



ISSN 1000-5013

CN 35-1079/N

CODEN HDZIEF

# 华侨大学学报

(自然科学版)

JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY

(NATURAL SCIENCE)

第 46 卷

第 4 期

Vol. 46

No. 4

## 2025

中国·泉州/厦门

CHINA • QUANZHOU / XIAMEN



公众微信号



官网二维码



《 华 侨 大 学 学 报 ( 自 然 科 学 版 ) 》  
第 八 届 编 辑 委 员 会  
The Eighth Editorial Committee of  
Journal of Huaqiao University ( Natural Science )

主 任 (Director of Editorial Committee)

黄 辉(HUANG Hui)

副主任 (Vice Director of Editorial Committee)

方瑞明(FANG Ruiming) 黄仲一(HUANG Zhongyi)

编 委 (Members of Editorial Committee) (按姓氏笔画为序)

刁 勇(DIAO Yong)

方瑞明(FANG Ruiming)

田 晖(TIAN Hui)

刘 阳(LIU Yang)

杜吉祥(DU Jixiang)

李海锋(LI Haifeng)

陈行堤(CHEN Xingdi)

陈志宏(CHEN Zhihong)

陈爱政(CHEN Aizheng)

林添良(LIN Tianliang)

罗继亮(LUO Jiliang)

荆国华(JING Guohua)

饶小平(RAO Xiaoping)

黄 辉(HUANG Hui)

黄仲一(HUANG Zhongyi)

黄华林(HUANG Hualin)

曾志兴(ZENG Zhixing)

缑 锦(GOU Jin)

魏展画(WEI Zhanhua)

主 编 (Editor in Chief)

黄仲一 (HUANG Zhongyi)

副主编 (Associate Editor in Chief)

陈志贤(CHEN Zhixian)

目 次

综述评

铁死亡在鼻咽癌发生发展及治疗中的研究进展  
..... 王福财, 周智涵, 马丽浩 (361)

参与肺癌靶向耐药的 lncRNAs 的作用及其机制  
..... 杨素心, 马丽浩, 张景红 (369)

学术论文

活性添加剂分散调控对镀铜线精细化的影响  
..... 乐其河, 江开勇 (379)

近海漂浮垃圾收集器的设计与实现  
..... 朱来发, 谭忠诚, 金花雪, 杨钟莹, 何隆榕, 范伟 (386)

基于卷积神经网络的石材镶嵌工艺颜色匹配方法  
..... 谢标峰, 陈首虹, 黄吉祥, 李建新, 黄身桂 (393)

NC-UHPC 界面抗剪性能试验及基于内聚力模型的仿真分析  
..... 黄维, 王婷, 张雨婷, 斯比努尔·下木希奴, 周知 (400)

温度作用下超精电子厂房大跨度楼板力学性能  
..... 莫家樑, 陈连健, 方四宝, 李海锋 (410)

Low-E 玻璃在厦门某高校教学楼节能改造中的应用模拟

..... 常明玉, 林姝颖, 李玲真, 吴正旺 (419)

豫中靠崖窑民居建筑室内采光分析及提升策略

..... 李显秋, 任婷, 侯智松 (425)

C5-12 启动子降低 rAAV1 介导的基因递送后转基因的免疫反应

..... 王晓, 黄晓平, 黎玲, 张红, 刁勇 (435)

浑浊水体中模拟水生动物的识别

..... 王孝艳, 柴瑜蔓, 蒲继雄 (442)

双空间耦合 LDPC 码滑窗译码算法改进

..... 练秋芳, 孙小芳, 陈启望, 鲁紫君, 周林 (448)

基于 UDP 组播协议的土壤数据实时监测软件的设计与实现

..... 梅小华, 黄彩虹, 董钰莹 (455)

采用高光谱技术的川西矿区周边土壤铬含量反演模型

..... 王光羽, 杨斌, 魏添翼, 卓思杰, 陈卓尔, 沙英超 (462)

Burgers-Huxley 方程的精确行波解

..... 贾惠临, 温振庶, 张晓雅 (470)

上半平面上  $\alpha$ -Bloch 空间的刻画

..... 陈娇, 胡春英 (476)



CONTENTS

COMPREHENSIVE REVIEW

|                                                                                          |                                            |
|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Research Progress of Ferroptosis in Pathogenesis and Therapy of Nasopharyngeal Carcinoma |                                            |
| .....                                                                                    | WANG Fucui, ZHOU Zhihan, MA Lihao (361)    |
| Role of LncRNAs in Targeted Drug Resistance in Lung Cancer and Their Mechanisms          |                                            |
| .....                                                                                    | YANG Suxin, MA Lihao, ZHANG Jinghong (369) |

ACADEMIC PAPERS

|                                                                                                            |                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Influence of Dispersion Control of Active Additives on Refinement of Copper Plated Wire                    |                                                                                      |
| .....                                                                                                      | LE Qihe, JIANG Kaiyong (379)                                                         |
| Design and Implementation of Offshore Floating Garbage Collector                                           |                                                                                      |
| .....                                                                                                      | ZHU Laifa, TAN Zhongcheng, JIN Huaxue,<br>YANG Zhongying, HE Longrong, FAN Wei (386) |
| Color Matching Method for Stone Tessellation Process Based on Convolutional Neural<br>Network              |                                                                                      |
| .....                                                                                                      | XIE Biaofeng, CHEN Shouhong, HUANG Jixiang,<br>LI Jianxin, HUANG Shengui (393)       |
| NC-UHPC Interface Shear Performance Test and Simulation Based on Cohesive Zone Model                       |                                                                                      |
| .....                                                                                                      | HUANG Wei, WANG Ting, ZHANG Yuting,<br>SIBINUER • Xiamuxinu, ZHOU Zhi (400)          |
| Mechanical Properties of Large-Span Slab of Ultra-Precision Electronic Factory Under<br>Temperature Action |                                                                                      |
| .....                                                                                                      | MO Jialiang, CHEN Lianjian, FANG Sibao, LI Haifeng (410)                             |

Simulation of Low-E Glass in Energy-Saving Renovation of University Teaching Buildings  
in Xiamen City  
..... CHANG Mingyu, LIN Shuying, LI Lingzhen, WU Zhengwang (419)

Indoor Lighting Analysis and Improvement Strategy of Cliff Dwelling Buildings in Central  
Henan  
..... LI Xianqiu, REN Ting, HOU Zhisong (425)

C5-12 Promoter Reduces Transgene Immune Response Following rAAV1-Mediated Gene  
Delivery  
..... WANG Xiao, HUANG Xiaoping, LI Ling, ZHANG Hong, DIAO Yong (435)

Recognition of Simulated Aquatic Animal in Turbid Water Environments  
..... WANG Xiaoyan, CHAI Yuman, PU Jixiong (442)

Improvement of Sliding Window Decoding Algorithm for Double Spatially Coupled LDPC  
Codes  
..... LIAN Qiufang, SUN Xiaofang, CHEN Qiwan, LU Zijun, ZHOU Lin (448)

Design and Implementation of Real-Time Soil Data Monitoring Software Based on UDP  
Multicast Protocol  
..... MEI Xiaohua, HUANG Caihong, DONG Yuying (455)

Inversion Model of Soil Cr Content Around Western Sichuan Mining Area Using  
Hyperspectral Technology  
..... WANG Guangyu, YANG Bin, WEI Tianyi,  
ZHUO Sijie, CHEN Zhuoer, SHA Yingchao (462)

Exact Traveling Wave Solutions of Burgers-Huxley Equation  
..... JIA Huilin, WEN Zhenshu, ZHANG Xiaoya (470)

Characterization of  $\alpha$ -Bloch Space on Upper Half-Plane  
..... CHEN Jiao, HU Chunying (476)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202503027



# 铁死亡在鼻咽癌发生发展及 治疗中的研究进展

王福财, 周智涵, 马丽浩

(华侨大学 医学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 通过查阅近年的相关文献,综述铁死亡的概念、特征及其在鼻咽癌治疗中的研究进展。结果表明:铁死亡的发生机制复杂且在鼻咽癌治疗中发挥着关键作用;鼻咽癌患者的长期生存率虽然明显增加,但远处转移和化疗耐药性仍然是鼻咽癌患者的治疗难点;铁死亡作为一种以活性氧和脂质过氧化物水平升高为特征的新型细胞死亡方式,有望成为鼻咽癌临床干预的一个新靶点。

**关键词:** 鼻咽癌; 铁死亡; 发生机制; 耐药性

**中图分类号:** R 739.6

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5013(2025)04-0361-08

## Research Progress of Ferroptosis in Pathogenesis and Therapy of Nasopharyngeal Carcinoma

WANG Fucui, ZHOU Zhihan, MA Lihao

(School of Medicine, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** By reviewing the relevant literature in recent years, the concept, characteristics and research progress of ferroptosis in the treatment of nasopharyngeal carcinoma were reviewed. The results showed that the mechanism of ferroptosis was complex and it played a key role in the treatment of nasopharyngeal carcinoma. Although the long-term survival rate of nasopharyngeal carcinoma patients had significantly increased, distant metastasis and resistance to radiotherapy and chemotherapy remained the treatment difficulties for nasopharyngeal carcinoma patients. As a novel mode of cell death characterized by elevated levels of reactive oxygen species and lipid peroxides, ferroptosis was expected to become a new target for clinical intervention in nasopharyngeal carcinoma.

**Keywords:** nasopharyngeal carcinoma; ferroptosis; mechanism; antibiotics resistance

铁死亡(ferroptosis)是一种以铁依赖性脂质活性氧堆积为特征的细胞死亡,不同于细胞凋亡、细胞坏死和细胞自噬现象,是一种新型的死亡方式<sup>[1-2]</sup>。研究表明,铁死亡参与了包含鼻咽癌等多种肿瘤及疾病的发展,并在肿瘤放化疗耐药性形成中发挥着重要作用<sup>[3]</sup>,尽管放化疗过程中癌细胞铁死亡的确切遗传背景尚不清楚,但研究铁死亡在药物对肿瘤的耐药性及新的治疗靶点的寻找方面具有重大意义。铁死亡与肿瘤免疫协同抗肿瘤作用的机制也是近年来研究的热点。

鼻咽癌(nasopharyngeal carcinoma, NPC)是一种发生在鼻咽上皮细胞的头颈部恶性肿瘤,鼻咽癌发病包括遗传因素、环境因素、Epstein-Barr(EB)病毒感染等多种因素<sup>[4]</sup>,放化疗及手术治疗是其主要

**收稿日期:** 2025-03-12

**通信作者:** 王福财(1978—),男,副教授,博士,主要从事肿瘤的免疫发病机制的研究。E-mail: wfc@hqu.edu.cn。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(81860354);福建省泉州市高层次人才创新创业项目(2022C015R)

的治疗方法,但是因其容易转移和复发,以及在治疗过程中极易产生耐药性,易造成预后不良。如何避免耐药性和实现精准治疗是当下面临的主要问题,也是影响鼻咽癌疗效的重要因素。因此,本文论述了铁死亡的发生机制及其在鼻咽癌的发生发展和治疗应用中的研究进展,以便深入理解铁死亡与鼻咽癌之间的关系,为未来鼻咽癌治疗提供新的思路新的靶点。

1 铁死亡的发生机制

铁死亡的概念最早是由 Dixon 等<sup>[5]</sup>提出的,随后针对铁死亡的研究逐渐增多且逐步深入。不同于其他的细胞死亡方式,铁死亡的细胞在形态学方面有以下特点:线粒体体积减小,但线粒体膜密度增加;线粒体嵴减少或消失,但细胞核大小正常;染色质不浓缩,并且细胞膜是完整的,因此它具有完整的球形细胞的外观。在生物化学方面,活性氧(ROS)、脂质过氧化物和铁水平的升高是铁死亡最显著的特征<sup>[6]</sup>。在铁死亡的过程中,线粒体既是铁的储存中心,又是代谢中心,在铁死亡中起着至关重要的调节作用<sup>[7]</sup>。铁死亡是一种程序性细胞死亡,在发生机制和分子特性等方面不同于细胞凋亡、自噬、坏死和焦亡等其他细胞死亡方式<sup>[8]</sup>。

铁死亡作为一种独特的细胞死亡方式,其发生与否取决于执行系统和防御缓冲体系的对抗结果,其执行机制包括铁积累、芬顿反应及多不饱和脂肪酸磷脂(PUFA-PLs)的合成与过氧化等,防御机制主要是胱氨酸-谷氨酸反向转运蛋白( $X_c^-$  系统)/还原型谷胱甘肽(GSH)/谷胱甘肽过氧化物酶(GPX4)系统<sup>[9]</sup>,其中, $X_c^-$  系统是细胞内重要的抗氧化体系,GSH 是膜脂修复酶 GPX4 的还原性辅因子。

1.1 铁代谢与不稳定铁池在铁死亡中的作用机制

铁代谢异常是铁死亡的一大因素。铁在人体内的含量非常丰富,但自由铁离子含量却极低,主要由胆汁或经粪便排出,尿液、出汗、皮肤细胞等代谢也排出少量铁。当细胞内铁过量且抗氧化能力下降时,血液循环中的  $Fe^{3+}$  与转铁蛋白结合并运输,通过转铁蛋白受体 1 进入细胞后被还原并释放到胞质的不稳定铁池(LIP)中,而多余的铁贮存在铁蛋白中。胞内 LIP 主要以  $Fe^{2+}$  的形式存在,由于  $Fe^{2+}$  的不稳定性和高反应活性,铁通过芬顿反应产生羟自由基,与细胞膜、质膜中的多不饱和脂肪酸反应,产生大量脂质活性氧,导致细胞死亡<sup>[10-11]</sup>。

1.2 脂质过氧化物积累与特定脂肪酸氧化在铁死亡中的作用机制

脂代谢异常是铁死亡的一大影响因素,脂质过氧化物的积累往往导致铁死亡的发生<sup>[11-12]</sup>。当细胞内脂质代谢异常从而造成脂质过氧化,细胞内会产生大量 ROS。铁死亡过程中多不饱和脂肪酸如花生四烯酸(AA)或肾上腺酸(AdA)是最容易发生氧化反应的脂质,且受 3 种合成酶调控<sup>[13]</sup>。酰基辅酶 A 合成酶长链家族成员 4(ACSL4)将 AA 或 AdA 催化为花生四烯酰-辅酶 A 和肾上腺酰-辅酶 A;然后,溶血卵磷脂酰基转移酶 3(LPCAT3)将其酯化为磷脂酰乙醇胺(PE)形成 AA-PE 和 AdA-PE;最后,经脂肪氧合酶氧化为脂质过氧化物<sup>[14]</sup>,积累的脂质过氧化物分解并触发额外 ROS 的形成,进一步消耗生物大分子,降低细胞膜厚度,促进胶束形成,从而诱发细胞铁死亡。

