参与后续坐标计算,保障数据有效性。模块四,多传感器信息融合与容错处理。针对配备多指触控或融合其他传感器(如压力传感)的系统,采用 D-S 证据理论(Dempster-Shafer Evidence Theory)或卡尔曼滤波进行多源信息融合,利用信息间的一致性抵抗局部干扰,提升系统整体决策可靠性。当某通道持续受扰时,系统可自动降低其权重或启动通道切换机制,实现动态容错。

软件算法层通过上述协同策略,不仅有效抑制了硬件层未完全消除的残余干扰,更具备了对未知干扰的自适应能力。其与硬件层优化形成有效互补,共同构建了系统在复杂电磁环境下的高效协同抗干扰体系。

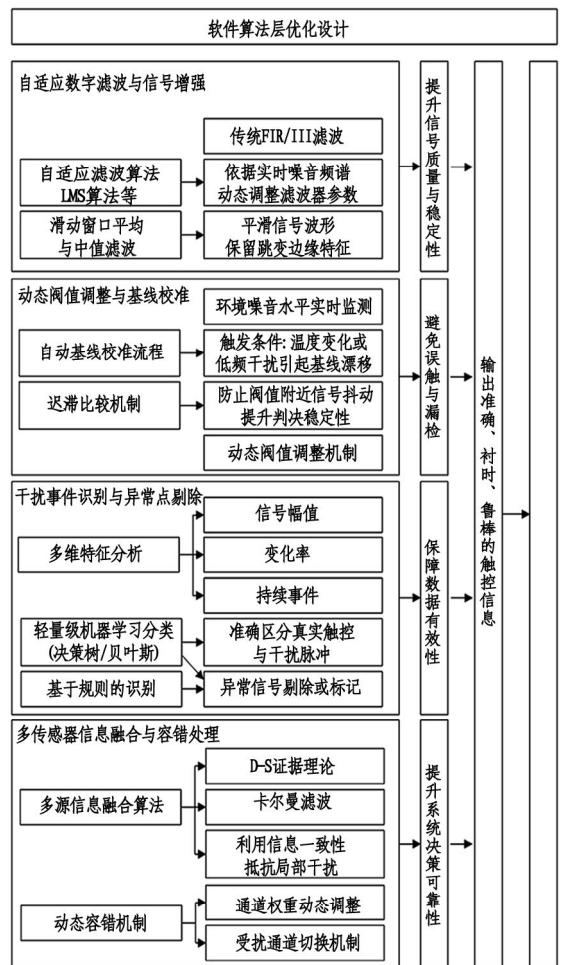


图 2 软件算法层优化设计

```

...../* @brief 触控信号处理核心函数
 * @param raw_data: 输入原始信号数组
 * @param data_length: 数据长度
 * @param threshold_ptr: 指向当前动态阈值的指针
 * @return uint8_t: 触控状态 (0: 无触控; 1: 有效触控; 2: 疑似干扰) */
uint8_t TouchSignal_Process(int16_t* raw_data, uint16_t
data_length, float* threshold_ptr) {
    static float baseline = 0.0f; // 静态基线值
    static float noise_level = 0.01f; // 噪声水平估计
    float filtered_signal[data_length];
    uint8_t touch_status = 0;
    // 1. 自适应滤波处理 (LMS算法)
    LMS_Filter(raw_data, filtered_signal, data_length);
    // 2. 动态更新基线与噪声水平
    baseline = UpdateBaseline(filtered_signal,
data_length, baseline);
    noise_level = EstimateNoiseLevel(filtered_signal,
data_length, baseline);
    // 3. 动态调整阈值 (基于噪声水平与基线)
    *threshold_ptr = baseline + 3.0f * noise_level; // 阈值=
基线 + 3倍噪声标准差
    // 4. 干扰识别与触控判决
    for (uint16_t i = 0; i < data_length; i++) {
        if (IsInterference(filtered_signal[i], baseline,
noise_level)) {
            MarkAsNoise(i); // 标记为噪声点
            continue;
        }
        // 迟滞比较防止抖动
        if (filtered_signal[i] > *threshold_ptr +
HYSTERESIS) {
            touch_status = 1; // 有效触控
        } else if (filtered_signal[i] < *threshold_ptr -
HYSTERESIS) {
            touch_status = 0; // 无触控
        }
    }
    // 5. 异常点剔除与输出净化
    if (touch_status == 1) {
        if (CheckConsistency(filtered_signal,
data_length) == FALSE) {
            touch_status = 2; // 疑似干扰, 需进一步处理
        }
    }
}
}
return touch_status;
}
}.....
/* @brief LMS自适应滤波算法实现
 * @param input: 输入信号
 * @param output: 输出信号
 * @param len: 信号长度 */
void LMS_Filter(int16_t* input, float* output, uint16_t
len) {
    const uint8_t filter_order = 10;
    static float w[10] = {0}; // 滤波器权重系数
    float mu = 0.01f; // 收敛步长
    for (uint16_t n = filter_order; n < len; n++) {
        float y = 0.0f;
        for (uint8_t i = 0; i < filter_order; i++) {
            y += w[i] * input[n - i];
        }
        float error = input[n] - y;
        // 更新权重
        for (uint8_t i = 0; i < filter_order; i++) {
            w[i] += mu * error * input[n - i];
        }
        output[n] = y; // 滤波后输出
    }
}
/* @brief 基于规则与特征的干扰识别函数
 * @param sample: 当前采样值
 * @param baseline: 当前基线
 * @param noise_level: 噪声水平
 * @return bool: 是否为干扰 */
bool IsInterference(float sample, float baseline, float
noise_level) {
    float diff = fabs(sample - baseline);
    // 规则1: 幅值超过基线6倍噪声水平视为干扰
    if (diff > 6.0f * noise_level) {
        return TRUE;
    }
    // 规则2: 短时突变检测 (需结合历史数据, 此处略)
    // ...
    return FALSE;
}.....
    
```

图3 算法层优化核心代码示例

### 2.4 机械结构层与系统级协同设计

机械结构层是构建系统整体电磁兼容环境、保障硬件与软件抗干扰措施有效实施的重要物理基础。其设计质量直接决定了外部干扰的侵入强度及内部信号的传输完整性。本节重点阐述机械结构优化与系统级协同设计,为车载触控系统构建低敏感、高可靠的工作环境,其协同架构如图4所示,主要包括以下四个方面。

其一,屏蔽设计与接地管理。针对触控模组及敏感电路区域采用局部屏蔽罩设计,优选高导电率材料(如镀锌钢板或导电塑料),并确保屏蔽体与整车之间实现低阻抗连接,以有效抑制辐射干扰。同时对整车内部高频干扰源(如DC-DC模块、电机驱动器)实施局部屏蔽,从源头降低干扰发射。系统接地采用星型单点接地结构,避免因接地环路引入共模噪声,并严格规划屏蔽地、数字地、模拟地的分区与汇接。

其二,布局与布线协同优化。在整车线束布局设计中,严格分离高压电源线束、低频信号线及触控系统高频信号线缆。对敏感信号传输采用双绞线或屏蔽电缆,屏蔽层实行两端接地,以抑制电场干扰。在物理布局上,使触控显示屏总成远离已知强干扰

源(如逆变器、点火线圈),通过增大空间间距以降低近场耦合风险。

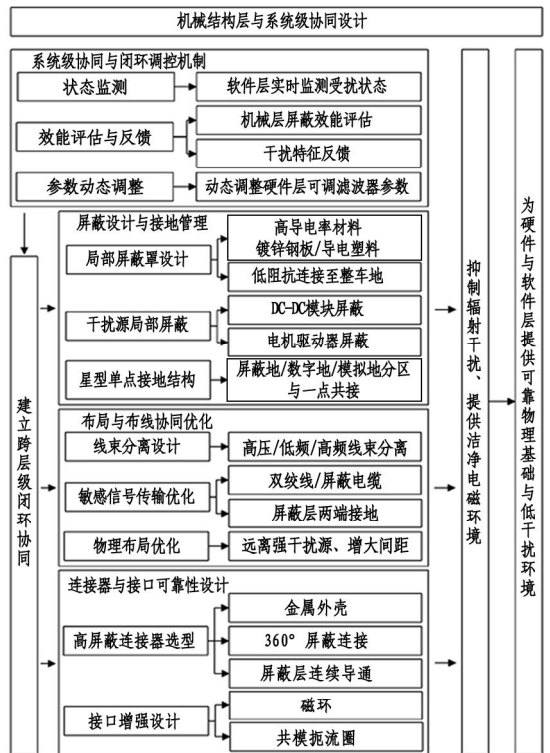


图4 机械结构层与系统级协同设计

其三,连接器与接口可靠性设计。选用具备金属外壳及360°屏蔽连接的连接器,确保线缆屏蔽层与连接器屏蔽壳之间可连续导通,防止电磁泄漏。在接口处增设磁环或共模扼流圈,进一步抑制高频噪声的传入,进而提升接口端电磁兼容性。其四,系统级协同与闭环调控。机械结构层与硬件、软件层共同构成动态协同体系。

如图5所示,软件层实时监测系统受扰状态,若识别到特定频段干扰持续增强,可动态调整硬件层

中可调滤波器的参数;机械屏蔽的效能评估结果也可反馈至PCB布局优化的迭代过程中。通过建立“监测-反馈-调整”的闭环协同机制,系统能够在全生命周期内具有自适应优化其抗干扰性能。

机械结构层的优化设计与系统级协同机制的引入,显著降低了外部干扰的侵入强度,为硬件和软件措施的有效实施提供了坚实基础,从而在系统层面实现了抗干扰能力的长效稳定与全面提升。

```

... void SystemLevel_Collaboration(uint8_t emi_level,
uint8_t shield_status, FilterParams_t* filter_params) {
    static uint8_t prev_emi_level=0;
    static uint32_t stability_counter=0;
    // 1. 屏蔽效能监测与反馈
    if (shield_status == SHIELD_GOOD) {
        // 屏蔽良好时放宽软件滤波强度
        if (emi_level > EMI_LEVEL_MEDIUM) {
            filter_params->coefficient=
DEFAULT_COEFFICIENT - 5; // 微调滤波系数
        }
    } else {
        // 屏蔽效能下降/失效时增强软件滤波与硬件抑制
        filter_params->coefficient=
DEFAULT_COEFFICIENT + 10;
        Enable_Aux_Filter(CUTOFF_FREQ_LOW);
        Log_Shielding_Fault();
    }

    // 2. 基于干扰趋势的动态适应
    if (emi_level > prev_emi_level) {
        // 干扰上升趋势, 提前增强抑制
        Increase_Filter_Strength(filter_params);
        stability_counter=0;
    } else if (emi_level==prev_emi_level) {
        stability_counter++;
    }
    // 干扰稳定在一定水平, 优化参数以平衡性能与抑制
    if (stability_counter >
STABILITY_THRESHOLD) {
        Optimize_Filter_Params(filter_params,
emi_level);
    }
} else {
    // 干扰下降, 逐步恢复默认参数
    Gradually_Recover_Params(filter_params);
    stability_counter=0;
}
prev_emi_level=emi_level;
/* @brief 屏蔽连接状态检测函数
 * @return uint8_t: 屏蔽状态 (0: 失效; 1: 良好) */
uint8_t Check_Shield_Connection(void) {
    // 检测屏蔽体与地之间的电阻值
    float resistance = Measure_Shield_Resistance();
    if (resistance <
SHIELD_RESISTANCE_THRESHOLD) {

        return SHIELD_GOOD;
    } else {
        return SHIELD_POOR;
    }
}

// 3. 硬件参数动态配置
if (Need_Hardware_Update(filter_params)) {
    Update_Hardware_Filter(filter_params);
}

/* @brief 屏蔽连接状态检测函数
 * @return uint8_t: 屏蔽状态 (0: 失效; 1: 良好) */
uint8_t Check_Shield_Connection(void) {
    // 检测屏蔽体与地之间的电阻值
    float resistance = Measure_Shield_Resistance();
    if (resistance < SHIELD_RESISTANCE_THRESHOLD) {
        return SHIELD_GOOD;
    } else {
        return SHIELD_POOR;
    }
}

/* @brief 辅助低通滤波器启用函数
 * @param cutoff_freq: 截止频率设置 */
void Enable_Aux_Filter(uint16_t cutoff_freq) {
    // 配置硬件辅助滤波器参数
    HW_Filter_Config(AUX_FILTER_ID, cutoff_freq,
FILTER_LOWPASS);
    // 通过开关控制启用辅助滤波通路
    GPIO_Set(AUX_FILTER_EN_PIN, HIGH);
}

/* @brief 硬件滤波器参数更新函数
 * @param params: 滤波器参数结构体 */
void Update_Hardware_Filter(FilterParams_t* params) {
    // 通过I2C/SPI接口配置可调滤波器芯片
    I2C_Write(FILTER_I2C_ADDR,
REG_COEFFICIENT, params->coefficient);
    I2C_Write(FILTER_I2C_ADDR,
REG_BANDWIDTH, params->bandwidth);
    // 触发参数生效
    I2C_Write(FILTER_I2C_ADDR, REG_APPLY,
0x01);
} ...

```

图5 基于状态监测的屏蔽效能反馈与参数自适应调整机制核心代码示例

### 3 实验验证与结果分析

在完成车载触控系统抗干扰协同优化设计的基础上,需对其实际效能进行客观与量化验证。本节将构建符合车规电磁兼容标准的测试平台,对优化前后的系统进行多场景、多指标对比测试,以综合评价所述协同设计方法在复杂电磁环境下的可行性与有效性。

#### 3.1 测试平台搭建

为客观评估本研究所提出的协同优化设计方法的实际效能,构建了一个能够模拟真实车载复杂电磁环境的标准化测试平台。该平台具备可重复的干扰注入与多维度数据采集能力,可精准量化触控系统的关键性能指标,确保测试条件的规范性、可重复性与结果的可比性。

测试平台主要由三个子系统构成。一,环境模拟子系统。采用大电流注入(bulk current injection, BCI)、电快速瞬变脉冲群(electrical fast transient, EFT)及射频辐射场抗扰度测试装置,模拟整车环境中常见的传导与辐射干扰。干扰类型、强度及频率范围严格遵循 ISO 11452 系列与 GB/T 17619 等汽车电子电磁兼容性标准,确保测试条件的代表性与与实际车载工况的一致性。二,被测系统与数据采集子系统。以量产车载触控显示屏总成为基础,分别搭载优化前(基准版)与优化后(协同设计版)的软硬件配置。通过高精度示波器、数据采集卡及专用触控测试仪,同步监测触控 IC 原始信号、处理后的坐标数据、电源质量及关键节点波形。系统采样率与精度满足信号完整性分析要求,确保数据真实

可靠。三,性能评估与自动化控制子系统。基于工控机与专用测试软件,控制干扰源的输出模式(如连续波、脉冲调制等),并自动执行预定义的触控动作序列(如单点触控、划线轨迹及多点手势)。系统实时记录触控报点率、坐标误差、误触率、响应延时等关键性能参数,并自动生成结构化测试报告,支持结果的可视化与对比分析。

该测试平台具有良好的可重构性与可扩展性,能够系统性地验证协同优化方案在不同干扰场景下的有效性,为后续性能对比与效果分析提供可靠、客观的数据支撑。

#### 3.2 优化效果对比分析

为系统评估协同优化设计的实际效能,在标准测试平台上对优化前后的车载触控系统进行了多场景、多指标对比测试。测试严格遵循 ISO 11452 系列与 GB/T 17619 标准,采用 10 套量产车载触控显示屏台架,每项测试重复 5 次并取平均值,确保数据的统计具有显著性与可靠性。测试涵盖大电流注入(BCI)、电快速瞬变脉冲群(EFT)及射频辐射干扰等典型车载干扰类型,并从功能可靠性、操作精确性及响应实时性三个维度对系统性能进行综合评价,测试结果如表 1、表 2 和表 3 所示。

功能可靠性。优化前系统在强 BCI 干扰(100 mA, 150 kHz 至 400 MHz)下平均误触率达 12.70%,且在 50 - 200 MHz 频段出现功能完全失效;优化后系统误触率显著降至 1.50% 以下,且在全频段干扰下未出现功能中断,表明系统的干扰免疫性与运行稳定性显著增强。

表 1 多干扰场景下系统抗干扰性能详细对比

| 干扰类型   | 测试场景描述                   | 频率范围/参数                             | 强度/条件         | 优化前性能        | 优化后性能        |
|--------|--------------------------|-------------------------------------|---------------|--------------|--------------|
| BCI 干扰 | 低频传导干扰                   | 150 - 1000 kHz                      | 60 mA         | 误触率:8.5%     | 误触率:≤1.0%    |
|        | 高频传导干扰                   | 1 - 400 MHz                         | 100 mA        | 误触率:12.7%    | 误触率:≤1.5%    |
| EFT 干扰 | 脉冲群干扰(电源线)               | 5/50 ns, 100 kHz                    | ±2 kV         | 定位误差:±5.0 像素 | 定位误差:±1.5 像素 |
|        | 脉冲群干扰(信号线)               | 5/50 ns, 100 kHz                    | ±1 kV         | 延迟波动:130 ms  | 延迟波动:≤6 ms   |
| 射频辐射干扰 | 连续波辐射<br>(80 - 1000 MHz) | 200 V · m <sup>-1</sup>             | 80 - 1000 MHz | 误报率:15.3%    | 误报率:≤2.0%    |
|        | 调制波辐射<br>(1 - 2.5 GHz)   | 200 V · m <sup>-1</sup> ,<br>80% AM | 1 - 2.5 GHz   | 漏报率:12.8%    | 漏报率:≤1.5%    |
| 复合干扰   | BCI + EFT 同步注入           | BCI: 100 mA,<br>EFT: ±2kV           | 同时施加          | 系统重启         | 功能正常         |
| 环境适应性  | 辐射 + 传导混合干扰              | 200 V · m <sup>-1</sup> + 100 mA    | 全频段           | 定位漂移 ≥ ±8 像素 | 定位漂移 ≤ ±2 像素 |
|        | 高温工作(+85 °C)             | 全频段                                 | 温度: +85 °C    | 误触率:14.2%    | 误触率:≤1.8%    |
|        | 低温工作(-40 °C)             | 全频段                                 | 温度: -40 °C    | 延迟增加:35%     | 延迟增加:≤5%     |

表2 不同强度干扰下系统性能表现

| 干扰类型 | 强度等级                  | 优化前<br>误触率/% | 优化后<br>误触率/% | 优化前<br>定位误差 | 优化后<br>定位误差 | 备注     |
|------|-----------------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------|
| BCI  | 60 mA                 | 8.5          | 1.0          | ±4.5 像素     | ±1.2 像素     | 低频传导干扰 |
|      | 100 mA                | 12.7         | 1.5          | ±5.0 像素     | ±1.5 像素     | 中频传导干扰 |
|      | 200 mA                | 18.3         | 2.0          | ±6.5 像素     | ±1.8 像素     | 高频传导干扰 |
| EFT  | ±1 kV                 | 10.2         | 1.2          | ±4.0 像素     | ±1.0 像素     | 信号线干扰  |
|      | ±2 kV                 | 15.5         | 1.8          | ±5.0 像素     | ±1.5 像素     | 电源线干扰  |
|      | ±4 kV                 | 22.1         | 2.5          | ±7.0 像素     | ±2.0 像素     | 强脉冲干扰  |
| 辐射场  | 100 V·m <sup>-1</sup> | 9.8          | 1.0          | ±3.5 像素     | ±1.0 像素     | 中等场强   |
|      | 200 V·m <sup>-1</sup> | 15.3         | 2.0          | ±5.0 像素     | ±1.5 像素     | 强场强    |
|      | 300 V·m <sup>-1</sup> | 24.7         | 3.2          | ±8.0 像素     | ±2.2 像素     | 极强场强   |

表3 系统容错与自适应机制性能验证

| 测试场景   | 干扰特征         | 优化前表现        | 优化后表现       | 关键技术机制        |
|--------|--------------|--------------|-------------|---------------|
| 瞬时脉冲干扰 | 单脉冲,宽度 50 ns | 出现误报或漏报      | 无异常响应       | 实时异常点剔除算法     |
| 周期性噪声  | 10 kHz 正弦波   | 连续误报         | 无影响         | 自适应窄带滤波       |
| 基线漂移   | 温度变化 ±30 °C  | 误触率上升至 18.5% | 误触率 ≤2.0%   | 动态阈值与基线校准     |
| 多通道干扰  | 单通道持续受扰      | 整体定位一致性差     | 自动降权,通道切换   | 多传感器融合与容错处理   |
| 突发宽带噪声 | 20 - 200 MHz | 系统重启或死机      | 功能正常,性能轻微下降 | 硬件滤波 + 软件冗余决策 |

操作精确性。优化前系统在 EFT 干扰 (±2 kV, 5/50 ns) 下单点触控定位误差最高达 ±5.00 像素, 划线轨迹出现明显断裂, 多点触控一致性差; 优化后系统定位误差控制在 ±1.50 像素以内, 轨迹平滑无断裂, 且在复合干扰背景下仍保持高一致性, 满足高精度交互需求。

响应实时性。优化前系统在 EFT 干扰下响应延迟波动范围大 (20 - 150 ms), BCI 干扰下延迟波动达 130 ms; 优化后系统通过硬件预处理与软件自适应滤波的协同作用, 将平均响应延迟稳定控制在 20 ms ± 3 ms 范围内, 波动范围缩小至 6 ms, 符合车载实时交互的性能要求。

实验结果表明, 本研究所提出的协同优化方法通过整合硬件抑制、软件处理与结构屏蔽的多重优势, 显著提升了系统在复杂电磁环境下的综合性能, 为解决车载触控系统抗干扰问题提供了有效的系统级解决方案。

## 4 结论

本研究针对车载触控系统在复杂电磁环境中面临的干扰问题, 提出了一种协同优化设计方法, 从干

扰机理分析、多层次协同架构构建到实验验证开展了系统研究。首先, 通过对车载典型电磁干扰源、耦合路径及系统失效模式的深入剖析, 明确了干扰作用于触控系统的关键环节与失效机理, 为针对性设计提供了理论依据。在此基础上, 构建了涵盖硬件电路、软件算法与机械结构的多层级协同抗干扰架构, 突破了传统“孤岛式”优化的局限。硬件层通过滤波电路优化、PCB 布局与接地策略改进以及高抗扰器件选型, 从物理层面显著抑制干扰侵入; 软件层引入自适应滤波、动态阈值调整、干扰事件识别与多传感器融合等智能算法, 有效提升信号处理的鲁棒性和准确性; 机械结构层则通过屏蔽设计、布线优化和连接器选型, 为系统提供良好的电磁环境保护。尤为重要的是, 本研究强调了各层级之间的信息交互与闭环调控机制, 实现了系统级协同抗干扰效能的最大化。通过搭建符合车规标准的测试平台并对优化前后系统进行对比实验, 结果表明: 所提协同优化方法显著提高了系统抗干扰性能, 误触率降至 1.5% 以下, 触控定位误差控制在 ±1.5 像素内, 响应延迟稳定在 20 ms ± 3 ms, 各项指标均满足高可靠车载交互的应用需求。

本研究表明,协同优化设计能够有效整合多层次技术优势,系统性提升车载触控系统的电磁兼容性与运行可靠性,为未来智能汽车人机交互系统的开发提供了有益参考。后续研究可进一步探索基于人工智能的干扰预测与自适应抑制策略,以增强系统在未知干扰环境下的应对能力。

### 参考文献:

- [1] 张杰. 基于环境感知的机载雷达抗干扰技术[J]. 信息化研究, 2025, 51(4): 47-53.
- [2] 叶子绿, 许魁, 张北华, 等. 深度强化学习的 ME-STAR-RIS 辅助无线抗干扰传输方法[J]. 陆军工程大学学报, 2025, 4(4): 53-60.
- [3] JIANG P F, GENG X S, PAN G W, et al. GNSS anti-interference technologies for unmanned systems: A brief review [J]. Drones, 2025, 9(5): 349-369.
- [4] 张大蔚, 刘国平, 王立敏. 受扰非线性全驱系统的抗干扰预测跟踪控制[J/OL]. 控制理论与应用, 2025: 1-9 [2025-09-03].
- [5] XU F, ZHANG X F. A high-temperature stabilized anti-interference Beidou array antenna [J]. Electronics, 2025, 14(8): 1555-1569.
- [6] 李亚鹏, 马骏宇, 李强, 等. 可重构智能表面辅助的通信抗干扰性能优化[J]. 电信科学, 2025, 41(7): 15-29.
- [7] ZHANG J B, FENG W Q, WANG H. A phase bias compensation method for anti-interference antenna arrays in RTK positioning [J]. Remote Sensing, 2025, 17(6): 1018-1041.
- [8] 韩笑, 夏青波, 施佳佳. 面向汽车毫米波雷达抗干扰的信号分离方法综述[J]. 电子信息对抗技术, 2025, 40(4): 90-98.
- [9] 朱海双, 宋君忠, 张长屹. 基于多信道抗干扰的天线信号传输检测技术研究[J]. 中国宽带, 2025, 21(8): 91-93.
- [10] 褚兴华, 王娟, 朱晨昊, 等. 基于采样值分布的 GNSS 抗干扰接收机快速数字 AGC 方法[J]. 兵器装备工程学报, 2025, 46(9): 314-321, 332.
- [11] 潘正辉. 基于多模块协同机制的 OTA 升级状态上报优化研究[J]. 宁夏师范大学学报, 2025, 46(4): 82-95.
- [12] 梁波, 徐翔, 牛荣超, 等. 针对 DC-DC 升压变换器的新型抗干扰快速终端滑模控制方法[J]. 西北工业大学学报, 2025, 43(2): 338-344.
- [13] 张锐. 面向通信抗干扰的 IRS-NOMA 系统上行链路和速率的优化[J]. 火力与指挥控制, 2025, 50(3): 49-55.
- [14] 马添乐, 胡圣波, 熊霞. 基于信道化干扰检测的跳频智能抗干扰方法[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2025, 43(5): 34-44.
- [15] 刘欢, 郝中洋, 张晓敏, 等. 一种永磁交流伺服系统速度抗干扰控制算法研究[J]. 航天返回与遥感, 2024, 45(6): 47-55.
- [16] 方小明, 刘艳梨, 田大海. 应用 GPC-PLC-PID 的电镀线镀槽液温度抗干扰稳定控制方法[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(2): 99-105.
- [17] PAN Z H, SUN Y, FENG W F, et al. Straddling mandatory standardisation and voluntary ESG practices: A sustainable innovation path for vehicle intelligence [J]. Academic Journal of Engineering and Technology Science, 2024, 7(1): 44-53.
- [18] 穆凡, 刘哲. 神经先验增强的抗干扰鲁棒自动驾驶导航[J]. 计算机应用研究, 2025, 42(1): 111-116.
- [19] 史海旭, 徐仲秋, 李光祚, 等. 利用稀疏 CP-OFDM 的 SAR 抗干扰成像方法研究[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(12): 4441-4450.

责任编辑:李壮

## 煤矸砂浆制备与性能的试验研究

栾从起\*, 王家乐

(宿州学院 资源与土木工程学院, 安徽 宿州 234000;  
宿州学院 矿井水资源化利用安徽普通高校重点实验室, 安徽 宿州 234000)

**摘要:**以煤矸砂取代天然河砂制备砂浆,系统考察了整体取代、单一粒径取代及双粒径取代方式对砂浆流动度、抗压强度与抗折强度的影响。结果表明:煤矸砂取代会导致砂浆的流动度、抗压强度与抗折强度均有所下降。整体取代时,随着取代率增加,各项性能逐渐降低。单一粒径取代中,1.18-0.6 mm 粒径对流动度影响最大;2.36-1.18 mm 粒径对抗折强度影响最大;4.75-2.36 mm 粒径对抗压强度影响最大。双粒径取代中,1.18-0.3 mm 粒径组合对流动度影响最大;对抗压强度而言,7 d 时影响最大的为 4.75-2.36 mm 与 1.18-0.6 mm 组合,28 d 时则为 1.18-0.6 mm 与 0.15 mm 以下组合;对抗折强度而言,其影响最大的为 1.18-0.6 mm 与 0.15 mm 以下组合。

**关键词:**煤矸砂;水泥砂浆;粒径区间;力学性能;细骨料

中图分类号:TV432

文献标识码:A

文章编号:2095-297X(2026)02-0074-08

## Experimental Study on the Preparation and Properties of Coal Gangue Sand Mortar

LUAN Congqi\*, WANG Jiale

(School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou, 234000, Anhui;  
Anhui Key Laboratory of Mine Water Resource Utilization, Suzhou University, Suzhou, 234000, Anhui)

**Abstract:** This study investigated the effects of replacing natural river sand with coal gangue sand (CGS) on the preparation of mortar. Three replacement strategies were evaluated: overall replacement, single-size replacement, and dual-size replacement, with a focus on fluidity, compressive strength, and flexural strength. The results indicated that incorporating CGS generally reduced the fluidity, compressive strength, and flexural strength of mortar. Under overall replacement, all properties gradually declined as the replacement ratio increased. In single-size replacement tests, the particle size range of 1.18-0.6 mm showed the most pronounced negative effect on fluidity; 2.36-1.18 mm had the greatest detrimental impact on flexural strength; and 4.75-2.36 mm most significantly lowered compressive strength. For dual-size replacement, the combination of 1.18-0.3 mm particle size has the greatest impact on fluidity; In terms of compressive strength, the combination of 4.75-2.36 mm and 1.18-0.6 mm caused the greatest decrease at 7 days, while at 28 d, it is the combination of 1.18-0.6 mm and less than 0.15 mm; for the flexural strength, the combination of the greatest impact is 1.18-0.6 mm and less than 0.15 mm.

**Key words:** coal gangue sand; cement mortar; particle size range; mechanical properties; fine aggregate

煤矸石是采煤过程和洗煤过程中排放的固体废物。煤炭生产过程中会产生 10% - 20% 的煤矸石,我国煤矸石累计堆放量超过 70 亿吨,形成矸石山

2600 座,并仍以每年 8.29 亿吨的速度增长,压占土地面积约 150 km<sup>2</sup>,占用大量的土地面积,危害环境<sup>[1-4]</sup>。因此实现煤矸石的二次利用,提高煤矸石

收稿日期:2025-10-17 \* 通讯联系人

基金项目:宿州学院博士科研启动基金(2024BSK014)。

作者简介:栾从起(1990-),男,山东济宁人,讲师,博士。E-mail:luancq0822@163.com

废料的利用率,显得尤为重要。对于煤矸石,国内目前的研究主要是替代混凝土中的粗骨料,少部分研究用其作为替代砂。陈凤阁等发现煤矸石掺量越高,则坍落度水平越低,添加附加水可以适当缓解,增加其流动性<sup>[5]</sup>。刘瀚卿等发现随着煤矸石掺量增加,混凝土的抗压强度、弹性模量及抗劈拉强度均呈下降趋势<sup>[6]</sup>。高银龙利用煤矸石骨料取代普通石灰石后发现其会影响混凝土的抗压强度,煤矸石混凝土受压力学性能随着取代率和保水率增加呈先增强后减弱的趋势,煤矸石骨料“吸水-释水”特点会影响煤矸石骨料与水泥基体间以及石灰石骨料与水泥基体间界面过渡区的细观结构,并且相同条件下,煤矸石骨料与水泥基体间界面过渡区的细观结构优于石灰石与水泥基体间界面过渡区的细观结构<sup>[7]</sup>。

砂浆作为建筑材料,用处广泛,随着我国社会的发展,建筑行业的发展突飞猛进,对于砂浆各种原材料的需求日益提高,生产砂浆的原料中细骨料用量最大,目前主要以天然砂作为细骨料,河砂作为一种天然资源,短时间大量开采,会导致资源短缺,目前的研究主要是用其他材料替代,张美香等发现红砬砂岩替代率小于30%时强度相较于未取代时增加,当取代率大于50%时强度快速下降<sup>[8]</sup>。莫旭典等利用煤渣细骨料取代天然河砂,发现随着取代比例的提高,其流动度越来越高,且砂浆的抗压强度不断提高<sup>[9]</sup>。李俊生发现铁尾矿掺入砂浆中可减少孔隙的数量和体积,使得孔隙尺寸分布更为集中,表现为物理填充效应,而对砂浆内部的水化活性影响较小,铁尾矿本身“物理效应”作用效果强于“化学效应”,铁尾矿的掺入会提高砂浆和混凝土的力学性能,改善骨料-砂浆界面性能,铁尾矿的最优替代率应在25%-50%之间<sup>[10]</sup>。上述研究都是整体取代混凝土或者砂浆内的砂子,未考虑到砂子级配对其性能的影响。

本文研究煤矸砂制备砂浆并探究不同粒径的煤矸砂在单掺或者双掺时,砂浆性能的变化,以此来提高煤矸石的回收利用率,以缓解其带来的环境压力。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

水泥:P·O 42.5 普通硅酸盐水泥。

河砂:宿州中砂,细度模数为2.62,细度分布如图1所示。

水:宿州市自来水。

煤矸砂:粒径小于4.75 mm的煤矸石,细度模

数为3.3,采用等质量取代天然河砂的方法掺入煤矸砂颗粒,细度分布如图2所示。

减水剂:聚羧酸系减水剂。

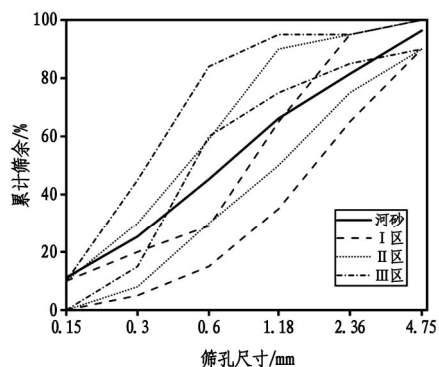


图1 河砂的级配曲线

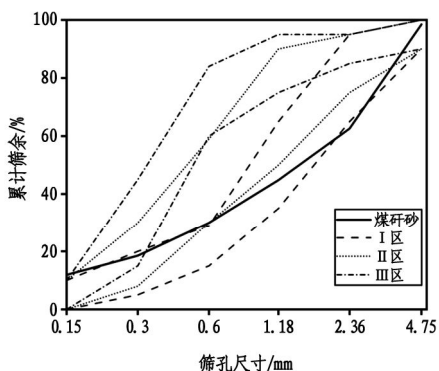


图2 煤矸砂的级配曲线

### 1.2 试验设计

本试验主要研究煤矸砂取代河砂(0%、25%、50%、75%、100%)以及配置煤矸砂使其级配与河砂的级配相同,将河砂全部取代。将煤矸砂的单一粒径等质量取代河砂相同粒径,将煤矸砂的双粒径等质量取代河砂相同粒径。参照《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671-2021),其中水泥、水、砂的配比为1:0.5:3。砂浆的配比如表1至表3所示。

表1 煤矸砂取代河砂砂浆配合比

| 组号   | 天然河砂   | 煤矸砂    | 水泥  | 水   | 减水剂   |
|------|--------|--------|-----|-----|-------|
| A0   | 1350   | 0      | 450 | 225 | 2.9   |
| A25  | 337.5  | 1012.5 | 450 | 225 | 5.1   |
| A50  | 675    | 675    | 450 | 225 | 7.3   |
| A75  | 1012.5 | 337.5  | 450 | 225 | 9.5   |
| A100 | 0      | 1350   | 450 | 225 | 11.7  |
| C100 | 0      | 1350   | 450 | 225 | 15.75 |

注:C100为河砂级配的煤矸砂取代河砂。

表2 煤矸砂单一粒径取代河砂砂浆配合比

| 组号 | 粒径区间/mm   |           |          |         |          |        | 减水剂/g |
|----|-----------|-----------|----------|---------|----------|--------|-------|
|    | 4.75-2.36 | 2.36-1.18 | 1.18-0.6 | 0.6-0.3 | 0.3-0.15 | 小于0.15 |       |
| B1 | √         |           |          |         |          |        | 3.78  |
| B2 |           | √         |          |         |          |        | 3.78  |
| B3 |           |           | √        |         |          |        | 3.78  |
| B4 |           |           |          | √       |          |        | 4.22  |
| B5 |           |           |          |         | √        |        | 3.78  |
| B6 |           |           |          |         |          | √      | 3.78  |