1.3 抗氧化防御系统及其在调控铁死亡中的关键作用

当细胞经历铁死亡时,会激活多层面的抗氧化保护机制,这些机制共同构建了一个全面的抗氧化防御体系。此体系包含过氧化物还原酶家族、硫氧还蛋白等抗氧化蛋白,并涉及多种信号传导通路,其中,溶质转运家族 7A11(SLC7A11)/GSH/GPX4 途径的作用已被证实在铁死亡中起决定作用。 $X_c^-$  系统发挥关键作用,生理条件下, $X_c^-$  系统由 SLC7A11 和溶质载体家族 3 成员 2(SLC3A2)组成<sup>[14]</sup>,将胱氨酸运输至细胞内并被还原为半胱氨酸,用于合成细胞内主要的抗氧化剂 GSH。GSH 是 GPX4 的一个必要辅因子,可将还原型 GSH 转化为氧化型 GSH,同时还原脂质过氧化物,从而减轻氧化应激损伤。因此, $X_c^-$  系统和 GPX4 是铁死亡氨基酸代谢中的重要调控靶点<sup>[15]</sup>。GPX4 参与体内多种催化还原反应,保护细胞膜脂质抵抗氧化自由基的攻击,GPX4 有助于清除有毒的脂质氢过氧化物(LOOH),从而防止氧化应激引起的细胞损伤,并维持氧化还原稳态,是铁死亡过程中重要的负性调节因子。

除此之外,铁死亡抑制蛋白 1/辅酶 Q10/烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸(FSP1/CoQ10/NADPH)途径<sup>[16-17]</sup>和 Kelch 样 ECH 相关蛋白 1/核因子红细胞相关因子 2/血红素氧合酶 1

(Keap1/Nrf2/HO-1)<sup>[18]</sup>等这些通路基本机制都是通过调控 GSH、CoQ10 等胞内还原力下调 ROS 含量,进而达到调控脂质过氧化和铁死亡的目的。

总结了铁死亡与其他细胞死亡方式的不同特征及其调节因子(表 1),有利于深入理解铁死亡的分子机制和其独特性。

表 1 铁死亡和其他细胞死亡方式的不同特征及其调节因子  
Tab.1 Different characteristics and regulatory factors of ferroptosis and other modes of cell death

| 死亡方式 | 形态特征          | 生物学特征                              | 发生影响            | 调节因子                                                |
|------|---------------|------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------|
| 铁死亡  | 线粒体皱缩、外膜破碎    | Fe <sup>2+</sup> 和 ROS 积累, 脂质过氧化积累 | 引发免疫反应          | 正向调节因子:NOX、p53、Ras、CARS 等;<br>负向调节因子:GPX4,SLC7A11 等 |
| 凋亡   | 核结构消失,形成凋亡小体  | 细胞色素释放 caspase                     | 单个细胞不同步发生不引起炎症  | —                                                   |
| 自噬   | 形成自噬溶酶体核细胞内空泡 | LC3-II/LC3-I 比例提高                  | 单个细胞不同步发生维持组织稳态 | —                                                   |
| 焦亡   | 细胞膨大变形        | 释放促炎因子                             | 引发炎症反应          | —                                                   |

## 2 铁死亡对鼻咽癌发生发展的影响

鼻咽癌是一种起源于鼻咽部的恶性上皮性肿瘤,流行于东南亚和北非地区<sup>[19]</sup>。单纯放疗或联合化疗是鼻咽癌的主要治疗方法,然而有大量患者因耐药性和肿瘤转移的发展而死亡。铁死亡与肿瘤免疫微环境中的抗肿瘤免疫细胞和促肿瘤免疫细胞密切相关<sup>[20]</sup>。最近的研究揭示了铁死亡在肿瘤转移中的关键作用,例如,淋巴组织保护肿瘤细胞免受铁死亡并促进黑色素瘤转移<sup>[21]</sup>。这些发现强调了铁死亡在肿瘤生长和转移中的重要性,确定新的抗癌策略和研发诱发铁死亡的新药将有助于改善肿瘤情况。

### 2.1 铁死亡与鼻咽癌耐药

鼻咽癌治疗过程中一个常见的问题是出现放化疗的耐药,在肿瘤细胞中,抗氧化防御途径的上调通过抑制铁死亡促进肿瘤细胞在氧化应激中存活并产生耐药性<sup>[8]</sup>。越来越多的证据揭示了病毒蛋白和 miRNA 的功能可能有助于 EB 病毒相关的癌症产生治疗耐药性<sup>[22]</sup>。N6-甲基腺嘌呤(m6A)已成为 RNA 最常见的修饰物,被认为是细胞内基因表达的主要调控因子<sup>[23]</sup>。脂肪质量和肥胖相关蛋白(FTO)是真核生物中被首次报道的 m6A 去甲基化酶,Huang 等<sup>[24]</sup>研究发现在鼻咽癌细胞中 FTO 高水平表达,其通过增强操作分类单元(OUT)域包含的泛素醛结合蛋白 1(OTUB1)基因(负调控泛素化来控制蛋白的稳定性和活性)的转录和蛋白水平,降低对铁死亡抑制剂 SLC7A11 的敏感度,并最终促进肿瘤发生,使鼻咽癌对放疗产生耐药性,进而降低对铁死亡的敏感度。Yuan 等<sup>[25]</sup>发现 EB 病毒感染的鼻咽癌细胞中蛋白 p62-Kelch 样 ECH 相关蛋白 1-核因子红细胞相关因子 2(p62-Keap1-NRF2)信号通路被激活,其中,GPX4 与转化生长因子-β 激活激酶 1-转化生长因子-β 激活激酶 1 结合蛋白 1/转化生长因子-β 激活激酶 1 结合蛋白 3(TAK1-TAB1/TAB3)复合物相互作用,调节 TAK1 激酶活性,进一步激活下游的丝裂原活化蛋白激酶-应激活化蛋白激酶(MAPK-JNK)和核因子 κB(NF-κB)通路,最终导致 GPX4 上调,从而有效地降低了鼻咽癌细胞的铁死亡对化放疗的敏感性。

### 2.2 铁死亡与鼻咽癌转移

鼻咽癌治疗过程中的另一大问题是远处转移。多数鼻咽癌患者在确诊时已经是晚期,并出现多器官的转移,因此在晚期癌症中找到与铁死亡相关的表达靶标是一项很有意义的研究,了解转移机制和确定可靠的治疗靶点对于改善预后和实现临床转化至关重要。CAPRIN 家族成员 2(CAPRIN2)是一种 RNA 结合蛋白(RBP),Qiu 等<sup>[26]</sup>发现在鼻咽癌远处转移(肺转移)的细胞中,CAPRIN2 上调,其铁死亡的敏感性较高,表明其促进了鼻咽癌细胞的存活、迁移和侵袭,并通过甲羟戊酸通路(MVA)中的关键酶 3-羟基-3-甲基戊二酸单酰辅酶 A 还原酶(HMGCR)发挥作用,此酶是 CAPRIN2 的关键下游分子。M1 型和 M2 型的巨噬细胞在肿瘤的转移中起着重要的作用。Chen 等<sup>[27]</sup>发现富含 B 类 1 型清道夫受体(SCARB1)的细胞外囊泡通过上调 3-羟基邻氨基苯甲酸 3,4-二加氧酶(HAAO)水平促进 M1 型巨噬细胞铁死亡,以减少 M1 型巨噬细胞浸润,同时通过上调细胞色素 P450 家族 1 亚家族 B 成员 1(CYP1B1)水平来降低 M2 型巨噬细胞的吞噬作用,从而实现远处转移。这表明找到 M1 型巨噬细胞在鼻咽癌中

的抑制靶点或许可以避免早期癌症的远处转移。

### 3 铁死亡在鼻咽癌治疗中的应用

近年来,研究证实多种药物、活性化合物、基因靶点及相关纳米材料能够通过诱导铁死亡来抑制鼻咽癌的生长,增强癌组织对放疗和化疗的敏感度,并能有效防止鼻咽癌的远处转移及复发。这些发现突显了利用铁死亡机制对抗癌症的巨大潜力。铁死亡调控鼻咽癌机制,如表 2 所示。表 2 中:↑表示促进或激活;↓表示抑制或减弱;NA 表示文献中未说明。

表 2 铁死亡调控鼻咽癌机制  
Tab. 2 Mechanism of ferroptosis regulation in nasopharyngeal carcinoma

| 项目       | 药物/材料                                 | 作用途径                             | 铁死亡 | 体内鼻咽癌进展 | 放化疗敏感性 |
|----------|---------------------------------------|----------------------------------|-----|---------|--------|
| 基因位点     | LARP1 ↓ <sup>[28]</sup>               | GPX4 ↓                           | ↑   | ↓       | ↑      |
|          | Erastin <sup>[29]</sup>               | GPX4 ↓                           | ↑   | ↓       | ↑      |
|          | 伊曲康唑 <sup>[2]</sup>                   | Fe <sup>2+</sup> ↑               | ↑   | ↑       | ↑      |
|          | RSL3 <sup>[30]</sup>                  | X <sub>c</sub> <sup>-</sup> 系统 ↓ | ↑   | ↓       | ↑      |
| 活性化合物/药物 | CD8 <sup>+</sup> T 细胞 <sup>[31]</sup> | X <sub>c</sub> <sup>-</sup> 系统 ↓ | ↑   | ↓       | ↑      |
|          | 淋巴因子 MIF <sup>[32]</sup>              | GPX4 ↑                           | ↓   | ↑       | NA     |
|          | 细胞外囊泡 <sup>[33]</sup>                 | ITGB3 ↑                          | ↑   | ↓       | ↑      |
|          | PRMT4 抗体 <sup>[34]</sup>              | GPX4 ↑                           | ↓   | ↑       | ↓      |
|          | 淫羊藿素 <sup>[35]</sup>                  | GPX4 ↓                           | ↑   | ↓       | ↑      |
| 天然药物     | 小檗碱 <sup>[36]</sup>                   | GPX4 ↓                           | ↑   | ↓       | NA     |
|          | 葫芦素 B <sup>[37]</sup>                 | GPX4 ↓、Fe <sup>2+</sup> ↑        | ↑   | ↓       | ↑      |
| 纳米材料     | 针对 circADARB1 的纳米载体 <sup>[38]</sup>   | Fe <sup>2+</sup> ↑               | ↑   | ↑       | ↑      |

#### 3.1 铁死亡与化疗

化疗是恶性肿瘤的主要治疗方法,包括小檗碱、木犀草素及顺铂在内的多种抗癌剂在鼻咽癌治疗中发挥着重要作用<sup>[36,39]</sup>,但肿瘤耐药问题严重影响疗效。顺铂是临床上治疗鼻咽癌的常用化疗药物之一,但耐药性的产生严重影响着顺铂疗效<sup>[13]</sup>。有研究指出,癌症相关成纤维细胞(CAFs)通过分泌成纤维细胞生长因子 5(FGF5)和激活下游成纤维细胞生长因子受体 2/核因子红细胞相关因子 2(FGFR2/Nrf2)信号传导抑制铁死亡,从而降低鼻咽癌的顺铂敏感性<sup>[40]</sup>。顺铂的耐药机制主要是肿瘤细胞 DNA 损伤自我修复能力,增加药物摄取减少,在药物到达细胞内靶点之前被主动泵出,药物被内源性硫醇分子灭活等,而铁死亡被证明在顺铂耐药过程中的敏感度下降。

从基因层面来看,La 相关蛋白 1(LARP1)是一种新型的肿瘤相关基因,焦泉慧<sup>[28]</sup>的研究发现,LARP1 通过调节铁死亡途径影响鼻咽癌细胞对顺铂的化疗敏感性,鼻咽癌细胞中 LARP1 高表达,而敲低 LARP1 可以增强顺铂对鼻咽癌细胞增殖能力的抑制作用,同时也可以增强顺铂对鼻咽癌细胞凋亡的促进作用,从而说明了 LARP1 表达水平与鼻咽癌细胞对顺铂化疗敏感性相关,为鼻咽癌增加对顺铂化疗的作用找到了新的靶点。从蛋白层面来看,EB 病毒潜伏蛋白和 miRNAs 参与了鼻咽癌化疗耐药性的形成。有研究发现,删除 EBNA1 从而减少了 EB 病毒 DNA 的丰度,使鼻咽癌细胞对顺铂和 5-氟尿嘧啶更加敏感<sup>[41]</sup>,可以增加其对化疗的敏感度。

铁死亡激活剂与化疗药物联合使用也能对鼻咽癌治疗起到一定作用。已有大量研究证明,铁死亡诱导剂 RSL3 等<sup>[30]</sup>铁死亡激活剂可通过抑制 X<sub>c</sub><sup>-</sup> 系统活性,促进 ROS 生成及铁累积等途径诱导铁死亡,进而逆转鼻咽癌等肿瘤化疗药物耐药。有研究究表明,铁死亡激活剂 Erastin 联合顺铂能通过降低 GPX4 表达诱导顺铂耐药的鼻咽癌细胞发生铁死亡,从而增强鼻咽癌细胞株敏感性,说明了铁死亡激动剂是治疗鼻咽癌化疗耐药的一种有前途的策略<sup>[29]</sup>。

#### 3.2 铁死亡与放疗

放疗是临床上治疗鼻咽癌的另一主流方法,它不仅可以通过损伤 DNA 直接损伤肿瘤组织,还可以通过引发强烈的铁死亡造成细胞死亡。铁死亡在放疗诱导的细胞死亡和肿瘤抑制中发挥重要作用,并



介导放疗与免疫治疗的协同作用,因此,寻找放疗增敏靶点意义重大。Xu 等<sup>[2]</sup>发现,伊曲康唑通过增加溶酶体内铁含量诱导鼻咽癌细胞发生铁死亡,从而降低鼻咽癌球体细胞的干性,并在一定程度上逆转放疗抗性。有研究表明,在鼻咽癌细胞中,淫羊藿素与放射联合治疗,可能会通过增加细胞周期阻滞及增强细胞活性氧促使细胞发生铁死亡来发挥放疗增敏的作用<sup>[35,42]</sup>。此外,谷胱甘肽 S-转移酶 mu3 (GSTM3)在促进铁死亡中也发挥着重要作用,GSTM3 通过稳定泛素特异性肽酶 14(USP14)抑制脂肪酸合酶(FASN)的泛素化和降解,而且可以与 GPX4 相互作用并抑制 GPX4 表达,从而促进放疗诱导的铁死亡并增强鼻咽癌的放疗敏感性<sup>[43]</sup>。

### 3.3 铁死亡与免疫治疗

免疫疗法以免疫检查点抑制剂(如细胞毒性 T 淋巴细胞相关蛋白 4(CATL-4)、程序性死亡受体 1/程序性死亡配体 1(PD1/PD-L1))为靶点和细胞治疗等为主,从而提高抗肿瘤免疫效率,近些年在临床上取得了巨大进展。有研究显示,肿瘤铁死亡和肿瘤免疫微环境之间存在合作关系<sup>[44]</sup>。Wang 等<sup>[31]</sup>发现 CD8<sup>+</sup>T 细胞通过抑制 X<sub>c</sub><sup>-</sup> 系统促进肿瘤铁死亡参与抗肿瘤活性,这表明 CD8<sup>+</sup>T 细胞治疗是一种潜在的治疗策略。除此之外,Zhou 等<sup>[45]</sup>将铁死亡相关基因 ATP 结合盒亚家族 C 成员 1(ABCC1)和谷氨酰胺酶 2(GLS2)用于风险模型构建,发现风险评分和瘤内肿瘤浸润淋巴细胞是与鼻咽癌患者预后相关的独立危险因素,表明铁死亡相关基因的特征预示着鼻咽癌的预后,为研究铁死亡相关基因在鼻咽癌免疫疗法中的作用提供了重要的实验依据。在鼻咽癌细胞免疫环境中,以巨噬细胞为主的免疫细胞起着重要的作用。Chen 等<sup>[32]</sup>发现一种淋巴因子巨噬细胞迁移抑制因子(MIF)在鼻咽癌细胞中高表达,鼻咽癌细胞分泌的外泌体可被巨噬细胞吸收,从而抑制巨噬细胞的铁死亡,促进鼻咽癌的转移。表明淋巴因子 MIF 可能是一种降低转移率的潜在免疫治疗方法。

### 3.4 铁死亡与靶向治疗

铁死亡对鼻咽癌药物的研究,近些年来也取得了很大的进展,并发现了许多新的药物靶点。Li 等<sup>[33]</sup>研究发现,血小板来源的细胞外囊泡通过上调整合素  $\beta 3$  亚基(ITGB3),抑制铁死亡并促进鼻咽癌的远处转移,说明 ITGB3 可能是促进鼻咽癌细胞铁死亡的新靶点。Pu 等<sup>[34]</sup>的研究表明,精氨酸甲基转移酶(PRMT4)抗体可通过 Nrf2/GPX4 通路减少 Erastin 诱导的鼻咽癌顺铂耐药细胞铁死亡,表明抗 PRMT4 是一种潜在靶向治疗药物。

一些天然药物在鼻咽癌靶向铁死亡治疗中也取得了很大的进展。Wu 等<sup>[36]</sup>发现小檗碱通过 X<sub>c</sub><sup>-</sup> 系统/GSH/GPX4 轴介导的铁死亡抑制鼻咽癌转移。Bakar-Ates 等<sup>[37]</sup>研究发现,葫芦素 B 作为一种天然药物可以通过促进铁离子积累和靶向 GSH 耗竭下调 GPX4 的表达,从而诱导鼻咽癌细胞发生铁死亡,说明葫芦素 B 或许可以作为一种靶向药物治疗鼻咽癌。

### 3.5 铁死亡与纳米治疗

纳米材料因其独特的物理化学特性在提升药物溶解度、改善吸收效率及实现精准靶向等方面展现出显著的优势。将这种技术与铁死亡机制结合应用于癌症治疗,是一种创新的治疗方法,并具有广泛的应用前景。Wang 等<sup>[38]</sup>开发了一种创新的纳米载体系统,该材料由包裹在细胞膜中的半导体聚合物纳米颗粒组成,专门针对环状 RNA 腺苷酸脱氨酶 RNA 特异性 B1(ADARB1),这是一种在多种癌症中表达异常且与肿瘤发生发展密切相关的非编码 RNA 分子。该纳米载体设计用于特异性递送能够沉默或下调 ADARB1 表达的小干扰 RNA(siRNA),当这些基因调控分子被有效递送到肿瘤细胞内时,它们可以抑制 ADARB1 的功能,从而诱导铁死亡,此外该纳米载体还能增强鼻咽癌细胞对放疗治疗的敏感性,这是因为铁死亡过程增强了放射线对癌细胞的杀伤效果。这一发现为未来开发更加个性化和有效的癌症治疗方法奠定了基础,并突显了纳米医学在癌症治疗领域的广阔应用前景。

## 4 总结与展望

铁死亡作为一种新的细胞死亡方式,在相关的调控网络和功能方面的研究已经取得了很大进展,但在鼻咽癌治疗方面仍需要探究铁死亡特异性的分子标记物,从而有利于了解鼻咽癌与铁死亡的关系及靶向铁死亡途径靶点。介绍铁死亡的具体作用机制和特点,进而了解铁死亡在鼻咽癌中的具体通路和

调控因子等,从而探讨其治疗耐药性、放化疗敏感性和远处转移等方面的应用。

目前,因治疗耐药性导致鼻咽癌难以治愈是临床上面临的一大难题,而铁死亡作为一种新的细胞死亡形式,是一种很有前途的抗癌策略。由表 2 可知,大多数药物的作用机制仍是 GPX4、铁代谢等经典途径,虽然铁死亡的新信号转导通路不断涌现,但应用于药物开发和靶点发现的仍然不多。这提示研究人员在未来进行鼻咽癌药物或靶点研发时可以与新信号通路相结合,从而研发更多新型的药物。此外,通过诱导铁死亡治疗鼻咽癌及克服放化疗耐药性的研究取得了重要进展,特别是在药物靶点发现方面。其中,天然药物的研发突破尤为显著,这类药物具有副作用较小、毒性较低等特点。从上述 5 种治疗方式来看,靶向治疗和免疫治疗处于研究的前沿,同时也新发现了多个靶点通路和免疫治疗手段,如 CD8<sup>+</sup> T 细胞、Nrf2/GPX4 通路等,这些都可以在未来为精准化治疗鼻咽癌提供新的治疗方式。同时,纳米材料治疗也是未来的热点的方向,它不仅可以实现精确定位,还具有运载小分子药物且避免被体内环境破坏等优点。

然而,铁死亡对鼻咽癌靶向治疗的研究仍有待深入。例如,在临床应用方面,因患者个体差异所导致的铁死亡激活剂用量仍没有统一的标准,药物所带来的副作用和毒性仍有待进一步明确。此外,临床联合用药、不同药物之间的相互作用、包括可能的拮抗或协同效果,也尚未完全明确。这些均对制定有效的治疗方案构成了挑战。在细胞方面,由于正常细胞也会发生铁死亡,如何在进行铁死亡治疗肿瘤过程中不伤害正常细胞,从而更大程度地避免不良反应也是未来研究中需要进一步深入探索的问题。在通路方面,由于铁死亡涉及的通路交错复杂,这些通路之间的协同作用也有待阐明。但是,随着研究的不断深入,铁死亡作为一种以活性氧和脂质过氧化物水平升高为特征的新型死亡方式,有望成为鼻咽癌临床干预的一个新靶点。

参考文献:

[1] LEI Guang,ZHANG Yilei,HONG Ting,*et al.* Ferroptosis as a mechanism to mediate p53 function in tumor radio-sensitivity[J]. *Oncogene*,2021,40(20):3533-3547. DOI:10. 1038/s41388-021-01790-w.

[2] XU Ying,WANG Qian,LI Xiaozhen,*et al.* Itraconazole attenuates the stemness of nasopharyngeal carcinoma cells *via* triggering ferroptosis[J]. *Environmental Toxicology*,2021,36(2):257-266. DOI:10. 1002/tox. 23031.

[3] ZHANG Wenlu,WEN Wen,TAN Ran,*et al.* Ferroptosis: Potential therapeutic targets and prognostic predictions for acute myeloid leukemia (Review)[J]. *Oncology Letters*,2024,28(6):574. DOI:10. 3892/ol. 2024. 14707.

[4] ZHANG Yuna,CAO Yujie,LUO Lin,*et al.* The global, regional, and national burden of nasopharyngeal carcinoma and its attributable risk factors in 204 countries and territories, 1990—2019[J]. *Acta Oto-Laryngologica*,2022,142(7/8):590-609. DOI:10. 1080/00016489. 2022. 2111711.

[5] DIXON S J,LEMBERG K M,LAMPRECHT M R,*et al.* Ferroptosis: An iron-dependent form of nonapoptotic cell death[J]. *Cell*,2012,149(5):1060-1072. DOI:10. 1016/j. cell. 2012. 03. 042.

[6] SHI Chunlei,XIE Yongjie,LI Xueyang,*et al.* Identification of ferroptosis-related genes signature predicting the efficiency of invasion and metastasis ability in colon adenocarcinoma[J]. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 2021,9:815104. DOI:10. 3389/fcell. 2021. 815104.

[7] 张展瑞,刘红雨,陈军. 线粒体在铁死亡中的作用及其与肿瘤的关系[J]. *中国肺癌杂志*,2024,27(10):785-791. DOI:10. 3779/j. issn. 1009-3419. 2024. 102. 34.

[8] 王新峰,姚宇欣,王攀. 铁死亡相关机制及其在恶性肿瘤中的研究进展[J]. *中国医学科学院学报*,2023,45(4):647-654. DOI:10. 3881/j. issn. 1000-503X. 15379.

[9] LI Fengjiao,LONG Huizhi,ZHOU Ziwei,*et al.* System X<sub>c</sub><sup>-</sup>/GSH/GPX4 axis: An important antioxidant system for the ferroptosis in drug-resistant solid tumor therapy[J]. *Frontiers in Pharmacology*,2022,13:910292. DOI:10. 3389/fphar. 2022. 910292.

[10] LIANG K A,CHIH H Y,LIU I J,*et al.* Tumor-targeted delivery of hyaluronic acid/polydopamine-coated Fe<sup>2+</sup>-doped nano-scaled metal-organic frameworks with doxorubicin payload for glutathione depletion-amplified chemodynamic-chemo cancer therapy[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*,2025,677:400-415. DOI:10. 1016/j. jcis. 2024. 07. 241.

[11] PUNZIANO C,TROMBETTI S,CESARO E,*et al.* Antioxidant systems as modulators of ferroptosis: Focus on

- transcription factors[J]. *Antioxidants (Basel)*, 2024, 13(3):298. DOI:10.3390/antiox13030298.
- [12] POPE L E, DIXON S J. Regulation of ferroptosis by lipid metabolism[J]. *Trends in Cell Biology*, 2023, 33(12):1077-1087. DOI:10.1016/j.tcb.2023.05.003.
- [13] LIANG Deguang, MINIKES A M, JIANG Xuejun. Ferroptosis at the intersection of lipid metabolism and cellular signaling[J]. *Molecular Cell*, 2022, 82(12):2215-2227. DOI:10.1016/j.molcel.2022.03.022.
- [14] KOPPULA P, ZHUANG Li, GAN Boyi. Cystine transporter SLC7A11/xCT in cancer: Ferroptosis, nutrient dependency, and cancer therapy[J]. *Protein & Cell*, 2021, 12(8):599-620. DOI:10.1007/s13238-020-00789-5.
- [15] WANG Kun, SHI Xu, LIN Hongjin, *et al.* Selenium deficiency exacerbates ROS/ER stress mediated pyroptosis and ferroptosis induced by bisphenol A in chickens thymus[J]. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 2025, 148:13-26. DOI:10.1016/j.jes.2024.01.002.
- [16] GUO Jun, CHEN Long, MA Min. Ginsenoside Rg1 suppresses ferroptosis of renal tubular epithelial cells in sepsis-induced acute kidney injury *via* the FSP1-CoQ(10)-NAD(P)H pathway[J]. *Current Medicinal Chemistry*, 2024, 31(15):2119-2132. DOI:10.2174/0929867330666230607125054.
- [17] NISHIZAWA H, YAMANAKA M, IGARASHI K. Ferroptosis: Regulation by competition between NRF2 and BACH1 and propagation of the death signal[J]. *FEBS Journal*, 2023, 290(7):1688-1704. DOI:10.1111/febs.16382.
- [18] NIU Xiaolong, SUN Wei, TANG Xiaohang, *et al.* Bufalin alleviates inflammatory response and oxidative stress in experimental severe acute pancreatitis through activating Keap1-Nrf2/HO-1 and inhibiting NF- $\kappa$ B pathways[J]. *International Immunopharmacology*, 2024, 142:113113. DOI:10.1016/j.intimp.2024.113113.
- [19] TANG Linglong, CHEN Yupei, CHEN Chuanben, *et al.* The Chinese Society of Clinical Oncology (CSCO) clinical guidelines for the diagnosis and treatment of nasopharyngeal carcinoma[J]. *Cancer Communications (Lond)*, 2021, 41(11):1195-1227. DOI:10.1002/cac2.12218.
- [20] 陶倩, 刘念, 陈静, 等. 铁死亡与肿瘤免疫[J]. *中南大学学报(医学版)*, 2024, 49(8):1309-1315. DOI:10.11817/j.issn.1672-7347.2024.240389.
- [21] UBELLACKER J M, TASDOGAN A, RAMESH V, *et al.* Lymph protects metastasizing melanoma cells from ferroptosis[J]. *Nature*, 2020, 585(7823):113-118. DOI:10.1038/s41586-020-2623-z.
- [22] ZUO Yingbing, ZHANG Yinfeng, ZHANG Rui, *et al.* Ferroptosis in cancer progression: Role of noncoding RNAs[J]. *International Journal of Biological Sciences*, 2022, 18(5):1829-1843. DOI:10.7150/ijbs.66917.
- [23] LI Lijie, ZENG Jie, HE Sili, *et al.* METTL14 decreases FTH1 mRNA stability *via* m6A methylation to promote sorafenib-induced ferroptosis of cervical cancer[J]. *Cancer Biology & Therapy*, 2024, 25(1):2349429. DOI:10.1080/15384047.2024.2349429.
- [24] HUANG Weimei, LI Zhixun, WU Yinghui, *et al.* m6A demethylase FTO renders radioresistance of nasopharyngeal carcinoma *via* promoting OTUB1-mediated anti-ferroptosis[J]. *Translational Oncology*, 2023, 27:101576. DOI:10.1016/j.tranon.2022.101576.
- [25] YUAN Li, LI Shibing, CHEN Qiuyuan, *et al.* EBV infection-induced GPX4 promotes chemoresistance and tumor progression in nasopharyngeal carcinoma[J]. *Cell Death and Differentiation*, 2022, 29(8):1513-1527. DOI:10.1038/s41418-022-00939-8.
- [26] QIU Lin, ZHOU Rui, ZHOU Ling, *et al.* CAPRIN2 upregulation by LINC00941 promotes nasopharyngeal carcinoma ferroptosis resistance and metastatic colonization through HMGCR[J]. *Frontiers in Oncology*, 2022, 12:931749. DOI:10.3389/fonc.2022.931749.
- [27] CHEN Wenhui, BAO Lili, REN Qianqian, *et al.* SCARB1 in extracellular vesicles promotes NPC metastasis by co-regulating M1 and M2 macrophage function[J]. *Cell Death Discovery*, 2023, 9(1):323. DOI:10.1038/s41420-023-01621-9.
- [28] 焦泉慧. LARP1 通过调控铁死亡介导鼻咽癌细胞中顺铂的化疗敏感性[D]. 南昌:江西中医药大学, 2023.
- [29] ZHONG Xing, ZHANG Weiwei, ZHANG Weiming, *et al.* FASN contributes to ADM resistance of diffuse large B-cell lymphoma by inhibiting ferroptosis *via* nf- $\kappa$ B/STAT3/GPX4 axis[J]. *Cancer Biology & Therapy*, 2024, 25(1):2403197. DOI:10.1080/15384047.2024.2403197.
- [30] DIKE P E, HWANG B J, CAMPBELL T, *et al.* HMGA2 regulates GPX4 expression and ferroptosis in prostate cancer cells[J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2024, 736:150859. DOI:10.1016/j.bbrc.