注:√表示用相同粒径等质量的煤矸砂取代天然河砂,空白表示此粒径为天然河砂,其他配料掺量:水泥为450 g、水为225 g。下表同。

表3 煤矸砂双粒径取代河砂砂浆配合比

| 组号  | 粒径区间/mm   |           |          |         |          |        | 减水剂/g |
|-----|-----------|-----------|----------|---------|----------|--------|-------|
|     | 4.75-2.36 | 2.36-1.18 | 1.18-0.6 | 0.6-0.3 | 0.3-0.15 | 小于0.15 |       |
| B12 | √         | √         |          |         |          |        | 5.47  |
| B13 | √         |           | √        |         |          |        | 6.11  |
| B14 | √         |           |          | √       |          |        | 6.11  |
| B15 | √         |           |          |         | √        |        | 6.11  |
| B16 | √         |           |          |         |          | √      | 6.11  |
| B23 |           | √         | √        |         |          |        | 6.11  |
| B24 |           | √         |          | √       |          |        | 6.11  |
| B25 |           | √         |          |         | √        |        | 6.11  |
| B26 |           | √         |          |         |          | √      | 6.11  |
| B34 |           |           | √        | √       |          |        | 7.40  |
| B35 |           |           | √        |         | √        |        | 7.40  |
| B36 |           |           | √        |         |          | √      | 7.40  |
| B45 |           |           |          | √       | √        |        | 7.40  |
| B46 |           |           |          | √       |          | √      | 7.40  |
| B56 |           |           |          |         | √        | √      | 6.11  |

### 1.3 试件制作及试验方法

本试验抗压强度及抗折强度的尺寸为40 mm × 40 mm × 160 mm,试件浇筑完24 h后拆模,在标准条件下养护7 d、28 d,试验参照《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671-2021)进行。

本试验流动度测试参照《水泥胶砂流动度测定方法》(GB/T 2419-2005)。先将河砂与煤矸砂混合均匀,将水泥和水搅拌30 s,在下一个30 s均匀地加入砂,停拌90 s,继续搅拌60 s,结束后将砂浆装入模具并振捣抹平。

## 2 结果与分析

### 2.1 煤矸砂取代河砂

由图3煤矸砂取代河砂对流动度的影响可知,煤矸砂整体取代天然河砂,各组试件的流动度从高到低依次是A0 > A25 = A50 > A75 > A100 > C100,其中A25、A50、A75、A100、C100组相较于基准组降低了9.26%、8.33%、29.63%、37.96%、40.74%;其中A0、A25、A50、A75、A100、C100组的减水剂量分别为2.9、5.1、7.3、9.5、11.7、15.75 g。随着煤矸砂取代河砂的比例不断增加,砂浆的流动度逐渐减少,

因为河砂表面光滑,颗粒级配均匀,而煤矸砂表面粗糙,颗粒不均匀,表面附着更多水分,导致砂浆的流动度减小。河砂取代比例从50%到75%时,流动度的变化幅度变大,其他组之间流动度的变化较小,这是因为煤矸砂表面粗糙,颗粒不规则,在掺加量不大时影响较小,但随着掺加量变大,砂浆需水量变大,

导致流动度大幅度减少,相较于 A100、C100 两组, C100 的流动度小于 A100,这是因为河砂级配较均匀、较小颗粒的占比大于煤矸砂级配,较细的颗粒表面积也较大,所需要的水也更多,使其流动性变差,导致 C100 的流动度小于 A100。

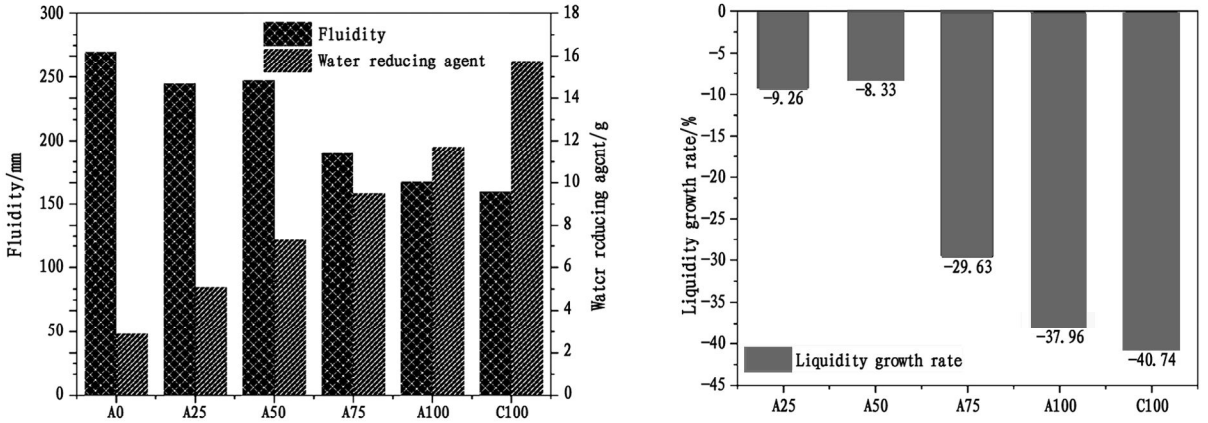


图3 煤矸砂取代河砂对流动度的影响

由图4、图5煤矸砂取代河砂对抗压强度、抗折强度的影响可知,煤矸砂整体取代天然河砂时,7 d、28 d 抗压强度、抗折强度变化幅度相似,28 d 龄期各组试件抗压强度由高到低依次是 A0 > A25 > A50 > A75 > C100 > A100,其中 A25、A50、A75、A100、C100 较基准组降低了 12.1%、17.75%、25.3%、33.51%、32.32%;28 d 龄期各组试件抗折强度由高到低依次是 A0 > A25 > A50 > A75 > C100 > A100,其中 A25、A50、A75、A100、C100 组相较于基准组降低了 7.85%、20.59%、31.22%、41.31%、35.01%。相较于 A0 组煤矸砂整体取代河砂,随着取代比例

的不断增加,砂浆试件强度不断降低,这是因为天然河砂的级配较均匀而煤矸砂的级配不均匀且大颗粒的占比较大,颗粒间空隙无法得到有效填充,导致所形成的结构强降低,煤矸砂强度相较于河砂强度较低也是导致砂浆试件强度降低的主要原因,煤矸砂100%取代河砂中,河砂级配的煤矸砂强度降低的比普通煤矸砂的少。这是因为河砂的级配较均匀,颗粒间空隙得到有效填充,提高了砂浆试件的密实度,形成的稳定骨架支撑着整体结构,强化了力学性能,确保了砂浆在受力下的稳定性,使得砂浆在被煤矸砂取代后,其抗压、抗折表现出类似变化规律。

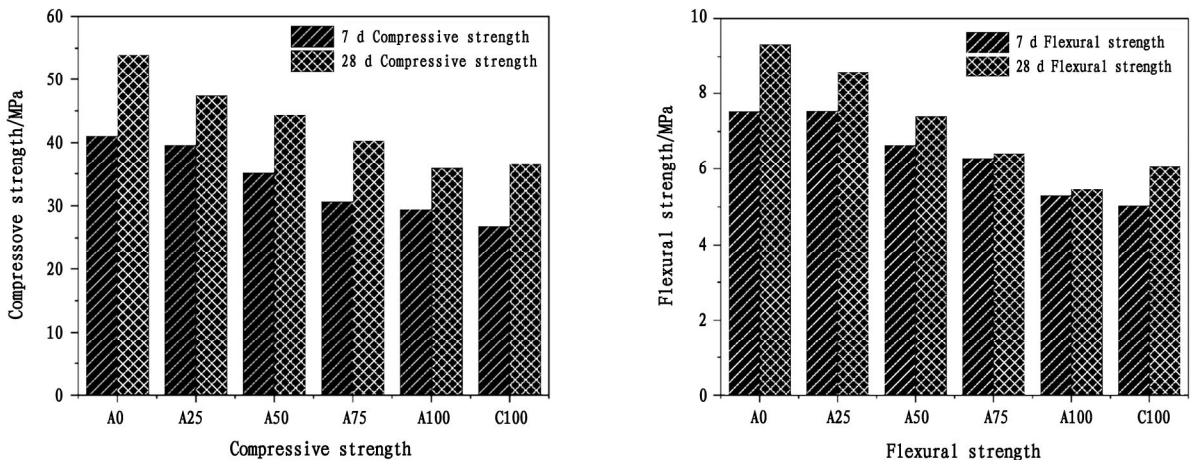


图4 煤矸砂取代河砂对抗压强度、抗折强度的影响

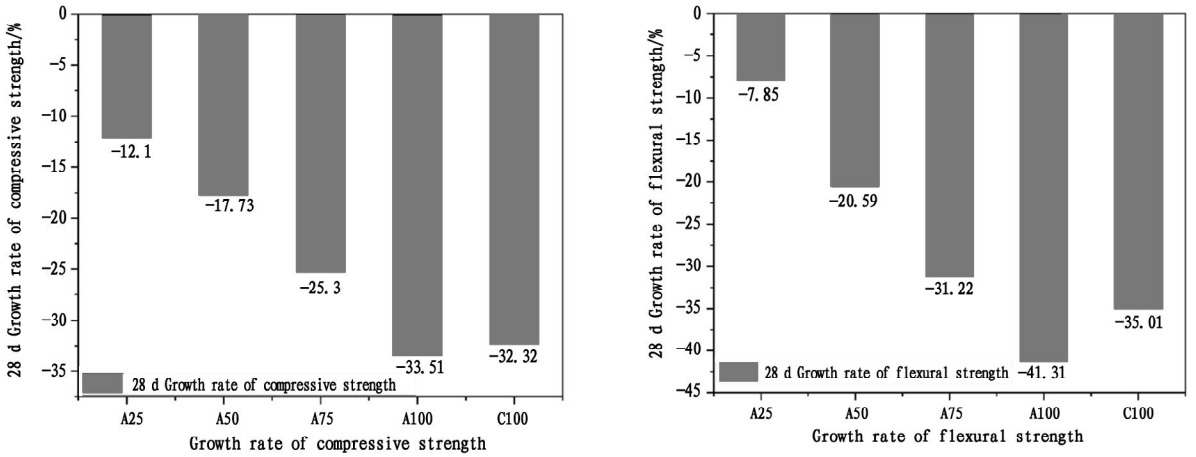


图5 煤矸砂取代河砂相较 A0 抗压强度、抗折强度变化率

## 2.2 煤矸砂单一粒径等质量取代河砂相应粒径

由图6煤矸砂单一粒径取代河砂对流动度的影响可知,煤矸砂单一粒径等质量取代河砂相应粒径,各组试件的流动度从高到低依次是  $A0 = B1 = B2 > B6 > B4 > B5 > B3$ ,其中  $B1$ 、 $B2$ 、 $B3$ 、 $B4$ 、 $B5$ 、 $B6$  组流动度相较于基准组降低了 0、0.93%、46.3%、35.19%、41.67%、25.46%,其中  $A0$ 、 $B1$ 、 $B2$ 、 $B3$ 、 $B4$ 、 $B5$ 、 $B6$  组的减水剂量分别为 2.9、3.78、3.78、3.78、4.22、3.78、3.78 g,河砂中 4.75 - 2.36、2.36 - 1.18、1.18 - 0.6、0.6 - 0.3、0.3 - 0.15、0.15 mm 以下的粒径占比分别为 15.64%、16.07%、21.92%、20.89%、14.84%、10.64%。不同粒径的取代对流动度的影响从高到低为  $A0 > B1 = B2 > B6 > B5 > B3 > B4$ ,河砂表面光滑,而煤矸砂表面粗糙,

表面附着更多水分,导致砂浆的流动度减小,颗粒粒径越小,表面积越大,对流动度的影响越大,对流动度影响最大的是 0.6 - 0.3 mm,对流动度影响最小的是 4.75 - 2.36 mm 和 2.36 - 1.18 mm,这是因为 0.6 - 0.3 mm 和 1.18 - 0.6 mm 粒径在整体占比中较大,所以对流动度的影响较大,而 0.6 - 0.3 mm 和 1.18 - 0.6 mm 虽然占比相近,但 0.6 - 0.3 mm 粒径更小,所以对流动度的影响更大,其中  $B1$  与  $B2$  流动度相当,说明 4.75 - 2.36 mm、2.36 - 1.18 mm 这两个粒径的取代对流动度的影响相近, $B6$  流动度大于  $B5$  是因为 0.3 - 0.15 mm 粒径的占比大于 0.15 mm 以下,不同粒径对砂浆的流动度的影响主要为粒径大小和粒径在整体的占比两个方面,粒径越小、占比越大,对流动度影响越大。

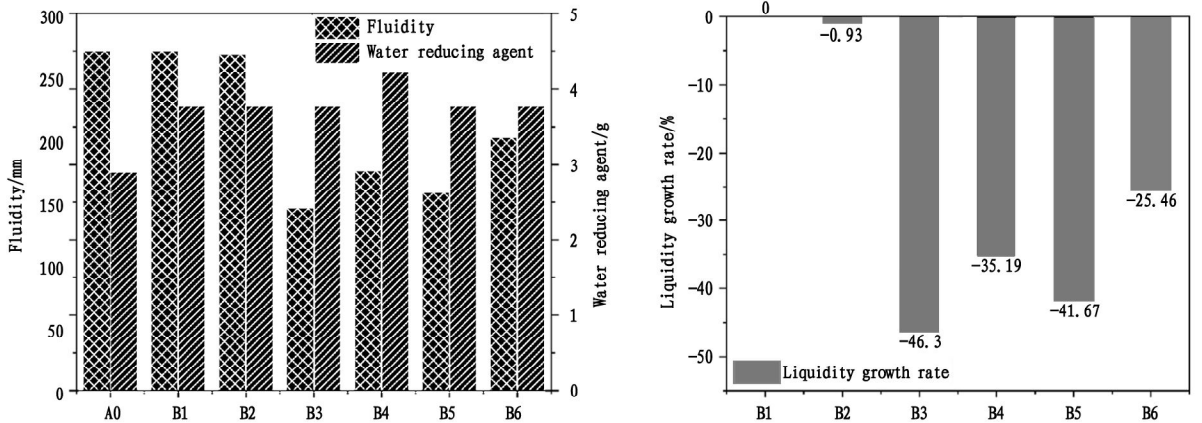


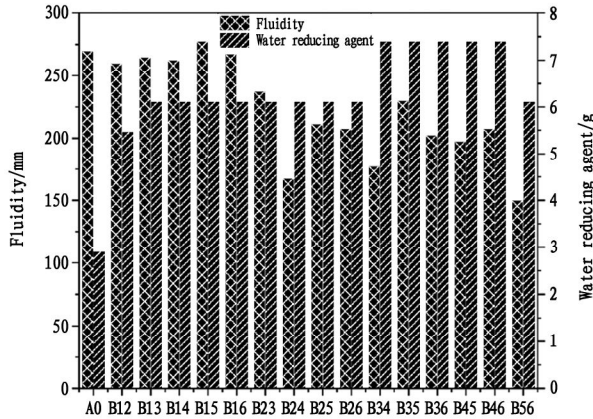
图6 煤矸砂单一粒径取代河砂对流动度的影响

煤矸砂单一粒径等质量取代河砂相应粒径对抗压强度、抗折强度的影响见图7、图8。由图可知,煤矸砂单一粒径取代天然河砂,28 d 龄期各组试件抗压强度由高到低依次为:  $A0 > B5 > B6 > B3 > B4 > B2 > B1$ ,其中  $B1$ 、 $B2$ 、 $B3$ 、 $B4$ 、 $B5$ 、 $B6$  组的抗压强度

相较于基准组  $A0$  降低了 23.29%、14.58%、7.42%、11.64%、4.13%、5.02%,28 d 龄期各组试件抗折强度由高到低依次为:  $A0 > B4 > B5 > B1 > B6 > B3 > B2$ ,其中  $B1$ 、 $B2$ 、 $B3$ 、 $B4$ 、 $B5$ 、 $B6$  组的抗折强度相较于基准组  $A0$  降低了 8.25%、18.85%、



径取代天然河砂相应的粒径使砂浆的流动度降低,其中 B12 流动度降低的最少, B34 降低的最大,这个与在单一粒径的试验对流动度的影响中 B12 对流动度影响最小, B34 对流动度影响最大相对应,但 B15、B16、B25、B26、B15、B16、B35、B36 组中显然与单一粒径的有出入,第二种粒径的加入使 0.3 - 0.15 mm、0.15 mm 以下两种粒径对流动度的影响产生了变化,0.15 mm 以下对流动度的影响大于



0.3 - 0.15 mm, B45、B46 组没有出现这种情况,说明较大粒径的取代会影响较小粒径对流动度的变化。主要是因为较大粒径的煤矸砂表面粗糙使其缝隙变大,越小的粒径占比越小,颗粒间空隙无法得到有效的自填充,因此填充砂粒间空隙的水泥浆增多,使骨料外侧水泥浆包裹层变薄,导致流动度下降<sup>[11]</sup>。

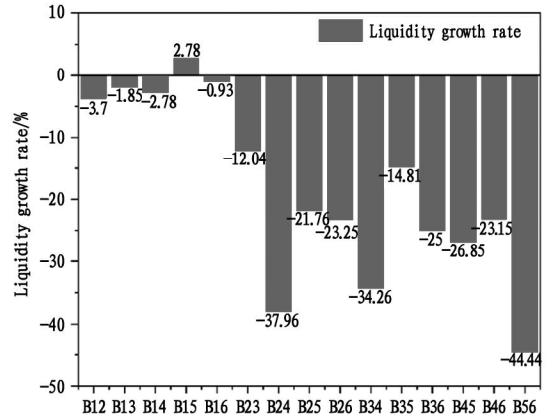


图9 煤矸砂双粒径等质量取代河砂相应粒径对流动度的影响

由图 10、图 11 煤矸砂双粒径等质量取代天然河砂对抗压强度、抗折强度的影响可知,7 d、28 d 抗压强度、抗折强度变化幅度相似。抗压强度整体呈现降低, B25 降幅最小, B15 降幅最大。抗折强度整体呈现降低, B12、B56 降幅最小, B36 降幅最大。4.75 - 2.36 mm、0.3 - 0.15 mm 对抗压强度的影响最大, 2.36 - 1.18 mm、0.3 - 0.15 mm 对抗压强度的影响最小, 因为 4.75 - 2.36 mm 的粒径较大, 导致缝隙增大, 无法形成较稳定的骨架, 导致 4.75 - 2.36 mm、0.3 - 0.15 mm 的取代对砂浆抗压强度的影响最大, 而 2.36 - 1.18 mm、0.3 - 0.15 mm 的取

代形成了较稳定的骨架结构, 导致其对砂浆抗压强度的影响最小。4.75 - 1.18 mm、0.3 mm 以下粒径取代对砂浆抗折强度的影响最小, 1.18 - 0.6 mm、0.15 mm 以下粒径取代对砂浆抗折强度的影响最大, 这是因为 4.75 - 1.18 mm、0.3 mm 以下粒径的占比较低, 以及河砂粒径连续内部较密实, 结构稳定, 黏聚性较好, 所以对砂浆抗折强度的影响最小, 而 1.18 - 0.6 mm、0.15 mm 以下粒径的占比较大, 以及级配不连续, 内部结构不稳定, 黏聚性较差, 所以对砂浆抗折强度的影响最大。

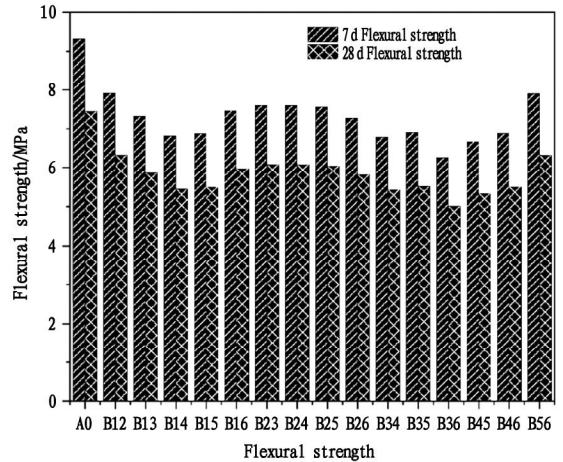
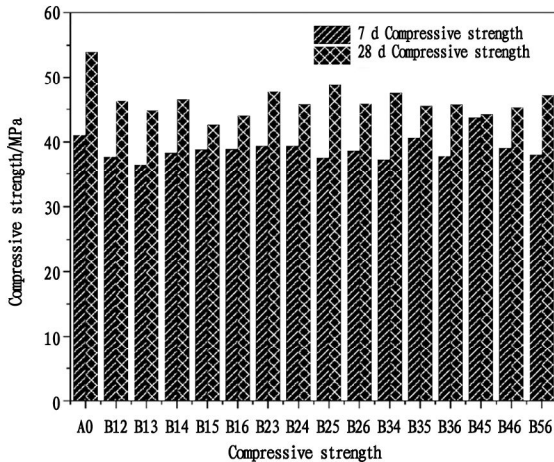


图10 煤矸砂双粒径取代天然河砂对抗压强度、抗折强度的影响

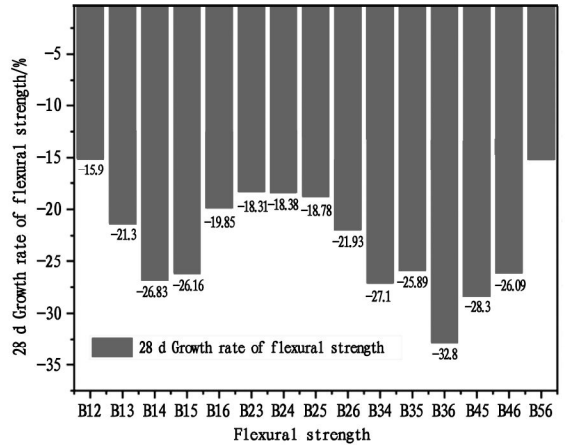
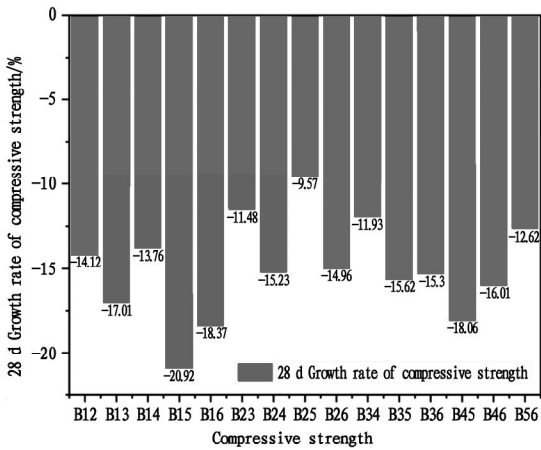


图 11 煤矸砂双粒径取代天然河砂相较 A0 抗压强度、抗折强度变化率

### 3 结论

为提升煤矸石利用率并缓解细骨料资源紧缺问题,研究了以煤矸砂替换天然河砂对砂浆性能的影响,包括整体替换、单一粒径替换及双粒径替换,测试了砂浆的流动度、抗压强度和抗折强度。主要结论如下:

整体替换时,随着煤矸砂比例增加,砂浆流动度、抗压强度与抗折强度均逐渐降低。河砂整体强度高于煤矸砂,且煤矸砂导致流动度下降。

单一粒径替换时,0.6 - 0.3 mm 粒径对流动度影响最大,4.75 - 2.36 mm 影响最小;4.75 - 2.36 mm 对抗压强度影响最大,0.3 - 0.15 mm 影响最小;2.36 - 1.18 mm 对抗折强度影响最大,0.6 - 0.3 mm 影响最小。

双粒径替换时,4.75 - 1.18 mm 对流动度影响最小,1.18 - 0.3 mm 影响最大;4.75 - 2.36 mm 与 0.3 - 0.15 mm 对抗压强度影响最大,2.36 - 1.18 mm 与 0.3 - 0.15 mm 影响最小;4.75 - 1.18 mm 与 0.3 mm 以下粒径对抗折强度影响最小,1.18 - 0.6 mm 与 0.15 mm 以下影响最大。

### 参考文献:

[1] 仲国龙,邓小伟,房朝军,等. 煤矸石资源化利用现状及

发展趋势[J/OL]. 煤炭学报,2025:1 - 18. (2025 - 04 - 08) [2025 - 07 - 17].

[2] 邓颖兰,魏恺颀,赵迪斐,等. 我国煤矸石固体废弃物在建筑与环境修复领域的资源化利用[J]. 能源研究与利用,2021(5):33 - 36.

[3] 潘硕,胡雨晴,王海燕,等. 煤矸石综合利用技术现状与标准体系研究[J]. 中国矿业,2024,33(7):89 - 98.

[4] 李振,雪佳,朱张磊,等. 煤矸石综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用,2021,41(6):165 - 178.

[5] 陈凤阁,刘鑫,张亚鹏,等. 拌合工艺对煤矸石细骨料混凝土流动性和力学强度的影响[J]. 金属矿山,2023(9):263 - 268.

[6] 刘瀚卿,白国良,朱可凡,等. 煤矸石混凝土抗折强度试验研究[J]. 建筑材料学报,2023,26(4):346 - 352.

[7] 高银龙. 取代率和保水率对煤矸石混凝土受压力学性能的影响[D]. 长春:吉林大学,2024.

[8] 张美香,罗忠涛,殷会玲,等. 红砭砂岩细集料制备水泥砂浆及其性能研究[J]. 混凝土,2015(8):112 - 114.

[9] 莫旭典,董磊,曹康华,等. 不同养护温度下镍渣细骨料水泥胶砂性能的试验研究[J]. 建筑施工,2024,46(11):1909 - 1912.

[10] 李俊生. 铁尾矿替代建设用砂可行性与力学性能研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2023.

[11] 罗健勇,于本田,苏俊辉,等. 机制砂颗粒级配对混凝土性能的影响研究[J]. 公路,2022,67(9):384 - 388.

责任编辑:刘娟

## 平椭圆形中空双壁管短柱的轴压力学性能研究

杨敬威, 孙俊祖\*, 汤志伟

(鲁东大学 水利土木学院, 山东 烟台 264025)

**摘要:**针对海上铁路桥梁墩柱弯剪破坏与腐蚀劣化频发问题,提出并探究平椭圆形FRP(纤维增强复合材料, Fiber Reinforced Polymer)-海水海砂混凝土-不锈钢中空双壁管短柱在单轴压缩荷载作用下的力学性能。设计36根短柱进行轴压试验,考察其破坏形态、抗压强度及延性特征。结果发现,试件均以FRP管环向脆性断裂为最终破坏状态。短柱的强度与延性随变形发展呈现出双曲线变化规律:初期快速上升,随后转为缓慢增长。基于试验实测数据,引入考虑截面比的约束刚度比与应变比修正系数,量化地提出了适用于此类柱在轴压作用下的极限应力-应变修正计算公式。该公式计算值与试验结果对比验证良好。所提出的计算方法可用于平椭圆形FRP-海水海砂混凝土-不锈钢中空双壁管柱在轴压作用下的力学性能评估。

**关键词:**平椭圆形;FRP;不锈钢;中空双壁管柱;单调轴压

中图分类号: TU392.3; TU398+.9

文献标识码: A

文章编号: 2095-297X(2026)02-082-08

### Study on Axial Compression Behavior of Flat Elliptical Double-Skin Hollow Tube Short Columns

YANG Jingwei, SUN Junzu\*, TANG Zhiwei

(School of Hydraulic and Civil Engineering, Ludong University, Yantai, 264025, Shandong)

**Abstract:** In response to the frequent occurrences of flexural-shear failure and corrosion deterioration in piers of maritime railway bridges, it proposed and investigated the mechanical properties of flat elliptical FRP (Fiber Reinforced Polymer)-seawater sea-sand concrete-stainless steel hollow double-skin tubular stub columns under uniaxial compressive loading. Axial compression tests were conducted on 36 stub columns to examine their failure modes, compressive strength, and ductility characteristics. The results indicated that the ultimate failure state of all specimens was characterized by the brittle fracture of the FRP tube in the hoop direction. The strength and ductility of the stub columns exhibited a hyperbolic variation pattern with deformation development: a rapid initial increase followed by a subsequent slow growth. Based on the experimental data, a modified formula for calculating the ultimate stress-strain of such columns under axial compression was quantitatively proposed by introducing correction factors for the confinement stiffness ratio and strain ratio, which consider the cross-sectional aspect ratio. The calculated values from this formula show good agreement with the experimental results. The proposed calculation method can be used for assessing the mechanical performance of flat elliptical FRP-seawater sea-sand concrete-stainless steel hollow double-skin tubular columns under axial compression.

**Key words:** flat elliptical; fiber reinforced polymer; stainless steel; hollow double-walled pipe column; monotonic axial compression

收稿日期: 2025-08-19 \* 通讯联系人

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2020ME260); 国家自然科学基金项目(51978322)。

作者简介: 杨敬威(2000-), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生; 孙俊祖(1984-), 男, 山东烟台人, 副教授, 博士。E-mail: sunjunzu@163.com

在海上铁路桥梁墩柱的服役周期中,弯剪破坏与腐蚀劣化现象频繁发生,已成为加速桥梁墩柱结构承载性能衰退及耐久性损伤的主要致因之一。海上铁路桥梁墩柱在使用期间,除受流水压力与风荷载的作用外,其主导性力学状况为结构自重静态荷载与高铁产生的动态荷载形成轴压荷载作用,直至承载临界值时墩柱突发脆性破坏。海洋环境中高氯离子与硫酸镁含量产生的化学作用以及海水干湿交替的物理作用加剧了墩柱的侵蚀。由此可见,海上铁路桥梁墩柱在轴向压力与海水腐蚀的耦合作用下,力学性能加速退化,其中承载能力下降尤为明显。并且,墩柱承载力作为桥梁结构服役性能评判的关键性评价参数,直接反映出整体结构的安全水平。因此,精确量化墩柱的轴压承载机理,完善了混凝土组合结构受压理论体系,为既有桥梁墩柱安全加固提供了设计思路,具有关键科学价值。

现阶段,对于 FRP-混凝土-钢双壁空心管柱 (FRP-concrete-steel double-skin tubular column, 简称 DSTC) 的极限状态承载性能在荷载作用下的研究,已构建出完整理论框架并建立了详实的实验数据<sup>[1-10]</sup>。Teng 等<sup>[11]</sup>在 Lam and Teng<sup>[12]</sup>的模型之上,开发了其优化模型。随后,Teng 等<sup>[13]</sup>针对 CFRP 约束椭圆形混凝土进行了轴压试验,并沿用了 Teng 等<sup>[11]</sup>模型作为椭圆形的模型形式,提出椭圆形 FRP 混凝土图像的双曲线特征。然而,对于 DSTC 柱的研究,国内外的研究主要围绕圆形、矩形及椭圆形截面<sup>[14-17]</sup>,对于平椭圆形 DSTC 柱的研究尚属一片空白。Wang 等<sup>[18]</sup>制作了 UHPFRC-DSTC 试件进行轴压试验,结果表明:FRP 厚度增加可提高试件的延性;在 FRP 约束较强时荷载-应变曲线呈双线性,约束较弱时在达到峰值荷载后突降。Xie 等<sup>[19]</sup>设计了 11 个大尺寸 DSTC 柱进行轴压试验,结果表明:试件延性均较好;由于收缩问题导致应力-应变曲线偏离双线性,呈现出在拐点处荷载回落和二次强化特征。

本研究承继既有研究成果,参考现有 DSTC 柱的受力情况,对平椭圆形 DSTC 柱进一步开展轴压试验,揭示了平椭圆形 DSTC 柱在轴压荷载作用下应力-应变的演化机理,进而对轴压荷载作用下平椭圆形 DSTC 柱的极限应力-应变构建量化计算公式,据此建立平椭圆形 DSTC 柱承压性能评估体系,为海上高铁桥墩工程提供理论范式与方法论框架。

## 1 试验过程概述

### 1.1 试验柱设计与制作

本次试验共设计、制作了 36 根平椭圆形 DSTC 试验柱,其截面示意图如图 1 所示。设计试件内外管为等厚结构,截面宽度 ( $2y = 120 \text{ mm}$ ) 固定,通过改变中间矩形的长度 ( $2x - 2y$ ) 来改变平椭圆形截面比,所有试件高度统一为 470 mm。影响试件轴压性能的参数有 FRP 管缠绕层数  $n_{frp}$  (4、6、8)、截面比  $x/y$  (1.3、1.7、2.0)、空心率  $\phi$  (0.32、0.36、0.39) 以及不锈钢管壁厚  $t$  (3 mm、5 mm)。试件编号根据参数信息由四部分构成:第一部分为数字+字母组合,数字表示试件缠绕的 FRP 层数,字母 C 为 CFRP 首字母;第二、三部分均为数字,分别代表平椭圆形截面比与不锈钢管壁厚;第四部分为罗马数字 I 和 II,以此来区分两个相同参数的试件。FRP 选定单向碳纤维布(弹性模量:240 GPa;极限应变:1.73%;标称厚度:0.167 mm),FRP 管制作流程如图 2 所示。不锈钢管采用 S304 号奥氏体不锈钢无缝管,经拉伸试验实测 3 mm 及 5 mm 钢材屈服强度分别为 221 MPa、307.3 MPa,抗拉强度分别为 634 MPa、714.7 MPa。海水海砂混凝土配合比为水泥:海水:海砂:粗骨料 = 1:0.5:1.6:3,设计强度等级为 C30,标准立方体混凝土试块实测抗压强度为 38.16 MPa,极限应变为 0.296%。平椭圆形 DSTC 试验柱制作流程如图 3 所示。

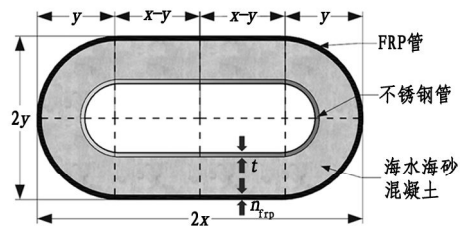


图 1 平椭圆形 DSTC 柱截面示意图

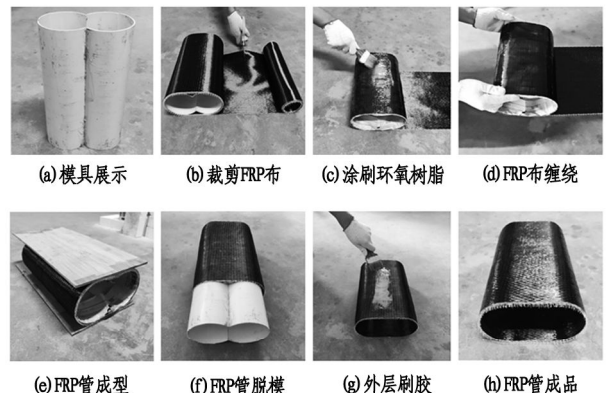


图 2 平椭圆形 FRP 管制作流程

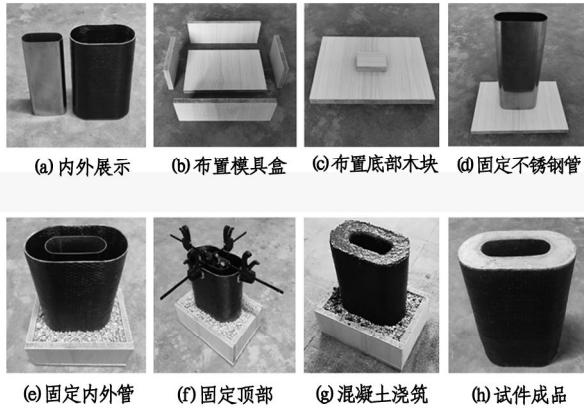


图3 平椭圆形 DSTC 柱制作流程

### 1.2 轴压试验加载与量测

本次轴压试验应用微机控制电液伺服压剪试验机(型号:YAW-5000J),采用位移控制加载模式,设置加载速度为  $0.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,直至试件失去承载,试验终止。在所有试件两端均缠绕4层宽度为5 cm 的 CFRP,以起到对试件端部的加固作用。在试件 FRP 管中部外表面粘贴10个  $20 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  环向应变片(H1 - H10),搭接区的应变片数据仅作参考;在不锈钢管短轴两端中部位置各布置1个  $5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  的应变片,应变片布置如图4所示。实验柱两侧中部位置各设置了2个位移计(LDM1 - LDM4)来记录竖向位移,详见图5。