2024. 150859.

[31] WANG Weimin, GREEN M, CHOI J E, *et al.* CD8<sup>+</sup> T cells regulate tumour ferroptosis during cancer immunotherapy[J]. *Nature*, 2019, 569(7755): 270-274. DOI: 10. 1038/s41586-019-1170-y.

[32] CHEN Wenhui, ZUO Fan, ZHANG Kaiwen, *et al.* Exosomal MIF derived from nasopharyngeal carcinoma promotes metastasis by repressing ferroptosis of macrophages[J]. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 2021, 9: 791187. DOI: 10. 3389/fcell. 2021. 791187.

[33] LI Fei, XU Ting, CHEN Peiling, *et al.* Platelet-derived extracellular vesicles inhibit ferroptosis and promote distant metastasis of nasopharyngeal carcinoma by upregulating ITGB3[J]. *International Journal of Biological Sciences*, 2022, 18(15): 5858-5872. DOI: 10. 7150/ijbs. 76162.

[34] PU Xiaoping, WU Hong, LIU Xiaoyan, *et al.* PRMT4 reduced erastin-induced ferroptosis in nasopharyngeal carcinoma cisplatin-resistant cells by Nrf2/GPX4 pathway[J]. *Journal of Environmental Pathology, Toxicology and Oncology*, 2025, 44(1): 57-71. DOI: 10. 1615/JEnvironPatholToxicolOncol. 2024053754.

[35] XIAO Juan, LUO Chenggen, LI Anmao, *et al.* Icaritin inhibits chondrocyte ferroptosis and alleviates osteoarthritis by enhancing the SLC7A11/GPX4 signaling[J]. *International Immunopharmacology*, 2024, 133: 112010. DOI: 10. 1016/j. intimp. 2024. 112010.

[36] WU Yao, JIA Qunying, TANG Qi, *et al.* Berberine-mediated ferroptosis through system X<sub>c</sub><sup>-</sup>/GSH/GPX4 axis inhibits metastasis of nasopharyngeal carcinoma[J]. *Journal of Cancer*, 2024, 15(3): 685-698. DOI: 10. 7150/jca. 90574.

[37] BAKAR-ATES F, OZKAN E. Cucurbitacin B and erastin co-treatment synergistically induced ferroptosis in breast cancer cells *via* altered iron-regulating proteins and lipid peroxidation[J]. *Toxicology in Vitro*, 2024, 94: 105732. DOI: 10. 1016/j. tiv. 2023. 105732.

[38] WANG Dan, TANG Le, CHEN Mingjian, *et al.* Nanocarriers targeting circular RNA ADARB1 boost radiosensitivity of nasopharyngeal carcinoma through synergically promoting ferroptosis[J]. *ACS Nano*, 2024, 18(45): 31055-31075. DOI: 10. 1021/acsnano. 4c07676.

[39] WU Zhiyi, QU Qingsong. Mechanism of luteolin induces ferroptosis in nasopharyngeal carcinoma cells[J]. *Journal of Toxicological Sciences*, 2024, 49(9): 399-408. DOI: 10. 2131/jts. 49. 399.

[40] LIU Feng, TANG Ling, LIU Huai, *et al.* Cancer-associated fibroblasts secrete FGF5 to inhibit ferroptosis to decrease cisplatin sensitivity in nasopharyngeal carcinoma through binding to FGFR2[J]. *Cell Death & Disease*, 2024, 15(4): 279. DOI: 10. 1038/s41419-024-06671-0.

[41] ZHANG Xinyu, CHEN Yanhong, WANG Shuhui, *et al.* TianTan vaccinia virus-based EBV vaccines targeting both latent and lytic antigens elicits potent immunity against lethal EBV challenge in humanized mice[J]. *Emerging Microbes & Infections*, 2024, 13(1): 2412640. DOI: 10. 1080/22221751. 2024. 2412640.

[42] 胡桐, 勾文峰, 任中昊, 等. 淫羊藿素通过调控铁死亡增加鼻咽癌细胞的放射敏感性[J]. *南方医科大学学报*, 2023, 43(10): 1665-1673. DOI: 10. 12122/j. issn. 1673-4254. 2023. 10. 03.

[43] CHEN Yuting, FENG Yuanyuan, LIN Yanling, *et al.* GSTM3 enhances radiosensitivity of nasopharyngeal carcinoma by promoting radiation-induced ferroptosis through USP14/FASN axis and GPX4[J]. *British Journal of Cancer*, 2024, 130(5): 755-768. DOI: 10. 1038/s41416-024-02574-1.

[44] CUI Kaisa, WANG Kang, HUANG Zhaohui. Ferroptosis and the tumor microenvironment[J]. *Journal of Experimental and Clinical Cancer Research*, 2024, 43(1): 315. DOI: 10. 1186/s13046-024-03235-0.

[45] ZHOU Ji, GUO Tianyao, ZHOU Lin, *et al.* The ferroptosis signature predicts the prognosis and immune microenvironment of nasopharyngeal carcinoma[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 1861. DOI: 10. 1038/s41598-023-28897-2.

(责任编辑: 黄晓楠      英文审校: 刘源岗)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202504010



# 参与肺癌靶向耐药的 lncRNAs 的作用及其机制

杨素心<sup>1,2</sup>, 马丽浩<sup>1</sup>, 张景红<sup>1</sup>(1. 华侨大学 医学院, 福建 厦门 361021;  
2. 马德里康普顿斯大学 社会学院, 马德里 28040)

**摘要:** 对参与肺癌靶向耐药的长链非编码 RNAs (lncRNAs) 的作用及其机制进行综合分析, 阐明治疗肺癌耐药的多种标志物。通过查阅近年相关文献, 总结参与肺癌顺铂 (DDP) 耐药、靶向表皮生长因子受体酪氨酸激酶抑制剂 (EGFR-TKIs) 抵抗、靶向间变性淋巴瘤激酶酪氨酸激酶抑制剂 (ALK-TKIs) 抵抗, 以及免疫治疗抵抗的各种长链非编码 RNAs, 分析其在逆转肺癌耐药中的作用和贡献。结果表明: 在参与 EGFR-TKIs 靶向抵抗的 lncRNAs 中, LINC00460 不仅通过激活 miR-338-3p/小染色体维持蛋白 4 通路调控吉非替尼耐药, 而且在奥西替尼耐药中同样发挥关键作用, 而肺腺癌转移相关转录本 1 则通过调控主要组织相容性复合体蛋白和程序性死亡配体 1 的表达, 进而影响免疫细胞群的耐药, 其有望成为改善肺癌免疫治疗预后的关键靶点。

**关键词:** 长链非编码 RNAs (lncRNAs); 肺癌; 顺铂耐药; 靶向耐药; 分子机制

中图分类号: R 979.1; R 966

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2025)04-0369-10

## Role of LncRNAs in Targeted Drug Resistance in Lung Cancer and Their Mechanisms

YANG Suxin<sup>1,2</sup>, MA Lihao<sup>1</sup>, ZHANG Jinghong<sup>1</sup>

(1. School of Medicine, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. School of Sociology, Universidad Complutense de Madrid, Madrid 28040, Spain)

**Abstract:** The roles and mechanisms of long non-coding RNAs (lncRNAs) involved in targeted drug resistance in lung cancer were analyzed comprehensively, elucidating multiple biomarkers for treating lung cancer resistance. By reviewing relevant literature in recent years, the involvement in cisplatin (DDP) resistance in lung cancer, targeted epidermal growth factor receptor tyrosine kinase inhibitors (EGFR-TKIs) resistance, targeted anaplastic lymphoma kinase tyrosine kinase inhibitors (ALK-TKIs) resistance, and various long non-coding RNAs (lncRNAs) resistant to immunotherapy were summarized, and its role and contribution in reversing drug resistance in lung cancer were analyzed. The results show that among the lncRNAs associated with EGFR-TKIs targeted resistance, LINC00460 not only regulates gefitinib resistance through activation of the miR-338-3p/SMC4 pathway, but also plays a crucial role in resistance to osimertinib. Additionally, lung adenocarcinoma metastasis-associated transcript 1 has been shown to affect immune resistance by modulating the expression of major histocompatibility complex proteins and programmed death-ligand 1, highlighting its potential as a key therapeutic target for improving the outcomes of immunotherapy in lung cancer.

收稿日期: 2025-04-19

通信作者: 张景红(1966—), 女, 教授, 博士, 主要从事肿瘤药理学研究。E-mail: zjh@hqu.edu.cn。

基金项目: 福建省科技计划引导性项目(2018Y0062); 福建省厦门市自然科学基金面上资助项目(3502Z202373044)

**Keywords:** long non-coding RNAs (lncRNAs); lung cancer; cisplatin resistance; targeted drug resistance; molecular mechanism

虽然肺癌化疗和靶向治疗研究已经取得了突破性进展,并显著地改善了患者预后,但肿瘤多药耐药(multi-drug resistance, MDR)导致的化疗失败和复发依旧是肺癌治疗中的一大难题。研究表明,在肺癌耐药细胞与敏感细胞之间,长链非编码 RNA(lncRNAs)的表达模式存在显著差异,而在干预原发性与继发性耐药方面,lncRNAs 发挥着尤其关键的作用<sup>[1]</sup>。在肺癌耐药过程中,已发现 lncRNAs 通过多种途径,如干预药物排出泵功能、抑制细胞凋亡、调控 miRNA 的海绵作用和自噬,以及增强肿瘤干细胞的自我更新能力等方式,抑制肿瘤细胞的多药耐药<sup>[2]</sup>。基于此,本文对参与肺癌靶向耐药的长链非编码 RNA 的作用及其机制进行综述。

1 参与肺癌顺铂耐药的 lncRNAs

作为一种经典化疗药物,顺铂(DDP)被广泛用于肺癌、胃癌、卵巢癌、宫颈癌、结直肠癌和头颈部等肿瘤的治疗中。然而,DDP 耐药的出現往往导致患者的预后不良。相关研究表明,许多 lncRNAs 都与肺癌 DDP 耐药有关<sup>[2-3]</sup>,包括致癌或抑癌的各种 lncRNAs,前者包括 HOX 转录反义 RNA(HOTAIR)、肺腺癌转移相关转录本 1(MALAT1)、X 染色体失活特异性转录因子(XIST)、小核仁 RNA 宿主基因 1/7/12(SNHG1/7/12)、膀胱癌相关转录本 1(BLACAT1)、核富集转录体 1(NEAT1)、浆细胞瘤变体易位 1(PVT1)等,而后者包括长链非编码 RNA LINC00173、生长停滞特异性转录本 5(GAS5)等。各种 lncRNAs 干预 DDP 耐药的分子机制主要包括抑制细胞凋亡(APOPTOSIS)、参与细胞自噬、介导 DNA 损伤修复及介导上皮-间充质转化(EMT)等。参与干预肺癌 DDP 耐药的 lncRNAs 及其作用机制,如表 1 所示。表 1 中:↑表示促进或激活;↓表示抑制或减弱。

表 1 参与干预肺癌 DDP 耐药的 lncRNAs 及其作用机制

| Tab. 1 lncRNAs involved in intervening DDP resistance in lung cancer and their action mechanisms |       |        |                                      |          |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------|--------------------------------------|----------|-----------|
| lncRNAs                                                                                          | 肿瘤类型  | 肿瘤药物耐药 | 靶基因/信号通路                             | 耐药机制     | 参考文献      |
| MALAT1                                                                                           | NSCLC | ↑      | miR-338-3p/PYCR2                     | 抑制细胞凋亡   | 文献[4]     |
|                                                                                                  |       |        | miR-27A-5p/PBOV1                     | 抑制细胞凋亡   | 文献[5]     |
|                                                                                                  |       |        | miR-503-5p/SEPT2                     | 抑制细胞凋亡   | 文献[6]     |
|                                                                                                  |       |        | miR-374B-5p/SRSF7                    | 抑制细胞凋亡   | 文献[7]     |
|                                                                                                  |       |        | miR-146A/miR-216                     | DNA 损伤修复 | 文献[8]     |
| SNHG1                                                                                            | NSCLC | ↑      | NF-κB,STAT3                          | 抑制细胞凋亡   | 文献[9]     |
| SNHG12                                                                                           | NSCLC | ↑      | miR-525-5p/XIAP                      | 抑制细胞凋亡   | 文献[10]    |
| HOTAIR                                                                                           | NSCLC | ↑      | MRP,CCL22、<br>miR-6807-5p/EGR1       | 抑制细胞凋亡   | 文献[11-12] |
| XIST                                                                                             | NSCLC | ↑      | GPX4、<br>miR-329-3p/TMBIM6           | 抑制细胞凋亡   | 文献[13-14] |
| NORAD                                                                                            | NSCLC | ↑      | miR-199A-3p/ZNF217                   | 抑制细胞凋亡   | 文献[15]    |
| HAR1A                                                                                            | NSCLC | ↓      | C-MYC                                | 抑制细胞凋亡   | 文献[16]    |
| DINO                                                                                             | LUAD  | ↓      | P53,P53-BAX                          | 抑制细胞凋亡   | 文献[17]    |
| SNHG7                                                                                            | NSCLC | ↑      | LC3β,Beclin1,p62                     | 调节细胞自噬   | 文献[18]    |
| BLACAT1                                                                                          | NSCLC | ↑      | miR-17/ATG7                          | 调节细胞自噬   | 文献[19]    |
| FGD5-AS1                                                                                         | NSCLC | ↑      | miR-142-5p/PD-L1、<br>miR-140-5p/WEE1 | 调节细胞自噬   | 文献[20]    |
| ACTA2-AS1                                                                                        | NSCLC | ↓      | TSC2                                 | 调节细胞自噬   | 文献[21]    |
| SNHG15                                                                                           | LUAD  | ↑      | E2F1,ECE2                            | DNA 损伤修复 | 文献[22]    |
| NEAT1                                                                                            | NSCLC | ↑      | CTR1、miR-98-5p、<br>Wnt 信号通路          | DNA 损伤修复 | 文献[23]    |
| CERS6-AS1                                                                                        | LUAD  | ↑      | miR-424-5p/ANLN                      | 介导 EMT   | 文献[24]    |
| GAS5                                                                                             | NSCLC | ↓      | miR-217/LHPP、<br>miR-221-3p/TP63     | 介导 EMT   | 文献[25-26] |
| MAGI2-AS3                                                                                        | NSCLC | ↓      | miR-1269A/PTEN                       | 介导 EMT   | 文献[27]    |

1.1 抑制细胞凋亡的 lncRNAs

细胞凋亡(APOPTOSIS)是一种由基因调控的程序性细胞死亡方式,同时也是 DDP 耐药肺癌细胞产生耐药的关键机制之一。目前,发现多种 lncRNAs 具有抑制 DDP 耐药肺癌细胞凋亡的作用,其机制涉及多种信号分子和通路。其中,MALAT1 是最早被发现的 lncRNAs 之一。MALAT1 在 NSCLC 耐药过程中与 miRNA 及其他信号分子的协同作用<sup>[2]</sup>,如图 1 所示。在 NSCLC 中,MALAT1 通过靶向 miR-374b-5p 上调富含丝氨酸/精氨酸的剪接因子 7(SRSF7),敲低了 miR-27a-5p 的表达,抑制其对 PBOV1 的负向调控,进而通过激活 MALAT1/miR-338-3p/吡咯喹-5-羧酸还原酶 2(PYCR2)或者 MALAT1/miR-503-5p/SEPTIN 蛋白 2(SEPT2)等信号通路,抑制耐药肺癌细胞的凋亡并降低其对 DDP 耐药细胞的敏感性<sup>[4-7]</sup>。

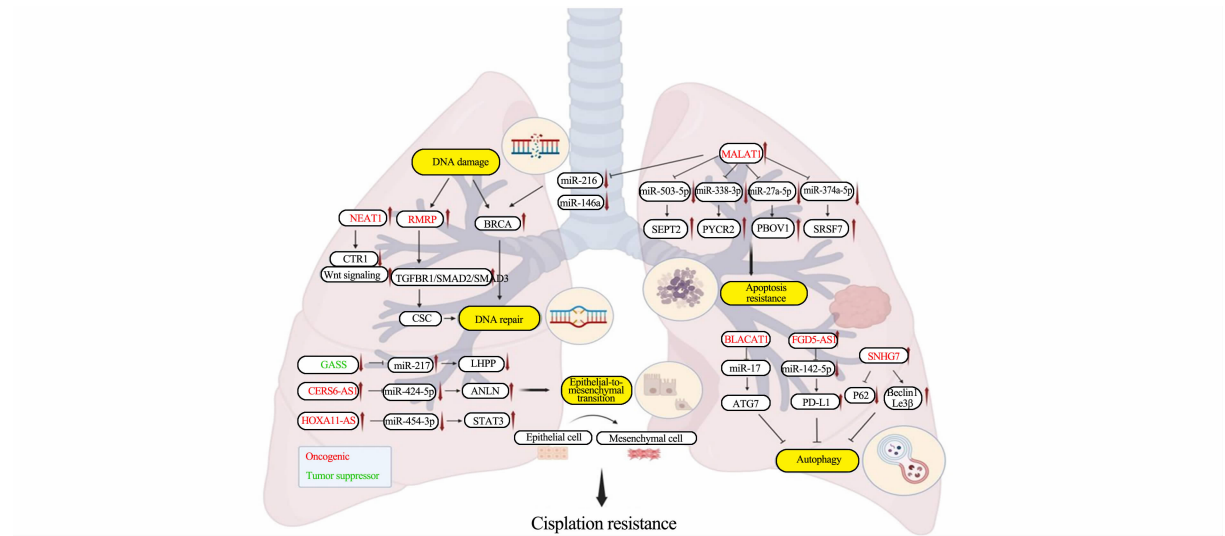


图 1 MALAT1 在 NSCLC 耐药过程中与 miRNA 及其他信号分子的协同作用

Fig. 1 Synergistic effect of MALAT1 with miRNA and other signaling molecules in NSCLC drug resistance process

在抑制肺癌细胞凋亡过程中,小核仁 RNA 宿主基因(SNHG)也发挥着关键作用。一方面,Nie 等<sup>[9]</sup>发现人乳头瘤病毒(HPV)能够通过 SNHG1 的过表达激活核因子- $\kappa$ B(NF- $\kappa$ B)通路,从而上调白介素-6(IL-6)的表达,然后,激活信号转导与转录激活因子 3(STAT3)通路发挥其药理作用;另一方面,SNHG12 则通过抑制 miR-525-5p 的表达,增强 RNA 的稳定性和 X 连锁凋亡抑制蛋白(XIAP)的转录活性,从而增强 DDP 耐药 NSCLC 细胞的抗性<sup>[10]</sup>,这一发现为克服 NSCLC 的 DDP 耐药提供了新的治疗靶点。

此外,研究发现多药耐药相关蛋白 1(MRP1)在肿瘤多药耐药中具有关键作用,HOTAIR 可以通过 miR-6807-5p/早期生长反应蛋白 1(EGFR1)轴,调控 MRP 基因的表达并影响 MDR 的发展<sup>[11]</sup>,同时,HOTAIR 也可以通过抑制趋化因子配体 22(CCL22)的表达,以增强肺癌细胞对 DDP 的化疗抗性<sup>[12]</sup>。

lncRNAs 另一分子机制是作为内源性 RNA(ceRNA)结合或整合 miRNA 来调节其丰度,发挥其海绵作用,进而阻止 miRNA 与其下游靶点的结合,发挥其促进耐药细胞凋亡的作用。相关研究表明:谷胱甘肽过氧化物酶 4(GPX4)的表达与致癌 lncRNA XIST 的表达呈正相关,而 XIST 则可通过上调 GPX4 的表达,抑制铁死亡,从而抑制肺腺癌细胞的凋亡,而沉默 XIST 后,则可上调 miR-329-3p 的表达,从而使具有肿瘤促进作用的跨膜 BAX 抑制剂基序-6(TMBIM6)的表达受到抑制,而敲低 XIST 则可逆转这一过程<sup>[13-14]</sup>。此外,NORAD 在 NSCLC 中高度表达,其表达下调可促进 miR-199a-3p 的表达,然后抑制锌指蛋白 217(ZNF217)的表达,从而抑制 H460/DDP 细胞的增殖并促进细胞凋亡<sup>[15]</sup>。

相较于参与肺癌 DDP 耐药的致癌 lncRNAs,关于抑癌 lncRNAs 的研究较少。其中,人类加速进化区域 1A(HAR1A)已被证实通过下调骨髓细胞瘤病毒癌基因同源物(C-MYC)的转录,加速其蛋白酶体降解,进而抑制 NSCLC 的复发和耐药<sup>[16]</sup>,而损伤诱导的非编码(DINO)RNA 则可以通过稳定靶基因 P53,激活 P53-BAX 信号轴,以增加肺腺癌(LUAD)细胞对 DDP 药物的敏感性<sup>[17]</sup>。



在抑制细胞凋亡的 lncRNAs 中,目前针对 MALAT1 的研究最为深入,MALAT1 通过多种信号通路(miR-374b-5p/SRSF7 和 miR-27a-5p/PBOV1)调控肺癌 DDP 耐药的机制已得到较为明确的阐释,MALAT1 已成为临床治疗肺癌耐药的潜在生物靶标之一。

1.2 参与细胞自噬的 lncRNAs

与抑制肺癌细胞凋亡的 SNHG1 和 SNHG12 不同,SNHG7 主要通过诱导自噬过程,促进肺癌细胞 DDP 耐药过程,从而促进 NSCLC 的复发和耐药。研究表明,相较于 DDP 敏感的 NSCLC 细胞,DDP 耐药细胞呈现出更高的 SNHG7 表达水平,也有研究发现敲低 SNHG7 表达后,会降低自噬标志物 LC3 $\beta$  和 Beclin1 蛋白表达水平,促进 P62 基因的表达<sup>[18]</sup>,进而发挥其调控耐药细胞自噬的作用。此外,BLA-CAT1 主要通过负向调控 miR17,上调自噬相关蛋白 7(ATG7)的表达,进而发挥其诱导耐药细胞自噬的作用<sup>[19]</sup>,而 FGD 基因反义 RNA1(FGD5-AS1)则通过抑制 miR-142 的表达,间接上调 PD-L1 的表达水平,从而增强 NSCLC 耐药细胞对 DDP 药物的抗性<sup>[20]</sup>。此外,还有研究表明, $\alpha$ -平滑肌肌动蛋白 2 反义 RNA1(ACTA2-AS1)能够抑制结节性硬化症复合体 2(TSC2)的表达,通过抑制自噬,增强 NSCLC 耐药细胞对 DDP 的敏感性<sup>[21]</sup>。

1.3 介导 DNA 损伤修复的 lncRNAs

DDP 作为一种经典化疗药物,具有干扰 DNA 的复制和细胞分裂的能力。此类药物通过在癌细胞内形成 DNA-DNA 交联抑制 DNA 的复制和转录,当 DNA 损伤达到无法修复的程度时,癌细胞发生凋亡或坏死。Huang 等<sup>[8]</sup>发现 DDP 耐药肺癌细胞的凋亡与 DNA 损伤修复密切相关,通过敲低 MAL-AT1 可以释放 miR-146a 和 miR-216,这些 miRNA 通过抑制乳腺癌易感基因 1(BRCA1)表达诱导 DNA 损伤,从而提高 NSCLC 耐药细胞对 DDP 的敏感性。Li 等<sup>[22]</sup>也发现 SNHG15 可以通过募集 E2F 转录因子 1(E2F1)上调内皮素转化酶 2(ECE2)的表达,从而增强肺腺癌细胞对 DDP 的耐药性。NEAT1 作为 miR-98-5p 的 ceRNA,通过对 NEAT1/miR-98-5p 轴的调控,提升铜转运体(CTR1)表达水平,而敲低 NEAT1 能够降低 NSCLC 细胞干性,也有研究发现 Wnt 信号通路的调控和 EMT 过程与其维持耐药细胞的干性密切相关<sup>[23]</sup>。

此外,Yin 等<sup>[28]</sup>发现线粒体 RNA 加工内切酶(RMRP)的 lncRNA 组分,在耐药 NSCLC 细胞中表达显著上调,通过调节 TGFBR1/SMAD2/SMAD3 信号通路,维持耐药肿瘤干细胞特性(CSC),在抑制肺癌细胞 DDP 耐药的过程中发挥重要作用。

1.4 介导 EMT 形成的 lncRNAs

EMT 在肿瘤侵袭和转移中起着重要的作用,MALAT1 除了能够抑制细胞凋亡,还可以通过控制 EMT 促进肺癌细胞的转移,而 HOTAIR 则通过对 miR-680 7-5p/EGR1 轴的调控,在抑制细胞凋亡和转移中发挥双重作用<sup>[12]</sup>。此外,神经酰胺合酶 6 反义 RNA1(CERS6-AS1)则通过对 miR-424-5p 海绵作用,解除对肌动蛋白结合蛋白 Anillin(ANLN)的抑制,在 NSCLC 细胞中发挥增强 DDP 抗性的作用<sup>[24]</sup>。研究还发现在抑癌 lncRNAs 中,NSCLC 耐药细胞中 GAS5 的表达显著下降,其通过对 miR-217 海绵作用抑制组氨酸磷酸酶(LHPP)的表达,进而调控 EMT,此外,它也可以同时对 miR-221-3p 产生作用,进而上调肺癌细胞抑制因子 TP63 的表达,抑制 NSCLC DDP 细胞的耐药过程<sup>[25-26]</sup>,而膜相关鸟苷酸激酶 2 反义 RNA3(MAGI2-AS3)则靶向 miR-1269a,上调人第 10 号染色体缺失的磷酸酶及张力蛋白同源物(PTEN)的表达水平,抑制 AKT 磷酸化,从而抑制 EMT,加速 A549/DDP 细胞凋亡的进程<sup>[27]</sup>。在介导 EMT 的众多 lncRNAs 中,HOTAIR 在相关研究中占据主导地位,其介导肺癌细胞迁移和侵袭的机制已被广泛验证,是其 EMT 相关研究的核心靶标之一。

2 参与 EGFR-TKIs 靶向抵抗的 lncRNAs

在肺癌的靶向治疗过程中,由于肿瘤细胞激活表皮生长因子受体(EGFR)结构域的第 2 个突变(如 T790M 突变)、MET 激活和 BRAF 突变等难题,其获得性耐药往往难以避免。目前,EGFR-TKIs 是治疗具有 EGFR 突变的 NSCLC 患者的有效药物,包括厄洛替尼(erlotinib)、吉非替尼(gefitinib)、阿法替尼(afatinib)和奥西替尼(osimertinib)等药物。参与 EGFR-TKIs 靶向抵抗的 lncRNAs,如表 2 所示。由表 2 可知:有 13 种 lncRNAs 参与药物靶向抵抗,其中,10 种为吉非替尼类。



表 2 参与 EGFR-TKIs 靶向抵抗的 lncRNAs  
Tab. 2 LncRNAs involved in EGFR-TKIs targeted resistance

| lncRNAs      | EGFR-TKIs | 肿瘤药物耐药 | 靶基因/信号通路                          | 参考文献   |
|--------------|-----------|--------|-----------------------------------|--------|
| PCAT6        | 吉非替尼      | ↑      | miR-326/IFNAR2                    | 文献[29] |
| AFAP1-AS1    | 吉非替尼      | ↑      | miR-653-5p/AGR2                   | 文献[30] |
| MALAT1       | 吉非替尼      | ↑      | miR-141-3p/SP1/IGFBP1             | 文献[31] |
| FTH1P3       | 吉非替尼      | ↑      | E2F1、LSD1/TIMP3                   | 文献[32] |
| SNHG17       | 吉非替尼      | ↑      | EZH2/LATS2                        | 文献[33] |
| LINC00460    | 吉非替尼      | ↑      | miR-338-3p/MCM4                   | 文献[34] |
| LINC00969    | 吉非替尼      | ↑      | NLRP3/caspase-1/GSDMD             | 文献[35] |
| LINC00665    | 吉非替尼      | ↑      | PI3K/AKT                          | 文献[36] |
| RP11-89K21.1 | 吉非替尼      | ↑      | miR-146a/b-5p/RHPN2、<br>RHOA/ROCK | 文献[37] |
| LOC105376794 | 吉非替尼      | ↓      | ATF4/CHOP                         | 文献[38] |
| H19          | 厄洛替尼      | ↑      | —                                 | 文献[39] |
| PTCSC3       | 厄洛替尼      | ↓      | WNT/β-CATENIN                     | 文献[40] |
| LINC00460    | 奥西替尼      | ↑      | —                                 | 文献[41] |
| LINC01278    | 奥西替尼      | ↑      | miR-324-3p/ZFX                    | 文献[42] |
| LINC00313    | 奥西替尼      | ↑      | miR-218-5p/COL1A1、<br>PI3K/AKT    | 文献[43] |