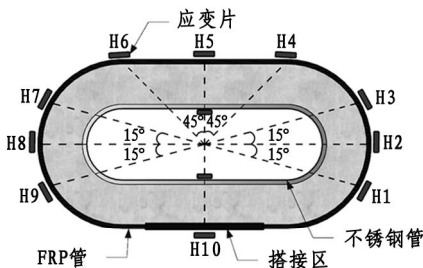


图4 FRP管应变片布置

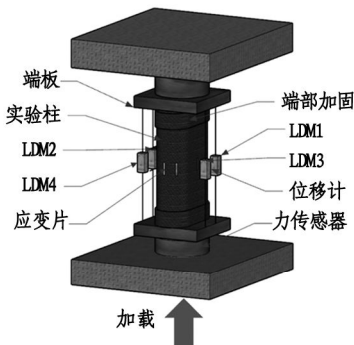


图5 位移计布置及加载装置

## 2 试验结果与分析

### 2.1 破坏形态

所有 DSTC 柱均因轴压变形至一定程度后突发环向断裂脆性破坏,部分典型破坏试件如图6所示,其标志为 FRP 管环向断裂,轴压荷载呈现骤降现象。试件在破坏前可清楚地听见 FRP 管发出的噼啪声,且随变形增大而变大,最后破坏时发出爆裂声,具有可预见性、危险性。



图6 部分典型试件破坏照片

## 2.2 轴压变形分析

部分典型试验柱在轴压后测得的应力-应变如图7所示, DSTC柱内置高强度不锈钢芯管形成类刚体核心,其应力计算采用FRP管截面面积(非整体截面)作为基准以避免误判为小截面实心柱;混凝土应力由(试件承载力-钢管承载力)/混凝土净面积确定。结合图6可发现:

加载初期,随试件变形增大,位移-荷载曲线迅速上升;至中期,FRP环向约束激活,进入第二段曲线,斜率小于第一段曲线;后期,试件变形过大,FRP约束失效时响起爆裂声,荷载直线下降,试件失去承载能力,破坏阶段曲线呈阶梯状。

FRP管断裂位置处混凝土破坏最严重,不锈钢管在此处向内凸起变形。由于混凝土被纵向压缩时,外层FRP管和内层不锈钢管均对其产生约束,随着变形增大,不锈钢管在此处屈服,FRP管断裂。

平椭圆形 DSTC柱在破坏后混凝土保存仍较为完整,并且残余荷载较高。因内部空心结构为混凝土提供了横向变形空间,在FRP管断裂后,不锈钢

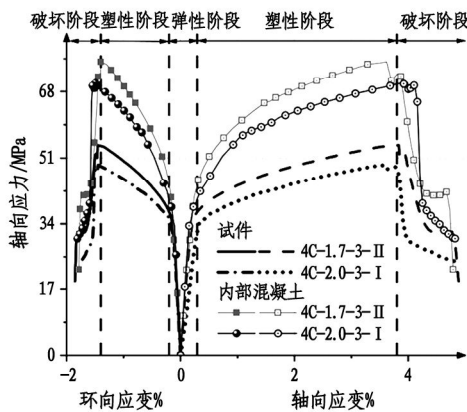
管仍能提供部分残余约束力和承载力。

3 mm厚度的不锈钢管试件内部不锈钢管突起较大,FRP断裂程度较轻;5 mm厚度的不锈钢管试件则发生相反的情况。这是由于不锈钢管越厚,其刚度越大,越难以发生屈曲,从而导致FRP管承受更大的横向荷载。

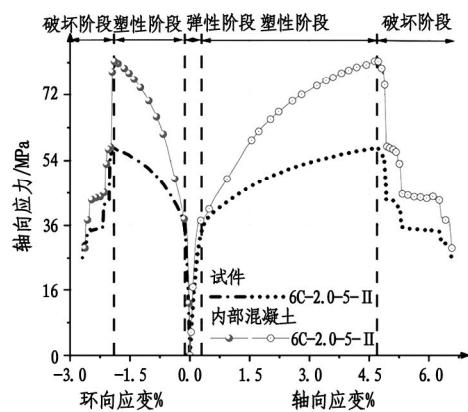
随着试件截面比增大,试件变形程度逐渐加大。这是由于截面比增加的同时,试件截面平面 $2x-2y$ 部分也在增加,在此处发生的横向变形越大。

FRP缠绕层数越多,不锈钢管变形越大,因为FRP缠绕层数增大会增强约束性能,使不锈钢管承受了更大的横向荷载。

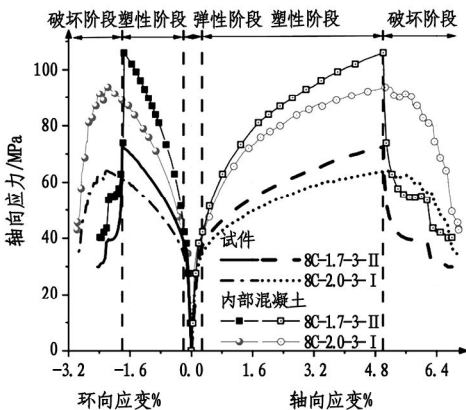
综上,在轴压荷载作用下,试验柱承压状态呈现出双阶段连续增长特征,即初始弹性阶段后快速进入渐进强化阶段,揭示其双重约束机制;与之相应,试验柱的应力-应变曲线呈现典型的双线性的变化特征,即迅速增大后缓慢上升,印证约束效应的阶段性转换。



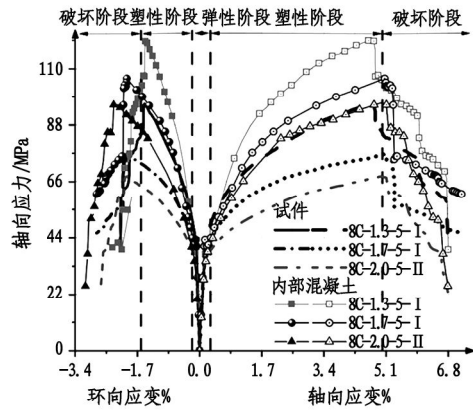
(a) 部分4层FRP-3 mm厚不锈钢管



(b) 部分6层FRP-5 mm厚不锈钢管



(c) 部分8层FRP-3 mm厚不锈钢管



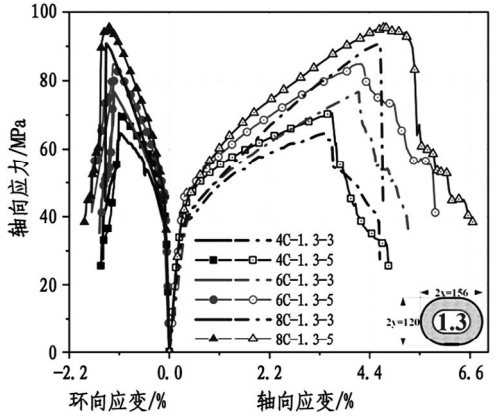
(d) 部分8层FRP-5 mm厚不锈钢管

图7 部分典型平椭圆形 DSTC柱及内部混凝土应力-应变曲线

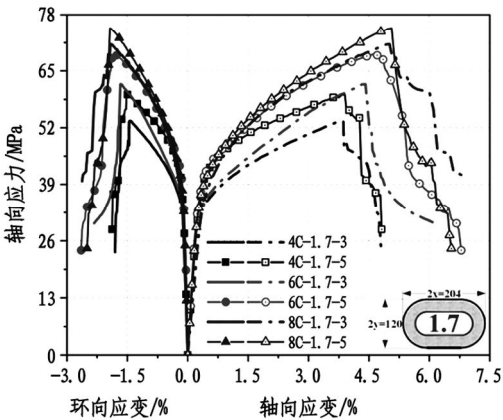
## 2.3 影响参数分析

### 2.3.1 FRP层数及不锈钢管厚度对平椭圆形 DSTC 柱影响

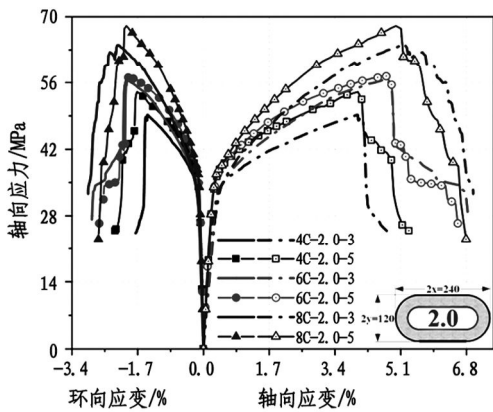
将等参数试件的试验数据经均值处理整合,以截面比保持一致,以 FRP 层数与不锈钢管壁厚为变量的实验柱应力-应变响应差异分析如图 8 所示。



(a)  $x/y=1.3$



(b)  $x/y=1.7$



(c)  $x/y=2.0$

图 8 FRP 层数及不锈钢管厚度对 DSTC 柱的影响

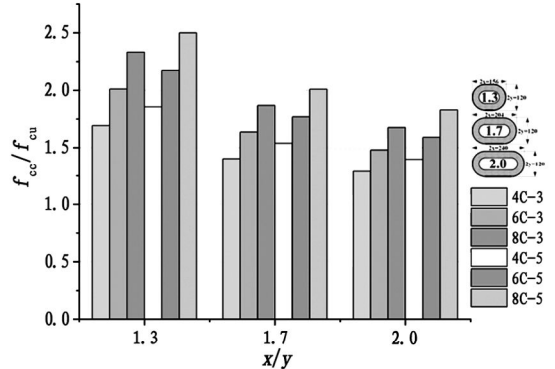
FRP 层数与试件极限抗压强度、峰值应变及环向断裂应变呈正向规律。各试件弹性段应力-应变曲线呈趋同性,阶段转折应变相近,揭示弹性阶段

FRP 约束还未激活,在强化阶段激发约束机制。强化段曲线斜率与 FRP 层数呈正相关,证实 FRP 层数累积效应,可通过增加层数实现力学性能的调控。

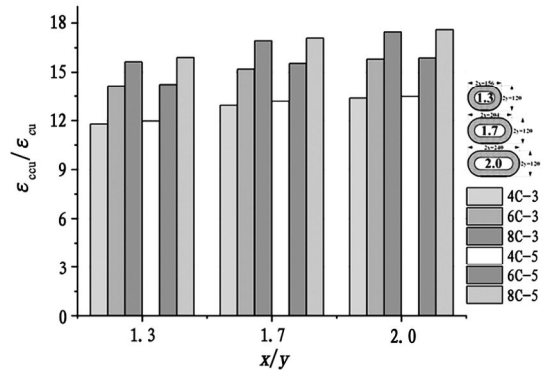
以不锈钢管厚度为变量,在弹性阶段由混凝土-不锈钢管协同承载,5 mm 钢管试件承载更高;塑性阶段极限应变趋同,表明不锈钢管应变调控作用较小。峰值后 5 mm 钢管试件曲线呈现阶梯式应力跳跃,其残余强度保留率达  $68\% \pm 5\%$ ,证实不锈钢管在 FRP 断裂后仍可维持延性承载状态。

### 2.3.2 截面比对平椭圆形 DSTC 柱的影响

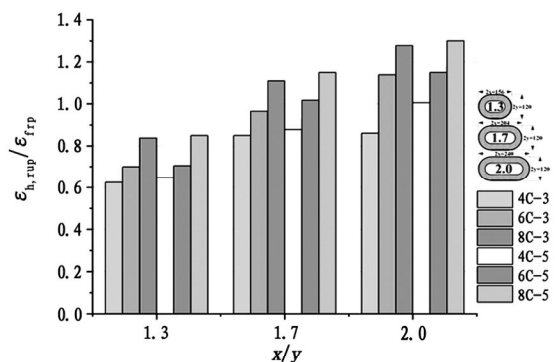
参数相同的试件取其平均值代入计算,在极限状态下的极限应力、极限应变以及环向断裂应变与截面比的关系如图 9 所示。



(a) 极限应力与截面比的关系



(b) 极限应变与截面比的关系



(c) 环向断裂应变与截面比的关系

图 9 截面比对 DSTC 柱极限状态的影响

由图 9 可知,随截面比增大,各试件极限应力结构性能反映出衰减趋势,衰减速率在  $-0.58$  至  $-0.95$  之间。本实验通过固定柱截面  $y$  不变、增大  $x$  以提高截面比,因此截面面积相应增加,进而使得材料极限应力呈现递减趋势。并发现 FRP 层数与截面比形成协同劣化效应,下降速率约为  $-0.947$ 。而截面比与试件极限应变呈正相关,与极限应力趋势相反,上升速率在  $2.37 - 2.55$  之间。并发现,随截面比增加,实验柱 FRP 层数表现出更显著的应变强化效应,其应变速率达  $2.5$ 。FRP 材料抗拉伸性能也与试件截面比呈正向规律,增长速率在  $0.42 - 0.64$  之间,其强化机制源于截面中部平面应变约束效应,在该处获得更大的膨胀空间(详见 2.3.3 节分析),印证试件几何优化与极限状态的协同增益效应。

### 2.3.3 平椭圆形截面不同位置处环向应变的变化

参考 Teng 等<sup>[20]</sup>,对搭接区位置 H10 不做分析。根据不同截面比,DSTC 柱 H1 - H9 的环向应变变化如图 10 所示。

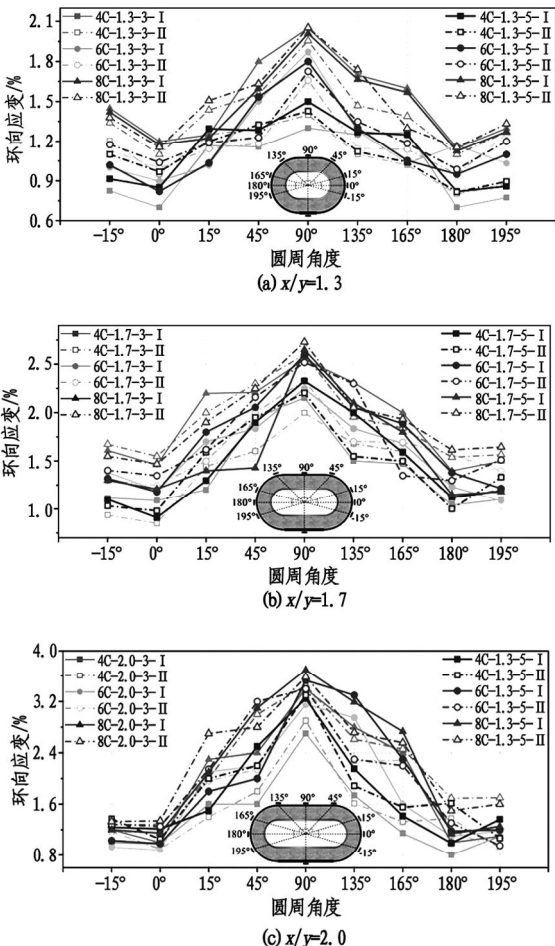


图 10 平椭圆形截面不同位置处环向应变变化

由图 10 可发现,平椭圆截面长轴端部呈半圆弧形,短轴端部为平面结构。整体呈长条状,圆弧区 FRP 约束较强( $0^\circ$ 和  $180^\circ$ 位置环向应变最小),膨胀受限;平面区 FRP 约束较弱( $90^\circ$ 位置环向应变最大),膨胀显著。环向应变分布表现为从  $0^\circ$ 与  $180^\circ$ 向  $90^\circ$ 位置递增。随截面比增大,环向应变分布差异加剧。平面区面积扩展提供更大横向变形空间,圆弧区曲率恒定约束较强。该平椭圆设计实现截面比与环向应变的正向关联,与传统设计截面比增加导致约束弱化不同,其能够满足大型建筑结构需求。

## 3 轴压作用下平椭圆形 DSTC 柱极限应力-应变修正计算公式

Yu 等<sup>[21]</sup>指出,若混凝土与钢管无显著相互作用,则空心率与极限应力无关,圆形 DSTC 柱的极限应力表达式也同样可以应用 Teng 等<sup>[11]</sup>所提出的圆形 FRP 约束混凝土柱的极限应力公式;Teng 等<sup>[13]</sup>沿用了 Teng 等<sup>[11]</sup>作为椭圆形模型(见式 1)。但空心率对极限应变影响较大,所以在其基础之上引入了空心率这一核心参数(见式 2)。

$$\frac{f_{cc}}{f_{cu}} = 1 - K(\rho_K)\rho_\varepsilon \quad (1a)$$

$$K(\rho_K) = \begin{cases} -3.5(\rho_K - 0.01) & \rho_K \geq 0.01 \\ 0 & \rho_K < 0.01 \end{cases} \quad (1b)$$

$$\rho_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{h,rupt}}{\varepsilon_{cu}} \quad (1c)$$

$$\rho_K = \frac{\rho_{FRP} E_{FRP}}{2} \frac{\varepsilon_{cu}}{f_{cu}} \quad (1d)$$

$$\rho_{FRP} = \frac{1.5(x+y) - \sqrt{xy}}{xy} t_{nom} \quad (1e)$$

$$\frac{\varepsilon_{ccu}}{\varepsilon_{cu}} = 1.75 + 6.5\rho_K^{0.8} \rho_\varepsilon^{1.45} (1-\phi)^{-0.22} \quad (2)$$

其中: $f_{cc}$ 、 $\varepsilon_{ccu}$ 分别表示平椭圆形 DSTC 柱极限应力、极限应变; $f_{cu}$ 、 $\varepsilon_{cu}$ 分别表示混凝土立方体试块极限应力、极限应变; $\rho_K$ 表示约束刚度比; $\rho_\varepsilon$ 表示 FRP 应变比; $\varepsilon_{h,rupt}$ 表示 FRP 的环向断裂应变; $\rho_{FRP}$ 表示 FRP 约束混凝土柱纤维体积比; $E_{FRP}$ 表示 FRP 弹性模量; $t_{nom}$ 表示 FRP 标称厚度; $\phi$ 表示空心率。

考虑到本结构复杂多变的应用场景,本研究实验柱截面比采用独特的设计思路:在保持短轴长度不变的情况下,通过增加长轴( $2x$ )尺寸来改变截面比。这与目前研究中固定长轴、调整短轴的方法截然不同。正因如此,本实验数据的变化规律与现有模型存在出入。鉴于截面比定义的根本差异,现有模型无法直接应用于解释本实验的结果。针对本实

验结构的创新设计,依托实验数据对  $\rho_K$  进行回归并量化引入截面修正参数  $C$  (见式3、式4):

$$C = 0.4 \times \frac{x}{y} + 0.64 \quad (3)$$

代入  $\rho_K$  可得:

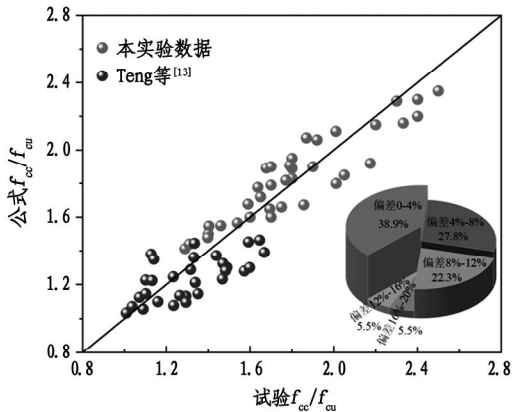
$$\rho_K = \frac{\rho_{FRP} E_{FRP} \varepsilon_{cu}}{2C f_{cu}} \quad (4)$$

考虑到  $x/y$  对  $\varepsilon_{h,rupt}$  的影响,对  $\rho_\varepsilon$  重新回归为:

$$\rho_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{h,rupt}}{\varepsilon_{cu} \left(\frac{x}{y}\right)^{1.3}} \quad (5)$$

参考式(1)至式(5),并根据本试验36根试件轴压实验数据,得到平椭圆形 DSTC 柱在轴压荷载作用下极限应力(见式6)与极限应变(见式7)的修正计算公式为:

$$\frac{f_{cc}}{f_{cu}} = 1 - K(\rho_K)\rho_\varepsilon \quad (6a)$$

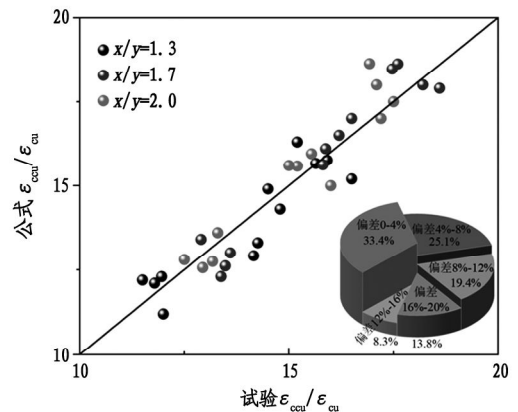


(a) 新极限应力公式与Teng等<sup>[13]</sup>、本实验结果对比及偏差分析

$$K(\rho_K) = \begin{cases} -0.76(\rho_K + 0.14) & \rho_K \geq 0.01 \\ 0 & \rho_K < 0.01 \end{cases} \quad (6b)$$

$$\frac{\varepsilon_{ccu}}{\varepsilon_{cu}} = 1.75 + 11.7\rho_K^{0.45}\rho_\varepsilon^{0.5}(1-\phi)^{0.02} \quad (7)$$

本次平椭圆形 DSTC 柱轴压试验数据与新应力、应变表达式的对比,以及理论预测与试验数据的偏差统计解析如图11所示。其中,由于试件结构与Teng等<sup>[13]</sup>的设计不同,因此只将新应力模型与Teng等<sup>[13]</sup>的试验数据进行对比。由图可知,计算模型值与实测数据值的系统性偏差显著集聚在0% - 12%,其中绝大部分在8%以内,验证了回归模型的预测精度。该误差水平满足了工程应用精度的要求,验证了平椭圆形 DSTC 柱应力-应变修正理论模型的有效性,为海上高铁桥梁墩柱在轴压荷载作用下的强度评估提供了技术依据。



(b) 新极限应变公式与本实验结果对比及偏差分析

图11 新应力-应变模型与试验数据对比及偏差分析

## 4 结论

所有平椭圆形 DSTC 柱在轴压加载到一定荷载后,均发生脆性破坏,标志为 FRP 管环向断裂,在破坏前伴随渐强嘶哨声,终致爆裂破坏,显现可预警性与危险性。轴压下试验柱受压响应呈现双阶段连续增长演化特性:在短暂弹性阶段后快速向渐进强化过渡,印证了 FRP 与不锈钢管的双重约束效应。

FRP 层数与截面比增加可显著提高平椭圆形 DSTC 柱极限承载、极限应变及环向断裂应变,但因截面比的特殊设计,导致随截面比的增加试件极限应力逐渐减小;不锈钢管增厚主要提升试件极限应力,对轴向与环向应变影响较小;平椭圆截面各位置环向应变呈短轴顶点最大、长轴顶点最小分布,随截面比增大应变梯度加剧。

基于平椭圆形 DSTC 柱轴压极限状态系统性研究,引入考虑截面比的约束刚度比与 FRP 应变比修正系数,经回归后提出了平椭圆形 DSTC 柱在轴压作用下的极限应力-应变修正模型。并与试验数据进行对比,验证了回归模型的预测精度,为海上高铁桥梁墩柱在轴压荷载作用下的强度评估提供了技术依据。

## 参考文献:

- [1] 余涛,滕锦光. FRP-混凝土-钢双壁空心构件及其在桥梁结构中的应用前景[J]. 玻璃钢/复合材料, 2011(5): 20-23.
- [2] OZBAKKALOGLU T, VINCENT T. Axial compressive behavior of circular high-strength concrete-filled FRP tubes [J]. Journal of Composites for Construction, 2014, 18(2): 785-793.

- [ 3 ] XIE P,JIANG T,LIN G,et al. Hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular columns of varying slenderness ratios under eccentric compression [ J ]. Journal of Constructional Steel Research,2023,201 : 1 – 25.
- [ 4 ] YU T,CHAN C,TEH L,et al. Hybrid FRP-Concrete-Steel multitube concrete columns: Concept and behavior [ J ]. Journal of Composites for Construction,2017,21 ( 6 ) : 1 – 9.
- [ 5 ] WANG S,ELGAWADY M A. Durability of hollow-core GFRP-concrete-steel columns under severe weather conditions [ J ]. Journal of Composites for Construction,2019,23 ( 1 ) : 1 – 13.
- [ 6 ] IDRIS Y,OZBAKKALOGLU T. Seismic behavior of FRP-concrete-steel double skin tubular columns [ J ]. Journal of Structural Engineering,2012,140( 6 ) : 1299 – 1328.
- [ 7 ] DONG C X,KWAN A K,HO J C. Axial and lateral stress-strain model for concrete-filled steel tubes with FRP jackets [ J ]. Engineering Structures,2016,126( 1 ) : 365 – 378.
- [ 8 ] ZHOU Y,LIU X,XING F. Behavior and modeling of FRP-concrete-steel double-skin tubular columns made of full lightweight aggregate concrete [ J ]. Construction and Building Materials,2017,139( 5 ) : 52 – 63.
- [ 9 ] FANGGI B A L,OZBAKKALOGLU T. Compressive behavior of aramid FRP-HSC-steel double-skin tubular columns [ J ]. Construction and Building Materials,2013,48 ( 11 ) : 554 – 565.
- [ 10 ] YU T,ZHANG S,HUANG L,et al. Compressive behavior of hybrid double-skin tubular columns with a large rupture strain FRP tube [ J ]. Composite Structures,2017,171 ( 7 ) : 10 – 18.
- [ 11 ] TENG J G,JIANG T,LAM L,et al. Refinement of a design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete [ J ]. Journal of Composites for Construction,2009,13 ( 4 ) : 269 – 278.
- [ 12 ] LAM L,TENG J G. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete [ J ]. Construction & Building Materials,2003,17( 6/7 ) : 471 – 489.
- [ 13 ] TENG J G,WU J Y,CASALBONI S,et al. Behavior and modeling of fiber-reinforced polymer-confined concrete in elliptical columns [ J ]. Advances in Structural Engineering,2016,19( 9 ) : 1359 – 1378.
- [ 14 ] LIN G,ZENG J J,TENG J G,et al. Behavior of large-scale FRP-confined rectangular RC columns under eccentric compression [ J ]. Engineering Structures,2020,216 : 1 – 17.
- [ 15 ] 陈光明,陆奕辰,谢攀,等. FRP-混凝土-钢双壁空心桥墩分析及设计方法研究 [ J ]. 中国公路学报,2022,35 ( 2 ) : 12 – 38.
- [ 16 ] JIANG T,LIN G,XIE P. Behavior of large-scale hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular columns subjected to eccentric compression [ J ]. Engineering Structures,2023,275 : 1 – 13.
- [ 17 ] OZBAKKALOGLU T,FANGGI B A L,ZHENG J. Confinement model for concrete in circular and square FRP-concrete-steel double-skin composite columns [ J ]. Materials & Design,2016,96 : 458 – 469.
- [ 18 ] WANG W,WU C,LIU Z. Compressive behavior of hybrid double-skin tubular columns with ultra-high performance fiber-reinforced concrete ( UHPFRC ) [ J ]. Engineering Structures,2019,180 : 419 – 441.
- [ 19 ] XIE P,JIANG T,LIN G. Behavior of large-scale hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular columns under concentric compression [ J ]. Thin-Walled Structures,2023,182 : 1 – 18.
- [ 20 ] TENG J G,HUANG Y L,LAM L,et al. Theoretical model for fiber-reinforced polymer-confined concrete [ J ]. Journal of Composites for Construction,2007,11 ( 2 ) : 201 – 210.
- [ 21 ] YU T,TENG J G,WONG Y L. Stress-strain behavior of concrete in hybrid FRP concrete-steel double-skin tubular columns [ J ]. Journal of Structural Engineering,2010,136 ( 4 ) : 379 – 389.

责任编辑:葛圣志

# 基于核磁共振对岩石冻融过程未冻水含量演化特征的研究

黄飞, 张子浩, 王彬\*, 王锦恒, 高宁

安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:**通过低频核磁共振技术,研究了岩石在冻融循环过程中未冻水的孔隙赋存分布情况,以及随着温度的变化未冻水含量的具体演化规律。研究表明:岩石在冻融过程中未冻水的相变过程可以划分为4个阶段:快速冻结阶段、缓慢冻结阶段、缓慢融化阶段、快速融化阶段;由核磁横向信号量可以显示出,冻结阶段大孔及次级孔中的孔隙水先被冻结,随后是微孔中的孔隙水,而融化阶段孔隙水的增加首先从微孔开始;岩石在冻融过程中存在明显的滞后现象,即在相同温度下,岩石冻结过程的未冻水含量明显高于融化过程。

**关键词:**  $T_2$  谱; 未冻水含量; 冻融循环; 孔隙结构; 核磁成像

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 2095-297X(2026)02-0090-09

## Research on the Evolution Characteristics of Unfrozen Water Content in Rock during Freezing and Thawing Based on Nuclear Magnetic Resonance

HUANG Fei, ZHANG Zihao, WANG Bin\*, WANG Jinheng, GAO Ning

(School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan, 232001, Anhui)

**Abstract:** By means of low-frequency nuclear magnetic resonance technology, the pore distribution of unfrozen water in rocks during freeze-thaw cycles and the specific evolution law of unfrozen water content with temperature changes were studied in the paper. The research results showed that the phase transformation process of unfrozen water in rocks during freeze-thaw can be divided into four stages: rapid freezing stage, slow freezing stage, slow melting stage, and rapid melting stage. The transverse semaphore of nuclear magnetic resonance can show that during the freezing stage, the pore water in the macropores and secondary pores was frozen first, followed by the pore water in the micropores, while during the melting stage, the increase of pore water begins with the micropores first. There is a significant lag phenomenon in the freeze-thaw process of rocks, that is, at the same temperature, the content of unfrozen water during the freezing process of rocks is significantly higher than that during the melting process.

**Key words:**  $T_2$  spectrum; unfrozen water content; freeze-thaw cycles; pore structure; nuclear magnetic resonance imaging

人工冻结法<sup>[1-4]</sup>作为一项地下工程施工技术,通过人工制冷的方法降低地层温度,使孔隙水结冰形成坚固的冻结壁,从而有效加固富水不稳定地层,广泛应用于地铁隧道、深基坑、矿井建设等复杂岩土工程领域。但在人工冻结过程中,地层中的岩石受

到冻融循环的影响,内部发生水冰相变,这一相变过程并非瞬时完成,其核心特征之一是未冻水含量的持续演化,即使在低于冰点的负温环境下,岩石孔隙中仍存在一定量的、未冻结的液态水,这种未冻水的存在及其含量变化,是驱动水分在温度梯度作用下

收稿日期: 2025-08-01

基金项目: 安徽省自然科学基金(2408085ME147); 国家自然科学基金(52378384, 52409135)。

作者简介: 黄飞(2000-),男,山东临沂人,硕士研究生。王彬(1991-),男,山东沂水人,副教授,博士(后)。E-mail: wbingoo@163.com

发生迁移的关键因素,并最终诱发显著的冻胀现象。其中冻胀力的产生源于水结冰时体积的膨胀。随着冻融循环<sup>[5-6]</sup>次数的增加,累积的冻胀力不断作用于岩石骨架,其影响是破坏性的:一方面,它会导致岩石原生孔隙和微裂隙的进一步张开与扩展;另一方面,强大的冻胀应力<sup>[7-13]</sup>甚至能够克服岩石的局部抗拉强度,诱发新的次生裂缝。这种由冻胀引起的岩石内部结构损伤与劣化,对作为工程屏障的冻结壁的整体强度和长期稳定性构成了严重威胁,是工程安全的重要隐患。因此,深入探究冻融循环过程中岩石未冻水含量的动态演化规律,不仅具有重要的科学意义,更是提升冻结法施工及其他涉及冻融环境岩土工程安全性与可靠性的迫切需求。

目前国内外相关专家对于未冻水受到冻融循环后具体的演化特征展开了大量的研究,其中宋勇军等<sup>[14]</sup>以砂岩作为研究对象探究了砂岩冻融过程中对岩石抗压强度等力学特性的影响,结果表明岩石在经历冻融过程时,其力学性质会受到未冻水冻融回滞效应的影响。谭龙<sup>[15]</sup>选取了不同土质、不同NaCl离子浓度饱和冻土试样来进行核磁共振试验,分析了离子浓度对未冻水含量的影响,结果表明在相同负温下,未冻水含量随着离子浓度的增加而增大。然而,在这些国内外的大量研究中,如何快速准确的获取未冻水含量是一个关键的问题,针对这个问题,国内外研究人员发展了多种基于不同物理原理的测试方法。热量法<sup>[16-17]</sup>作为经典手段,依据相变过程严格遵循的能量守恒定律,通过精确测量体系的热量变化反演未冻水含量。其优势在于原理清晰、理论成熟且结果精度较高、稳定性好;然而,该方法在试验操作上相对繁琐,且对温度控制的精度要求极高,数据处理也较为复杂,这使其在快速、连续监测方面存在局限性。时域反射仪<sup>[18]</sup>(TDR)法则是利用土壤介电常数与其体积含水率(包括未冻水)之间的经验或理论函数关系,通过测量电磁波在介质中的传播速度来确定介电常数。TDR技术因其具有测试速度快、设备相对便携、成本可控等优点而受到欢迎。然而,其测量精度易受多重因素干扰,包括土体本身的矿物组成与结构(土质)、环境温度变化、土体密度(重度)等物理特性。王丽萍等<sup>[19]</sup>的研究进一步指出,在孔隙水空间分布高度不均匀的冻土中,TDR所依赖的介电常数整体测量值可能无法准确反映局部的未冻水含量,导致结果存在偏差。计算机断层扫描(CT)法提供了一种可视化的测试途径,其原理是基于X射线或 $\gamma$ 射线穿透

物质时的吸收强度与物质密度及水份含量呈线性关系,通过重建断层图像可间接反映水份分布,但是此方法尽管能提供空间信息,但是其定性量化精度、设备成本和辐射防护要求比较高。

相较之下,核磁共振(NMR)法在未冻水测试领域展现出独特的优势。该技术的物理基础在于:处于不同物理化学环境中的氢核( $^1\text{H}$ ),在特定射频场脉冲序列的激发下,其磁化矢量恢复到平衡态的过程,也就是弛豫过程存在显著差异。液态未冻水的 $T_2$ 弛豫时间特征使其能够被NMR信号有效识别和定量。NMR方法的核心优势在于其直接性、无损性、抗干扰性强,单次测试时间短以及对水份迁移过程扰动极小。这些特性使得NMR技术成为一种极具潜力且快速、准确的未冻水含量测定方法,尤其适合于研究冻融循环过程中未冻水的动态演化规律及其空间分布特征,为深入揭示冻胀机制和评估冻融损伤提供了强有力的技术支撑。

综上所述,如今关于冻融循环中未冻水含量领域已经取得了大量的成果,但还未能直观的显示出冻融循环过程中不同温度下的未冻水含量。本文以砂岩为试验对象,采用苏州纽脉核磁共振系统来检测饱和试样在冻融循环过程中未冻水含量的演化情况,并且在此过程中在不同温度点下对试验对象进行定点成像,通过检测数据与图像的相互印证,从而揭示了冻融循环作用下饱和和岩石未冻水含量变化的内在机制,同时也为核磁共振技术在岩土工程中的应用提供了一些新的思路。

## 2 试验方法与过程

### 2.1 试样的选择与制备

本次试验采用的是内蒙古鄂尔多斯采集的砂岩岩块,人工挑选出适合试验的岩块,并通过专业钻机进行取芯,制成尺寸为 $\varphi 25\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的圆柱形试验试样,后对试样两侧进行仔细抛光。随后将试验试样放置在温度为 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘干 $12\text{ h}$ ,然后自然冷却至室温以获得干燥的试样。在加热过程中,设定恒定加热速率( $2.0\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ )以避免热冲击。在干燥处理之后,测量其基本物理参数,再将其置于真空加压饱和装置对试样进行加压,使压强达到 $-0.1\text{ MPa}$ ,并持续饱和 $12\text{ h}$ ,确保试样完全饱水后取出,得到水饱和试样。最后,将水饱和试样用保鲜膜包裹以防止其水分蒸发。试样基本物理参数如表1所示。试验试样如图1所示。