2.1 吉非替尼耐药

吉非替尼主要通过阻断肿瘤细胞的信号传导、抑制增殖、转移和血管生成而发挥作用,而吉非替尼耐药仍旧是 NSCLC 治疗过程中的一大难题。Zheng 等<sup>[29]</sup>发现在吉非替尼耐药的 NSCLC 中,前列腺癌相关转录物 6(PCAT6)表达上调,其作为 miR-326 的 ceRNA 可以直接靶向 miR-326,从而增强 NSCLC 对吉非替尼的耐药性,而靶向 miR-326 则可以通过抑制其下游干扰素-α 受体 2(IFNAR2)的表达,进而降低 NSCLC 对吉非替尼的耐药性。Zuo 等<sup>[30]</sup>发现在吉非替尼耐药的肺腺癌细胞中,肌动蛋白丝相关蛋白 1 反义 RNA1(AFAP1-AS1)的表达上调导致前梯度蛋白 2(AGR2)的过表达,而其对 miR-653-5p 具有负调控作用,能够阻断 miR-653-5p 对 AGR2 蛋白的抑制,进而抑制肺腺癌细胞对吉非替尼的抗性。此外,药物 Solamargine 也可通过调节 MALAT1/miR-141-3p/Sp1/胰岛素样生长因子结合蛋白 1(IGFBP1)信号通路,有效增强吉非替尼的抗癌作用<sup>[31]</sup>。临床研究也表明铁蛋白重链 1 假基因 3(FTH1P3)的高表达与 NSCLC 患者的不良预后密切相关,而转录因子 E2F1 通过加快 FTH1P3 的转录,促进赖氨酸特异性脱乙酰化酶 1(LSD1)的招募,抑制金属蛋白酶组织抑制剂 3(TIM P3)的表达,从而促进 NSCLC 的耐药的发生和发展<sup>[32]</sup>。目前,有研究表明 SNHG17 将 ZESTE 基因增强子同源物 2(EZH2)募集到大肿瘤抑制激酶 2(LATS2)的启动子区域,通过抑制 LATS2 的表达,降低肺腺癌细胞对吉非替尼的敏感性<sup>[33]</sup>。

与上述作用不同,作为竞争性内源 RNA,LINC00460 通过海绵吸附 miR-338-3p 后,上调微小染色体维持蛋白 4(MCM4)的表达,从而增强吉非替尼的耐药性<sup>[34]</sup>,而 LINC00969 则通过调控 NOD 样受体蛋白 3(NLRP3)/半胱天冬酶-1(caspase-1)/gasdermin 结构域蛋白 D(GSDMD)相关凋亡信号通路,诱导肺癌细胞发生耐药<sup>[35]</sup>。

此外,LINC00665 主要通过招募 EZH2 的增强子到细胞周期激酶抑制剂 1C(CDKN1C)的启动子区域,通过抑制其转录或激活磷脂酰肌醇 3 激酶(PI3K)/蛋白激酶 B(AKT)信号通路而发挥其致癌作用<sup>[36]</sup>。相关试验结果证明,LINC00665 与 EGFR-TKIs 靶向抑制作用密切相关。Chen 等<sup>[37]</sup>发现 lncRNA RP11-89K21.1 可以直接结合肿瘤细胞的 miR-146a/b-5p,降低其表达水平,然后上调 RHO GTP 酶激活蛋白 2(RHPN2)表达,进而通过激活 RAS 同源基因家族成员 A(RHOA)/RHO 相关的卷曲螺旋,形成蛋白激酶(ROCK)信号通路,诱导吉非替尼耐药发生。

相较于致癌的 lncRNAs,关于抑癌 lncRNAs 在 EGFR-TKIs 靶向抑制作用的研究较少。其中,Liu 等<sup>[38]</sup>证实了沉默 lncRNA LOC105376794 可以促进 EGFR 基因外显子 19 框内缺失(19DEL)突变的肺腺癌的复发和转移,加强细胞对吉非替尼的耐药性,而这一过程是通过调控激活转录因子 4(ATF4)/C/

EBP 同源蛋白(CHOP)信号通路和细胞外信号调节激酶(ERK)磷酸化实现的。

2.2 厄洛替尼耐药

厄洛替尼也是 1 种第 1 代 EGFR-TKIs,其通过竞争性抑制 EGFR 的 ATP 结合位点来阻断 EGFR 信号的传导。Xu 等<sup>[39]</sup>发现肺癌细胞对厄洛替尼的敏感性与 lncRNA H19 表达呈正相关,而  $\beta$ -EL-EMENE 可以通过上调 EGFR 突变 NSCLC 中 H19 的表达,进而诱导肿瘤细胞发生铁死亡,从而增强厄洛替尼的敏感性。

此外,在其他参与厄洛替尼耐药的抑癌 lncRNAs 中,来源于人骨髓间充质干细胞(HBMSC)的 lncRNA PTCSC3 则可以通过其对 WNT/ $\beta$ -CATENIN 信号通路调控作用,逆转肺腺癌细胞对厄洛替尼的耐药<sup>[40]</sup>。

2.3 奥西替尼耐药

奥西替尼是 1 种第 3 代不可逆的 EGFR-TKIs,被批准用于治疗携带 EGFR 突变的肺癌患者。研究表明,LINC00460 不仅介导肺癌细胞吉非替尼耐药,也在奥西替尼耐药中发挥着重要作用。通过小干扰 RNA(siRNA)沉默 LINC00460 高表达的奥西替尼耐药细胞,发现肺癌细胞对奥西替尼的药物敏感性增强<sup>[41]</sup>,而 LINC01278 则通过靶向 miR-324-3p/锌指蛋白 X 连锁(ZFX)轴,减少 NSCLC 细胞对奥西替尼抗性<sup>[42]</sup>,也有发现 LINC00313 通过调控 miR-218-5p/I 型胶原  $\alpha$ 1 链(COL1A1)轴,调控 PI3K/AKT 信号通路,增强奥西替尼耐药的发生<sup>[43]</sup>。

在参与 EGFR-TKIs 靶向抵抗的 lncRNAs 中,针对 LINC00460 的研究较多,其耐药机制的研究最为深入,研究发现 LINC00460 可以通过激活肿瘤细胞中 miR-338-3p/MCM4 信号通路,同时,抑制吉非替尼耐药和或奥西替尼耐药的发生,在诱导耐药肿瘤细胞凋亡、抑制自噬和 EMT 以及诱导周期阻滞等发面中发挥着关键作用,是抑制肿瘤耐药研究的关键靶标之一。

目前,针对吉非替尼耐药的 lncRNAs 的研究较多,而对介导奥西替尼和厄洛替尼耐药的 lncRNAs 研究相对较少,深入研究参与 EGFR-TKIs 靶向抵抗的 lncRNAs 或能为肺癌耐药的治疗提供新的思路 and 方向。

3 参与 ALK-TKIs 抗性的 lncRNAs

目前,已经有 3 代 ALK-TKIs 被用于 NSCLC 的治疗,主要包括第 1 代的克唑替尼(crizotinib),第 2 代的塞瑞替尼(ceritinib)、阿来替尼(alectinib)和布加替尼(brigatinib)等,以及第 3 代的劳拉替尼(lorlatinib)。相关研究表明,HOTAIR 的下调抑制了克唑替尼给药后 A549 细胞的中 Beclin1 和 LC3II/I 蛋白的表达,同时,也降低了 UNC-51 样激酶 1(ULK1)自噬激活激酶的磷酸化的水平,说明 HOTAIR 可藉由抑制自噬,降低 NSCLC 细胞对克唑替尼的耐药性<sup>[44]</sup>。

此外,也有研究发现致癌 lncRNA ROR 在 NSCLC 组织和细胞系中高表达,其与 NSCLC 的干细胞特性密切相关,在 A549 细胞中,ROR 的高表达诱导了性别决定区 Y 框蛋白 4(SOX4)和八聚体结合转录因子 4(Oct4)的表达,同样在微管相关蛋白样 4-间变性淋巴瘤激酶(EML4-ALK)阳性 NSCLC 细胞中,也发现 ROR 的表达与其干性的维持密切相关<sup>[3]</sup>。

研究还发现缺氧诱导因子 1 $\alpha$  反义 RNA 2(HIF1A-AS2)的表达与 NSCLC 患者的肿瘤病理分级、TNM 分期、远处转移及临床预后呈正相关,HIF1A-AS2/miR-153-5p/S100A14 轴被证实能够调节 NSCLC 细胞的增殖、迁移和凋亡,敲低 HIF1A-AS2 可增强肺癌细胞对多柔比星的敏感性,并减少自噬。此外,体外实验表明,奥希替尼耐药性与 HIF1A-AS2 的表达呈正相关,下调 HIF1A-AS2 后,提高了 NSCLC 细胞对奥西替尼治疗的耐药性<sup>[3]</sup>。

相关研究表明,作为缺氧诱导因子 1 $\alpha$ (HIF1 $\alpha$ )的反义 RNA,HIF1A-AS2 也可以通过招募 DEAH-BOX 解旋酶 9(DHX9)蛋白至 MYC 启动子区域刺激 MYC 的转录,从而增强肿瘤细胞增殖和转移能力<sup>[45]</sup>。虽然对参与 ALK-TKIs 抗性的 lncRNAs 的研究较少,但 HOTAIR 在克唑替尼耐药中的分子机制已得到初步阐释,提示其可能成为 ALK-TKIs 类研究潜在靶标。因此,进一步深入研究 ALK-TKIs 类 lncRNAs 并揭示其分子机制,将是肺癌靶向治疗领域中值得重视的研究方向。

## 4 参与免疫治疗抵抗的 lncRNAs

在 NSCLC 患者的治疗中,免疫检查点抑制剂(ICD)PD1 和 PD-L1 在临床上的应用已经获得批准,然而,免疫逃逸依旧是导致 NSCLC 患者产生免疫治疗抵抗的主要原因之一。在 NSCLC 中,参与免疫治疗抵抗的 lncRNA 主要包括 MALAT-1、LINC00847、LINC00261、*OIP5* 基因反义 RNA 1(*OIP5-AS1*)、SNHG12 和 lncRNA NPSR1-AS1 等<sup>[2-3]</sup>。相关研究表明,MALAT-1 在调节免疫反应中发挥着重要作用,它不仅能够影响主要组织相容性复合体(MHC)蛋白和 PD-L1 的表达,而且还可以对多种免疫细胞群产生调节作用。因此,深入探讨 MALAT-1 在免疫治疗抵抗中的分子机制对于改进 NSCLC 的治疗策略具有重要意义<sup>[46]</sup>。Chen 等<sup>[47]</sup>发现 LINC00847 与肺腺癌细胞中 B 细胞、CD8<sup>+</sup> T 细胞和树突状细胞的免疫浸润呈正相关,并且能够降低细胞免疫治疗相关基因 PD-L1 的表达。此外,还有研究表明,在 NSCLC 中发现 *OIP5* 基因反义 RNA 1(*OIP5-AS1*)的表达水平上调,其通过靶向 miR-34a 促进 PD-L1 的过表达,从而促进 NSCLC 细胞的增殖<sup>[48]</sup>。此外,沉默 lncRNA SNHG12 也可以减少其与 HUR 的结合并上调 PD-L1 和泛素特异性蛋白酶 8(USP8)的表达水平,从而对 NSCLC 的复发和转移产生负向调节作用,而 USP8 介导的去泛素化过程则进一步稳定了 PD-L1 蛋白水平,最终导致 NSCLC 的免疫逃逸<sup>[49]</sup>。

在 NSCLC 免疫治疗研究中,针对 MALAT1 的研究相对较多。已明确 MALAT-1 主要通过调控 MHC 蛋白和 PD-L1 的表达影响免疫细胞群的耐药性,而 MALAT-1 有望成为肺癌免疫治疗的关键生物靶标。不同的 lncRNAs 在免疫逃逸过程中表现出不同的调控作用,通过发现新的 lncRNAs 靶标,揭示其参与免疫抵抗的新机制,有望为肿瘤的免疫治疗提供新的干预策略。

## 5 总结与展望

多种 lncRNAs 在参与肺癌耐药中发挥着重要作用,虽然 LINC00460 具有调控吉非替尼和奥西替尼耐药的双重作用,但针对 MALAT1 的研究最为深入,其在抑制多种肺癌耐药细胞的凋亡、介导 EMT,以及在免疫治疗抵抗等过程中都发挥着关键作用,是逆转肺癌耐药的最有希望的治疗靶标之一。

lncRNAs 靶标的发现不仅为克服肺癌耐药提供了新策略,而且也为肺癌预后评估或精准治疗提供了新的思路。虽然多种致癌或抑癌的 lncRNAs 在参与肺癌顺铂耐药、靶向 EGFR-TKIs 或 ALK-TKIs 抵抗,以及参与免疫治疗抵抗中发挥着重要的作用,也有阐明其抑制细胞凋亡、参与细胞自噬、介导 EMT,以及影响 DNA 损伤修复等多重分子机制,但是要实现 lncRNAs 的临床应用,还需解决以下几个关键问题:

- 1) 明确 lncRNAs 是否与其他耐药相关因素存在相互作用;
- 2) 关于靶向治疗和免疫逃逸的研究大多依赖于体外实验,因此仍需通过体内实验验证 lncRNAs 靶标的可靠性和准确性,为肺癌的精准治疗提供依据。

鉴于肺癌耐药的复杂性,未来的研究中还应注重多学科交叉合作,综合运用基因编辑、高通量测序、生物信息学等技术手段,深入挖掘 lncRNAs 在肺癌耐药中的潜在作用。

### 参考文献:

[1] GENCEL-AUGUSTO J, WU Wei, BIVONA T G. Long non-coding RNAs as emerging targets in lung cancer[J]. *Cancers*, 2023, 15(12): 3135. DOI: 10.3390/cancers15123135.

[2] WANG Meibin, FU Yujie, ZHONG Chuyue, *et al.* Long non-coding RNA and evolving drug resistance in lung cancer [J]. *Heliyon*, 2023, 9(12): e22591. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e22591.

[3] LIU Wenjuan, ZUO Bingli, LIU Wenting, *et al.* Long non-coding RNAs in non-small cell lung cancer: Implications for preventing therapeutic resistance[J]. *Biochimica et Biophysica Acta-Reviews on Cancer*, 2023, 1878(6): 188982. DOI: 10.1016/j.bbcan.2023.188982

[4] GENG Yang, CHEN Pengfei, ZHANG Lei, *et al.* LncRNA MALAT1 regulates growth of carcinoma of the lung through modulating miR-338-3p/PYCR2 axis[J]. *Cellular and Molecular Biology*, 2023, 69(4): 133-140. DOI: 10.

14715/cmb/2023. 69. 4. 21.

[5] CHEN Wenyu, TAN Xiaoli, YANG Qi, *et al.* MALAT1 enhances gemcitabine resistance in non-small cell lung cancer cells by directly affecting miR-27a-5p/PBOV1 axis[J]. Cellular Signalling, 2022, 94: 110326. DOI: 10. 1016/j. cell-sig. 2022. 110326.

[6] SONG Jie, SU Zhengzhong, SHEN Qiming. Long non-coding RNA MALAT1 regulates proliferation, apoptosis, migration and invasion *via* miR-374b-5p/SRSF7 axis in non-small cell lung cancer[J]. European Review for Medical and Pharmacological Sciences, 2020, 24(4): 1853-1862. DOI: 10. 26355/eurev\_202002\_20363.

[7] ZHANG Jun, WANG Mingliang, WANG Jiashun, *et al.* JMJD2C-mediated long non-coding RNA MALAT1/mi-croRNA-503-5p/SEPT2 axis worsens non-small cell lung cancer[J]. Cell Death & Disease, 2022, 13(1): 65. DOI: 10. 1038/s41419-022-04513-5.

[8] HUANG Jinghua, LIN Changxiu, DONG Hai, *et al.* Targeting MALAT1 induces DNA damage and sensitize non-small cell lung cancer cells to cisplatin by repressing *BRCA1* [J]. Cancer Chemotherapy and Pharmacology, 2020, 86(5): 663-672. DOI: 10. 1007/s00280-020-04152-7.

[9] NIE Zhenkai, ZHANG Kaihua, LI Zhantao, *et al.* Human papillomavirus 16 E6 promotes angiogenesis of lung cancer *via* SNHG1[J]. Cell Biochemistry and Biophysics, 2023, 81(2): 325-336. DOI: 10. 1007/s12013-022-01121-0.

[10] ALNEFAIE G O. A review of the complex interplay between chemoresistance and lncRNAs in lung cancer[J]. Journal of Translation Medicine, 2024, 22(1): 1109. DOI: 10. 1186/s12967-024-05877-2.

[11] DU Yang, ZHU Shaowei, LIU Xianglu, *et al.* LncRNA HOTAIR regulates the expression of *MRP1* gene through the mir-6807-5p/Egr1 axis to affect the multidrug resistance of lung cancer cells[J]. Gene, 2025, 940: 149216. DOI: 10. 1016/j. gene. 2025. 149216.

[12] LIANG Hanlin, PENG Jiewen. LncRNA HOTAIR promotes proliferation, invasion and migration in NSCLC cells *via* the CCL22 signaling pathway[J]. Public Library of Science One, 2022, 17(2): e0263997. DOI: 10. 1371/journal.pone. 0263997.

[13] LU Chenlin, LIU Jie, YANG Junfa. LncRNA-XIST promotes lung adenocarcinoma growth and inhibits ferroptosis by regulating GPX4[J]. Molecular Biotechnology, 2025, 67(1): 187-195. DOI: 10. 1007/s12033-023-00993-8.

[14] LI Cheng, SONG Shuai, WANG Yuge, *et al.* Deciphering the function of lncRNA XIST/miR-329-3p/TMBIM6 axis in the proliferation of non-small cell lung cancer[J]. Journal of Investigative Surgery, 2025, 38(1): 2457472. DOI: 10. 1080/08941939. 2025. 2457472.

[15] 高颖, 罗小林, 廖鹏飞, 等. LncRNA NORAD 通过 miR-199a-3p 调控 ZNF217 对非小细胞肺癌细胞增殖、凋亡及化疗敏感性的影响[J]. 中国肺癌杂志, 2023, 26(7): 479-486. DOI: 10. 3779/j. issn. 1009-3419. 2023. 102. 27.

[16] MA Jianqun, ZHANG Ping, WANG Yuning, *et al.* LncRNA HAR1A inhibits non-small cell lung cancer growth by downregulating c-MYC transcripts and facilitating its proteasomal degradation[J]. International Immunopharmacology, 2024, 142: 113264. DOI: 10. 1016/j. intimp. 2024. 113264.

[17] LIU Zhile, WANG Qi, BI Yue, *et al.* Long non-coding RNA DINO promotes cisplatin sensitivity in lung adenocarcinoma *via* the *p53-Bax* axis[J]. Journal of Thoracic Disease, 2023, 15(4): 2198-2212. DOI: 10. 21037/jtd-23-465.

[18] SHE Kelin, HE Shushuai, LU Xiao, *et al.* LncRNA SNHG7 promotes non-small cell lung cancer progression and cisplatin resistance by inducing autophagic activity[J]. Journal of Thoracic Disease, 2023, 15(1): 155-167. DOI: 10. 21037/jtd-22-1826.

[19] HUANG Fengxiang, CHEN Hongjie, ZHENG Fuxia, *et al.* LncRNA BLACAT1 is involved in chemoresistance of non small cell lung cancer cells by regulating autophagy[J]. International Journal of Oncology, 2019, 54(1): 339-347. DOI: 10. 3892/ijo. 2018. 4614.

[20] ZHU Feng, NIU Rong, SHAO Xiaoliang, *et al.* FGD5 AS1 promotes cisplatin resistance of human lung adenocarcinoma cell *via* the miR1425p/PDL1 axis[J]. International Journal of Molecular Medicine, 2021, 47(2): 523-532. DOI: 10. 3892/ijmm. 2020. 4816.

[21] LIU Xuehui, ZHANG Xufeng, DU Shuzhang. Long non-coding RNA ACTA2-AS1 inhibits the cisplatin resistance of non-small cell lung cancer cells through inhibiting autophagy by suppressing TSC2[J]. Cell Cycle, 2022, 21(4): 368-378. DOI: 10. 1080/15384101. 2021. 2020433.

[22] LI Yong, HUANG Huiqin, HUANG Zhenghui, *et al.* SNHG15 enhances cisplatin resistance in lung adenocarcinoma by affecting the DNA repair capacity of cancer cells[J]. Diagnostic Pathology, 2023, 18(1): 33. DOI: 10. 1186/

s13000-023-01291-2.

[23] HUSSAIN M S,AFZAL O,GUPTA G,*et al.* Unraveling NEAT1's complex role in lung cancer biology: A comprehensive review[J]. EXCLI Journal,2024,23,34-52. DOI:10. 17179/excli2023-6553.

[24] ZHUO Ting, WU Zuotao, YANG Chuyi, *et al.* LncRNA CERS6-AS1 upregulates the expression of ANLN by sponging miR-424-5p to promote the progression and drug resistance of lung adenocarcinoma[J]. Non-coding RNA Research,2024,9(1): 221-235. DOI:10. 1016/j. ncna. 2023. 11. 013.

[25] SHEN Qiming,WANG Haoyou,ZHANG Lin. TP63 functions as a tumor suppressor regulated by GAS5/miR-221-3p signaling axis in human non-small cell lung cancer cells[J]. Cancer Management and Research,2023,15:217-231. DOI:10. 2147/cmar. S387781.

[26] YANG Xuhui,MENG Lifei,ZHONG Yuang,*et al.* The long intergenic noncoding RNA GAS5 reduces cisplatin-resistance in non-small cell lung cancer through the miR-217/LHPP axis[J]. Aging,2021,13(2):2864-2884. DOI:10. 18632/aging. 202352.

[27] 范喜瑞,戚之琳,邓园洁,等. LncRNA MAGI2-AS3 通过靶向调控 miR-1269a/PTEN/AKT 通路增强非小细胞肺癌对顺铂化疗的敏感性[J]. 南方医科大学学报,2024,44(10):2033-2043. DOI:10. 12122/j. issn. 1673-4254. 2024. 10. 22.

[28] YIN Hang,CHEN Lin,PIAO Shiqi,*et al.* M6A RNA methylation-mediated RMRP stability renders proliferation and progression of non-small cell lung cancer through regulating TGFBR1/SMAD2/SMAD3 pathway[J]. Cell Death and Differentiation,2023,30(3):605-617. DOI:10. 1038/s41418-021-00888-8.

[29] ZHENG Yu,GUO Ziyi,LI Ying. Long non-coding RNA prostate cancer-associated transcript 6 inhibited gefitinib sensitivity of non-small cell lung cancer by serving as a competing endogenous RNA of miR-326 to up-regulate interferon-alpha receptor 2[J]. Bioengineered,2022,13(2):3785-3796. DOI:10. 1080/21655979. 2022. 2031416.

[30] ZUO Tao,JIANG Ping,FU Jun,*et al.* LncRNA AFAP1-AS1 induces gefitinib resistance of lung adenocarcinoma through the miR-653-5p/AGR2 axis[J]. Therapeutic and Clinical Risk Management,2023,19:1-13. DOI:10. 2147/term. S374162.

[31] TANG Qing,ZHOU Qichun,LI Jing,*et al.* Solamargine enhanced gefitinib antitumor effect *via* regulating MAL-AT1/miR-141-3p/Sp1/IGFBP1 signaling pathway in non-small cell lung cancer[J]. Carcinogenesis,2023,44(6):497-510. DOI:10. 1093/carcin/bgad028.

[32] DARVISH M. LncRNA FTH1P3: A new biomarker for cancer-related therapeutic development[J]. Current Molecular Medicine,2024,24(5):576-584. DOI:10. 2174/1566524023666230724141353.

[33] ZHANG Heng,WANG Shaoqiang,WANG Li,*et al.* m6A methyltransferase METTL3-induced lncRNA SNHG17 promotes lung adenocarcinoma gefitinib resistance by epigenetically repressing LATS2 expression[J]. Cell Death & Disease,2022,13(7):657. DOI:10. 1038/s41419-022-05050-x.

[34] JIA Mingxi,FENG Shanshan,CAO Fengxi,*et al.* Identification of EGFR-Related LINC00460/mir-338-3p/MCM4 regulatory axis as diagnostic and prognostic biomarker of lung adenocarcinoma based on comprehensive bioinformatics analysis and experimental validation[J]. Cancers,2022,14(20):5073. DOI:10. 3390/cancers14205073.

[35] DAI Jiali,QU Tianyu,YIN Dandan,*et al.* LncRNA LINC00969 promotes acquired gefitinib resistance by epigenetically suppressing of NLRP3 at transcriptional and posttranscriptional levels to inhibit pyroptosis in lung cancer[J]. Cell Death & Disease,2023,14(5):312. DOI:10. 1038/s41419-023-05840-x.

[36] ZHONG Chenming,XIE Zijun,SHEN Jinze,*et al.* LINC00665: An emerging biomarker for cancer diagnostics and therapeutics[J]. Cells,2022,11(9):1540. DOI:10. 3390/cells11091540.

[37] CHEN Huaxin,SHEN Dan,ZHU Feng,*et al.* Long noncoding RNA RP11-89K21. 1 interacts with miR-146a/b-5p to promote proliferation and gefitinib resistance through regulating RHPN2 and RhoA/ROCK pathway in lung adenocarcinoma[J]. Cancer Biotherapy and Radiopharmaceuticals,2023,38(5):282-292. DOI:10. 1089/cbr. 2020. 4395.

[38] LIU Wenjing,DUAN Zhipeng,WU Yefeng,*et al.* Silencing of lncRNA LOC105376794 promotes migration, invasion, and Gefitinib resistance of lung adenocarcinoma cells with EGFR 19Del mutation by ATF4/CHOP axis and ERK phosphorylation[J]. Neoplasia,2024,71(3):219-230. DOI:10. 4149/neo\_2024\_230616N316.

[39] XU Cong,JIANG Zebo,SHAO Le,*et al.*  $\beta$ -Elemene enhances erlotinib sensitivity through induction of ferroptosis by upregulating lncRNA H19 in EGFR-mutant non-small cell lung cancer[J]. Pharmacological Research,2023,

191;106739. DOI:10. 1016/j. phrs. 2023. 106739.

[40] CHEN Bohang,ZHANG Bohao,GARCÍA CENADOR M B. Human bone marrow mesenchymal stem cell-driven lncRNA PTCSC3 upregulation within lung adenocarcinoma cells reduces erlotinib resistance by mitigating Wnt/ $\beta$ -catenin pathway[J]. American Journal of Cancer Research,2024,14(5):2439-2452. DOI:10. 62347/bofp2157.

[41] NAKANO Y,ISOBE K,YOSHIZAWA T,*et al.* Upregulation of long non coding RNA LINC00460 in EGFR mutant lung cancer indicates a poor prognosis in patients treated with osimertinib[J]. Oncology Letters,2023,26(3):380. DOI:10. 3892/ol. 2023. 13966.

[42] LEI Quan,LIU Ping,GUAN Xinlei,*et al.* Silencing of LINC01278 promotes sensitivity of non-small cell lung cancer cells to osimertinib by targeting miR-324-3p/ZFX axis[J]. Cytotechnology, 2025, 77(1):23. DOI: 10. 1007/s10616-024-00673-8.

[43] DING Dandan,XU Chenguang,ZHANG Jufeng,*et al.* Revealing underlying regulatory mechanisms of LINC00313 in Osimertinib-resistant LUAD cells by ceRNA network analysis[J]. Translational Oncology, 2024, 43:101895. DOI:10. 1016/j. tranon. 2024. 101895.

[44] YANG Yan,JIANG Caiyu,YANG Yang,*et al.* Silencing of lncRNA-HOTAIR decreases drug resistance of non-small cell lung cancer cells by inactivating autophagy *via* suppressing the phosphorylation of ULK1[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications,2018,497(4):1003-1010. DOI:10. 1016/j. bbrc. 2018. 02. 141.

[45] YANG Kaixin,ZHANG Wenyang,ZHONG Linghui,*et al.* Long non-coding RNA HIF1A-As2 and MYC form a double-positive feedback loop to promote cell proliferation and metastasis in KRAS-driven non-small cell lung cancer[J]. Cell Death and Differentiation,2023,30(6):1533-1549. DOI:10. 1038/s41418-023-01160-x.

[46] XU Dexin,WANG Wenhai,WANG Duo,*et al.* Long noncoding RNA MALAT-1: A versatile regulator in cancer progression, metastasis, immunity, and therapeutic resistance[J]. Non-Coding RNA Research,2024,9(2):388-406. DOI:10. 1016/j. ncrrna. 2024. 01. 015.

[47] CHEN Xiujuan,ZHANG Le. Integrative analysis revealed LINC00847 as a potential target of tumor immunotherapy[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology,2023,195(10):6345-6358. DOI:10. 1007/s12010-023-04387-z.

[48] QIAO Xinwei,ZHAO Feng. Long non-coding RNA Opa interacting protein 5-antisense RNA 1 binds to micorRNA-34a to upregulate oncogenic PD-L1 in non-small cell lung cancer[J]. Bioengineered,2022,13(4):9264-9273. DOI: 10. 1080/21655979. 2022. 2036904.

[49] HUANG Yusheng,XIA Lei,TAN Xiangwu,*et al.* Molecular mechanism of lncRNA SNHG12 in immune escape of non-small cell lung cancer through the HuR/PD-L1/USP8 axis[J]. Cellular and Molecular Biology Letters,2022,27(1):43. DOI:10. 1186/s11658-022-00343-7.