表1 试样基本物理参数

| 干密度<br>/g·cm <sup>-3</sup> | 饱和密度<br>/g·cm <sup>-3</sup> | 饱和含水率<br>/% | 孔隙度<br>/% |
|----------------------------|-----------------------------|-------------|-----------|
| 2.429                      | 2.499                       | 2.9         | 6.712     |



图1 岩石试样

在试验开始之前,为了全面表征原始砂岩的基本岩性特征,本研究对本次试验砂岩用样进行了X射线衍射矿物成分分析<sup>[20]</sup>。具体操作如下:选取部分试验试样取芯后的剩余岩块,经充分研磨至200目以下细粉后,使用X射线衍射仪进行测试。测试采用对粉末样品进行了 $2\theta$ 角范围 $10^\circ$ 至 $80^\circ$ 的扫描,获取的原始衍射数据经Jade 9软件处理,确定了砂岩的主要矿物组成,并绘制出了XRD衍射谱图,如图2所示。

分析结果表明,该砂岩主要由石英( $\text{SiO}_2$ )、长石类矿物(如钾长石和斜长石)以及黏土矿物(如伊利石和高岭石)构成。详细的XRD图谱清晰记录了各矿物的特征衍射峰位与相对强度,为完整记录试样的基础物性提供了必要的矿物学依据。

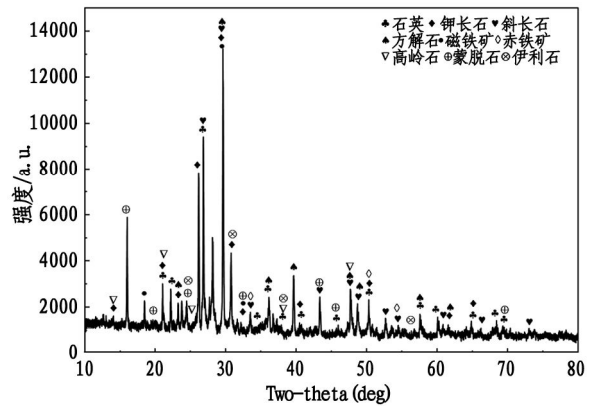


图2 砂岩 XRD 衍射谱图

## 2.2 试验流程

本次试验包括 NMR 测试与核磁成像两部分,两者同步进行,试验中所用的仪器包括岩心夹持器、低温高压循环装置、核磁共振装置、温控装置等。配备有温控装置的核磁共振装置可以保证在目标温度点下对试样进行原位 NMR 测试,避免了温度变化对测试结果的影响。

图3显示了主要试验设备以及 NMR 测试流程,在将试样干燥和饱和处理后,主要对饱和砂岩样品(以下简称砂岩)同步进行了两项试验工作,即冻融循环处理下砂岩的原位核磁共振测试以及各个测试温度点下的核磁成像测试,具体试验操作如下。



图3 主要试验设备与 NMR 测试流程

为了研究砂岩中未冻水含量随温度的变化,通过配备有温度控制装置的 NMR 系统对渐进冻结处理下的砂岩进行了一系列原位核磁共振测试,砂岩以恒定的冷却速度从  $25.0^\circ\text{C}$  逐渐冻结到  $-18.0^\circ\text{C}$ 。在整个冻结过程中共设置了 11 个温度点,即  $25^\circ\text{C}$ 、 $10^\circ\text{C}$ 、 $5^\circ\text{C}$ 、 $0^\circ\text{C}$ 、 $-0.5^\circ\text{C}$ 、 $-1^\circ\text{C}$ 、 $-1.5^\circ\text{C}$ 、 $-2^\circ\text{C}$ 、 $-5^\circ\text{C}$ 、 $-10^\circ\text{C}$  和  $-18^\circ\text{C}$ 。当温度达到预设温度点时,将砂岩在当前温度点下保持 2 h 以确保热平衡且给同步进行的核磁成像测试预留出足够的时间。当 2 h 的恒温时间结束后,对砂岩进行原位核磁共振测试,便可得到当前温度下砂岩孔隙水的  $\delta T_2$  分布曲线以及核磁信号强度。在原位核磁共振测试期间,磁体的温度应保持在  $32.0^\circ\text{C}$ ,探针线圈

的温度保持在  $25.0^\circ\text{C}$ ,允许上下出现微小波动。本次试验的基本原理在于固体冰中的氢离子  $T_2$  极短(通常小于  $5\ \mu\text{s}$ ),远小于水中的氢离子  $T_2$ 。即在低磁场下,几乎无法检测到冰的核磁信号,因此,可以认为冻结砂岩的核磁共振信号强度均来源于未冻结的孔隙水。

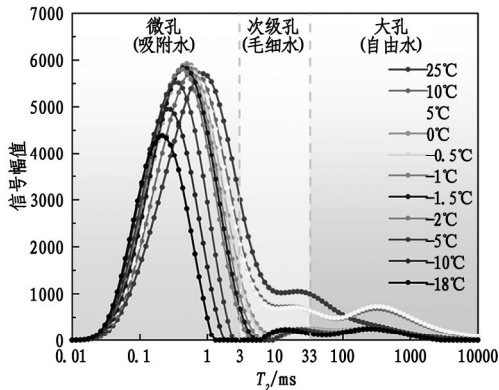
## 3 试验结果与分析

### 3.1 冻融过程中未冻水孔隙赋存情况

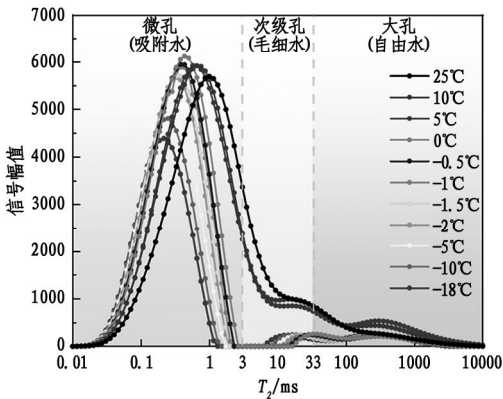
根据核磁共振相关理论, $T_2$  谱可以反应孔隙水在岩石中的赋存位置,随着  $T_2$  谱值的不断增大,代表未冻水赋存的孔隙孔径越大,根据宋勇军等相关研究,多孔岩石中的孔隙水可以根据  $T_2$  弛豫时间划

分为三个部分,分别为吸附水、毛细水和自由水,本文采用了两个临界值(3 ms 和 33 ms)来划分砂岩孔隙水,其中吸附水的  $T_2$  值小于 3 ms,毛细水的  $T_2$  值在 3 ms 至 33 ms 之间,而自由水的  $T_2$  值大于 33 ms。

冻融循环的  $T_2$  曲线分布图如图 4 所示,砂岩初始温度为 25 °C,此时曲线在不同形态未冻水区域各有一个峰,其中吸附水的信号峰值高达 6000,毛细水的信号峰值在 1000 - 2000 之间,自由水的信号峰值在 1000 以下,这说明在本次砂岩试样中,相较于大孔和次级孔,微孔的数量相对较多。



(a) 未冻水的分布随温度的变化(冻结过程)



(b) 未冻水的分布随温度的变化(融化过程)

图 4 不同温度点下冻融循环  $T_2$  分布曲线

冻结过程如图 4(a) 所示,随着温度逐渐降低,分布曲线开始向下和向左移动,三个区域的峰宽度和高度均随温度降低而下降。在正温度区域,三个区域的峰面积略有变化,这说明砂岩中孔隙水仍然保持未冻状态,此时  $T_2$  分布曲线显示的是未冻状态下孔隙水在大小孔隙中的赋存情况,此时的孔隙水分布在饱和试样的大小孔隙中,峰面积的大小代表正温度区域试样中未冻水的含量。当温度到达 0 °C 时,毛细水与自由水区域的峰面积发生突降,吸附水区域的峰面积变化不大,这说明这个过程中大孔以及次级孔中孔隙水开始被冻结,微孔中的孔隙水仍

然处于未冻状态。当温度降低到 -5 °C 的过程中,毛细水与自由水区域的峰面积随着温度继续下降,逐渐开始向着 0 逼近,此时吸附水区域峰面积也开始出现明显的下降状态,这说明大孔与次级孔中的大部分孔隙水已经被冻结,冻结过程开始向着微孔中的孔隙水发展,这种冻结顺序方面的不同,是由于不同孔径孔隙中孔隙水的水份势能的差异所导致的冻结过程在时间上具有有序性。随着温度的进一步下降,毛细水与自由水几乎不再发生变化,峰面积的减少主要依靠吸附水的冻结,这说明在此温度段冻结过程主要发生在微孔中,但值得注意的是,即使当温度降低到 -18 °C 的时候,试样中仍然存在未冻结的孔隙水,这说明岩石中的部分孔隙水在一定的负温度范围内不会被冻结。

融化过程如图 4(b) 所示,随着温度的逐渐升高,分布曲线开始向上和向右移动,三个区域的峰宽度和高度均随温度升高而升高。当温度从 -18 °C 升高到 -2 °C 的过程中,吸附水区域的峰值缓慢上升,但是上升幅度较小,其他区域的峰值变化不大,这说明微孔中的冰最先开始融化。当温度从 -2 °C 升高到 0 °C 的过程中,吸附水区域的峰面积变化速率上升,这说明已经冻结的吸附水发生剧烈相变。当温度进一步升高,跨越 0 °C 时,吸附水区域的峰面积变化趋于稳定,毛细水和自由式区域的峰值发生突变,这说明此时融化进程已经从微孔转向次级孔和大孔。当温度继续升高直至常温 25 °C,三个区域的峰面积仅发生微小变化,这说明砂岩中的大部分冰已经被融化。

综上,冻结过程是从大孔和次级孔开始并逐渐过渡到微孔中,而与之相反,融化是从微孔开始的。

### 3.2 冻融过程中未冻水含量变化分析

砂岩中未冻水的含量难以采用常规方法直接测量,但是根据居里定律,土体在正温区域其孔隙水核磁信号强度与温度之间呈线性关系,于是可以依照正温度区域的相关数据拟合出顺磁线性回归线,如图 5 所示。

根据核磁共振技术的相关原理,核磁共振信号强度  $MXY$  与样品中的氢原子呈正比<sup>[21]</sup>,而氢原子主要来源于液态水(未冻水),故核磁信号强度可以表征未冻水含量。由于本次砂岩试样的孔隙中微孔所占比例较大,故采用体积含水率来表征未冻水含量,且任一温度点下砂岩的体积含水率即为该温度点下未冻水的体积比上砂岩整体的体积。综上,我们将正温度区域的回归线延长至负温度区域,后依赖于正温区信号 - 温度的线性关系从而得到负温度

区域信号强度拟合值,故负温度区域任一温度点的未冻水含量即为该温度点下实测信号强度乘以常温下饱和砂岩的含水率再除以该温度点下信号强度拟合值。具体的计算公式如下:

$$\omega_u = \frac{S_{\text{obs}}}{S_{\text{fit}}} \omega_0 \quad (1)$$

其中: $S_{\text{obs}}$ 为负温区实测首点信号值; $S_{\text{fit}}$ 为信号强度拟合值; $\omega_u$ 为未冻水含水量; $\omega_0$ 为常温下饱和试样的含水率。

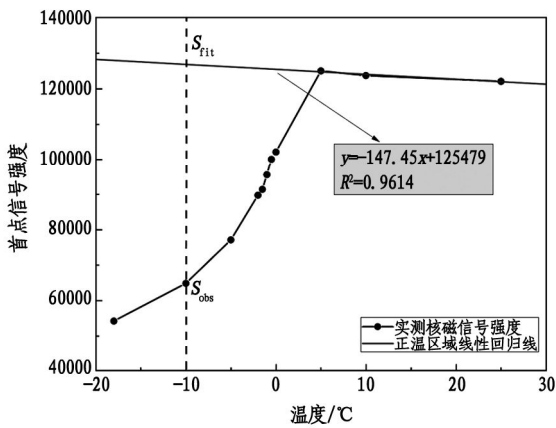


图5 顺磁信号回归线

图6为冻融过程未冻水含量随温度变化情况。

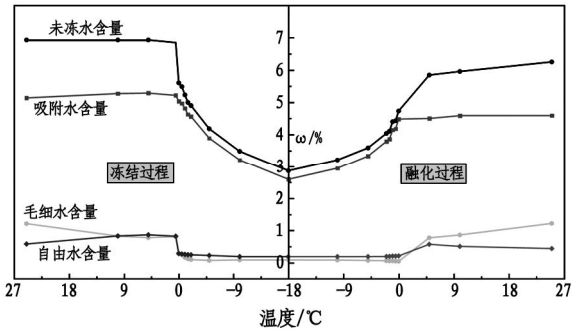


图6 未冻水含量变化曲线

综合试验观测结果,饱和砂岩在冻融循环过程中呈现出显著的未冻水含量阶段性演化特征。在冻结过程负温度区域中,冻结过程主要表现为两个连续阶段:在快速冻结阶段( $0\text{ }^{\circ}\text{C} - (-5\text{ }^{\circ}\text{C})$ ),当温度跨越 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相变阈值时,未冻水含量呈现断崖式下降,表明孔隙水的实际冰点集中分布于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近的狭窄温区;当进入缓慢冻结阶段( $-5\text{ }^{\circ}\text{C} - (-18\text{ }^{\circ}\text{C})$ )后,未冻水含量虽持续降低,但下降速率显著趋缓。值得注意的是,在冻结起始的正温度区间( $>0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),未冻水含量始终维持稳定状态,这说明此时孔隙水尚未达到相变条件。

与之对应,融化过程同样表现出鲜明的两阶段

特征:在缓慢融化阶段( $-18\text{ }^{\circ}\text{C} - (-2\text{ }^{\circ}\text{C})$ ),随温度回升,未冻水含量仅小幅增加 $1.18\%$ ,相变速率较低;当温度升至快速融化阶段( $-2\text{ }^{\circ}\text{C} - 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ )时,未冻水含量急剧上升 $1.81\%$ ,反映出剧烈的冰-水相变过程。

进一步分析未冻水组分可以发现:在到达冰点即 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近邻域时,毛细水与自由水含量瞬间锐减 $0.54\%$ ,而吸附水含量却只发生了微小的变化,这说明冻结初期是由毛细水与自由水主导相变进程,其含量随温度降低而急剧减少,并逐渐逼近于零;当温度进一步降低,毛细水与自由水含量的变化已经微乎其微,此时未冻水总量的变化主要受控于吸附水的缓慢相变。整体而言,冻结过程遵循毛细水与自由水优先相变,吸附水后续相变的冻结顺序,这与孔隙水的赋存状态及表面结合能密切相关。

融化过程则呈现相反相变顺序:在缓慢融化阶段( $-18\text{ }^{\circ}\text{C} - (-2\text{ }^{\circ}\text{C})$ ),吸附水含量率先缓慢增加,而毛细水与自由水基本维持冻结状态;当温度突破 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,吸附水含量上升速率增加,未冻水总量呈现爆发式增长;当温度到达 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近邻域时,吸附水含量趋近于不变,毛细水和自由水含量迅速增加。这种融化过程符合吸附水优先增加,毛细水、自由水后续增加的特征,与冻结顺序形成明显对比,进一步印证了孔隙尺度对相变行为的影响。

为直观地反映冻融循环过程中的温度点变化,提取了核磁成像测试部分试样的黑白成像,并将图像导入ShortcutsForc图像处理软件,对黑白图像进行了伪彩色映射处理,使图像的变化细节部分可视化,并分别采取了冻结和融化过程中负温度区域的部分关键温度点进行分析<sup>[22]</sup>,如图7所示。

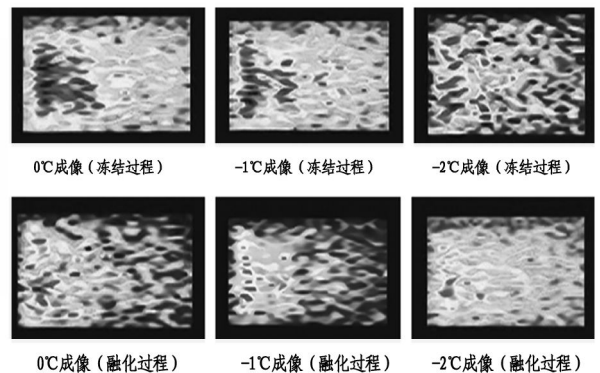


图7 冻融循环部分温度点成像对比图

图7直观呈现了冻融循环过程中的未冻水含量的动态空间分布变化。根据右侧色差条的指示,颜色由冷色到暖色的变化即是核磁信号量的强度变化,亦可以表征砂岩中未冻水含量的多少。可以看

出,砂岩中的未冻水含量分布并不均匀,且主要集中在砂岩一端的位置。在冻结过程中,随着温度逐渐下降,暖色区域逐渐减少,而在融化过程中,随着温度的逐渐上升,暖色区域逐渐增加。这种颜色的变化清晰对应了冻融循环过程中水冰相变的物理变化过程,与图6未冻水含量的变化曲线相互印证,为理解未冻水迁移变化规律提供了有力证据。值得注意的是,冻结和融化过程中,相同温度点下的核磁成像也具有明显的差异,这说明冻融循环过程中还存在明显的滞后现象。

### 3.3 冻融循环中的滞后现象

在冻融循环过程中,滞后现象是一种常见但是缺乏深入研究的现象。滞后现象指物质在冻结和融化过程中,温度路径与水分相变(冻结或融化)路径不一致的现象,即物质在冻结和融化过程对应的水分状态(冰含量或未冻水含量)在相同温度点下并不相同。这种现象常出现在如砂岩这种多孔介质中,这是因为孔隙结构的物理性质具有复杂性,且还具有水分迁移的非均质性,这导致在砂岩的冻融循环中出现滞后现象<sup>[23]</sup>。

为定量分析冻融过程中的滞后现象,引入冻结率来表征砂岩在各个温度点的水份状态情况,其定义为冻融循环过程砂岩中冰的质量占常温下饱和砂岩中水的总质量的百分比。在对砂岩进行饱和和处理前先对其进行干燥处理,用天秤测量其重量,再进行饱和,重新测量其质量,则饱和砂岩中的水的总质量为干燥试样与饱和试样质量之差。随着冻结过程的进行,试样中的部分孔隙水开始转化为冰,则冰的质量即为水的总质量与未冻水质量之差<sup>[24]</sup>。因此,试样的冻结率可以表示为:

$$R_f = \frac{m_{\text{all}} - m_u}{m_{\text{all}}} \times 100\% \quad (2)$$

其中: $R_f$ 为试样的冻结率; $m_{\text{all}}$ 为砂岩中水的总质量; $m_u$ 为砂岩中未冻水的质量。

根据上述方法,可以得到砂岩在不同温度点下的冻结率,如图8所示。

由图8数据可知,在冻融循环中砂岩冻结率的

变化具有明显差异,由于冻结率为砂岩中冰的质量与试样初始未冻水总质量的比值,故冻结与融化过程中相同温度点冻结率的差异即可反映砂岩中未冻水含量与孔隙冰含量随温度的变化所呈现出的明显差异。随着温度的变化,如 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温度点,融化段的冻结率与冻结段的冻结率的差值依次为 $3.92\%$ 、 $8.61\%$ 、 $12.42\%$ ,这其中的不一致性即为冻融循环过程中的滞后现象,这也说明了在相同温度下,冻结和融化的水冰相变效应并不完全可逆。

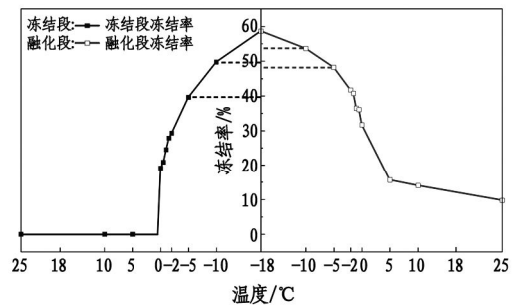


图8 冻融循环过程中冻结率的变化

表2呈现了试样在冻融循环中不同温度点下的核磁信号数据,清晰揭示了各组分未冻水含量随温度变化的动态过程。观察发现,在相同的负温条件下,冻结过程中的未冻水含量始终高于融化过程。这种差异的原因在于水分子在吸热与散热状态下的热力学行为不同。在温度上升的融化阶段,矿物颗粒表面束缚的吸附水会率先开始增加,但由于其与矿物表面结合紧密,故吸热速率相对迟缓,导致整体未冻水含量的回升显得较为平缓。而真正主导未冻水含量显著变化的,则是随后融化的毛细水和自由水。整个融化过程可以这样理解:从 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 开始升温,饱和砂岩中的未冻吸附水首先吸热并向周围传递热量,此时已冻结的吸附水开始融化,其含量减少,同时冰晶含量也随之下落,矿物颗粒表面的未冻水膜逐渐消散。随着温度进一步升高,毛细水开始融化,当毛细水融化达到一定程度后,自由水也开始融化。在此过程中,孔隙冰持续减少,对应的孔隙水则不断增多。最终,当温度升至正温区后,矿物颗粒表面的未冻水膜完全消失,标志着融化过程完成。

表2 冻融循环下相同温度点核磁信号对照表

| 温度<br>冻融过程 | 10 °C |       | 5 °C  |       | 0 °C   |       | -2 °C |       | -5 °C |       | -10 °C |       | -18 °C |       |
|------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|
|            | 冻结    | 融化    | 冻结    | 融化    | 冻结     | 融化    | 冻结    | 融化    | 冻结    | 融化    | 冻结     | 融化    | 冻结     | 融化    |
| 微孔         | 94112 | 95914 | 95363 | 95339 | 111365 | 81707 | 83482 | 69371 | 71665 | 61381 | 59701  | 54771 | 49004  | 49004 |
| 次级孔        | 14748 | 17999 | 14011 | 16341 | 6384   | 731   | 1778  | 1095  | 1260  | 1225  | 1582   | 1467  | 1595   | 1595  |
| 大孔         | 14820 | 10552 | 15606 | 12090 | 6254   | 3820  | 4445  | 3473  | 4132  | 3463  | 3496   | 3479  | 3529   | 3529  |

### 3.4 未冻水含量数学模型适应性分析

由于砂岩属于多孔介质,故本节将利用几种常用的未冻水含量计算数学模型对砂岩冻融循环中冻结阶段的未冻水含量变化规律进行回归拟合,并确定模型参数,以此来探究数学模型在砂岩未冻水含量计算中的实际适用性,为实际人工地层冻结中的工程数值计算提供依据<sup>[25]</sup>。

#### 3.4.1 Anderson 模型

Anderson 模型由 Anderson 与 Tice 于 1972 年共同提出,其核心在于采用幂函数关系式来描述未冻水的重力质量随冻结温度的变化规律。因其数学形式简洁且所需参数较少,该模型在相关研究领域得到了广泛应用,其表达式为:

$$W_u = \begin{cases} \alpha(-T)^\beta & T < T_f \\ W_0 & T \geq T_f \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $W_u$  为重力未冻水含量;  $\alpha, \beta$  为公式的拟合参数;  $T$  为温度;  $T_f$  为砂岩的冰点;  $W_0$  为砂岩的初始重力含水量。

$$S_w = S_{wres} + (1 - S_{wres}) \exp\left[-\left(\frac{T - T_f}{\gamma}\right)^2\right] \quad (6)$$

式中:  $S_w$  为砂岩体积含水率的饱和度;  $S_{wres}$  为与不冻水含量对应的残余饱和度(Mckenzie 认为在冻结完成后仍然会有一部分不冻水);  $\gamma$  为公式的拟合参数。

砂岩饱和度与未冻水体积含量的关系式为:

$$S_w = \frac{\theta_u}{\theta_0} \quad (7)$$

$$\theta_u = \begin{cases} \theta_{wres} + (1 - \theta_{wres}) \exp\left[-\left(\frac{T - T_f}{\gamma}\right)^2\right] & T < T_f \\ \theta_0 & T \geq T_f \end{cases} \quad (9)$$

#### 3.4.3 Zhang 模型

Zhang 提出了一项关键假设:当冻结过程达到热力学零度( $-273.15^\circ\text{C}$ )时,多孔介质中的含水率

$$\theta_u = \begin{cases} \theta_0 \left[1 - \left(\frac{T_f - T}{T_{k0} + T_f}\right)^w\right] & T < T_f \\ \theta_0 & T \geq T_f \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $T_{k0} = 273.15$ ,  $w$  为拟合参数。

基于上述模型,对本次试验结果进行拟合,并结合参数对计算结果的影响规律进行分析(见图9)。

由图9(a)可知,Anderson 模型的未冻水含量计算结果显著受参数  $\alpha$  和  $\beta$  的协同调控:在相同温度条件下,未冻水含量随  $\alpha$  值增大呈现单调递增趋势,而随  $\beta$  绝对值的增大则表现出递减特征。从整体拟合效果来看,该模型的计算曲线与实测数据的总体趋势吻合度较高。然而,由于模型未纳入残余

重力含水率与体积含水率的关系如下:

$$\theta_u = \frac{W_u \rho_d}{100 \rho_w} \quad (4)$$

式中:  $\theta_u$  为砂岩的体积未冻水含量,  $\rho_d$  以及  $\rho_w$  分别为砂岩的干密度以及水的密度,对于一种多孔介质,  $\rho_d/\rho_w$  的值是一个常数,因此可以将公式(3)转换成体积未冻水含量的表达式(5)。

$$\theta_u = \begin{cases} \alpha'(-T)^\beta & T < T_f \\ \theta_0 & T \geq T_f \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\alpha' = \frac{\rho_d}{100 \rho_w} \alpha$ ,  $\theta_0$  为砂岩的初始含水率。

#### 3.4.2 Mckenzie 模型

Mckenzie 模型由 Mckenzie 于 2007 年提出,该模型创新性地采用指数函数刻画了多孔介质饱和度随温度变化的关联特性。凭借其形式简洁、参数需求少的特点,该模型在相关领域受到了普遍认可与应用,其具体表达式如下:

残余饱和度与不冻结水含量的关系式为:

$$S_{wres} = \frac{\theta_{res}}{\theta_0} \quad (8)$$

将公式(7)、公式(8)代入公式(6)可得体积未冻水含量与温度的关系式(9)。

趋近于零。基于此物理基础,他进一步推导出了未冻水含量随冻结温度变化的理论预测公式如下:

含水率的影响,即未考虑极端低温下仍无法冻结的孔隙水比例,导致不同参数组合下的计算结果差异显著,曲线离散度较大,一定程度上限制了其在精细模拟场景中的应用。

图9(b)所示的 Mckenzie 模型结果则呈现出不同特征。未冻水体积含量的计算值完全由参数  $\gamma$  主导,在同一温度点下,  $\gamma$  值越大,未冻水含量越高。但从整体趋势分析,该模型的理论曲线与实际测量

数据偏差明显,尤其是冻结初期的偏差更为突出,未能有效反映砂岩孔隙中水分冻结的非线性变化规律,拟合效果欠佳,表明其在描述砂岩未冻水含量演化特征时存在一定局限性。

相比之下,图9(c)所示的 Zhang 模型表现出更优的适应性:未冻水体积含水量受参数  $w$  调控,在相同温度条件下随  $w$  值增大呈递增趋势,且不同  $w$

值对应的曲线簇呈现出稳健的收敛特征,计算结果差异较小。从整体拟合度来看,该模型的理论预测与试验数据的吻合程度最高,准确捕捉了未冻水含量随温度降低的衰减趋势。这一优异表现得益于模型对砂岩孔隙结构与水分束缚能的精细刻画,使其对本次砂岩试验数据具有更强的适配性。

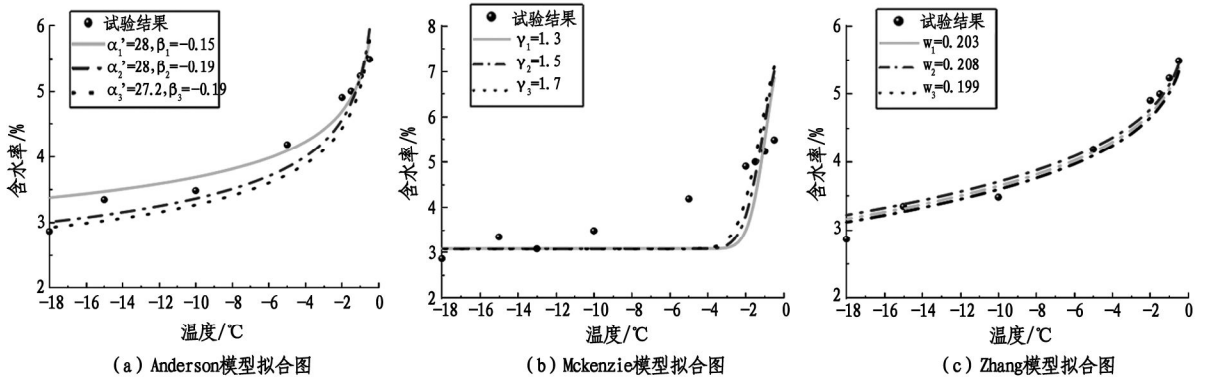


图9 未冻水含量变化计算结果与试验结果对比

## 4 结论

根据前人研究将孔隙水的赋存位置分成了微孔、次级孔、大孔三个部分,并结合  $T_2$  谱分布曲线,从微观角度分析了砂岩冻融过程中的分布情况,在冻结过程中,随着温度逐渐降低,大孔和次级孔中的自由水和毛细水先被冻结,然后才是微孔中的吸附水。而融化过程中,则是微孔中的冻结吸附水先被融化,然后才是次级孔和大孔。

岩石孔隙中的未冻水含量可以通过核磁共振技术有效地反映出来。从未冻水含量变化曲线可知,冻融过程中砂岩受温度影响效果显著,冻结过程未冻水含量随温度的下降而减少,且依次经过快速冻结和缓慢冻结两个阶段,未冻水冻结冰点在  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  附近的微小邻域。而融化过程,未冻水含量随温度上升而增加,且依次经过缓慢融化和快速融化两个阶段。

核磁共振成像技术能够更直观地显示冻融循环过程中的未冻水含量变化情况,从图像的色彩分布上可以看出砂岩孔隙水分布并不均匀,且主要集中在砂岩的一端。在冻结过程中,随着温度的逐渐降低,图像中的暖色区域逐渐消失,标志着砂岩中未冻水含量逐渐减少。而在融化过程中,随着温度的逐渐升高,暖色的区域逐渐呈现,标志着未冻水含量逐渐增加。这为探究砂岩中未冻水的具体变化情况提供了一种新的辅助方法。

在冻融循环过程中,存在有明显的滞后现象,在冻结和融化过程中相同的温度点下,融化过程的冻结率要明显高于冻结阶段,这说明冻融循环过程中冻结和融化的路径产生了明显的分离现象,且从核磁共振成像技术中亦可以明显地看出相同温度点下,冻结和融化的图像颜色区域也有着明显的差异。

通过几种常用的未冻水含量计算数学模型对砂岩冻融循环中冻结阶段的未冻水含量变化规律进行回归拟合,以此来探究数学模型在砂岩未冻水含量计算中的实际适用性。由计算结果与试验结果对比曲线可知,Zhang 模型的理论预测数据与试验数据的吻合程度最高,且不同  $w$  值对应的曲线簇呈现出稳健的收敛特征,计算结果差异较小,具有优异的实际适应性。Anderson 模型的理论预测数据与试验数据的吻合程度较高,仅次于 Zhang 模型,但是由于该模型未纳入残余含水率的影响导致不同参数组合下的计算结果差异显著,曲线离散度较大,一定程度上限制了其在精细模拟场景中的应用。McKenzie 模型的计算结果则呈现出不同特征,该模型的理论预测数据与试验数据偏差明显,尤其是冻结初期的偏差更为突出,表明其未能有效反映砂岩孔隙中水分冻结的非线性变化规律。

## 参考文献:

- [1] 韩昉希. 多场耦合作用下富水砂层人工冻结状态研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022: 6.

- [2] 薛茹镜,于娇,侯宇迪,等. 地铁隧道大流速地层联络通道冻结施工技术[J]. 铁道建筑,2025,65(6):136-142.
- [3] 王升福,张祥荣,周彪,等. 人工冻结水泥改良软黏土冻融及强度特性研究[J]. 东华理工大学学报(自然科学版),2024,47(4):370-380.
- [4] 毕全超,李永奎,郭强,等. 人工冻结状态下岩石力学性能增强研究[J]. 河北建筑工程学院学报,2025,43(1):24-31.
- [5] 赵含,尹可. 冻融循环作用下粉质黏土裂隙演化规律[J]. 市政技术,2025,43(5):24-30.
- [6] 黄耀英,方晨,邵成羽,等. 冻融循环下非饱和水工混凝土实测应变规律[J]. 水力发电学报,2025,44(5):147-158.
- [7] 刘建宇,王沛,黄伟,等. 水分条件对季节性冻土区原状土冻胀特性影响的试验研究[J]. 华北地质,2025,48(1):87-94.
- [8] 王家琪,刘志峰,张涛,等. 单向冻结条件下饱和粉土局部冻胀特性研究[J]. 金陵科技学院学报,2024,40(4):40-47.
- [9] LIU Y, TIAN Q, HUANG S, et al. Research on frost heaving pressure and frost deformation of water-filled fractures in the rock[J]. Cold Regions Science and Technology, 2025, 235:104490.
- [10] 卢汉青,包卫星,尹严. 高海拔寒区炭质板岩隧道围岩冻胀特性与原位测试分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(6):1569-1584.
- [11] 谭贤君,郑培超,苏舟舟,等. 裂隙岩体冻胀破坏机制研究综述[J]. 岩石力学与工程学报,2025,44(5):1065-1088.
- [12] 韩子豪. 高频冻融循环作用下砂砾土的强度劣化及冻胀特性研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2024:8.
- [13] 朱杰,刘睿智,王浩. 哈尔滨市松北区粉质砂土的冻胀特性研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2024, 45(2):41-50.
- [14] 宋勇军,杨慧敏,谭皓,等. 冻融环境下不同饱和度砂岩损伤演化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(8):1513-1524.
- [15] 谭龙,韦昌富,田慧会,等. 冻土未冻水含量的低场核磁共振试验研究[J]. 岩土力学,2015,36(6):1566-1572.
- [16] 刘艳玲. 热量法测定煤焦油中的混合馏分的酚含量[J]. 河北冶金,2002(4):62-63.
- [17] 冷毅飞,张喜发,杨杨学,等. 冻土未冻水含量的量热法试验研究[J]. 岩土力学,2010,31(12):3758-3760.
- [18] 苏振,胡锦涛,姚学召,等. 基于时域反射法的土壤水分系统设计[J]. 工业仪表与自动化装置,2024(5):31-33.
- [19] 王丽萍,刘霞,边海明,等. 用于估算冻土中液态水分量的TDR数据校正(英文)[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2011,32(1):208-214.
- [20] 张悦,马梦玲,张桂凤,等. XRD粉晶衍射仪对天然岩石矿物成分含量测定的研究[J]. 世界有色金属,2017(2):201-202.
- [21] 秦雷,王辉,李树刚,等. 冻结煤未冻水与孔隙特征变化核磁共振研究[J]. 清华大学学报(自然科学版),2025,65(3):601-613.
- [22] 高世奇. 单能量X光图像的伪彩色化处理[J]. 信息通信,2014(5):10-11.
- [23] 陈汉青,程桦,曹璐,等. 土/岩体的冻融回滞及水分迁移综合机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2022,41(11):2365-2375.
- [24] QIU B, FAN L, MA C, et al. Effects of ice content on compression characteristics of frozen sandstone by in-situ NMR technology[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2023, 9(1):1-14.
- [25] 荣传新,王彬,程桦,等. 大流速渗透地层人工冻结壁形成机制室内模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(3):596-613.

责任编辑:汤庆国

## 基于实验与 CFD 模拟的船舶涂层减阻性能研究

石文可\*, 乔印虎, 李忠芳, 缙瑞宾, 曹波

(安徽科技学院 智能制造学院, 安徽 滁州 233100)

**摘要:**为应对船舶航运业巨大的燃料消耗,评估了石墨烯与 CMP 涂料作为减阻船体涂层的减阻有效性。研究通过 3D 打印船模、水槽牵引实验与 CFD 模拟相结合的方式验证。实验测量了石墨烯、CMP 涂层与无涂层船模在  $0.2-1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  速度范围内的航行阻力,并利用 CFD 分析了流场结构与实验结果的拟合情况。结果表明石墨烯与 CMP 涂层均能有效减阻。CMP 涂层减阻效果更为稳定,而石墨烯涂层在特定速度区间优势显著。研究证明,表面涂层技术是降低船舶阻力的关键手段,而石墨烯涂层展现出巨大的应用潜力,为新一代环保、高效船体涂料的开发提供了重要参考。

**关键词:**涂料;船舶减阻;牵引实验;CFD

中图分类号:U661.1

文献标识码:A

文章编号:2095-297X(2026)02-0099-05

### Research on Drag Reduction Performance of Ship Coatings Based on Experiments and CFD Simulation

SHI Wenke\*, QIAO Yinhu, LI Zhongfang, GOU Ruibin, CAO Bo

(School of Intelligent Manufacturing, Anhui Science and Technology University, Chuzhou, 233100, Anhui)

**Abstract:** To address the huge fuel consumption in the shipping industry, the drag reduction effectiveness of graphene and CMP coatings as drag reduction hull coatings were evaluated in the paper. The research was verified through a combination of 3D printed ship models, water trough traction experiments and CFD simulation. The navigation resistance of coated and uncoated ship models within the speed range of  $0.2-1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  was experimentally measured, and the flow field structure was analyzed using CFD. The results show that both graphene and CMP coatings can achieve effective drag reduction. The drag reduction effect of CMP coating is more stable, while the graphene coating has a significant advantage in a specific speed range. This study demonstrates that surface coating technology is a key means to reduce ship resistance. Among them, graphene coating shows great application potential, providing an important reference for the development of a new generation of environmentally friendly and efficient hull coatings.

**Key words:** paint; ship drag reduction; traction experiment; conventional marine paint

燃料消耗是航运行业的重点关注问题,化石燃料,例如柴油和汽油以及经过进一步加工的燃料油被普遍认为是快速消耗资源之一。如图 1 所示,与其他行业相比,仅交通运输业的燃料油消耗就占了 39%<sup>[1]</sup>。而在交通运输业中船舶燃料油使用量超

过其使用总量的 80%<sup>[2]</sup>。船舶的燃料消耗速率与船舶所受的航行阻力大小有直接联系,而航行阻力的大小又取决于船体的粗糙度情况<sup>[3]</sup>。

针对船舶航行减阻问题,宋科委等立足船体阻流板对船舶斜航水动力性能的影响进行了 CFD 分

收稿日期:2025-12-03 \* 通讯联系人:

基金项目:工程教育专业认证背景下《流体力学》课程探索与实践(Xj2024185);安徽省工业和信息化厅“揭榜挂帅”项目翼型 CFD 仿真工具(JB24143);《材料力学》教学创新团队(2024cxtld109)。

作者简介:石文可(1996-),男,安徽蚌埠人,助教,硕士。E-mail:768294174@qq.com

析研究<sup>[4]</sup>;毛超进等采用CFD技术模拟了DTC船舶航行时的黏性流场,对其航行阻力变化规律进行了研究<sup>[5]</sup>;翟锦果综合运用了CFD和系统仿真技术,对船舶水动力性能预测的精度与效率进行研究,对船舶设计阶段的船体优化、主机选型和运营阶段的航速优化、节能减排具有重要的实用价值<sup>[6]</sup>。

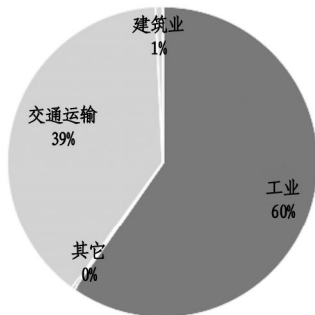


图1 2024年各行业燃料油消耗情况

船体表面粗糙度的增加会导致航行阻力增加,而海洋生物在船体表面沉积也会增加船体触水面积和粗糙度从而导致燃料消耗量的增加<sup>[7]</sup>。此外,海洋生物沉积也增加了船只的年均维护成本。目前的航运业使用传统CMP(conventional marine paint)涂料处理生物污染来减少阻力。但是CMP涂料含有重金属,对海洋生物有害。另外,CMP涂料大都价格高昂,且需要进行多层涂覆<sup>[8]</sup>。由于上述缺陷,目前船舶行业需要一种新型船体涂料以克服CMP涂料的缺点。

本研究旨在评估石墨烯与CMP涂料作为船体涂层,通过调控流体动力边界层以降低航行阻力的有效性。石墨烯具有典型的超疏水特性,而超疏水表面已被研究证实能够通过边界层过渡区与层流区引入“非零滑移”现象,从而有效降低黏性阻力。其机理在于,该类表面能够维持边界层流动的附着性,抑制流动分离,并可促进边界层向更稳定的层流状态转变,进而优化绕流流场<sup>[9]</sup>。

为验证涂层的实际效果,结合实验与仿真模拟手段,系统评估了表面涂层对船舶阻力的影响。实验首先通过3D打印构建简化船模,并去除龙骨以统一喷涂条件。模型表面分别施加石墨烯涂料与CMP涂料,并与无涂层模型进行对照。实验在水槽中进行,通过牵引系统以一定速度拖曳船模,并利用拉力传感器与数据记录器实时采集阻力数据。通过对比不同速度下各模型的阻力值,分析涂层的减阻性能,并辅以仿真手段进一步验证流场变化机制。

## 1 实验设备与实验设置

本研究实验使用额定电压为12V的步进电机,基于Arduino的DAC6000控制器模块、量程为0-5N的拉力传感器,3D打印的船只模型、电机控制箱以及基于LabVIEW开发的实验数据采集器。实验开始时,首先通过压载物调节船模的吃水深度,使其水线略高于水面约2mm。随后,在水槽中以不同速度牵引三艘船模进行测试,速度范围从 $0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 至 $1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,并以 $0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为间隔逐级递增。每个速度点下的测试均重复10次,以消除随机误差;最终计算该速度下的平均阻力值。

### 1.1 实验用船模准备

为在运动过程中获得最佳水动力稳定性,本研究对船只模型进行了简化与重新设计。为减少涂层涂覆时的复杂性,船模在设计时移除了龙骨结构。为补偿由此可能带来的稳定性损失,在船尾加装了固定式方向舵,并在运行时配置压载物以提供辅助稳定。该方向舵基于NACA0012翼型设计,并通过增加舵高以最大化升力。所产生的升力有助于增强船模在牵引过程中的航向稳定性,有效减小横向偏移。船模主体采用复合PLA(聚乳酸)材料经3D打印制成,内部嵌有20%的蜂窝状基质结构。该结构内部包含气穴,可为模型提供充足浮力,确保其漂浮于水面。船体内部设有一个独立隔舱,用于安置拉力传感器、数据记录仪及铅质压载物。实验制备多个船模,如图2所示,其中2个模型分别涂覆石墨烯涂层与含氧化亚铜的CMP涂料,1个模型不涂覆涂料作为对照组。石墨烯涂层的处理与施涂由外部合作机构完成,涂覆前使用聚二甲基硅氧烷(PDMS)作为底漆层以增强附着力,待底漆彻底干燥后施涂2遍石墨烯涂层。

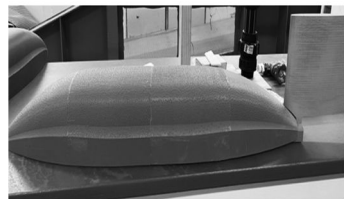


图2 船体模型实物图

### 1.2 实验设施

准备实验时,对渔线轮进行了改装,拆除了原有的驱动手柄,并在其位置安装了六角套筒用于固定。卷筒的驱动轴通过万向节与电机轴联接,从而实现电机至卷筒的动力传递。整套牵引系统安装于钢制底座上,以提供稳定的刚性支撑。底板上装有滚轮

与导向孔,并配有可调支架,确保牵引线在运行过程中不发生偏移。电机由专用控制箱进行供电与调速,该控制箱可输出可变电压以调节电机转速。控制箱与安装有 LabVIEW 的计算机相连,通过软件界面设定并实时显示电压参数。实验水槽位于地下实验室,故水温相对恒定,对实验影响可忽略,水槽一端安装有牵引系统。支架高度经过调整,使其与拉力传感器附件对齐,从而保证牵引线始终与水面保持平行。为监测模型运动,水箱两侧壁安装了多对光电传感器,间距为 2.95 m。传感器持续发射红外光束,对侧壁装有反射板,用于将光束反射回传感器,在实验中可以实现船模运动位置的实时检测。实验设备配置如图 3 所示。

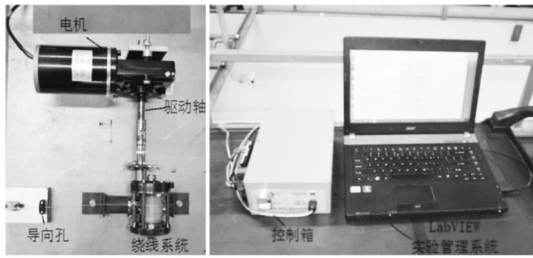


图 3 实验设备配置图

### 1.3 拉力传感器和数据记录

阻力测量使用量程为 0 - 5 N 的应变式拉力传感器。该传感器被固定在一个可拆卸的锁定附件上,此附件垂直安装于船模的艏端。牵引线连接至传感器另一端,当船模被拖曳时,牵引线张紧,传感器将检测到的阻力信号传输至由电池供电的数据记录器进行记录。该记录器具备清零、单位切换、复位及数据保存等功能。

### 1.4 牵引速度计算

模型最大牵引速度的计算是基于简化前船模原型和船模的弗劳德数相等的假设。因此,船模牵引速度  $V_m$  的估计依据表 1 数据。

表 1 参考技术参数

| 参数名称  | 数值  |
|---|---|
| 水的密度 $\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$   | 997   |
| 水的动力粘度 $\mu/\text{Pa} \cdot \text{s}$       | 0.00089                                     |
| 原型船舶航行速度 $V_b/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ | 10 节 = $5.14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ |
| 原型船舶长度 $L_b/\text{m}$                       | 19.21                                       |
| 船模长度 $L_m/\text{m}$                         | 1.147                                       |

基于弗劳德数推论如下:

$$\frac{V_b}{\sqrt{L_b}} = \frac{V_m}{\sqrt{L_m}}$$

$$V_m = V_b \sqrt{\frac{L_m}{L_b}} = 1.256$$

计算出的  $V_m$  对应船模在水槽中的最大牵引速度,实验中,船模的牵引速度从  $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  至  $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,以  $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  为间隔逐级递增,以测量不同速度下的阻力。最大雷诺数是以最大流速为  $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的情况下计算获得的。估算船模周围流体的最大雷诺数,可确定船模周围流体流动的性质。

$$R_e = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{997 \times 1 \times 1.147}{0.00089} = 1.2849 \times 10^6$$

基于平板理论,可通过船模航行的雷诺数  $R_e$  和临界雷诺数  $R_e(\text{cr})$  计算起始段长度  $x_{\text{transition}}$ :

$$\frac{R_e}{R_e(\text{cr})} = \frac{L_m}{x_{\text{transition}}}$$

$$R_e(\text{cr}) = 5 \times 10^5 \text{ (基于平板理论)}$$

$$x_{\text{transition}} = 0.4463 \text{ m}$$

计算的起始段长度远小于模型的实际长度,即  $L_m$  远大于  $x_{\text{transition}}$ 。这表明船模周围的流体处于完全发展的湍流运动状态。

### 1.5 拉力传感器误差估计

为检验测量系统的可重复性并估算拉力传感器的固有误差,本研究对采集的数据进行了回归分析。校准时,采用 5 g 至 300 g 的标准砝码作为载荷,并保持与正式实验相同的连接状态(即传感器与数据记录器均固定于船模)。将载荷逐级施加于牵引线,记录数据记录仪的读数,每个负载水平重复测试 10 次。随后,计算每个负载下读数的平均值,并与砝码的实际标称值进行回归分析,从而得出测量的标准误差。最终结果显示,本实验的标准误差为 0.4497%。

### 1.6 实验结果与分析

对照实验结果如图 4 和图 5 所示。图 4 为无涂层船模与 CMP 涂层船模以规定速度航行时的阻力变化图。图 5 为无涂层船模与石墨烯涂层船模以规定速度航行时的阻力变化图。由图可知,船模所受阻力与牵引速度成正比,且增长速度随速度增长不断提高。由于图中减阻效果差异随速度变化而发生波动,故将 2 种涂料的减阻效果对比数据整理如图 6 所示。

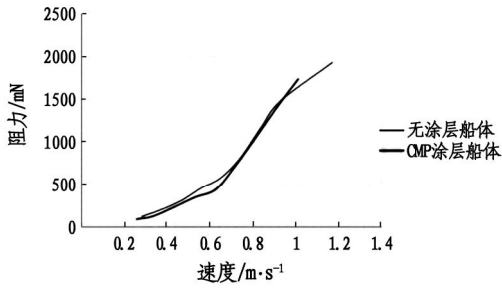


图4 无涂层船模与CMP涂覆船模速度-阻力线图

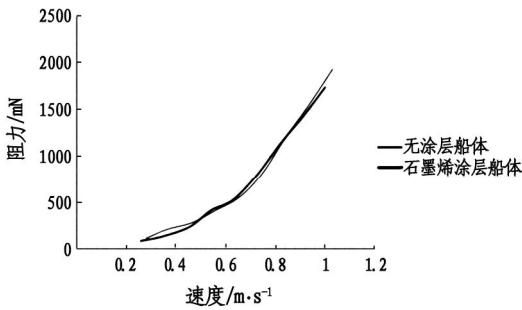


图5 无涂层船模与石墨烯涂覆船模速度-阻力线图

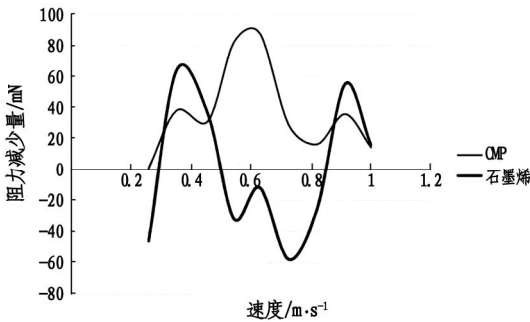


图6 石墨烯与CMP涂料减阻效果对比图

对减阻性能的分析结果表明,CMP和石墨烯均对船模的减阻有一定效果。由图6可看出这2种涂层在某些特定速度下减阻效果更为明显。如CMP涂层在 $0.2583 - 1.0002 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度范围内表现更为稳定,而石墨烯涂层在 $0.3508 - 0.542 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度区间内效果更佳。然而,CMP涂料在速度超过 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时效果急剧下降,而石墨烯涂层在速度高于 $0.9131 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时表现更优。基于如下减阻率公式进行分析可得

$$\eta = \frac{R_0 - R}{R_0} \times 100\%$$

其中: $\eta$ 为减阻率; $R_0$ 为基准船体以一定速度航行时所受总阻力( $N$ ); $R$ 为采用减阻措施后的船体在相同航速下的总阻力( $N$ )。

综合实验数据可知,石墨烯涂层实现的最大减阻率约为32.31%,而CMP涂层的最大减阻率约为

20.93%。综上所述,石墨烯涂层表面在 $0.3508 - 0.542 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度范围内以及速度高于 $0.9135 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时具有良好的减阻性能。CMP涂层表面在 $0.2583 - 1.0002 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的范围内减阻效果更佳。因此,采用石墨烯和CMP对船体进行表面处理均会减少船体的航行阻力,并在某些流速下效果进一步提升,但CMP涂料的减阻效果相对更加稳定。实验结果表明,就减阻性能而言,CMP涂层的综合表现比石墨烯涂层更为优异。尽管如此,石墨烯在此领域也已显现出良好的应用潜力。

## 2 船体阻力有限元分析

接下来进行CFD分析对实验获得的结果进行验证。由前文最大牵引速度( $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )下计算的雷诺数表明,船模周围的流体流动处于完全发展的湍流状态。因此,采用K-epsilon湍流模型进行模拟。在建模分析中,船模的无涂层外表面为粗糙壁面,而涂层船面近似光滑。分析中考虑了原型的润湿区域,而忽略船模的非润湿区域。模型使用对称边界条件,假设流过船体的水流为对称流动。船模示意图如图7所示。

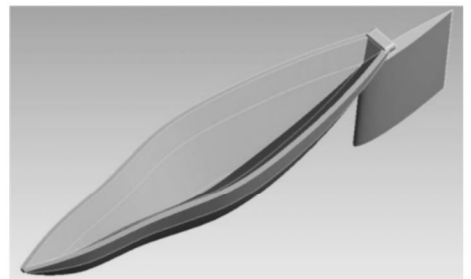


图7 用于流体分析的船模示意图

在流场模拟方面,使用布尔运算从基流场中减去船体,并为整个流场定义了不同的网格尺寸。在船体附近的流场建立子区域,并对其单独进行网格划分以提高分析精度,船体的单元尺寸为 $2 \text{ mm}$ ,船体分层附近的单元尺寸为 $20 \text{ mm}$ ,流场其它区域的网格使其自适应为最大 $100 \text{ mm}$ 的单元。图8为网格化流场示意图。

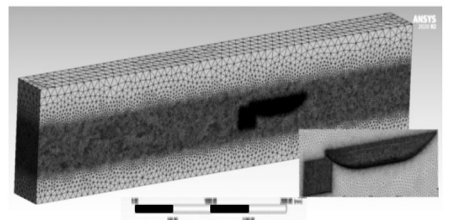


图8 网格化流场示意图

在 Fluent 分析组件中,分析模型采用多相流、VOF(volume of fluid)模型、明渠流和隐式体积力,然后将空气和水分配到不同的相中。为了检查每种材料的相态是否正确,可以绘制等值线来检查两相的体积分数。

图9为多相流模型示意图,图中显示有两相物质耦合参与仿真计算,水线(物相分界线)以上的区域为空气,以下的区域为水。空气和水之间有一薄层,呈现出渐变趋势,说明空气和水的接触界面为薄层的混合相;黏度选择 K-epsilon 可靠模型。边界条件应为压力入口和压力出口,底层是水面到场底的距离,并输入需要模拟的速度。由于本研究关注的是船舶匀速运动时产生的阻力。在“方法”部分,选择“耦合”方案进行计算。



图9 多相流模型示意图

图10是速度为  $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的光滑船体的等值面图,可以看出远离船体方向的流场速度趋于均匀。船体附近的流动趋于复杂,这是由于船头的挤压激励,流体从船头边界开始加速,在黏性力和主流与边界层之间压力差的作用下,沿着船体边界逐渐减速。当流体流经船尾区域时,流场突然膨胀,流速急剧下降,并在黏性力的影响下逐渐加速至主流速度。

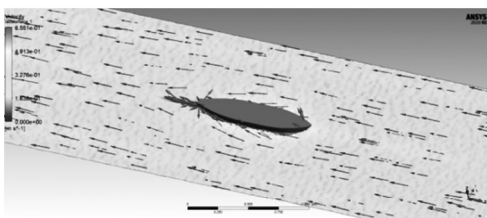


图10  $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  光滑船体流场速度矢量及云图

考虑到以上所有因素,粗糙度较大的船体必然具有更大的流体阻力和更复杂的湍流流动条件,如果再次使用拟瞬态分析,结果将无法收敛,阻力图会在很大的范围内波动,导致分析失效。

因此,采用基于时间步长的瞬态分析来模拟流场可以捕捉流体流动的过程,而不仅满足最终值。图11是速度为  $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的粗糙船体的等值面图,可以看出远离船体的流场为均匀流速。流速分布趋势与光滑船体相近,但由于船体粗糙度影响,导致摩擦影响区显著外扩变大,在船尾处由于黏性力的作

用,流速急剧下降,并逐渐加速至主流速度。

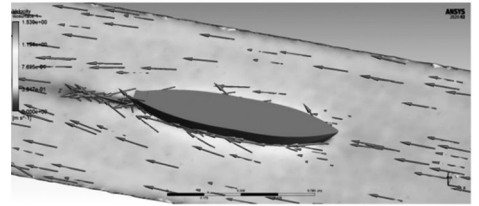


图11  $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  粗糙壁面船体流场速度矢量及云图

将 CFD 分析结果与无涂层模型的阻力读数进行比较和验证(见图12)。发现在  $0.2 - 0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的较低速度下,CFD 结果对实验数据进行了良好的验证。然而,当速度高于  $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,CFD 获得的阻力趋势线与实验测量数据略有偏差。这种轻微的偏差是由于模型在高速拖曳时产生的高湍流动能在原型机周围引发高涡量场。实验情况下,当水流从水箱壁反弹时,该涡量场在水箱侧壁附近形成了一个回流区。由于水箱的宽度约为  $1 \text{ m}$ ,且模型运动时相对于侧壁的距离较近,这些高涡量区可能对阻力测量值产生轻微影响。在 CFD 分析中,侧壁被定义为自由表面,因此回流区和模型边界线周围的涡量场问题被消除了。然而,在实验和 CFD 分析中,阻力随速度的变化趋势相似,且实验得到的阻力值与模拟分析得到的值较为吻合,故认为实验结果可信。此外,为保障模拟可靠性,本研究对速度为  $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时进行了无关性验证(见表2),发现在精度最高,单元最细化时与前一次计算结果差值较小,故分析结果可靠。

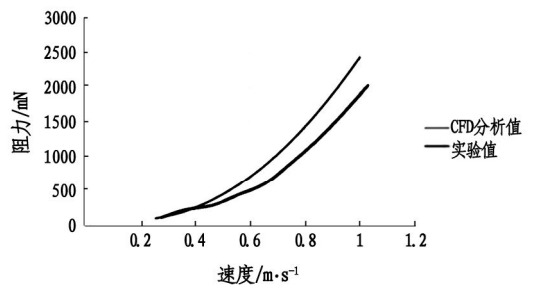


图12 CFD 分析与实验结果速度 - 阻力线图

表2 无关性验证

| 求解次数 | 单元尺寸 /mm | 数值变化量 | 节点数量 /个 | 单元数量 /个 |
|------|----------|-------|---------|---------|
| 1    | 200      | -     | 442173  | 2358995 |
| 2    | 100      | 8.72  | 445641  | 2377392 |
| 3    | 20       | 3.23  | 605456  | 3269462 |
| 4    | 2        | 0.62  | 791418  | 4385065 |

## 高标准农田建设适宜性评价及障碍因素分区

李闯<sup>1</sup>, 于跃跃<sup>2</sup>, 王胜涛<sup>2</sup>, 张蕾<sup>2</sup>, 张世文<sup>1\*</sup>

(1. 安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001; 2. 北京市耕地建设保护中心, 北京 100020)

**摘要:**从土壤条件、立地条件、基础设施条件和生态景观条件4个方面建立高标准农田建设适宜性评价体系, 将研究区适宜程度分为高度适宜、一般适宜、勉强适宜和不适宜4级, 其中高度适宜区占比最大, 面积为9133.57 hm<sup>2</sup>。基于生态位理论和障碍因子诊断模型, 进行适宜等级下的障碍分区。高度适宜区和一般适宜区主导障碍以土壤pH和灌溉能力为主; 勉强适宜区主导障碍为道路距离; 不适宜区主导障碍以道路距离为主。本研究基于障碍程度提出了相应的障碍整治方向和治理措施, 为选址优化和耕地质量提升提供了科学依据。

**关键词:**高标准农田建设; 生态位; 适宜性; 障碍诊断; 障碍因素分区

中图分类号: F323.211; S28

文献标识码: A

文章编号: 2095-297X(2026)02-0104-07

## Suitability Assessment and Obstacle Factor Zoning for High-Standard Farmland Construction

LI Chuang<sup>1</sup>, YU Yueyue<sup>2</sup>, WANG Shengtao<sup>2</sup>, ZHANG Lei<sup>2</sup>, ZHANG Shiwen<sup>1\*</sup>

(1. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan, 232001, Anhui;

2. Beijing Cultivated Land Construction and Protection Center, 100020, Beijing)

**Abstract:** An evaluation system for the suitability of high-standard farmland construction was established from four aspects: soil conditions, site conditions, infrastructure conditions and ecological landscape conditions. The study area was classified into four levels of suitability: highly suitable, generally suitable, marginally suitable, and unsuitable. Among these, the highly suitable zone accounted for the largest proportion, with an area of 9133.57 hm<sup>2</sup>. Based on the ecological niche theory and obstacle factor diagnosis model, obstacle zoning under different suitability levels was conducted. In the highly suitable and generally suitable zones, the primary obstacles are identified as soil pH and irrigation capacity. In the marginally suitable zone, the dominant obstacle is road distance. The unsuitable zone is primarily limited by road distance. Corresponding obstacle remediation directions and management measures were proposed based on the degree of obstruction. It provides a scientific basis for site selection optimization and cultivated land quality improvement.

**Key words:** high-standard farmland construction; ecological niche; suitability; constraint diagnostics; obstacle factor zoning

高标准农田是保障我国农业发展的核心资源。2025年,《逐步把永久基本农田建成高标准农田实施方案》中要求在2035年前,将具备条件的永久基本农田改造成高标准农田,累计改造提升达4.55亿亩<sup>[1]</sup>。在全面推进农业振兴的当下,我国耕地建设

保护工作迈入新阶段,强调深入推进全域土地综合整治,而中低等地改造正成为未来高标准农田建设的重要方向<sup>[2]</sup>。我国农业现代化已经进入从中期向后过渡的扩面提质阶段,如何高质量、高标准、高效率推进高标准农田建设工作成为高标准农田建

收稿日期: 2025-09-26 \* 通讯联系人

基金项目: 粮食作物创新团队土壤评价与质量提升岗位专家项目(BAIC02-2024)。

作者简介: 李闯(2000-),男,安徽阜阳人,硕士研究生。E-mail: 3431438549@qq.com

设的重要挑战<sup>[3]</sup>。掌握区域耕地资源开发强度与障碍改良的现实情况,对制定区域耕地资源管理政策,保障区域粮食安全和生态安全具有重要意义<sup>[4-5]</sup>。但当前高标准农田建设过程中还存在建设布局有待优化、建设内容标准有待细化、建设地块筛选评估有待加强等问题<sup>[6]</sup>。因此,系统地开展高标准农田建设重要性就越发凸显。

国外农田建设工作主要围绕优质耕地保护、耕地质量评价和耕地生态效益等方面开展<sup>[7]</sup>。我国则围绕高标准农田建设进行相关研究,其理论主要集中在高标准农田时序安排、空间分布、建设路径、障碍诊断、实例分析等方面<sup>[8-9]</sup>。研究者主要使用四象限法、理想解逼近法、熵权法、改进突变级数模型以及空间自相关分析法等<sup>[9-10]</sup>进行综合评价,这类方法需确定权重,评价主观且计算复杂,难以确定耕地建设的限制性因素。生态位理论作为生态学重要理论之一,其表征物种对生境条件的适宜性,因而能够体现出不同物种对生境条件的适宜程度<sup>[11]</sup>。生态位理论的内涵也逐渐应用于土地整合、高标准农田建设和规划中<sup>[12-13]</sup>。赵素霞等<sup>[14]</sup>将生态位模型运用于识别高标准农田建设障碍。夏敏峰等<sup>[15]</sup>基于生态位理论,聚焦湖滨平原区不同维度的高标准农田建设障碍。唐志敏等<sup>[16]</sup>以生态位理论为基础,构建富硒土地资源评价指标体系,明确富硒土地资源的限制条件。已有研究在高标准农田建设评价中仅聚焦于障碍因素。但在耕地综合评价框架下,如何系统性地识别和分析这些障碍因素,仍需进一步探讨。

为全面反映高标准农田建设障碍限制程度、建设条件等基本情况,本研究构建高标准农田建设适宜性评价体系,结合生态位理论,划分适宜性评价等级;结合障碍因子诊断模型,确定建设适宜性分级下的主导障碍,明确高标准农田建设方向,并提出改良措施。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

顺义区位于北京市东北方向,距市区 30 km,北靠怀柔、密云,东邻平谷,南接通州,西连昌平,是北京东北部重要的综合交通枢纽。顺义区介于 40°00'N - 40°18'N, 116°28'E - 116°58'E,东西长 45 km,南北宽 30 km,总面积约为 1021 km<sup>2</sup>。顺义区下辖 19 个镇和 6 个街道,常住人口 132.6 万人。顺义区地势北高南低,为潮白河冲积沉积平原,东北边界屏障燕山,山势和缓,岩石以花岗岩、片麻岩为主。北部

山地最高点海拔为 637 m,境内最低点海拔为 24 m。年平均气温为 11.5 ℃,年均降雨量 610 mm,年日照 2750 h,无霜期 195 d。土壤主要分为潮土、褐土、沼泽土、风砂土、水稻土 5 个土类。全区耕地面积约为 19 627 hm<sup>2</sup>,占全区总面积的 19.22%。研究区地理位置图如图 1 所示。

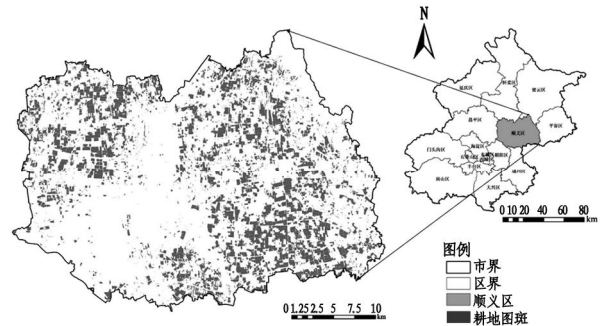


图 1 研究区地理位置图

### 1.2 数据来源及数据处理

本研究所用数据包括顺义区数字高程图 (DEM)、土壤图、耕地图斑、道路数据和 2023 年耕地资源质量分类数据库。本研究以耕地图斑为评价单元,共 10 438 个。有效土层厚度、土壤质地等数据来源于 2023 年耕地资源质量分类数据库。坡度指标从 DEM 数据中提取;道路距离指标使用 ArcGIS 中的 near 工具统计耕地图斑到公路之间的距离获取;耕地连片度指标使用 ArcGIS 中的 near 工具统计耕地图斑之间的距离获取;斑块形状指数、田块面积指标利用耕地图斑的周长、面积计算得出;生物多样性指标通过测定土壤微生物量来表征;土壤污染程度通过测定砷、镉、铜、铅、铬、汞、镍等重金属含量,利用内梅罗指数计算出土壤综合污染指数。

## 2 研究方法

### 2.1 基于生态位理论的多指标适宜度模型

生态位适宜度是生态学中用于表征物种对生境条件的适应程度,体现为现实生态位与理想生态位的贴近程度<sup>[17]</sup>。参考多维超体积生态位<sup>[18]</sup>、赵素霞等<sup>[14]</sup>的高标准农田生态位的概念,为量化评价区域的建设条件,本研究引入生态位理论模型。其中高标准农田生态位指理想条件下的多维资源空间;现实生态位对应于评价因子的实际状态;两者间的拟合度反映为建设适宜性,即生态位适宜度,其标准化量值范围为[0,1]。

根据生态位理论,将高标准农田建设适宜性评价选定的因子分为正向因子、适度因子和负向因子 3 种类型。

第一类是正向因子,正向因子的实际值越大,表示现实越好。该类指标的评价模型为:

$$N_k = \begin{cases} 0 & X_k < D_{kmin} \\ X_k/D_{kopt} & D_{kmin} \leq X_k < D_{kopt} \\ 1 & X_k \geq D_{kopt} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $N_k$ 为评价因子 $k(k \in [1, n])$ 的适宜度; $X_k$ 为评价因子 $k$ 的实际值; $D_{kopt}$ 为评价因子 $k$ 的最适值; $D_{kmin}$ 为评价因子 $k$ 的最小值。

第二类是适度因子,该类因子在一个区间内,实际值越大或者越小都会对耕地实际建设产生不利影响。该类指标的评价模型为:

$$N_k = \begin{cases} 0 & X_k \leq D_{kmin} \text{ 或 } X_k \geq D_{kmax} \\ \frac{X_k - D_{kmin}}{D_{kopt} - D_{kmin}} & D_{kmin} < X_k < D_{kopt} \\ \frac{D_{kmax} - X_k}{D_{kmax} - D_{kopt}} & D_{kopt} < X_k < D_{kmax} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $D_{kmax}$ 为评价因子 $k$ 的最大值。

第三类是负向因子,负向因子的实际值越小,现实条件越好。该类指标的评价模型为:

$$N_k = \begin{cases} 1 & X_k \leq D_{kmin} \\ 1 - \frac{X_k - D_{kmin}}{D_{kmax} - D_{kmin}} & D_{kmin} < X_k < D_{kmax} \\ 0 & X_k \geq D_{kmax} \end{cases} \quad (3)$$

从生态位理论视角看,可将高标准农田建设视为一个由多重障碍因子共同定义的 $n$ 维资源空间,每个因子的状态都决定了系统最终的适宜性。基于

此,高标准生态农田建设适宜度模型为:

$$M_k = \sqrt[n]{\prod_{k=1}^n N_k} \quad (4)$$

式中, $M_k$ 为第 $k$ 个评价单元的综合生态位适宜度。

## 2.2 高标准农田建设适宜性评价体系

高标准农田建设以优良的耕地本底与稳固的空间格局为依托,通过系列整治工程,消除障碍因子最终达成建设适宜性的最优化目标<sup>[9]</sup>。为确保评价的科学性与实用性,从土壤条件、立地条件、基础设施条件与生态景观条件4个维度遴选具体指标,从而系统构建起高标准农田建设的适宜性评价指标体系。根据已有研究基础及现有技术体系<sup>[14-21]</sup>获取包括土壤pH值、有效土层厚度等13个评价指标,最终形成了由4个维度13个指标组成的高标准生态农田建设适宜性评价指标体系(见表1)。

高标准农田建设中的每个评价指标都具有适当的阈值,即为生态位最适值。指标体系中,土壤质地、有效土层厚度、土壤有机质含量、土壤pH和坡度参考国家标准<sup>[22-23]</sup>和相关文献<sup>[24]</sup>。灌溉能力、排水能力、生物多样性等指标越大越好,直接按分值100分作为最适值;而土壤污染程度则是越小越好,把0分作为最适值。耕地连片度和田块面积参考《高标准农田建设评价规范》(GB/T 33130-2024)<sup>[25]</sup>和实际情况确定,道路距离和斑块形状指数参考薛剑<sup>[26]</sup>和王新盼等<sup>[27]</sup>研究成果。

表1 高标准农田建设适宜性评价指标体系

| 目标层          | 准则层    | 指标层       | 最适值                        | 指标类型     |     |
|--------------|--------|-----------|----------------------------|----------|-----|
| 高标准农田建设适宜性评价 | 土壤条件   | 土壤质地/分    | 100                        | 离散型      |     |
|              |        | 有效土层厚度/cm | 100                        | 离散型      |     |
|              |        | 土壤pH      | 6.5-7.5                    | 适度       |     |
|              | 立地条件   | 基础设施条件    | 土壤有机质含量/g·kg <sup>-1</sup> | 20       | 正向  |
|              |        |           | 坡度/°                       | 2        | 负向  |
|              |        | 生态景观条件    | 灌溉能力/分                     | 100      | 离散型 |
|              |        |           | 排水能力/分                     | 100      | 离散型 |
|              | 生态景观条件 | 耕地连片度/m   | 道路距离/m                     | 100      | 负向  |
|              |        |           | 耕地连片度/m                    | 100      | 负向  |
|              |        | 生态景观条件    | 田块面积/hm <sup>2</sup>       | 8        | 正向  |
|              |        |           | 斑块形状指数                     | 1.25-2.6 | 负向  |
|              | 生态景观条件 | 生物多样性/分   | 100                        | 离散型      |     |
|              |        | 土壤污染程度/分  | 0                          | 离散型      |     |

土壤质地、灌溉保证率、排水能力、生物多样性和土壤污染程度为离散因子。为了准确地量化指标数据,参考实际情况和相关研究<sup>[14-16]</sup>,对离散因子进行量化打分,对其他连续型因子进行量化计算(见表2)。

表2 指标分级赋值

| 指标     | 分级标准 | 赋分  |
|--------|------|-----|
| 土壤质地   | 壤土   | 100 |
|        | 黏土   | 90  |
|        | 砂土   | 70  |
|        | 砾质土  | 40  |
| 灌溉保证率  | 充分满足 | 100 |
|        | 满足   | 85  |
|        | 基本满足 | 70  |
|        | 不满足  | 50  |
| 排水能力   | 充分满足 | 100 |
|        | 满足   | 85  |
|        | 基本满足 | 70  |
|        | 不满足  | 50  |
| 生物多样性  | 丰富   | 100 |
|        | 一般   | 80  |
|        | 不丰富  | 60  |
| 土壤污染程度 | 无污染  | 100 |
|        | 轻度污染 | 40  |
|        | 重度污染 | 10  |

### 2.3 障碍度诊断模型

对影响区域高标准农田建设的主要障碍因子进行识别判断,在计算生态位适宜度指数的基础上,引入障碍度模型( $O_k$ )。该模型能有效测度各维度因子的相对障碍度,其值越大,代表该因子对实现高标准农田建设目标的限制性作用越强。

用指标偏离度公式计算各评价因子的障碍度。

$$O_k = 1 - N_k \quad (5)$$

利用生态位限制性定律进行障碍诊断,诊断模型可表示为:

$$O = \max \{O_1, O_2, \dots, O_k\} \quad (6)$$

### 2.4 主导障碍因素分区

本研究以高障碍度作为耕地障碍度分区的初步依据,但因障碍评价结果导致的分区类型过多,降低了在生产实践中的指导作用。本研究对各评价单元的高障碍因素进行障碍度排序,筛选出主导障碍因

素组合,并据此最终划定具有明确指导意义的耕地障碍类型区。

## 3 结果与分析

### 3.1 适宜性评价结果

对顺义区高标准农田建设适宜性进行评价,结果如图2所示,结合自然断点法将评价结果分为4级。

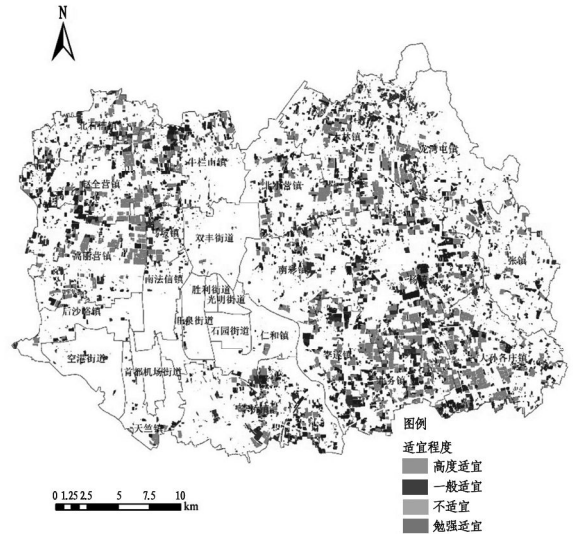


图2 适宜性评价结果

高度适宜区耕地面积达到了 9133.57  $\text{hm}^2$ , 占耕地面积的 46.54%。分布区域以杨镇、大孙各庄镇和木林镇为主。该区域土壤肥沃,地势平缓,有效土层厚度大于 100 cm,耕地形状规整,耕地面积大,耕地连片度高。由于机械化耕作程度高,化肥使用较多,耕地利用强度大,导致部分耕地土壤偏碱、微生物多样性下降,这可能导致耕地生态系统衰退。该区域适宜度高,障碍程度较低,已具备高标准农田建设条件,应加强耕地保护。

一般适宜区耕地面积达到了 6475.94  $\text{hm}^2$ , 占耕地面积的 32.99%, 靠近高度适宜区,以杨镇、赵全营镇和大孙各庄镇为主。该区域有机质含量较高,质地偏砂,土壤 PH 偏碱性,耕地田块面积小,不利于机械化耕作。部分区域高标准农田建设较早,灌溉设施维护不足,灌溉能力下降。该区域中虽然存在一定的障碍,但稍加整治,便能满足高标准农田的建设条件。

勉强适宜区耕地面积为 929.52  $\text{hm}^2$ , 占耕地面积的 4.74%, 耕地分布较为分散,主要在杨镇、赵全营镇和李桥镇等地。该区域整体土壤本地条件较好,但基础设施较差,受历史利用方式影响,空间上分布在大型耕地周围,耕地分割严重,单块耕地面积

较小,与其他等级耕地距离较远,耕作生产时较不便利。该区域的高标准农田建设条件相对较为苛刻,需要采取针对性的整治措施才能满足建设要求。

不适宜区耕地面积为 3088.26  $\text{hm}^2$ ,占耕地面积的 15.73%。主要分布在木林镇、杨镇和李桥镇。木林镇北部为低山地貌,有效土层厚度较薄,耕作条件差。由于这些区域的位置远离城区,路网较不发达,耕地连通性差,制约了农业的发展,基础条件差,利用效益低,不适宜建设高标准农田。

### 3.2 障碍因素分区

不同区域的区位、立地条件和耕地地力不同,产生的障碍也不尽相同。为针对性消除障碍因素,高标准农田建设项目必须解决影响耕地的关键制约因素及症结性障碍因素,结合适宜性评价结果与障碍分析,可确定不同适宜性分级下的主导障碍因素。

高度适宜区障碍因素分区如表 3 和图 3 所示。

表 3 高度适宜区耕地障碍因素面积统计

| 障碍因素分区 | 图斑/个 | 面积/ $\text{hm}^2$ | 占比/%  |
|--------|------|-------------------|-------|
| 土壤 pH  | 295  | 3124.48           | 34.21 |
| 灌溉能力   | 223  | 2409.46           | 26.38 |
| 田块面积   | 281  | 1151.17           | 12.60 |
| 生物多样性  | 218  | 2448.47           | 26.81 |

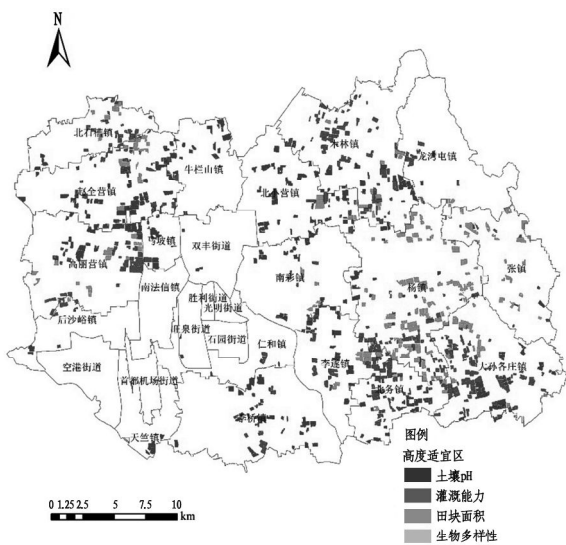


图 3 高度适宜区障碍因素分区图

障碍因素以土壤 pH、灌溉能力、田块面积和生物多样性为主。土壤 pH 障碍面积为 3124.48  $\text{hm}^2$ ,主要分布在赵全营镇、北小营镇和李桥镇;灌溉能力障碍面积为 2409.46  $\text{hm}^2$ ,主要分布在木林镇、大孙各庄镇和北务镇;田块面积障碍面积为 1151.17  $\text{hm}^2$ ,主要分布在大孙各庄镇、杨镇和北务镇;生物

多样性障碍面积为 2448.47  $\text{hm}^2$ ,主要分布在杨镇、张镇和大孙各庄镇。该区域的土壤条件较好,地势平坦,集中连片,可通过打机井及修筑引水渠,使耕地灌溉保证率得到保障及提升,同时应注重土壤 pH 和生物多样性障碍,通过施用有机肥和菌剂,加强土壤管理,使耕地质量相对较易地达到较高的水平。

一般适宜区障碍因素分区结果如表 4 和图 4 所示。障碍因素以土壤 pH、灌溉能力、道路距离和田块面积为主。土壤 pH 障碍面积为 1374.88  $\text{hm}^2$ ,主要分布在杨镇、赵全营镇和大孙各庄镇;灌溉能力障碍面积为 970.94  $\text{hm}^2$ ,主要分布在杨镇、赵全营镇和木林镇;道路距离障碍面积为 704.20  $\text{hm}^2$ ,主要分布在李遂镇、杨镇和大孙各庄镇;田块面积障碍面积为 3425.92  $\text{hm}^2$ ,主要分布在杨镇、大孙各庄镇和木林镇。该区域田块面积较小,达不到高标准农田建设要求,可通过土地平整措施,重新划分农田,使之适宜耕作。土壤 pH 偏碱可通过有机肥结合酸性调节剂混合施用,调节土壤质量。灌溉能力和道路距离障碍可通过完善基础设施建设,保障农田灌溉和生产运输需求。

表 4 一般适宜区耕地障碍因素面积统计

| 障碍因素分区 | 图斑/个 | 面积/ $\text{hm}^2$ | 占比/%  |
|--------|------|-------------------|-------|
| 土壤 pH  | 215  | 1374.88           | 21.23 |
| 灌溉能力   | 124  | 970.94            | 14.99 |
| 道路距离   | 109  | 704.20            | 10.87 |
| 田块面积   | 2146 | 3425.92           | 52.91 |

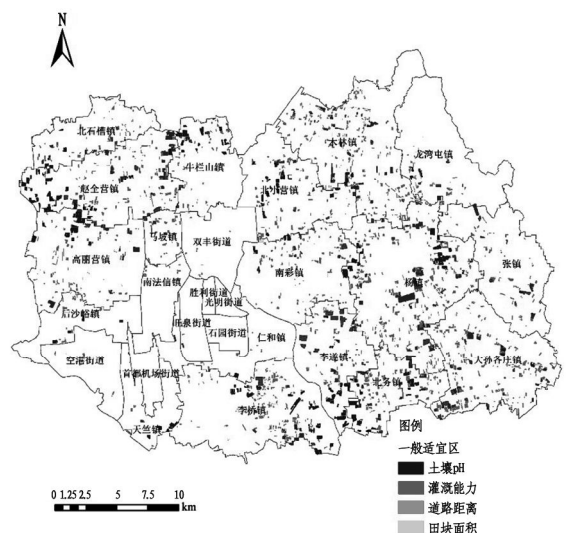


图 4 一般适宜区障碍因素分区图

勉强适宜区障碍因素分区结果如表 5 和图 5 所示。障碍因素以道路距离和田块面积为主。道路距

离障碍面积为 169.15 hm<sup>2</sup>, 主要分布在杨镇、赵全营镇和木林镇; 田块面积障碍面积为 760.37 hm<sup>2</sup>, 主要分布在杨镇、赵全营镇和李桥镇。该区域耕地图斑面积低于高标准农田建设要求, 应打破原有农户地块界旧布局, 统一平整土地, 减少田块数量, 提升单块面积, 满足大型机械作业需求。耕作距离较远不利于农业活动, 应加快网格化道路建设, 保证生产需求。

表 5 勉强适宜区耕地障碍因素面积统计

| 障碍因素分区 | 图斑/个 | 面积/hm <sup>2</sup> | 占比/%  |
|--------|------|--------------------|-------|
| 道路距离   | 97   | 169.15             | 18.20 |
| 田块面积   | 3074 | 760.37             | 81.80 |



图 6 不适宜区障碍因素分区图

#### 4 结论

研究区根据高标准农田建设适宜性评价分为高度适宜区、一般适宜区、勉强适宜区和不适宜区。高度适宜区和一般适宜区面积达 15 609.51 hm<sup>2</sup>, 占耕地面积 79.53%。高度适宜区障碍类型区分为土壤 pH、灌溉能力、田块面积和生物多样性障碍区, 其中土壤 pH 障碍区最大, 可通过施用有机肥进行改良。一般适宜区障碍类型区分为土壤 pH、灌溉能力和道路距离和田块面积障碍区, 田块面积障碍区最大, 可通过土地平整措施, 重新规划农田。勉强适宜区障碍类型区分为道路距离和田块面积障碍区, 其中田块面积障碍区最大, 应打破旧地块布局, 统一平整土地, 减少图斑数量, 提升整体面积, 满足大型机械作业需求。不适宜区障碍类型区分为有效土层厚度、道路距离和耕地连片度障碍区, 该区域应作为耕地后备区, 以待合适的条件开发。

本研究围绕高标准农田建设的新部署和新要求, 基于生态位理论构建适合的高标准农田建设适宜性评价方法, 并划分不同等级的建设适宜性区域。基于障碍诊断分析, 确定各适宜等级下的主导障碍, 明确整治方向和改良措施。本研究在既定数据和资料条件下, 主要聚焦于对高标准农田建设进行静态分析。未来的研究应纳入时间序列数据, 探索耕地质量的动态演变规律, 实现从静态评估到动态模拟的方法论跃迁。

#### 参考文献:

[1] 中共中央办公厅, 国务院办公厅. 逐步把永久基本农田建成高标准农田实施方案[EB/OL]. (2025-03-30)

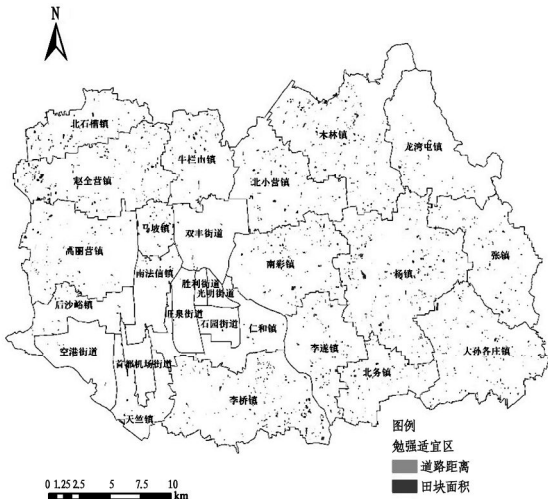


图 5 勉强适宜区障碍因素分区图

不适宜区障碍因素分区结果如表 6 和图 6 所示。不适宜区障碍度较高, 障碍因素以有效土层厚度、道路距离和耕地连片度为主。有效土层厚度障碍面积为 354.98 hm<sup>2</sup>, 主要分布在木林镇、龙湾屯镇和北石槽镇; 道路距离障碍面积为 2367.58 hm<sup>2</sup>, 主要分布在李桥镇、杨镇和木林镇; 耕地连片度障碍面积为 574 hm<sup>2</sup>, 主要分布在张镇、杨镇和大孙各庄镇。该区域距道路较远, 土壤条件较差, 田块分布不均, 改造难度较大。田块较为集中的区域应建设生产道路, 保障粮食生产; 距离较远, 土壤条件差的区域, 应作为耕地后备区。

表 6 不适宜区耕地障碍因素面积统计

| 障碍因素分区 | 图斑/个 | 面积/hm <sup>2</sup> | 占比/%  |
|--------|------|--------------------|-------|
| 有效土层厚度 | 412  | 354.98             | 11.49 |
| 道路距离   | 2670 | 2367.58            | 76.67 |
| 耕地连片度  | 574  | 365.70             | 11.84 |

- [2025-09-26]. [https://www.gov.cn/zhengce/202503/content\\_7016421.htm](https://www.gov.cn/zhengce/202503/content_7016421.htm).
- [2] 陈麟,吴克宁,冯喆,等.生态文明建设视角下的高标准农田建设适宜性评价[J]. 土壤,2019,51(4):803-812.
- [3] 郭澄澄,安淑新.我国基本实现农业现代化:阶段特征、问题挑战与实施路径[J]. 农业经济,2025(1):3-6.
- [4] 于法稳,代明慧,车丽娟.土壤健康视角下实现粮食安全的绿色之路[J]. 南京农业大学学报(社会科学版),2025,25(1):29-40.
- [5] 刘文发,韩汉君.高标准农田建设对粮食增产的作用机制与影响研究[J]. 河南社会科学,2025,33(5):109-117.
- [6] 吴洋,吴晓亮,严家家,等.关于推进生态型高标准农田建设的思考[J]. 新农业,2022(3):82-83.
- [7] 李刘荣,吴小峰,何振嘉,等.新形势下陕西省高标准农田建设条件及新模式思考[J]. 中国农机化学报,2025,46(4):231-239.
- [8] 张凤平,王柳,赵云云,等.北京市高标准农田建设模式与路径初探[J]. 中国农业资源与区划,2024,45(12):118-124.
- [9] 王晓青,史文娇,邢晓旭,等.高标准农田建设适宜性评价、效益评价及影响因素解析的研究方法综述[J]. 中国农学通报,2019,35(19):131-142.
- [10] 赵素霞,牛海鹏,张合兵,等.高标准农田生态位障碍因子诊断模型建立与应用[J]. 农业机械学报,2018,49(1):194-202.
- [11] 徐小千,汪景宽,李双异,等.基于生态位理论的东北黑土区耕地整治适宜性评价——以公主岭市为例[J]. 中国生态农业学报,2018,26(3):432-441.
- [12] 蔡海生,陈艺,张学玲.基于生态位理论的富硒土壤资源开发利用适宜性评价及分区方法[J]. 生态学报,2020,40(24):9208-9219.
- [13] 江倩倩,罗先香,张龙军.生态适宜性评价研究及在海洋环境中应用的思考[J]. 海洋环境科学,2016,35(1):155-160.
- [14] 赵素霞,牛海鹏,张捍卫,等.基于生态位模型的高标准基本农田建设适宜性评价[J]. 农业工程学报,2016,32(12):220-228.
- [15] 夏敏峰,余慧敏,李爽,等.基于生态位的鄱阳湖平原区高标准农田建设障碍因子诊断[J]. 中国农业大学学报,2021,26(7):182-190.
- [16] 唐志敏,湛龙,张晓东,等.基于生态位理论与AHP-TOPSIS模型的福建长汀县富硒土地资源综合评价[J]. 岩矿测试,2024,43(4):592-602.
- [17] 郭彦龙,赵泽芳,乔慧捷,等.物种分布模型面临的挑战与发展趋势[J]. 地球科学进展,2020,35(12):1292-1305.
- [18] HUTCHINSON G E. Concluding remarks[J]. Cold Spring Harbor Symposium Quantitative Biology, 1957, 22: 415-427.
- [19] 廖通霖,叶英聪,匡丽花.高标准农田建设对耕地质量的影响——以鹰潭市余江区为例[J]. 中国农机化学报,2025,46(1):255-263.
- [20] 郝帅,王国刚,杨艳涛,等.高标准农田建设研究追踪与未来展望——基于CiteSpace可视化分析[J]. 中国农业资源与区划,2023,44(4):113-124.
- [21] 代小露,刘洪云,曹丹,等.基于障碍度模型的高标准农田建设工程分区及投资研究——以贵阳市为例[J]. 中国农业综合开发,2025(6):36-40.
- [22] 全国国土资源标准化技术委员会(SAC/TC 93). 农用地质量分等规程:GB/T 28407-2012[S]. 北京:中国标准出版社,2012.
- [23] 全国土壤质量标准化技术委员会(SAC/TC 404). 耕地质量等级:GB/T 33469-2016[S]. 北京:中国标准出版社,2016.
- [24] 杨建宇,杜贞容,杜振博,等.基于耕地质量评价和局部空间自相关的高标准农田划定[J]. 农业机械学报,2017,48(6):109-115.
- [25] 中华人民共和国农业农村部. 高标准农田建设评价规范:GB/T 33130-2024[S]. 北京:中国标准出版社,2024.
- [26] 薛剑,韩娟,张凤荣,等.高标准基本农田建设评价模型的构建及建设时序的确定[J]. 农业工程学报,2014,30(5):193-203.
- [27] 王新盼,姜广辉,张瑞娟,等.高标准基本农田建设区域划定方法[J]. 农业工程学报,2013,29(10):241-250.

责任编辑:于舒霖

## 化工原理“多维度融合”教学模式探索与效果分析

刘沐鑫, 秦英月, 石春杰, 赵建军\*, 陈浩

(蚌埠学院 材料与化学工程学院, 安徽 蚌埠 233030)

**摘要:** 针对应用型本科高校化工原理教学过程中学生应用能力趋弱、学生学习兴趣不足和学生自主学习能力差的现象, 剖析了应用能力、学习兴趣和自主学习能力三者之间的关系。通过在教学中引入蕴含化工原理知识的生活案例和科研案例, 以线上-线下混合式教学为手段, 构建了包括“生活-教学融合”“科研-教学融合”“线上-线下融合”的“多维度融合”教学模式。该教学模式可以提升学生解决复杂工程问题的能力, 使学生感受学以致用快乐, 激发学生的学习兴趣, 实现学生应用实践能力和自主学习能力相互促进、同步提高的效果。为应用型本科高校培养化工领域应用型创新人才提供了新思路。

**关键词:** 化工原理; 多维度融合; 教学模式; 实践; 自主学习

中图分类号: G642

文献标识码: A

文章编号: 2095-297X(2026)02-0111-06

## Exploration and Effect Analysis of the Multi-dimensional Integration Teaching Mode of Chemical Engineering Principles

LIU Muxin, QIN Yingyue, SHI Chunjie, ZHAO Jianjun\*, CHEN Hao

(School of Material and Chemical Engineering, Bengbu University, Bengbu, 233030, Anhui)

**Abstract:** The challenges of diminishing practical application skills, lack of learning motivation, and inadequate independent learning capabilities among students in the instruction of chemical engineering principles at application-oriented undergraduate universities are examined in this paper. In response to these issues, the interrelationship between practical application competence, learning motivation, and independent learning capacity are explored. By introducing life cases and scientific research cases that embody knowledge of chemical engineering principles, and utilizing online and offline hybrid blended teaching, a “multi-dimensional integration” pedagogical framework covering the integration of “life and teaching” “research and teaching” and “online and offline” elements has been proposed. This pedagogical framework aims to enhance students’ capabilities in addressing complex engineering problems, foster their enjoyment in applying acquired knowledge, stimulate their learning interest, and promote the concurrent advancement of both practical application skills and independent learning capabilities. The model offers an innovative approach to cultivating application-oriented talents with a focus on innovation within the chemical engineering discipline at application-oriented undergraduate universities.

**Key words:** principles of chemical engineering; multi-dimensional integration; teaching mode; practice; autonomous learning

面对全球产业变革, 我国化工行业面临着前所未有的机遇与挑战, 逐渐向高集成化、高科技化转

收稿日期: 2025-12-11 \* 通讯联系人

基金项目: 安徽省教学质量工程项目(2023jyxm0822, 2024dzxkc119); 安徽省高校高端人才引育行动青年拔尖人才(青年教学名师)项目。

作者简介: 刘沐鑫(1983-), 男, 吉林扶余人, 教授, 博士。E-mail: liumx49@163.com

变,化工行业对高水平创新人才的需求十分紧迫<sup>[1]</sup>。党的二十大对人才培养指明了方向,把以卓越工程师、大国工匠、高技能人才等为代表的创新型人才作为构成拔尖创新人才体系的重要组成部分<sup>[2]</sup>。深化高校人才培养模式改革,持续培养化工领域应用型创新人才,对于发展化工产业相关的新质生产力有着重要的战略支点价值和功能。

蚌埠学院(以下简称我校)为地方应用型本科高校,“应用型”始终是我校办学定位的核心内容。基于我校办学定位的要求和工科属性,我校十分重视化学工程与工艺专业(以下简称化工)学生应用实践能力的培养<sup>[3]</sup>。化工原理是化工专业的核心基础课程,是化工专业本科学生认识化工生产过程的起点,在培养化工专业学生的应用实践能力过程中起着“排头兵”的作用<sup>[4-6]</sup>。2009年我校化工原理首次开课,经过多年建设确立了以培养学生实际工作能力、树立工程观点和突出工程研究方法的教学指导思想。目前本课程为安徽省精品开放课程、省级一流课程和校级课程思政示范课程。然而,在教学过程中本团队发现学生应用实践能力趋弱、学生学习兴趣不足和学生自主学习能力差等新问题,人才培养方式已经无法应对新时代大变局下的需求与挑战。这些问题也是当前工科专业人才培养和工科课程教学面临的普遍问题。因此,很多高校教师采用产教融合、案例式教学、赛教融合、校企协同育人、线上线下混合教学等多种手段和方式尝试解决这些问题<sup>[7-11]</sup>。本团队认为以上问题之间存在相关性,即应用实践能力不足,无法做到学以致用,会进一步使学生丧失学习兴趣,进而丧失了培养学生自主学习能力的机会。基于此,本团队探索了“多维度融合”的教学模式,通过提升学生的应用实践能力,激发学生的学习兴趣,以实现学生应用实践能力和自主学习能力相互促进、同步提高的效果。

## 1 化工原理课程教学中的问题与困境

化工原理是讲述化工生产过程的单元操作及所用设备的基本理论知识的课程,这门课是综合运用数学、物理、化学等基础知识,分析和解决化工生产中各种物理过程问题的工程学科,它承担着工程科学与工程技术的双重教育任务。然而,在长期的教学过程中教学团队发现在教学内容、教学方法和学生学习状态等方面存在欠缺(见图1),致使本课程在人才培养过程中没有发挥出应有的作用,卷面成绩不及格率高于30%,优秀率不足3%。

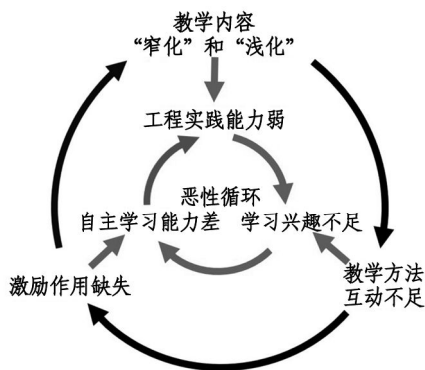


图1 化工原理教学现状分析

### 1.1 教学内容方面存在的问题

化工原理被称为沟通化工理论知识与化工工程实践的桥梁,旨在培养学生理论联系实际、分析与解决实际工程问题的能力<sup>[12-14]</sup>。从我校的化工原理教学的知识体系和教学内容来看,这种桥梁作用并不显著。在学生的化工工程实践能力培养方面,学生学习单元操作的相关理论知识后,无法熟练、正确地运用这些知识。例如,在化工原理课程设计和毕业设计中发现30%以上的学生在给设备配管时缺少核验,初步设计精馏塔发现流体力学性能不达标后,20%以上的学生不能正确地调整,在化工原理实验过程中近20%的学生需要在指导老师的协助下才能完成精馏塔操作参数的调节以获得更好的分离效果。显然,这会导致学生在未来从事化工领域工作时应用实践能力和化工专业素养的不足。本教学团队经过分析,认为其原因是化工原理教学内容只是单元操作的基本原理、单元操作过程的设计计算和操作过程调节原理等理论知识,虽然后续会有相关的习题训练,但是缺少对于真实、复杂化工生成案例的讲解和解析,造成了工程实践教学内容的“窄化”。在理论知识层面,化工原理教学内容存在“浅化”的问题。动量传递、热量传递和质量传递,即“三传”,是化工原理的理论基础。化工传递工程是详细阐述“三传”的课程,通常在化工专业学生学习化工原理时,化工传递工程还没有开课。化工原理对“三传”的阐述比较零散、粗略,简单地把单元操作的基本原理视为化工原理的理论基础,造成教学内容的“浅化”。由于缺少“三传”主线的“串联”作用,导致学生无法深刻认识各个单元操作之间的紧密联系,零散的理论知识点无法为学生的应用实践提供有效的理论支撑,进一步加剧了学生应用实践能力的不足。

### 1.2 教学方式存在的问题

为了弥补线下教学学时的不足,以及省级精品

课程建设的要求,本团队从2019年开始探索线上线下混合式教学。团队通过超星学习通构建的线上教学资源包括视频、课件、作业库、试题库、案例库等。目前平台累计开课15期,页面累计浏览量超过400万人次。在开展混合式教学初期,本团队仅仅是把线上教学作为线下教学的补充,开展的线上教学活动包括视频学习、作业、测验和考试等。线上教学弥补了课堂教学的学时不足,给学生提供了自主学习的资源<sup>[15-16]</sup>。然而,本团队发现在混合式教学过程中线上和线下教学之间缺少联动和深度融合,而且线上教学过程中学生与教师的互动不充分,导致学生感觉线上学习比线下学习还枯燥。此外,由于教学内容的“窄化”和“浅化”,导致线下教学的互动环节受到了限制,授课过程以多媒体课件讲解为主,启发式和探究式教学开展不理想。由于以上问题,虽然通过混合式教学学生的应试能力和考试成绩有所提高,但是混合式教学的优势没有被充分开发出来。

### 1.3 学情分析

学生缺少学习兴趣和学习的自觉性是造成课堂抬头率不高的根源,也是当前教育面临的普遍问题。在化工原理的教学过程中也存在这些问题,但是对于化工原理教学其原因具有特殊性<sup>[17-19]</sup>。首先,学生应用实践能力不足是学生缺少学习兴趣的原因之一。由于化工原理知识体系和教学内容的“窄化”和“浅化”,学生的应用实践能力得不到提升,学生学了知识不会运用,学生无法感受到学习的意义和作用,会逐渐失去学习兴趣而怠学<sup>[20]</sup>。其次,由于缺少开展启发式和探究式教学的素材,课堂教学以填鸭式和灌输式教学为主,教学内容枯燥,无法激发学生的学习动力。学生缺少学习兴趣和学习的自觉性,导致学生的自我学习的能力得不到训练,自主解决工程实践问题的能力无法提高,应用实践能力进一步下降,从而陷入恶性循环。

## 2 化工原理“多维度融合”教学改革与实践

针对化工原理教学过程中存在的问题,本团队构建了“多维度融合”教学模式(见图2),通过“生活-教学融合”“科研-教学融合”“线上-线下融合”,提升学生的应用实践能力,激发学生的学习兴趣,使学生应用实践能力和自主学习能力相互促进、同步提高。

### 2.1 “生活-教学融合”使学习有兴趣

团队教师在教学过程搜集整理一些生活中蕴含化工原理知识的案例,通过解析这些案例中的化工原理知识,增加教学的趣味性和生动性,为启发式、

探究式教学提供素材,改变生硬的灌输式教学,使教学过程有温度,使学生对学习有兴趣,实现从教师要求下的“被动抬头”变为兴趣驱动下的“主动抬头”。同时,在解析这些生活现象的过程中,锻炼了学生认识和解决实际问题的能力。例如,通过“浮萍寄清水,随风东西流”解释什么是动量传递;通过“散发乘夕凉,开轩卧闲敞”解释什么是热量传递;通过“遥知不是雪,为有暗香来”解释什么是质量传递。通过触摸对比碳酸饮料开瓶前后瓶身硬度的变化,解释压力对吸收的影响;通过冻梨在冷水里比在热水里解冻的快讲解相变热;通过烫热黄酒的过程讲解蒸馏的原理;通过梅雨季节衣服返潮解释干燥过程中平衡水分与空气状态的关系等。这些案例涉及的化工原理知识包括单元操作的基本原理、单元操作及其设备的设计、单元操作过程调节等,将这些案例以“动量传递”“热量传递”“质量传递”为理论主线进行归纳、串联,使这些知识点更加系统化,有利于学生深度理解其背后的理论原理,使化工原理理论和工程实践有效沟通。

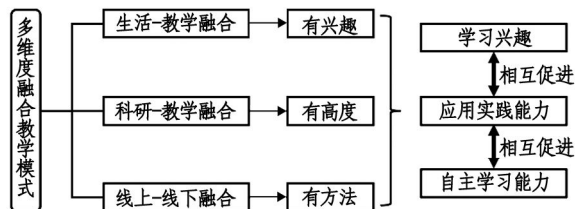


图2 “多维度融合”教学模式

### 2.2 “科研-教学融合”使教学有深度

“科研-教学融合”是培养高素质创新人才的重要途径<sup>[21]</sup>,本团队通过科研-教学融合及时将化工领域的科研成果转化为课堂教学内容,使学生及时掌握最新动态和学科前沿,满足教学对“广度”和“深度”的要求,深入强化学生的工程实践能力和化工专业素养。由于团队教师的科研方向与我校化学工程与工艺专业的专业建设方向一致,团队教师尤其注重将个人科研成果转化为课堂教学内容,这样可以更好地保持人才培养的特色。例如,在传热的教学过程中,引入教师承担国家自然科学基金项目成果,将“神华煤直接液化煤浆预热器中结焦原因”作为教学案例,讲解煤浆流动状态是如何影响传热和传质过程的,以及如何导致煤浆预热器内形成高温缺氧的环境从而发生结焦的<sup>[4]</sup>。本科科研成果涉及的化工原理的知识点包括流体流动的流型、边界层、分子扩散、涡流传质、对流传热和热传导等。显然,通过此成果的介绍可以加深学生对这些

知识点的理解,提升学生运用理论知识解决实际工程问题的能力。“科研-教学融合”不仅可以使学生获得行业发展的最新知识,也可以培养学生的科学研究能力,便于引入科创精神、职业操守和创新精神等思政元素,实现教学的“两性一度”。

### 2.3 “线上-线下融合”使教学有方法

为了充分发挥线上线下混合式教学的优势,教学团队在教学过程中采用“线上提出先导问题→线下反馈问题→线下拓展知识→线上夯实巩固”的逐级递进式流程(见图3),增加了教学的互动性,实现了线上-线下教学的深度融合。具体实施过程如下:第一步,课前通过学习通“讨论”模块在线上提出先导问题,这些问题是“生活-教学融合”中的一些案例。由于是一些生活中常见的现象,学生们容易通过分析或者通过查阅资料找出其中蕴含的知识。由于线上不受课堂教学时间限制,可以预留较多的时间,让学生充分发表观点,在讨论和争论中初步认识基本原理和基础知识。第二步,在线下教学过程中,总结反馈学生解决问题的情况,同时教师深入讲解相关知识点,完成大纲规定的教学内容,深度解析重点难点问题。第三步,在学生已掌握知识点的基础上进行知识拓展,提供更复杂、更专业的单元操作案例让学生分析讨论。案例来源于实际生产过程和教师的科研项目,使课堂教学具备高阶性、创新性、挑战度,同时在实施过程中充分利用网络平台的“抢答”“选人”“投屏”等功能,提高课堂的活跃度,改善课堂体验效果。在教学过程中,重点章节至少安排一次讨论,表1为2022级和2023级开展讨论情况的平均数据。最后,通过线上作业和章节测验等手段,让学生夯实知识基础,巩固学习成果,进一步加深对关键知识点的掌握程度。由于“生活-教学融合”和“科研-教学融合”提供了充足的素材,该教学过程可以更好地进行启发式、探究式、案例式教学,线上和线下都有了充分的师生互动和生生互动,实现了线上线下教学过程的深度融合。

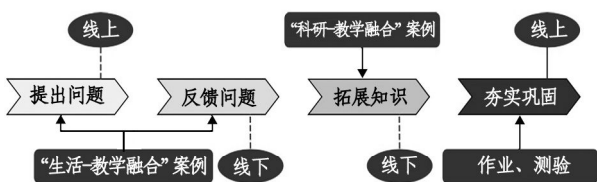


图3 “多维度融合”式线上-线下教学流程

表1 线上“讨论”环节统计数据

| 线上讨论<br>问题数 | 线上生均<br>回帖数 | 线上回帖<br>平均字数 | 线下讨论<br>案例数 |
|-------------|-------------|--------------|-------------|
| 7           | 13          | 261          | 12          |

## 3 “多维度融合”教学模式的成效

本团队在2020级和2021级化学工程与工艺专业的化工原理授课过程中开始搜集整理生活和科研案例素材,形成了“多维度融合”教学的雏形,在2022级化学工程与工艺专业中开始尝试“多维度融合”教学,在2023级化学工程与工艺专业中全面开展“多维度融合”教学。通过“多维度融合”教学模式的实施,培养了学生解决复杂问题的能力,将知识、能力和素质有机融合,促进学生实践创新、养成工程探究素养和科学研究的习惯。学生在探究的过程中对知识的认识逐步加深,感受到学以致用乐趣,激发自主学习的兴趣。初步形成了学生应用实践能力和自主学习能力相互促进、同步提高的局面。

### 3.1 激发学生的学习兴趣

“多维度融合”教学模式实施以来,学生的学习兴趣得到了激发。主要变化是现在学生之间在“讨论”环节的争论增多,学生在课余时间向教师请教问题的情况增多,学生参加化工设计竞赛和化工实验竞赛等学科竞赛的积极性提高。课堂氛围改善,学习兴趣得到了激发,也提升了学生对本课程的满意度,学生的评价就是对本课程和团队教师最好的鼓励,近3学期本课程评教结果均为优秀,团队教师多次被评为学生心目中的好老师。

### 3.2 提升学生工程实践能力

学生的成绩是最好的教学成果,近3年在团队教师指导下,化工专业学生在化工设计大赛、化工实验竞赛等比赛中获得省级以上获奖24项,其中国家奖9项。以2021级化学工程与工艺为例,全班53名学生中有17人在全国大学生化工设计大赛中获得国家奖,这些比赛都需要用到化工原理的知识,学生取得的成绩证明了学生应用实践能力的提升和化工原理教学改革的成功。

### 3.3 带动其他课程建设和专业建设

由于化工原理是化学工程与工艺专业的核心基础课程,本课程的改革和创新也对其他专业课的建设起到了带动作用。本教学团队将此教学方法推广至化工原理实验、化工分离工程、化工设备机械基础和化工制图等其他化工专业基础课的教学中,进一

步提高了化工基础课程群的建设水平。从而提高了学生的专业素养水平,助力化学工程与工艺专业省级一流本科专业建设,促进了本专业人才培养模式、教学资源 and 教师教学水平的提升。

### 3.4 提高学生成绩

学生成绩是评价教学改革效果的重要指标,图4为近5年化工原理期末考试卷面成绩,可以看出随着“多维度融合”教学的实施,学生成绩稳步提高。为了深入评价“多维度融合”教学对学生成绩的影响,以2022级化学工程与工艺专业两个班级共91名学生的成绩为样本进行统计分析。为了保证数据的有效性,选取的学生出勤率在100%,且排除了留级、病休复学等特殊情况。在2022级化学工程与工艺专业的化工原理教学过程中,将线上教学活动分为基础教学活动和“多维度融合”教学活动,其中基础教学活动要求所有学生参加,而“多维度融合”教学活动由学生根据自己的学习能力自愿选择参加。经统计,学生“多维度融合”教学线上任务点完成度在18.5%–100%之间,中位数为89%,依据完成度的中位数将学生分成两组,其中A组的任务点完成度 $\geq 89\%$ ,共46人,B组的任务点完成度 $< 89\%$ ,共45人。

89%,共45人。表2为两组学生成绩的统计结果。为了进一步对比两组学生成绩的差异,采用SPSS软件对两组学生期末考试的卷面成绩进行了t检验。首先由levene方差齐性检验判断两组学生成绩分布是否相同,得到 $F = 4.743$ ,显著性 $P = 0.032 < 0.05$ ,表明两组成绩t检验方差不齐,应该采用Welch校正t检验,结果见表3。可以看出,t值为4.61,显著性 $P < 0.001$ ,A组比B组平均分高出14.14分,表明“多维度融合”教学可以提高学生的成绩<sup>[22-23]</sup>。

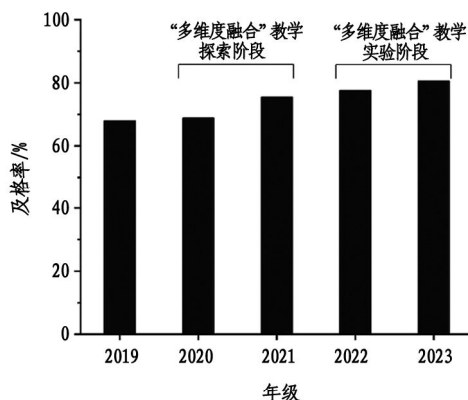


图4 近5年期末考试成绩变化

表2 学生期末考试卷面成绩统计结果

| 分组 | 线上任务完成率     | 人数/人 | 卷面成绩平均值 | 卷面成绩标准差 |
|----|-------------|------|---------|---------|
| A  | $\geq 89\%$ | 46   | 68.08   | 12.30   |
| B  | $< 89\%$    | 45   | 53.94   | 16.60   |

表3 学生期末考试卷面成绩t检验结果

| t    | 自由度 | 显著性(双尾)   | 平均值差值 | 标准误差差值 | 差值95%置信区间下限 | 差值95%置信区间上限 |
|------|-----|-----------|-------|--------|-------------|-------------|
| 4.61 | 81  | $< 0.001$ | 14.14 | 3.07   | 8.03        | 20.23       |

需要指出的是,以上分组方案不排除将学习兴趣不高或者学习能力较差的学生分到了B组,从而导致学生考试成绩较低。因此,为了进一步证实“多维度融合”教学与学生考试成绩之间的关系,对A组学生在“多维度融合”学习中取得的平时成绩(包括讨论、作业、章节测验等成绩)与期末考试卷面成绩进行了相关性分析,结果见表4和图5。可以看出Pearson相关系数为0.432,显著性 $P = 0.003$ ,表明期末考试卷面成绩与“多维度融合”平时成绩之间存在中等相关性,即“多维度融合”教学在一定程度上可以提高学生的考试成绩<sup>[23-24]</sup>。

表4 期末考试卷面成绩与“多维度融合”平时成绩的相关性

| Pearson 相关系数 | 个案数/个 | 显著性   |
|--------------|-------|-------|
| 0.432        | 46    | 0.003 |

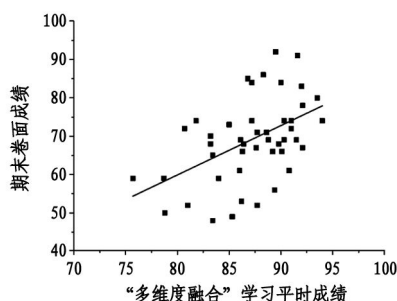


图5 “多维度融合”学习平时成绩与期末考试卷面成绩的相关性

## 4 结论

为了提升化工原理在化工专业人才培养中的核心作用,分析了化工原理教学过程中面临的问题,探索了包含“生活-教学融合”“科研-教学融合”“线上-线下融合”的“多维度融合”教学新模式。此教学模式的实施可以提升学生的应用实践能力,激发学生的学习兴趣,实现学生应用实践能力和自主学习能力相互促进、同步提高的效果,使学生的知识、能力和素质都得到了提高。然而,教学方式创新带来的效果需要长期检验,并且可能面临新的问题,因此,本团队将在未来的教学过程中持续优化和完善“多维度融合”教学模式,进而提升化工原理教学水平和化工专业人才培养质量。

## 参考文献:

- [1] 梁铄,张晓艳,魏亦军. 课程思政背景下的“化工原理”教学探索与实践[J]. 商丘师范学院学报,2024,40(9): 96-98.
- [2] 於建明. 因地制宜培养高素质应用型人才[N]. 光明日报,2025-04-25(6).
- [3] 赵建军,曾小剑,刘沐鑫,等. 大学生创新创业教育教学体系的改革与构建[J]. 辽宁科技学院学报,2023,25(1):42-44,94.
- [4] 刘沐鑫,秦英月,石春杰,等. “案例分析”在应用型高校化工原理教学中的运用与探索——以煤直接液化工艺中的结焦现象为例[J]. 教育现代化,2020,71(7):159-162.
- [5] 张英杰,巩冠群,刘建周,等. 化工原理理论和实践一体化学习模式探索——以精馏教学为例[J]. 高师理科学刊,2018,38(12):87-89.
- [6] 姚运金,连超,陈树海,等. 以工程教育专业认证理念推动化工设计系列实践课的改革[J]. 化工高等教育,2019(3):93-98.
- [7] 田玲,张乐涛,乔伟,等. 化工实验大赛在应用型本科化工人才培养中的作用[J]. 化学工程与装备,2023(7):285-286,252.
- [8] 赵仲霞,杨海涛. 新工科背景下化工类应用型人才校企协同育人建设研究[J]. 中国教育技术装备,2024(8):145-148.
- [9] 秦绪彬,蔡晓敏,韩燕. 产教融合视域下的线上线下混合一流课程建设研究——以南京邮电大学通达学院为例[J]. 工业和信息化教育,2025(1):42-47.
- [10] 向文军. 应用型高校化工原理线上线下混合式一流课程的教学设计与实践[J]. 四川文理学院学报,2024,34(2):79-84.
- [11] 王思琼,郑志磊,周欣,等. 本科教学工作合格评估背景下化工应用型人才培养模式探索[J]. 大学教育,2024(7):118-121.
- [12] 刘亚,曾贤璐,胡鑫,等. “化工原理”在线开放课程的建设与教学实践[J]. 化学教育,2018,39(24):7-14.
- [13] 潘鹤林,宗原,黄婕. 《化工原理》课程中的量纲分析法[J]. 教育教学论坛,2019(2):165-167.
- [14] 宋兰兰,于跃,张杰,等. 《化工原理》在线课程建设探索与实践[J]. 教育教学论坛,2019(1):147-148.
- [15] 南旭莹,杨慧,孙丽丽,等. 压缩学时下提高化工制图教学质量的应对策略——线上线下混合式教学法[J]. 化工高等教育,2018,35(6):60-63.
- [16] 刘红梅,李可意,韩永萍,等. 基于现代教育模式的小学时“化工原理”教学改革与实践[J]. 教育教学论坛,2018(21):123-124.
- [17] 陶彩虹,张玉洁,盛丽,等. 改革考核方式,激发学习兴趣——化工原理教学方法探索[J]. 化工高等教育,2020,37(2):137-140.
- [18] 田怡. 提高学生对“化工原理”学习兴趣的探索[J]. 乐山师范学院学报,2015,30(4):122-125,132.
- [19] 袁军. 基于生活案例的化工原理课堂教学[J]. 教育教学论坛,2018(5):182-183.
- [20] 王晓达,叶长燊,李玲,等. 浅谈化工原理教学中学生兴趣和能力的培养[J]. 化工高等教育,2021,38(3):109-114.
- [21] 陈辉伦,胡晔凝,皋希兰,等. 基于科教融合的“环境生物地球化学”研究型教学探索[J]. 安庆师范大学学报(自然科学版),2024,30(4):116-122.
- [22] 谢芳娟. 应用型本科院校新生生涯适应力现状及影响因素分析[J]. 创新创业理论研究与实践,2025(8):195-198.
- [23] 武松. SPSS 实战与统计思维[M]. 北京:清华大学出版社,2024:108-239.
- [24] 冯艳茹,李昊洋,栾芳,等. 基于 SPSS 软件分析成绩与化学教学方法的相关性[J]. 佳木斯大学社会科学学报,2025,43(2):182-184.

责任编辑:李云

## 基于 Factory IO 与 PLC 虚拟仿真教学改革与探索

王 强<sup>1</sup>, 黄迎辉<sup>2\*</sup>, 陈章宝<sup>1</sup>, 魏临通<sup>3</sup>

(1. 蚌埠学院 电子与电气工程学院, 安徽 蚌埠 233030; 2. 蚌埠学院 数理学院, 安徽 蚌埠 233030;  
3. 西安工程大学 电子信息学院, 陕西 西安 710600)

**摘要:**传统 PLC 教学因设备成本高、场景抽象化、学生参与度低等问题, 难以满足智能制造时代对学生工程实践能力的要求。本研究提出“虚实融合、项目驱动”教学模式, 通过集成 Factory IO 虚拟仿真平台与西门子 PLC 硬件, 构建“认知-仿真-实操-创新”四阶递进式教学体系。实践表明, 该模式显著降低实验成本, 孪生多种高危场景训练工况提高了学生工程素养与创新能力, 为地方应用型本科院校工科教学改革提供了可复制的范式。

**关键词:** PLC 教学; Factory IO; 虚拟仿真; 工科教学改革

中图分类号: G642; TP273

文献标识码: A

文章编号: 2095-297X(2026)02-0117-05

## Reform and Exploration of Teaching Based on Factory IO and PLC Virtual Simulation

WANG Qiang<sup>1</sup>, HUANG Yinghui<sup>2\*</sup>, CHEN Zhangbao<sup>1</sup>, WEI Lintong<sup>3</sup>

(1. School of Electronic and Electrical Engineering, Bengbu University, Bengbu, 233030, Anhui;  
2. School of Mathematics and Physics, Bengbu University, Bengbu, 233030, Anhui;  
3. School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710600, Shaanxi)

**Abstract:** Traditional PLC teaching has been challenged by high equipment costs, abstract instructional scenarios, and low levels of student engagement, hindering the cultivation of practical engineering skills required in the era of intelligent manufacturing. In response, a “virtual-real integration, project-driven” teaching model has been proposed, wherein the Factory IO virtual simulation platform is integrated with Siemens PLC hardware to construct a four-level progressive teaching system comprising “cognition-simulation-practical operation-innovation”. Practical implementation has demonstrated that this model significantly reduces experimental costs, broadens the scope of training in high-risk scenarios, and effectively enhances students’ engineering literacy and innovative capabilities. This approach provides a replicable paradigm for engineering education reform in local application-oriented undergraduate institutions.

**Key words:** PLC teaching; Factory input/output; virtual simulation; engineering education reform

传统 PLC 教学长期面临设备投入高、场景抽象化、学生参与度低等瓶颈<sup>[1]</sup>。硬件实验箱功能单一且成本高昂, 难以构建完整产线级控制系统<sup>[2]</sup>; 抽象化的教学载体, 如指示灯、按钮导致学生无法直观理解工业设备状态, 且高危场景实训覆盖率不足。与此同时, 《中国教育现代化 2035》与教育部《虚拟仿真实验教学课程建设指南》明确提出“虚实融合”

战略, 要求依托工业软件构建联动式实践教学体系, 为教学改革提供了政策支撑与技术路径<sup>[3]</sup>。图 1 为传统仿真教学目前所处困境和虚实融合方案优势分析。

本研究提出“虚实融合、项目驱动”教学模式, 通过集成 Factory IO (用于学习自动化编程的 3D 模拟软件) 虚拟仿真平台与西门子 PLC 硬件<sup>[4-5]</sup>, 构

收稿日期: 2025-04-09 \* 通讯联系人

基金项目: 安徽省高校省级质量工程项目 (2024xjzts059; 2023zygzs096)。

作者简介: 王强 (1979-), 男, 安徽宿州人, 副教授, 博士。E-mail: wq@bbc.edu.cn

建“认知 - 仿真 - 实操 - 创新”四阶递进式教学体系,如图 2 所示。基于数字孪生技术实现 PLC 程序与虚拟场景的双向数据交互<sup>[6]</sup>,支持实时调试与动态故障模拟。实践表明,该模式显著降低了实验风险与成本,为应用型本科院校工科专业改革提供了可复制的创新范式,有效弥合了人才培养与产业需求间的鸿沟。

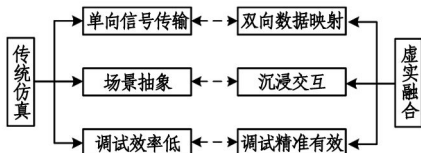


图 1 虚实融合与传统仿真优势对比

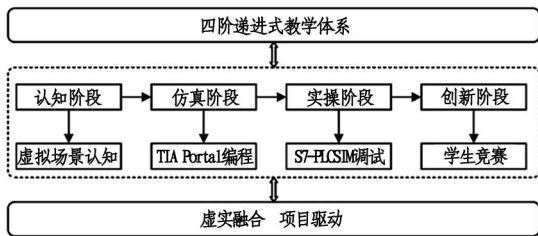


图 2 四阶递进式教学体系

## 1 Factory IO 仿真教学系统构建

### 1.1 系统设计的理论基础与教育目标

本研究以布鲁姆教育目标分类理论为框架,聚焦“认知 - 仿真 - 实操 - 创新”能力层级的递进培养,结合《中国教育现代化 2035》提出的“虚实融合”战略,构建了基于 Factory IO 的仿真教学系统。系统设计紧扣应用型本科院校的工程教育需求,旨在通过虚拟仿真技术解决传统教学中设备抽象化、场景碎片化等痛点。例如,在认知阶段,学生通过 Factory IO 的 3D 场景直观理解传感器与执行器的联动逻辑;在仿真应用与实操阶段,借助 TIA Portal (西门子全集成自动化工程平台) 编程环境实现 PLC 程序的调试与优化<sup>[7]</sup>;在创新阶段,基于柔性产线设计项目,培养学生跨学科解决复杂工程问题的能力<sup>[8]</sup>。这一设计不仅呼应了教育部对虚拟仿真实验课程的指导要求,还为智能制造人才培养提供了可量化的能力提升路径。

### 1.2 虚实融合的架构设计与技术实现

系统采用“虚拟层 - 控制层 - 通信层”三层架构,如图 3 所示,形成闭环教学环境。虚拟层依托 Factory IO 平台构建工业场景库,涵盖智能分拣、液位控制等典型场景,通过 Unity 引擎实现高精度物理仿真(如货物滑落、传感器遮挡),并集成国产

PLC 模型适配本土化教学需求。

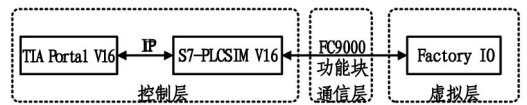


图 3 系统架构

控制层以西门子 TIA Portal 为核心,支持 PLC 程序编写与 S7-PLCSIM 虚拟调试,学生可通过模块化编程框架快速掌握 Profinet (工业以太网实时通信协议)、Modbus-TCP (设备间非实时数据通信) 等工业协议的逻辑设计。通信层通过以太网协议与功能块 FC9000 实现虚实数据双向映射,例如将 Factory IO 中的光电传感器信号 (IO.0) 实时反馈至 PLC 输入寄存器,同时 PLC 输出指令 (Q0.1) 驱动虚拟电机启停,动态响应时间小于 100 ms。这一架构突破了传统仿真的单向信号限制,实现了“场景可设计、程序可验证、效果可追溯”的沉浸式教学。

### 1.3 核心功能的教学适配与创新

系统的核心功能围绕教学场景的柔性化构建与动态评价展开。在场景构建中,学生通过拖拽式界面自主设计虚拟产线,设置传送带速度、气缸行程等参数,实现“所见即所得”的交互体验。多模式切换功能支持手动调试、自动运行与故障模拟,例如在故障模式下,系统随机触发通信中断或逻辑错误,提升学生从信号追踪到逻辑修正的完整调试能力。虚实同步模块通过 OPC UA 协议实现 PLC 变量与虚拟场景标签的实时绑定,以智能分拣系统为例,PLC 脉冲频率 PWM 信号直接控制机械臂分拣速度,虚拟场景同步呈现效率变化。教学管理模块则通过记录调试路径,生成可视化学习轨迹图,帮助教师精准定位知识薄弱点,并结合多维评分体系生成能力雷达图,为教学优化提供数据支撑。

### 1.4 关键技术的创新突破与优化

在技术实现层面,系统通过通信配置优化与实时性保障机制确保教学稳定性。针对教学中 32% 的通信故障源于 IP 冲突的问题,系统内置一键检测工具可自动修复网络配置;变量表管理采用 TIA Portal 全局变量命名规则,将 Factory IO 标签如“Conveyor\_Run”映射至标准化 PLC 地址, DB1.DBX0.0,减少地址混淆风险。为确保虚实交互的实时性,系统采用轻量级 JSON 格式压缩传输数据,带宽占用降低 60%,并通过本地缓存机制实现断网续仿,避免教学进程中断。此外,错误注入教学法被深度集成,教师可预设硬件异常、协议错误等四类典型故障,例如模拟网段冲突导致 PLC 离线,引导学生

通过变量监视器与场景动画协同排查问题。数据来源于2023级电气工程专业学生的实验记录分析(样本量 $N=120$ ),通过实验日志统计得出。

### 1.5 系统的可扩展性与产教协同机制

本研究充分考虑未来技术升级与产业需求适配性。一方面,通过开放式接口支持云端部署与多终端访问,学生可通过移动端轻量化工具实现远程实训;另一方面,系统兼容多种工业协议,可无缝对接企业真实设备,推动校企协同开发。例如,汽车零部件企业将产线数字孪生模型导入系统,学生基于实际生产需求优化分拣逻辑,最终方案被企业采纳并应用于实际产线。这一机制不仅提升了教学场景的真实性,还为学生提供了直面工业复杂问题的实战机会,为培养“懂理论、精技术、能创新”复合型人才奠定了坚实基础。

## 2 分层案例教学设计

工业自动化教学的核心目标在于培养学生的工程实践能力与创新思维,而分层案例设计是实现这一目标的关键路径。设计以“基础能力奠基-综合应用强化-创新实践辐射”为主线,构建了基于Factory IO与西门子PLC的分层案例教学体系,如图4所示。通过递进式教学设计,学生从单一设备控制逐步进阶至复杂系统开发,最终通过竞赛与企业项目实现能力跃迁。

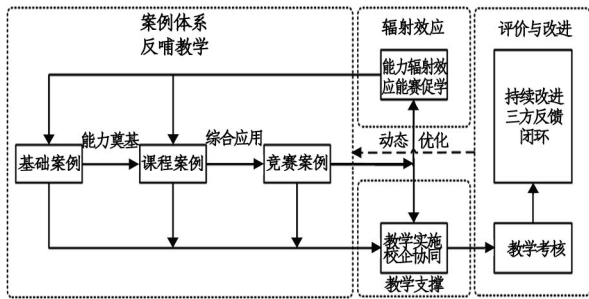


图4 分层案例教学体系

图4系统呈现了案例设计的逻辑框架。基础案例聚焦传感器-执行器联动逻辑,课程案例深化多协议协同与动态优化,竞赛案例推动跨学科创新;教学实施依托校企协同机制,将企业真实需求融入课堂;考核与改进机制通过数据化追踪与三方反馈闭环,确保教学内容与产业发展同步迭代。这一设计不仅体现了“虚实融合、项目驱动”的教改理念,更通过“以赛促学、以学促产”的辐射效应<sup>[7]</sup>,为应用型人才培养提供了可复制的实践范式。

### 2.1 基础案例:传送带启停控制

传送带启停控制作为PLC教学的入门案例,聚

焦传感器与执行器的联动逻辑培养。学生在Factory IO中调用“From A to B”场景,通过拖拽光电传感器(I.0)、电机(Q0.1)等元件构建基础产线,并在TIA Portal中编写启停程序。教学中引入“防抖延时”设计,例如通过TON定时器过滤传感器误触发信号,使误触率从15%降至3%。学生在虚拟调试阶段可实时观察货物运输动画,验证逻辑正确性。实践表明,该案例使实验耗时从传统教学的2课时缩短至1课时,学生程序一次通过率提升至78%,为后续复杂案例分析奠定了扎实的编程基础。

### 2.2 课程案例:智能分拣系统

智能分拣系统作为进阶案例,旨在培养学生多传感器协同与工业协议应用能力<sup>[9]</sup>,是“虚实融合、项目驱动”教学模式的核心实践载体,如图5所示。学生需在Factory IO中搭建包含颜色传感器、气动机械臂的虚拟产线,并通过TIA Portal编写分拣逻辑<sup>[10]</sup>。例如,基于RGB信号识别货物颜色,结合Profinet协议控制机械臂动作<sup>[11]</sup>。教学中引入动态优化环节,要求学生调整脉冲频率提升分拣效率,此案例不仅强化了学生的系统性思维,还通过虚实联动调试提升了复杂问题解决能力,使学生在多设备协同调试与非标协议应用两个维度的能力显著提升,充分验证了虚拟仿真技术对复杂工程问题教学的有效性。



图5 智能分拣系统

### 2.3 教学实施:校企协同的闭环路径

教学实施采用“三阶段三主体”协同模式,构建“校-企-生”联动的闭环路径,深度融合理论教学、工程实践与创新培养,如图6所示。第一阶段由教师主导,通过Factory IO虚拟仿真平台完成基础理论讲授与场景搭建,例如在传送带控制案例中,学生基于TIA Portal编程环境掌握传感器-执行器联动逻辑,并结合防抖延时优化将误触率从15%降至3%,夯实“认知-应用”能力转化基础;第二阶段引入企业工程师作为协同主体,以真实工业需求,如汽车零部件分拣产线效率提升驱动教学,指导学生完成Profinet协议的多PLC协同调试与程序优化;第三阶段以竞赛为牵引,要求学生提交虚实联调方

案并参与企业评审,优秀方案可直接导入企业数字孪生系统测试,形成“教学-竞赛-产业”协同反哺的生态闭环。这一路径不仅实现了教学场景与工业需求的无缝对接,还通过企业反馈机制持续优化课程内容。

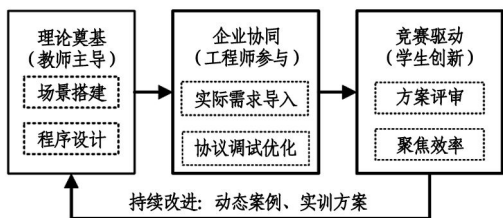


图6 校企协同“三阶段三主体”教学闭环

## 2.4 教学考核与持续改进机制

考核体系采用“过程性评价+终结性评价”双轨模式,覆盖能力培养全周期。过程性评价依托系统自动生成的学习轨迹图,量化分析调试效率,如故障修复时间、代码规范性如注释完整性等指标;终结性评价则通过虚实联调答辩与企业专家评分,重点考察方案创新性与工业适配性。根据近两学期数据,对比2022级(传统教学组)与2023级(虚拟教学组)学生的课程考核结果,采用SPSS 26.0进行显著性检验( $P < 0.05$ )。学生工程素养达标率从62.4%提升至90%,工业协议应用能力达标率从12.3%跃升至56.3%。持续改进机制则通过“教师-学生-企业”三方反馈闭环实现,每学期末收集企业技术痛点,动态更新故障案例库;针对学生薄弱环节,增设专题实训模块。这一机制确保了教学内容与产业发展的同步迭代。

## 2.5 分层能力培养的辐射效应

工业自动化教学的核心目标在于培养学生的工程实践能力与创新思维,而分层案例设计是实现这一目标的关键路径。基于布鲁姆教育目标分类理论,本研究以“认知-应用-创新”能力层级为框架,构建了“基础案例-课程案例-竞赛案例”三级递进式教学体系(见图7)。通过从单一设备控制到复杂系统开发的渐进式训练,学生逐步掌握传感器联动逻辑、工业协议协同调试及跨学科创新设计能力,最终通过企业项目与竞赛实现能力跃迁。

分层案例设计通过“基础-课程-竞赛”三级进阶,形成能力培养的辐射效应。基础案例夯实编程与调试技能,课程案例强化系统设计与协议应用,竞赛案例则推动跨学科创新。以全国大学生自动化竞赛为例,其实现PLC与云端数据库的实时交互,提升仓储分拣效率,充分体现了分层教学的实践价

值。这一设计需集成PLC、机器视觉与物联网技术,设计支持多协议切换的智能仓储控制系统,并通过OPC UA协议实现PLC与云端数据库的实时交互,提升仓储分拣效率,充分体现了分层教学的实践价值。这一设计不仅提升了学生的技术整合能力,还通过竞赛成果反哺教学,形成“以赛促学、以学促产”的良性循环。

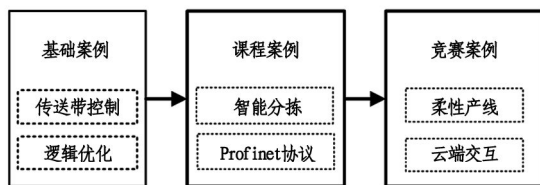


图7 分层案例教学能力培养路径

## 3 教学反馈与改进

为验证“虚实融合、项目驱动”教学模式的有效性,如图7所示,以蚌埠学院电子与电气工程学院电气工程及其自动化专业学生为研究对象,采用对比分析法与问卷调查法,从定量与定性两个维度系统评估虚拟仿真教学与传统教学的差异。通过统一培养方案与考核标准,对比2022级(传统教学组)与2023级(虚拟教学组)学生的课程成绩及学习反馈,呈现Factory IO在PLC教学中的实际价值。

### 3.1 教学评价:数据驱动的功效分析

通过对比两届学生的课程成绩发现,虚拟仿真教学模式显著提升了学生的综合能力。如表1所示,虚拟教学组高分段(85-100分)占比从3.36%提升至8.40%,中高分段(75-85分)占比从31.94%增至35.30%,而低分段(60-75分)占比下降8.4%。这一数据表明,虚拟仿真技术通过沉浸式场景与实时调试机制,有效降低了学习门槛,助力学生突破复杂逻辑编程与系统调试的瓶颈。

表1 学生课程成绩分布

| 分数段/分  | 传统教学组/% | 虚拟教学组/% |
|--------|---------|---------|
| 85-100 | 3.36    | 8.40    |
| 75-85  | 31.94   | 35.30   |
| 60-75  | 64.70   | 56.30   |

通过匿名问卷调查(有效样本 $N = 120$ )发现,89%的学生认为Factory IO“显著提升了学习效果”,95%的学生对虚实融合模式“表现出浓厚兴趣”,87.5%的学生认可虚拟调试“避免了高压设备操作风险”(见图8)。典型案例中,学生反馈“通过

3D 动画直观理解 PLC 程序与设备动作的关联性”“动态故障模拟让我掌握了工业现场排查问题的系统性思维”。

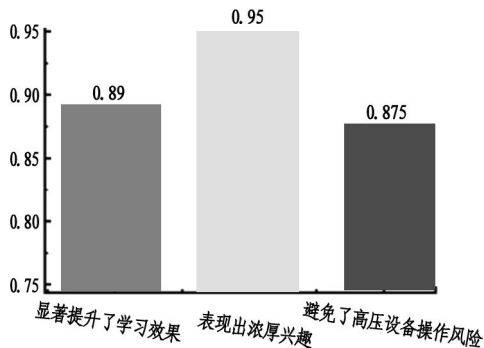


图 8 调查问卷图

### 3.2 教学改进:基于反馈的持续优化

根据教学评价结果,研究提出以下改进策略:动态更新故障案例库,针对学生薄弱环节(如工业协议配置错误率 65%),新增企业真实故障场景(如 Profinet 通信丢包、传感器信号漂移),强化复杂问题解决能力训练;分层实训模块开发,基于成绩分布差异,设计“基础-进阶-高阶”三级实训任务,适配不同能力层级学生的学习需求。例如,针对低分段学生增设“传感器防抖逻辑”专项练习,针对高分段学生开放多 PLC 协同控制挑战项目;校企协同评价机制,邀请企业工程师参与终结性考核评分,重点考察方案的工业适配性(如成本控制、协议兼容性),推动教学内容与产业需求深度对接。

实践表明,改进后学生的工业协议应用达标率从 56.3% 提升至 73.8%,企业满意度评分达 4.8/5.0( $N=30$  家)。这一闭环反馈机制不仅验证了虚实融合模式的可推广性,也为后续“企业案例-教学场景-竞赛项目”三元联动体系的构建提供了数据支撑。

## 4 结论

本研究针对传统 PLC 教学中设备投入高、场景抽象化、学生参与度低等核心问题,提出了“虚实融合、项目驱动”的教学改革模式,通过整合 Factory IO 虚拟仿真平台与西门子 PLC 硬件,构建了“认知-仿真-实操-创新”四阶递进式教学体系。基于数字孪生技术,实现了 PLC 程序与虚拟场景的双向实时交互,突破了传统仿真的单向信号限制,为应用型

工科人才培养提供了可复制的技术范式。

未来研究将聚焦两个方向:一是开发基于 Unity 引擎的轻量化移动端仿真工具,支持学生随时随地的虚实联调训练;二是构建“企业案例-教学场景-竞赛项目”三元联动机制,推动产教深度融合。本研究成果为地方应用型本科院校的工科教学改革提供了理论支撑与实践路径,对培养智能制造时代亟需的高素质工程技术人才具有重要参考价值。

### 参考文献:

- [1] 张威. 新工科背景下 PLC 技术与应用课程教学改革探索[J]. 模具制造, 2025, 25(2): 142-144.
- [2] 杜付鑫, 崔维一, 程天宇, 等. 连续体机器人通用实验平台的设计与应用[J]. 实验技术与管理, 2025, 42(2): 37-43.
- [3] 中共中央办公厅, 国务院办公厅. 中国教育现代化 2035 [EB/OL]. (2019-02-23) [2024-12-19]. <https://www.gov.cn/zhengce/2019-02/23/content5367987.htm>.
- [4] 武晓莉, 介婧, 侯北平, 等. 虚实融合的“智能控制”课程教学改革[J]. 教育教学论坛, 2021(42): 61-64.
- [5] 李秀忠, 彭一航, 陈思涛, 等. Factory IO 在 PLC 应用技术课程虚拟仿真教学中的应用[J]. 中国设备工程, 2024(5): 253-255.
- [6] 蒋太波. 基于数字孪生技术的智能制造虚拟仿真实训基地设计与建设研究[J]. 造纸装备及材料, 2024, 53(12): 187-189.
- [7] 魏树国, 张少伍, 周超. 基于新工科机械控制工程基础课程改革的探讨[J]. 河北北方学院学报(自然科学版), 2022, 38(7): 61-64.
- [8] 徐鹿眉, 乔爽, 聂相举, 等. 应用型大学电气控制与 PLC 课程教学改革与研究[J]. 中国设备工程, 2025(5): 258-260.
- [9] 丁江涛, 王帅, 王强. 基于机器视觉与 PLC 的工业零件自动检测及分拣系统[J]. 蚌埠学院学报, 2023, 12(5): 82-87.
- [10] 姜少燕, 贾秋霜, 解永辉, 等. 面向现场工程师培养的课堂教学任务实施探讨——以智能物料分拣 PLC 控制系统为例[J]. 装备制造技术, 2024(6): 92-94, 98.
- [11] 罗国荣, 戚金凤. 基于数字孪生的物料分拣工作站的设计[J]. 北京工业职业技术学院学报, 2025, 24(1): 12-17.

责任编辑:李壮

## 基于 AI 赋能的供应链管理课程教学改革与实践探索

王翠\*, 周宇

(宿州学院 商学院, 安徽 宿州 234000)

**摘要:** 针对供应链管理课程教学中存在的理论与实践脱节、学生技术应用与创新能力不足等问题, 研究探讨人工智能在优化教学资源、支持个性化学习、强化实践教学等方面的赋能作用。构建“三阶段-多模块-AI 融入”的混合式教学模式, 涵盖自主学习、线下互动与实践、线上拓展三大阶段, 并融入理论基础、实践操作、技术应用、创新协作等多个教学模块。实践结果表明, 该模式有效提升了学生的学业成绩、实践能力与学习满意度, 为同类课程智能化教学改革提供了可操作的方案与参考。

**关键词:** 供应链管理; 人工智能; 混合式教学

中图分类号: G642; F25

文献标识码: A

文章编号: 2095-297X(2026)02-0122-07

### Teaching Reform and Practical Exploration of Supply Chain Management Course Based on AI Empowerment

WANG Cui\*, ZHOU Yu

(School of Business, Suzhou University, Suzhou, 234000, Anhui)

**Abstract:** In response to the problems of disconnection between theory and practice, insufficient technical application and innovation abilities among students in supply chain management courses, it systematically explores the enabling potential of artificial intelligence in optimizing teaching resources, supporting personalized learning, and strengthening practical teaching in the paper. A blended teaching model integrating “three-stage, multi-module, and AI integration” is constructed, covering three major stages: self-learning, offline interaction and practice, and online expansion, incorporating multiple teaching modules such as theoretical foundations, practical operations, technology applications, and innovation collaboration. Practice has shown that this approach can effectively enhance students' academic performance, practical abilities, and learning satisfaction, providing an operable implementation plan and reference for the intelligent teaching reform of similar courses.

**Key words:** supply chain management; artificial intelligence; blended teaching

供应链管理在现代商业环境中居于战略核心地位, 是构筑企业竞争优势的关键环节, 其人才培养的质量, 直接关系到产业链整体的韧性、效率与可持续发展。随着全球化竞争不断加剧, 消费者需求日益个性化与多样化, 供应链运作面临更高复杂性与动态性挑战。与此同时, 以人工智能 (AI)、大数据、物

联网为代表的新一代信息技术正深刻重构供应链的运作模式与生态体系, 智慧物流、智能预测、自动化决策等已成为行业发展的主流趋势<sup>[1]</sup>。在此背景下, 行业对既具备扎实实践能力、又拥有技术创新素养的高素质供应链管理人才的需求日益迫切<sup>[2]</sup>。应用型本科供应链管理课程的人才培养, 不仅需夯

收稿日期: 2025-10-17 \* 通讯联系人

基金项目: 安徽省教育厅高等学校省级质量工程项目 (2023xjzts069, 2024jyxm0441); 宿州学院教学创新团队 (szxy2024extd02)。

作者简介: 王翠 (1983-), 女, 安徽宿州人, 副教授, 博士。E-mail: wangcui@ahszu.edu.cn

实学生的系统理论知识,更应强化其运用 AI 等技术解决复杂供应链实际问题的能力。

然而,当前高校供应链管理课程大多数仍普遍沿用传统教学模式,存在理论教学与行业实践脱节、教学方法单一、学生主动性不足等问题,难以有效培养学生的技术应用能力与创新思维<sup>[3]</sup>。线上线下混合式教学因其灵活性和互动性,已成为高等教育改革的重要方向,并在多学科中验证了其提升学习自主性的潜力<sup>[4]</sup>。AI 技术的进步,特别是生成式 AI 在教育中的初步应用,为混合式教学改革提供了新机遇<sup>[5-6]</sup>。

近年来,AI 在教育领域的应用逐步深化,研究集中于个性化学习路径推荐<sup>[7]</sup>、智能答疑、学习行为分析<sup>[8]</sup>与自动化评估<sup>[9]</sup>等方面,展现出较强的教学支持能力。在供应链领域,相关研究多聚焦于 AI 在需求预测、库存优化、路径规划等场景的行业应用<sup>[10-12]</sup>,然而将其系统引入教学过程的研究仍较有限。尽管已有研究尝试通过 AI 驱动的虚拟仿真实验增强学生对真实环境的认知<sup>[13]</sup>,但整体仍处于局部试点阶段,尚未实现 AI 与混合式教学在目标、内容、方法与评价上的深度融合,特别是在应用型本科教育中,缺乏一套系统化、可推广的 AI 深度融合教学模式,这已成为制约课程教学质量进一步提升的关键瓶颈。

基于此,本研究聚焦应用型本科供应链管理课程的教学痛点,构建一种以 AI 为核心支撑的混合式教学模式。研究首先剖析当前教学现状与核心挑战,继而探讨 AI 技术在教学资源优化、个性化学习支持与实践能力强化等方面的赋能潜力,提出“三阶段-多模块-AI 融入”的混合式教学模式架构,并明确 AI 融合的实施策略与效果评估。研究成果旨在提升课程教学质量,培养学生的技术整合与实践创新能力,为同类课程提供可复制的教学范式,对培养适应产业智能化转型需求的高素质应用型人才具有重要的理论与实践意义。

## 1 供应链管理课程教学现状与核心挑战

### 1.1 教学现状

当前,应用型本科高校的供应链管理课程教学模式在一定程度上延续了传统商科教学的特点,教学方法以教师课堂讲授为主,辅以 PPT 演示,并结合少量案例讨论和小组作业,学生主动参与和深度思考的空间有限。课程内容侧重于供应链管理理论体系的系统性与完整性,覆盖采购、生产、库存、物流及客户关系管理等核心模块,然而,针对大数据分

析、AI、物联网等新兴技术在供应链领域的应用,教材更新与课程内容导入相对滞后,未能充分反映行业技术发展的前沿动态。值得肯定的是,部分高校已开始重视产教融合与实践教学环节,通过开展企业专家讲座、组织企业参观、共建校企合作实习基地等方式,尝试搭建理论与实践之间的衔接桥梁。部分院校还引入了供应链仿真软件,让学生在模拟环境中体验需求预测、库存优化、物流调度等决策过程<sup>[14]</sup>。尽管如此,这些实践探索仍存在一定局限,在深度上,多停留在“观摩式”“浅尝式”层面,未形成贯穿课程全程的系统化实践教学体系;在广度上,覆盖的学生群体、涉及的供应链场景较为有限,未能从根本上破解传统教学中理论与实践脱节、技术与教学割裂等结构性问题。

### 1.2 核心挑战

#### 1.2.1 理论与实践脱节

随着全球化和数字化的发展,供应链环境日益复杂多变,新的商业模式和技术创新层出不穷,如平台型供应链、区块链溯源等,但当前课程使用的教材案例多滞后于行业实践,部分案例甚至停留在传统供应链场景,与真实产业环境存在显著差距。学生虽然掌握了理论知识,却难以将其迁移至企业实际面临的复杂问题中,面对供应链中断应对、多主体协同优化等真实场景时,常因缺乏实践方法论支撑而无从下手,理论知识难以有效转化为解决实际问题的能力。此外,传统的教学模式往往侧重于静态的理论知识传授,忽视了对学生适应变化和持续学习能力的培养,这进一步加剧了学生毕业后与供应链行业需求的适配差距。

#### 1.2.2 学生创新与技术应用能力培养不足

课堂上传统的“教师主导、学生被动接收”的单向灌输式教学模式仍占主导,师生互动多停留在问答式浅层交流,缺乏激发学生主动思考的探究性环节,难以充分激发学生的学习兴趣 and 主动参与的积极性,批判性思维、团队协作等核心能力难以通过课堂场景有效培养。与此同时,面对供应链行业的数字化、智能化转型,课程内容对 AI、大数据分析、物联网等前沿技术的覆盖度和深度不足,学生缺乏对这些新技术如何应用于供应链优化、决策支持的系统认知和实践训练,导致其技术素养和创新应用能力难以满足行业发展需求。

#### 1.2.3 评价体系与师资能力的局限性

课程考核方式往往采用期末闭卷考试,对学生知识记忆的考察多于对其分析问题、解决问题能力以及创新能力的评价,过程性评价(如平时作业、课

堂参与、小组项目)虽有涉及,但缺乏标准化的评分维度与科学的量化方法,难以全面、客观反映学生的综合能力发展与学习过程动态表现。在师资能力方面,教师队伍对于 AI、大数据等新兴技术的理解和应用能力参差不齐,部分教师仅能掌握基础技术概念,将其有效融入教学设计和实践的能力有待进一步加强。少数教师虽具备技术基础,但因缺乏供应链行业一线实践经验,难以结合企业真实需求设计教学案例,也限制了教学内容的深度和鲜活性。

## 2 人工智能对供应链管理课程教学的赋能作用

AI 技术的快速发展,特别是深度学习、自然语言处理等领域的突破,正深刻变革各行各业,也为教育领域解决传统教学痛点提供了强大的技术支持<sup>[15]</sup>,在供应链管理课程教学改革中展现出多维度赋能潜力。

### 2.1 支持供应链关键知识点的个性化学习

供应链管理课程中的需求预测、库存优化、网络设计、协调管理等核心知识模块,往往涉及复杂的定量模型与动态决策逻辑,学生理解程度差异显著。依托大数据分析 with 智能算法, AI 系统可实时捕捉学生的学习行为数据,结合知识掌握程度与认知能力差异,构建个性化学习画像,并据此推送定制化学习资源与路径。例如,对牛鞭效应传导逻辑理解不深的学生,精准推送基于啤酒游戏仿真数据的可视化分析案例与交互式练习;对需求预测误差率高的学生,匹配行业真实销售数据 + AI 预测工具的定制化实操任务。此外, AI 还能根据学生的学习进度和能力,动态调整教学难度和内容,实现因材施教与供应链课程核心能力培养的精准匹配,避免“一刀切”教学的弊端,既提升学习效率,又激发学生的学习兴趣和主动性。

### 2.2 发挥供应链教学智能辅助价值

AI 可承接供应链教学过程中重复性强、耗时长辅助工作,帮助教师聚焦核心教学环节。在课后服务端,针对学生高频提问的专业问题如双重边际效应缓解、库存水平的确定、供应链协调规划等, AI 通过自然语言处理解析问题核心,结合理论模型生成步骤化解答思路,并自动关联专题讲解视频。在教学决策端, AI 整合学生在供应链的设计与优化、采购管理、供应链绩效评价等模块的学习数据,生成可视化的供应链核心技能掌握热力图,帮助教师精准定位教学重点和难点,科学调整教学内容与授课节奏。在作业批改端, AI 可自动批改客观性作业,

标注共性错误与典型问题,如忽略不确定性因素对库存决策的影响、未考虑运输成本对供应链整体效益的制约等,为课堂讲评提供精准方向。此外, AI 可自动记录学生在虚拟仿真实验中的操作轨迹、课堂互动中的参与度,为教师全面评估学生学习状态提供数据支撑,进一步提升教学管理效率。

### 2.3 提供丰富教学资源与交互

传统教学中,高质量的供应链案例与仿真环境开发成本高、内容更新慢。 AI 可从资源生成与实践交互两大维度实现突破。在教学资源开发方面,生成式 AI 可基于最新行业研究报告、企业年报,或是跨境电商供应链中断、原材料价格波动等突发公共事件,快速生成供应链韧性优化、成本管控等贴合行业实际的实时教学案例,帮助教师及时更新课程内容,让教学紧跟行业发展前沿。在实践教学交互方面, AI 驱动的供应链仿真平台可完整模拟从原材料采购到生产加工、配送,直至把产品送到用户手中的全链条运作,学生在虚拟环境中开展供应商选择、生产排程、采购提前期调整等决策操作时, AI 能实时反馈决策行为对供应链总成本、客户满意度、库存周转率等核心指标的影响;同时,平台可模拟港口关闭、用户需求爆发式增长等突发场景,引导学生在动态环境中制定应急方案,有效训练其应急决策与问题解决能力。

## 3 人工智能赋能供应链管理混合式教学模式构建

基于 AI 在高等教育领域展现出的强大赋能作用,结合供应链管理课程理论性强、实操要求高、技术应用场景丰富的学科特点,构建适配供应链管理教学需求的“三阶段 - 多模块 - AI 融入”的混合式教学模式架构(见图 1)。该模式将课程教学过程划分为三个阶段,并围绕多个教学模块展开,同时在各阶段和模块中有机融入 AI 技术,以实现教学目标的有效达成。

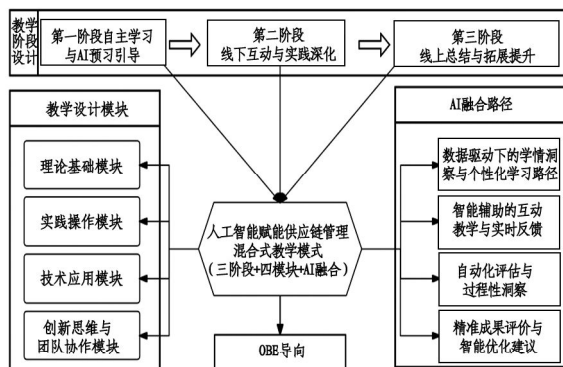


图 1 人工智能赋能供应链管理混合式教学模式

### 3.1 混合式教学模式三阶段构成

#### 3.1.1 第一阶段:自主学习与 AI 预习引导

本阶段聚焦供应链管理基础理论与核心概念的初步构建。学生利用智能教学平台进行线上预习,内容涵盖供应链结构、需求预测、库存模型、协调机制等关键知识点。AI 预习模块会基于学生专业背景与前期学习数据,精准推送与供应链场景结合的拓展资源。同时,平台嵌入轻量化供应链虚拟仿真实验,学生可提前完成简单的需求预测、库存水平设定等操作,初步体验供应链管理决策过程,感知理论知识在实际供应链运作中的应用逻辑,为线下课堂的深度讲解和实践研讨奠定基础。

#### 3.1.2 第二阶段:线下互动与实践深化

本阶段以问题链与项目式教学为主,推动理论知识向供应链实践能力的转化。针对线上预习中反馈的普遍性问题,开展针对性的线下教学。结合供应链管理多主体协同、多场景决策的特点,采用翻转课堂、问题导向学习、团队项目实践等教学形式,教师聚焦供应链管理的重点难点进行深度讲解和答疑。教学过程中,融入 AI 驱动的智能教学工具和沉浸式仿真场景,针对供应链实操训练,利用 AR/VR 技术模拟真实的供应商选择、生产排程、物流配送等场景,让学生在虚拟环境中完成供应链全流程决策操作,实现理论知识与供应链实践的深度融合。

#### 3.1.3 第三阶段:线上总结与拓展提升

本阶段聚焦供应链管理知识的巩固与能力的拓展,针对线下课堂的学习成果,利用 AI 实现个性化复习、针对性拓展和全方位评估。AI 系统会根据学生的学习数据和反馈,为其推荐针对性的复习资料 and 拓展学习资源,如多级库存优化、供应链碳足迹测算等,帮助其巩固所学知识并拓展专业视野。同时,借助平台,教师可以围绕信任机制的建立、数字化供应链转型趋势等主题,组织线上讨论和答疑活动,鼓励学生分享学习心得和经验,形成“师生互动+生生互学”的良性氛围。此外,还可以利用智能教学工具进行学习效果评估,如通过在线测试、项目报告和供应链优化方案汇报等方式,全面了解学生的学习进展和成果,为后续教学提供改进方向。

### 3.2 混合式教学模式多模块设计

在设计供应链管理课程内容时,为实现“理论夯实-实践落地-技术应用-创新突破”的递进式培养目标,结合供应链管理课程的知识体系特点、学生能力成长规律及产业需求,课程内容可以设计成多个相对独立又相互关联的学习模块,每个模块既包含理论知识的传授,也注重实践能力的培养,以及

创新思维与技术应用的引导。

#### 3.2.1 理论基础模块

这一模块以构建完整的供应链管理理论体系为核心,涵盖供应链的概念、结构模型、运作模式、经典理论以及采购、生产、库存、物流等核心环节。教学方法上,主要通过线上视频课程、PPT 演示和文献阅读等形式,帮助学生建立扎实的理论基础。在这一模块中,针对供应链管理理论概念抽象、定量模型多、逻辑关联性强的特点,AI 技术主要用于个性化资源推送、智能问答和概念理解诊断,教师利用 AI 技术生成的学情报告,课堂上针对共性误区进行重点讲解,确保学生扎实掌握理论内核。

#### 3.2.2 实践操作模块

该模块以提升学生供应链实操决策能力为核心,紧扣供应链管理全流程、多节点、动态化的实操特点,涵盖需求预测、库存优化、供应链绩效评价等核心实操环节。通过引入供应链仿真软件、虚拟实验平台等 AI 工具,让学生在模拟环境中进行供应链决策和操作,体验真实的供应链流程。此外,教师还可结合企业真实案例,设计出更具有挑战性和实用性的实践项目,要求学生以小组为单位分析案例企业供应链运作过程中存在的问题、制定方案并通过仿真工具验证效果,让学生在实践中深化对理论知识的理解。

#### 3.2.3 技术应用模块

紧扣供应链行业数字化、智能化转型趋势,本模块聚焦大数据、AI 等前沿技术在供应链场景中的落地应用,打破技术与业务脱节的痛点。围绕需求预测、库存优化等,先以 AI 驱动的案例分析讲解技术原理与应用逻辑;再让学生基于真实数据集完成实操任务,教师通过教学平台实时查看学生操作进度,帮助学生掌握如何利用这些技术优化供应链管理流程、提高决策效率,确保学生不仅懂技术概念,更能会技术应用。

#### 3.2.4 创新思维与团队协作模块

在创新思维培养上,通过组织研讨会、创意工作坊等活动,围绕绿色供应链、供应链韧性等行业前沿议题,组织学生开展头脑风暴,AI 工具通过推送案例与资料启发思路,并通过算法评估学生提出方案的可行性,并生成优化建议。在团队协作训练上,以真实项目驱动为核心,设计跨部门供应链协同、供应链优化方案设计等小组项目,要求学生明确分工并协作完成,AI 技术通过实时追踪各成员的任务进度等,辅助团队管理,针对分工不均、沟通低效等问题给出改进建议,帮助学生在实践中掌握高效协作的

方法,适配供应链管理的团队工作属性。

### 3.3 混合式教学模式 AI 融合

在教学设计过程中,AI 技术不是孤立存在,而是深度、有机、常态化地融入到“三阶段”的各个环节和“多模块”的具体内容中,发挥其关键赋能作用。

#### 3.3.1 数据驱动下的学情洞察与个性化学习路径

AI 融合的核心基础是对全周期学习数据的深度挖掘,系统针对供应链构建与优化、采购管理、生产计划与控制等核心章节,实时采集学生的线上学习行为、知识掌握表现和认知偏好数据,通过算法构建多维度学习画像,精准定位学生在牛鞭效应缓解、库存控制策略、准时化采购等知识点上的掌握短板与认知偏差。基于学习画像为教师提供详实的学情反馈,教师能够更准确地了解学生的学习状态和需求,进而调整教学策略和内容,实现因材施教。这种数据驱动的融合方式,不仅提高了教学效率,还增强了教学的针对性和有效性。

#### 3.3.2 智能辅助的互动教学与实时反馈

在课堂互动层面,AI 能够实时分析师生之间的互动情况,精准捕捉学生的参与度和理解程度,从而优化学生分组策略,确保每个小组的学习效率和合作效果最大化。在理论研讨中,针对供应链合作伙伴选择、基于产品的供应链设计等开放性议题,AI 可自动归纳核心观点分歧,智能推送相关文献或企业实践数据,助力讨论走向深入。在场景体验层面,AI 驱动的供应链仿真平台使学生能够在虚拟空间中进行实践操作,并展示决策行为带来的成本、时效、碳排放等多维绩效指标变化,增强学习的直观性和趣味性。

#### 3.3.3 自动化评估与过程性洞察

在作业评估环节,针对客观性作业,AI 实现自动化批改,快速统计学生在结构模型类型、供应链管理库存策略等核心知识点的错误率,精准定位共性问题,为教师的课堂讲评提供重点方向;针对供应链案例分析报告、多级库存优化方案设计等主观性作业,AI 进行初步评分和相似度检测,帮助教师快速把握学生作业的质量和创新能力,提升作业批改的效率和标准化程度。在过程性洞察层面,AI 系统整合了线上和线下多维度学习数据,从多个角度评估学生的学习进度、掌握程度以及潜在问题,为教师提供精准的教学反馈和个性化的教学建议,避免仅以终结性成绩判断学习效果的片面性,助力教育教学质量的全面提升。

#### 3.3.4 精准成果评价与智能优化建议

AI 技术能够根据 OBE 目标,对学生的学习成果进行精准的量化与质性评价,以此来衡量学生能力达成的程度。AI 通过收集和分析学生的学习数据,生成个性化的学习报告。报告不仅展示了学生的学习成绩,还详细分析了学生的学习强项和弱点,明确学生在供应链战略分析、运营流程优化、跨组织协同等核心能力维度上的优势与不足,以及需要改进的地方。同时,AI 根据学生的具体情况,提供针对性的优化建议,如供应链协调方面突出的学生可进一步学习契约理论,数据分析应用能力薄弱的学生推荐相关的数据处理与建模课程,从而帮助学生制定更有效的学习计划,提高学习效率,促进学生的全面发展。

## 4 实施效果评估

为全面验证“三阶段-多模块-AI 融入”混合式教学模式的应用成效,研究采用对照组实验法结合问卷调查、成果量化的方式开展评估,选取物流工程专业 2024 级两个平行班作为研究对象,其中实验班采用 AI 赋能的混合式教学模式,对照班采用传统课堂教学模式。两班学生均为同年级同专业,入学成绩、前期专业基础课程成绩无显著统计学差异,且由同一位教师授课,排除学生学习基础、师资水平等干扰因素对评估结果的影响。评估体系从知识掌握、学习体验、能力发展三个核心维度构建,通过对比两班的教学数据,系统分析教学改革的实际效果,具体结果如下。

### 4.1 学生学习成绩评估

对比实验班与对照班的学习成绩及学习行为数据,结果显示,实验班整体学习效果显著优于对照班。实验班课程平均成绩为 81.2 分,较对照班的 75.1 分显著提升 8.1%;实验班不及格率为 6.8%,较对照班的 12.6% 下降 5.8 个百分点,成绩分布呈现高分扩容、低分收缩的良性趋势。特别是在实践操作和技术应用相关的考核中,实验班学生的表现尤为突出,不仅操作熟练度大幅提升,解决问题的能力也得到了显著增强。对学生学习过程的持续跟踪和深入分析显示,实验班学生在自主学习能力方面表现出更强的主动性和计划性,线上预习完成率较对照组的 45% 提升至 82%,课堂互动参与度提升 40%,团队协作能力明显提升,能够更高效地完成小组任务,创新思维方面也展现出了较明显的进步,能够提出更多具有创造性和实用性的解决方案。这些变化充分表明,AI 赋能的混合式教学模式的实施对学生的综合能力提升起到了积极的促进作用。

## 4.2 学生满意度调查

课程结束后,对实验班全体学生进行匿名问卷调查,围绕教学资源、个性化支持、实践教学及综合效果四个维度收集反馈。调查结果显示(见表1):教学资源广受认可,其中在线资源质量与前沿资料价值满意度均超75%,显示课程内容建设成效显著;个性化支持存在提升空间,AI学习工具与在线

互动深度均值低于3.5分,反映智能化辅助和师生交互重点优化;实践环节设计获肯定但协作工具仍有待提升,其中AI实践任务真实性获73%好评,但小组协作工具满意度仅42%,表明技术赋能协作效率不足;AI驱动的混合式模式优势突出,84%学习者认为AI驱动的混合教学比传统课堂更有效,验证了教学改革的整体有效性。

表1 供应链管理课程 AI 赋能混合式教学改革满意度调查结果

| 题项 | 评估维度    | 问题描述                        | 非常不满意 | 不满意 | 一般  | 满意  | 非常满意 | 均值  |
|----|---------|-----------------------------|-------|-----|-----|-----|------|-----|
| 1  | 教学资源    | 在线课程视频、课件、案例等学习资源的丰富程度与内容质量 | 2%    | 5%  | 18% | 45% | 30%  | 4   |
| 2  |         | AI平台运行稳定性与操作便捷性             | 3%    | 8%  | 22% | 40% | 27%  | 3.8 |
| 3  |         | 行业前沿报告等拓展性资料对开阔专业视野的帮助程度    | 1%    | 4%  | 15% | 50% | 30%  | 4.1 |
| 4  | 个性化学习支持 | AI辅助工具满足个性化学习程度             | 5%    | 12% | 35% | 30% | 18%  | 3.4 |
| 5  |         | 教师根据AI学情分析报告所提供的针对性指导效果     | 4%    | 10% | 28% | 38% | 20%  | 3.6 |
| 6  |         | 在线讨论区互动及时性与内容深度             | 6%    | 15% | 33% | 30% | 16%  | 3.3 |
| 7  | 实践教学    | AI驱动的实践教学环节设计合理性            | 3%    | 7%  | 25% | 42% | 23%  | 3.8 |
| 8  |         | 实践任务模拟真实场景的有效性              | 2%    | 5%  | 20% | 48% | 25%  | 3.9 |
| 9  |         | AI工具对小组协作效率的促进作用            | 8%    | 14% | 36% | 28% | 14%  | 3.3 |
| 10 | 综合反馈    | 混合式教学学习效果提升程度               | 1%    | 3%  | 12% | 47% | 37%  | 4.2 |

## 4.3 学生创新实践能力评估

在教学改革周期内,实验班学生展现出更积极的探索意愿与实践能力。在课程学习过程中,学生通过参与虚拟仿真实验、互动练习以及团队项目实践等活动,不仅加深了对供应链管理理论知识的理解,还锻炼了实际操作和解决问题的能力。特别是在技术应用模块和创新思维与团队协作模块的学习中,学生积极探索前沿技术在供应链管理中的应用,主动参与全国大学生物流设计大赛、全国供应链管理大赛等学科技能竞赛,提出了诸多具有创新性和实用性的解决方案,锻炼了知识运用和创新能力,激发了学习热情和探索精神。

## 5 结论

AI技术的深度融入为供应链管理课程的混合式教学模式创新提供了有力支持,通过优化教学资源、支持个性化学习和强化实践教学等方面的应用,有效提升了教学效果,培养了学生的综合能力。目前AI技术在教学中的应用仍处于探索深化阶段,一方面,AI教学工具的开发与应用成本较高,部分应

用型高校的硬件设施与经费支持难以满足规模化推广需求;另一方面,教师队伍对AI技术的理解深度、实操能力存在差异,部分教师在教学设计上仍显不足。未来,随着AI技术的不断发展和完善,高校和教师应进一步加强对AI技术在课程教学中的应用研究,不断优化教学模式,提高教学质量,为培养适应数字化时代需求的高素质供应链管理复合型人才提供坚实保障。

## 参考文献:

- [1]陈剑,刘运辉.数智化使能运营管理变革:从供应链到供应链生态系统[J].管理世界,2021,37(11):227-240,14.
- [2]邹翔斐,关海玲.人工智能技术在商贸流通领域的应用及对就业的影响研究[J].商业经济研究,2025(20):19-23.
- [3]王维国,徐健,盖印.经管类专业课程体系数智化升级与教学方法创新[J].中国大学教学,2022(3):31-36.
- [4]孙慧,李玉蓉,谢萌.未来教育视域下高校新型混合式教学研究[J].黑龙江高教研究,2024,42(1):17-22.

- [5] 郑旭东,周冰. 人工智能融入“三个课堂”的总体目标、理论基础与具体路径[J]. 电化教育研究, 2025, 46(11):85-91.
- [6] 石磊,方海光. 生成式人工智能重塑开放教育教学场景:样态、价值及实践路径[J]. 成人教育, 2025, 45(9):47-54.
- [7] 赵晶莹,吴坚. 美国 K-12 教育领域人工智能赋能个性化学习的实践路径[J]. 比较教育学报, 2025(5):153-166.
- [8] 翟雪松,许家奇,童兆平,等. 人工智能赋能高校韧性教学生态的路径研究[J]. 中国远程教育, 2023, 43(1):49-58.
- [9] 梁存良. 在线学习行为投入对学习绩效的影响——基于国内外 30 篇实证研究文献的元分析[J]. 河南师范大学学报(哲学社会科学版), 2024, 51(5):151-156.
- [10] 胡化广,刘海建,周枫凯. 人工智能的“稳链”效应——来自供应链波动的经验证据[J]. 数量经济技术经济研究, 2025, 42(10):90-111.
- [11] 程乐. “人工智能+物流”:技术张力与结构性优化[J]. 人民论坛, 2025(2):35-40.
- [12] 翟玲. 基于人工智能的物流系统优化[J]. 山西财经大学学报, 2024, 46(S2):77-79.
- [13] 余辉,夏文蕾,程钰,等. 基于生成式人工智能的课堂教学实验设计与实践[J/OL]. 实验室研究与探索, 1-6 [2025-11-11].
- [14] 石贵舟,余霞. 应用型高校产教融合型课程教学改革与创新实践[J]. 南京工程学院学报(社会科学版), 2022, 22(4):69-73.
- [15] 喻国明,李钊,滕文强. AI+教育:人工智能时代的教学模式升维与转型[J]. 宁夏社会科学, 2024(2):191-198.

责任编辑:张晓娜

(上接第 103 页)

### 3 结论

本研究通过实验测量与 CFD 模拟相结合的方法,系统评估了石墨烯与 CMP 涂料作为船体涂层的减阻性能与机理。实验结果表明,两种涂层均能有效降低船模航行阻力,但其性能随速度变化呈现不同特征。石墨烯涂层在低速区间( $0.3508 - 0.542 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )和高速段( $>0.9135 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )表现优异,最大减阻率可达 32.31%;而 CMP 涂层则在更宽的中低速范围( $0.2583 - 1.0002 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )内提供更为稳定的减阻效果,最大减阻率为 20.93%。综合分析表明, CMP 涂层在当前技术下的综合减阻稳定性优于石墨烯涂层,但石墨烯在特定航速区间展现出一定的减阻潜力,且由于其固有的物理与化学特性,纯净石墨烯对人类及海洋生物无毒,因而也有助于降低海洋污染风险。同时依据 CFD 流场分析为实验观测到的减阻现象提供了理论支撑。虽然高速下实验与 CFD 结果存在轻微偏差,这主要源于实验水槽的壁面边界效应,但两者在阻力变化趋势上高度一致,验证了实验结果的可靠性。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2024.

- [2] 张英,薛树业. 基于数据收集机制的国际航行船舶燃油消耗数据分析[J]. 世界海运, 2023, 46(5):14-21.
- [3] STENZEL V, WILKE Y, HAGE W. Drag-reducing paints for the reduction of fuel consumption in aviation and shipping[J]. Progress in Organic Coatings, 2011, 70(4):224-229.
- [4] 宋科委,徐佩,葛坤玮,等. 基于 CFD 的阻流板对船舶斜航水动力性能影响研究[J]. 船舶, 2025, 36(2):52-59.
- [5] 毛超进,忽园园,朱鹏飞,等. 基于 CFD 的苏伊士运河 DTC 船航行阻力特性研究[J]. 海洋技术学报, 2024, 43(6):96-103.
- [6] 翟锦果. 船舶航行阻力数值计算及油耗预测[D]. 大连海事大学, 2023.
- [7] SCHULTZ M P, BENDICK J A, HOLM E R, et al. Economic impact of biofouling on a naval surface ship[J]. Biofouling, 2011, 27(1):87-98.
- [8] PERSOONE G, CASTRITSI-CATHARIOS J. A simple bioassay with Artemia larvae to determine the acute toxicity of antifouling paints[J]. Water Research, 1989, 23(7):893-897.
- [9] HENOCH C, KRUPENKIN T N, KOLODNER P, et al. Turbulent drag reduction using superhydrophobic surfaces[J]. American Physical Society, 2008. DOI:10.2514/6.2006-3192.

责任编辑:汤庆国

# 蚌埠学院学报

(综合类双月刊)

编辑委员会

主 任:陈国龙

副 主 任:张亚新

委 员:(以姓氏笔画为序)

|     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 王艳春 | 韦文联 | 吕效华 | 朱兰保 | 朱家席 | 邬旭东 |
| 刘春景 | 许 晖 | 孙兰萍 | 孙西超 | 孙艳辉 | 李大胜 |
| 李文璘 | 李宗群 | 吴长法 | 何 蕾 | 张亚新 | 张茂林 |
| 陈发来 | 陈国龙 | 陈恩红 | 武 杰 | 郑晓奋 | 胡 飞 |
| 赵东勇 | 袁 飞 | 郭有强 | 黄迎辉 | 崔执树 | 魏天路 |

主 编:张亚新

副 主 编:郭有强 邬旭东 朱家席

## 目次

### 食品工程·生命科学

菊花风味蛋糕工艺优化及品质分析 ..... 邹小欠,王乐成,陈春旭,等(1)

### 硅基新材料·化学工程

不同纤维增强材料对高温后混凝土力学性能的影响研究 ..... 林新梅(8)

冷冻干燥保存时间对重组磷脂酶A<sub>2</sub>蛋白稳定性及酶活性的影响 ... 林美枝,吴敏,仪明君(13)

### 机械工程

粉尘环境下机电系统可靠性综合设计技术及应用 ..... 李刚,陈飞,邓志旭(18)

教学型全向移动机器人设计与运动控制 ..... 孙辉辉,张婷婷,刘亚军,等(24)

矢量推进轴系纵向振动分析与模糊自适应PID控制 ..... 陈征宇,王波,佟默,等(32)

二级增压复合容积泵的设计及其特性研究 ..... 杨子钊,孟利民,李双(43)

### 电子与电气工程·人工智能及计算机技术

基于变分模态分解算法的肌电信号去噪研究 ..... 凌六一,赵博洋,韦利余,等(52)

基于树莓派的自动驾驶小车设计与实现 ..... 郝志廷(59)

车载触控系统抗干扰协同优化设计研究 ..... 潘正辉(65)

### 水利科学·土木建筑工程

煤矸砂砂浆制备与性能的试验研究 ..... 栾从起,王家乐(74)

平椭圆形中空双壁管短柱的轴压力学性能研究 ..... 杨敬威,孙俊祖,汤志伟(82)

基于核磁共振对岩石冻融过程未冻水含量演化特征的研究 ..... 黄飞,张子浩,王彬,等(90)

## 基础科学研究

- 基于实验与 CFD 模拟的船舶涂层减阻性能研究 ..... 石文可, 乔印虎, 李忠芳, 等(99)  
高标准农田建设适宜性评价及障碍因素分区 ..... 李闯, 于跃跃, 王胜涛, 等(104)

## 教育与教学研究

- 化工原理“多维度融合”教学模式探索与效果分析 ..... 刘沐鑫, 秦英月, 石春杰, 等(111)  
基于 Factory IO 与 PLC 虚拟仿真教学改革与探索 ..... 王强, 黄迎辉, 陈章宝, 等(117)  
基于 AI 赋能的供应链管理课程教学改革与实践探索 ..... 王翠, 周宇(122)

## Main Contents

- Optimization of Processing Technology and Quality Evaluation of Chrysanthemum-Flavored Cake  
..... ZOU Xiaoqian ,WANG Lecheng ,CHEN Chunxu ,et al. ( 1)
- Study on the Influence of Different Fiber Reinforced Materials on the Mechanical Properties of Concrete after High Temperature ..... LIN Xinmei(8)
- Impact of Lyophilization Storage Duration on Recombinant phospholipase A<sub>2</sub> Protein Stability and Enzymatic Activity ..... LIN Meizhi ,WU Min ,YI Mingjun(13)
- Comprehensive Design Technology and Application of Reliability of Electromechanical Systems in Dust Environment ..... LI Gang ,CHEN Fei ,DENG Zhixu(18)
- Design and Motion Control of Teaching-oriented Omnidirectional Mobile Robot  
..... SUN Huihui ,ZHANG Tingting ,LIU Yajun ,et al. ( 24)
- Longitudinal Vibration Analysis of Vector Propulsion Shaft System and Fuzzy Adaptive PID Control ..... CHEN Zhengyu ,WANG Bo ,TONG Mo ,et al. ( 32)
- Design and Characteristics Study of A Two-stage Supercharging Composite Positive Displacement Pump ..... YANG Zizhao ,MENG Limin ,LI Shuang(43)
- Research on Denoising of Electromyography Signals Based on Variational Mode Decomposition Algorithm ..... LING Liuyi ,ZHAO Boyang ,WEI Liyu ,et al. ( 52)
- Design and Implementation of an Autonomous Driving Vehicle Based on Raspberry Pi  
..... HAO Zhiting(59)
- Collaborative Optimization Design for Anti-Interference in Vehicle Touch Control Systems  
..... PAN Zhenghui(65)
- Experimental Study on the Preparation and Properties of Coal Gangue Sand Mortar  
..... LUAN Congqi ,WANG Jiale(74)
- Study on Axial Compression Behavior of Flat Elliptical Double-Skin Hollow Tube Short Columns  
..... YANG Jingwei ,SUN Junzu ,TANG Zhiwei(82)
- Research on Drag Reduction Performance of Ship Coatings Based on Experiments and CFD Simulation ..... SHI Wenke ,QIAO Yinhu ,LI Zhongfang ,et al. ( 99)
- Suitability Assessment and Obstacle Factor Zoning for High-Standard Farmland Construction  
..... LI Chuang ,YU Yueyue ,WANG Shengtao(104)
- Exploration and Effect Analysis of the Multi-dimensional Integration Teaching Mode of Chemical Engineering Principles ..... LIU Muxin ,QIN Yingyue ,SHI Chunjie ,et al. ( 111)
- Reform and Exploration of Teaching Based on Factory IO and PLC Virtual Simulation  
..... WANG Qiang ,HUANG Yinghui ,CHEN Zhangbao ,et al. ( 117)
- Teaching Reform and Practical Exploration of Supply Chain Management Course Based on AI Empowerment ..... WANG Cui ,ZHOU Yu(122)