(责任编辑: 钱筠      英文审校: 刘源岗)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202504038



# 活性添加剂分散调控对 镀铜线精细化的影响

乐其河, 江开勇

(华侨大学 福建省特种能场制造重点实验室, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 针对柔性阴极电解加工中镀铜线条边缘精细化问题, 研究添加剂颗粒粒度及分散性对镀铜质量的影响。调整添加剂颗粒的研磨时间与浆料搅拌方式, 并结合激光活化及化学镀铜工艺, 制备导电线路并分析其形貌。结果表明: 添加剂颗粒的研磨时间对其粒度有显著影响, 经 48 h 研磨的颗粒粒度稳定在  $1.445\ \mu\text{m}$ , 分散性提升, 团聚减少; 采用高速分散机搅拌 5 min 后聚氨酯中的颗粒面积分数较传统搅拌降低了 11.9%; 添加剂颗粒细化与均匀分散改善了激光活化催化中心的均匀性, 当研磨时间达 48 h、搅拌时间为 5 min 时, 镀铜线条边缘整齐清晰, 线条分布均匀, 线宽约为  $85.1\ \mu\text{m}$ 。

**关键词:** 电解加工; 激光活化; 化学镀铜; 线条精细化; 颗粒分散性

中图分类号: TQ 153.14

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2025)04-0379-07

## Influence of Dispersion Control of Active Additives on Refinement of Copper Plated Wire

LE Qihe, JIANG Kaiyong

(Fujian Key Laboratory of Special Energy Manufacturing, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** To address the issue of edge refinement of copper plated wires in flexible cathode electrochemical machining, the influence of additive particle size and dispersion on copper plating quality was studied. The grinding time of additive particles and the slurry stirring method were adjusted, and laser activation was combined with electroless copper plating processes to prepare conductive wires and their morphology was analyzed. The results demonstrated that grinding time significantly influenced the particle size, which stabilized at  $1.445\ \mu\text{m}$  after 48 hours of grinding, with improved dispersibility and reduced agglomeration. After stirring for 5 minutes using a high-speed disperser, the particle area fraction in polyurethane decreased by 11.9% compared to traditional stirring. The refinement and uniformly dispersed additive particles improved the uniformity of laser activated catalytic centers. Under the optimal conditions (48 hours grinding and 5 minutes high-speed stirring), the copper plated wires exhibited sharp and well-defined edges, uniform distribution, and a consistent wire width of approximately  $85.1\ \mu\text{m}$ .

**Keywords:** electrochemical machining; laser activation; electroless plating copper; refinement; particle dispersibility

柔性阴极电解加工(FC-ECM)作为一种融合激光诱导化学镀(LDS)的创新性微纳制造工艺, 近年

收稿日期: 2025-04-22

通信作者: 乐其河(1991—), 男, 实验师, 主要从事特种加工的研究。E-mail: leqihe@hqu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51475174)

来在柔性电子器件、三维模塑互连器件(3D-MID)及高精度传感器等领域展现出广阔的应用前景<sup>[1-4]</sup>。其核心工艺是通过激光扫描柔性基材表面,选择性活化催化中心,并通过化学镀铜形成高精度导电路径。该技术突破了传统光刻工艺对复杂三维结构的限制,为轻量化、集成化电子器件的制造提供了新途径<sup>[5]</sup>。然而,随着器件微型化需求的提升,镀铜线条边缘的精细化程度成为制约其电学性能与可靠性的关键因素。研究表明,线路边缘的毛刺、线宽波动等问题主要源于活性添加剂颗粒的分散不均及尺寸分布差异<sup>[5-8]</sup>。因此,优化添加剂分散性以提升镀层质量已成为当前 FC-ECM 技术研究的重点方向之一。

当前研究主要集中在激光参数优化和镀液配方改进方面。王攀等<sup>[9]</sup>通过调整激光功率和扫描速度,显著提升了聚酰亚胺基材的镀铜精度。Xu 等<sup>[10]</sup>开发了新型激光敏化剂,它可以很好地与 1 064 nm 近红外激光和 355 nm 紫外激光配合使用,在近红外激光诱导下可实现线宽 106 μm 的铜线沉积,而采用紫外激光时线宽显著缩减至 37 μm。然而,目前关于活性添加剂颗粒分散性对镀铜线条精细化影响的系统性研究仍较为缺乏。传统方法中,添加剂颗粒易因表面能高而发生团聚,导致基材中催化中心分布不均,进而引发镀层边缘毛刺、线宽波动等问题<sup>[11-14]</sup>。尽管部分学者已尝试采用超声辅助分散或表面改性等方法改善颗粒分散性<sup>[15-17]</sup>,但关于研磨工艺与搅拌方式对颗粒细化及分散效果的协同影响仍缺乏深入研究。

基于此,本文以铜基金属化合物为活性添加剂,探究了添加剂颗粒的研磨时长、浆料搅拌方式及搅拌时间对颗粒分散效果的影响,进一步分析添加剂颗粒细化程度与镀铜线条边缘质量之间的内在联系。

## 1 实验部分

### 1.1 原材料

MU-609K 型聚氨酯树脂(PU,浙江永信化工有限公司);铜基金属化合物(沙特基础工业公司)。

### 1.2 仪器设备

TYM120 型研钵式研磨机(常州中实三水机械科技有限公司);Mastersizer 2000 型激光粒度仪(英国马尔文仪器有限公司);Phenom ProX 型内置能谱仪台式扫描电镜(荷兰 Phenom-World 公司);激光打标机(SPI 脉冲光纤激光器,深圳市泛友科技有限公司);IRM VDM50 型真空干燥机(爱安姆科技(北京)有限公司);IKA T18 型高速分散机(转速最高可达 20 000 r · min<sup>-1</sup>,德国艾卡公司);JB200-D 型传统机械搅拌机(上海沪析实业有限公司)。

### 1.3 添加剂颗粒的研磨

将铜基金属化合物添加剂置于真空干燥箱中干燥 2 h 后,于研钵式研磨机中分别进行不同时间(0、12、24、36、48、60、72 h)的研磨,充分研磨后得到不同粒度的添加剂颗粒,重新置于真空干燥箱中保存。

### 1.4 柔性聚氨酯基材的制备

将真空干燥箱中研磨过的添加剂颗粒与聚氨酯按照质量比 3 : 7 进行混合,分别采用手动搅拌、传统机械搅拌及高速分散机搅拌,将搅拌后的改性聚氨酯浆料平铺于洁净的玻璃面板上,通过可调式涂覆器控制浆料铺平厚度。

### 1.5 激光活化

采用波长为 1 064 nm 的光纤激光打标机对改性聚氨酯表面进行激光敏化处理。采用的激光扫描工艺参数为激光功率 7 W,脉冲重复频率 65 kHz,扫描速度 3 m · s<sup>-1</sup>,光斑模式 TEM<sub>00</sub>。

### 1.6 化学镀铜

将激光活化的改性聚氨酯置于质量分数为 10% 的氢氧化钠溶液中超声清洗除油并用去离子水清洗干净后,置于 80 ℃ 烘箱中烘干待用。称取 1.6 g 硫酸铜和 1.4 g 氢氧化钠分别溶于去离子水中,先将硫酸铜溶液与 1.4 g 络合剂充分搅拌混合;然后缓慢倒入 NaOH 溶液;最后加入稳定剂、还原剂及去离子水,配置 100 mL 的镀铜液。将清洗除油且干燥后的改性聚氨酯放入配置好的镀液中,并用保鲜膜密封,置于 80 ℃ 水浴锅中保温 2 h 后取出,清洗。

### 1.7 表征

采用 Mastersizer 2000 型激光粒度仪对添加剂颗粒粒度分布进行表征。采用 Phenom ProX 型内置能谱仪台式扫描电镜观察聚氨酯表面颗粒分布情况。



## 2 实验结果与讨论

### 2.1 研磨时间对添加剂粒度的影响

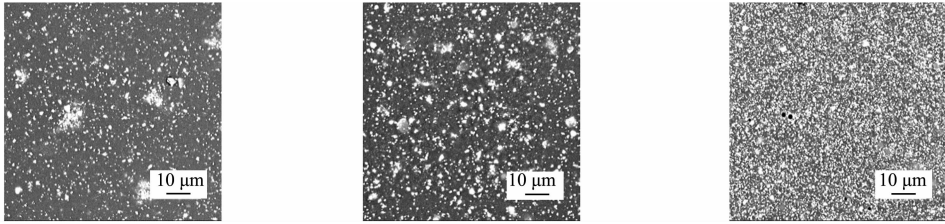
由于微细添加剂颗粒表面能很高,加上研钵机的研钵与研钵头的挤压破碎作用,容易使添加剂颗粒团聚成块,从而使添加剂颗粒分散效果较差,因此,在进行粒度测试实验过程中均开启超声频率为 10 Hz 的超声辅助。超声辅助能使添加剂颗粒分散效果更好、更均匀,能减小因添加剂颗粒团聚而造成的影响。不同研磨时间下添加剂粒度的变化,如图 1 所示。图 1 中: $\varphi$  为体积分数; $D$  为添加剂粒度。

由图 1 可知:随着研磨时间的增加,添加剂粒度也逐渐变小,未经研磨的原始添加剂颗粒粒度主要集中在 $1.905\sim 100\ \mu\text{m}$  之间,颗粒大且尺寸较为分散;当添加剂经过 24 h 研磨之后,粒度的分布明显集中在 $1\sim 5\ \mu\text{m}$ ,表明长时间机械研磨能够破碎团聚体、细化颗粒,提升颗粒均匀性;但当研磨 48 h 后,添加剂粒度在 $1.445\ \mu\text{m}$  的体积分数为 29.79%,且颗粒粒度在 $1\sim 5\ \mu\text{m}$  范围内的体积分数也在逐渐缩小;当研磨 72 h 后,添加剂颗粒粒度在 $1.259\ \mu\text{m}$  的体积分数为 31.68%,说明机械研磨只能在一定程度上对团聚体进行有效破碎。

### 2.2 搅拌方式与时间对分散性的影响

由于添加剂颗粒在聚氨酯中的分散情况对化学镀铜边缘整齐度有较大影响,因此分别采用手动搅拌、传统机械搅拌及高速分散机搅拌 3 种搅拌方式制备柔性聚氨酯,考察搅拌方式对分散性的影响。

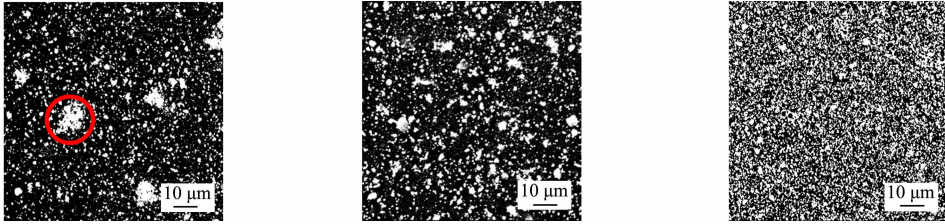
首先,对聚氨酯微观组织形貌的 SEM 图像进行图像平滑、滤波与灰度拉伸等预处理,并对预处理后的图像进行阈值分割(该步骤是为了获取添加剂颗粒);然后,对分割后的图像进行去除毛刺及空洞的填补;最后,获得微观组织结构 SEM 图像的二值化图像。不同搅拌方式下制备的改性聚氨酯表面的 SEM 图像,如图 2 所示。对聚氨酯表面微观组织形貌进行阈值分割后得到的二值化图像,如图 3 所示。



(a) 手动搅拌 (b) 传统机械搅拌 (c) 高速分散机搅拌

图 2 改性聚氨酯表面的 SEM 图像

Fig. 2 SEM images of modified polyurethane surface



(a) 手动搅拌 (b) 传统机械搅拌 (c) 高速分散机搅拌

图 3 改性聚氨酯表面的二值化图像

Fig. 3 Binary images of modified polyurethane surface

由图 2、3 可知:手动搅拌方式制备得到的聚氨酯中添加剂颗粒的分散效果最差,且所含的添加剂颗粒数量最少;传统机械搅拌方式制备得到的聚氨酯中添加剂颗粒的分散效果一般;相比之下,高速分散机搅拌方式制备得到的聚氨酯中所含的颗粒数量最多,且分散效果最佳。

对于不同搅拌方式表现出不同的颗粒分散效果可能存在以下 3 点原因。

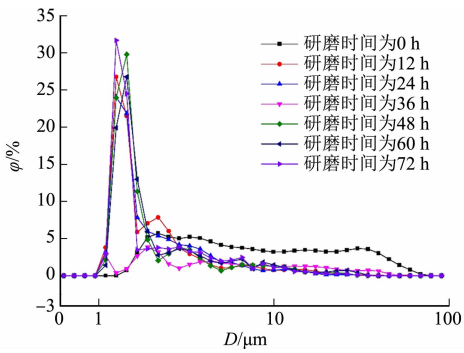


图 1 不同研磨时间下添加剂粒度的变化

Fig. 1 Changes in additive particle size under different grinding times

1) 采用手动搅拌方式进行聚氨酯和添加剂颗粒的混合过程中,由于搅拌力不足、产生的能量小,且操作人员搅拌速度不均匀(材料制备受人员因素影响较大),不能有效地分散添加剂的硬团聚甚至是软团聚,颗粒的团聚和搅拌力不足引起的颗粒沉积使聚氨酯中添加剂颗粒数量偏少。

2) 采用传统机械搅拌方式受设备因素影响,转速较低(小于 $1\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ),产生的能量也相对较小,不能有效地解决添加剂颗粒团聚问题。

3) 当采用高速分散机混合浆料时,浆料在搅拌头定子和转子间隙之间经过强烈的撞击、破碎、强力剪切后从间隙射出,在多种不同方向力的作用下,产生强大的紊流,在高能量作用下,经过一段时间反复剪切、循环解聚,使添加剂颗粒在聚氨酯中均匀分散。

另外,可以通过颗粒面积分数法来定量说明颗粒的团聚情况。该方法是通过计算基材表面每个颗粒的平均面积(颗粒所占像素点)定量评判颗粒的分散效果,其数值越小,说明颗粒的分散效果越好<sup>[18]</sup>。颗粒面积分数( $S_{\text{mean}}$ )的计算公式为

$$S_{\text{mean}}=\frac{\sum S_i}{S_{\text{总}}\times N_{\text{总}}}。$$

上式中:  $\sum S_i$  表示所测区域内颗粒的总面积;  $S_{\text{总}}$  表示所测区域面积;  $N_{\text{总}}$  表示所测区域颗粒总数。

通过计算可得,分别采用手动搅拌、传统机械搅拌、高速分散机搅拌后,聚氨酯表面的  $S_{\text{mean}}$  分别为  $0.144\,75\times10^{-4}$ 、 $0.144\,42\times10^{-4}$ 、 $0.127\,30\times10^{-4}$ 。由计算结果可知:手动搅拌的  $S_{\text{mean}}$  最大,说明聚氨酯表面上每个颗粒的平均面积最大,颗粒的分散效果最差;高速分散机搅拌因高剪切力(转速 $>20\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ),其分散效果显著优于传统机械搅拌( $S_{\text{mean}}$ 降低 11.9%),说明其内部颗粒的分散程度最好。

不同搅拌时间( $t$ )下聚氨酯的微观形貌,如图 4 所示。搅拌时间与颗粒面积分数的关系,如图 5 所示。由图 4、5 可知:当搅拌时间为 3 min 时,添加剂颗粒在聚氨酯中的  $S_{\text{mean}}$  值最大,说明其在聚氨酯中的分散效果最差;随着搅拌时间的增长,颗粒的分散效果明显改善,当搅拌时间为 5 min 时,添加剂颗粒在聚氨酯中的  $S_{\text{mean}}$  值最小;当搅拌时间大于 7 min 后,添加剂颗粒的分散效果没有很大的改变。

不同搅拌时间下浆料温度( $\theta$ )和黏度( $\eta$ )的变化曲线,如图 6 所示。由图 6 可知:在初始温度为  $25.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,浆料黏度为  $588\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ;随着搅拌时间的增加,浆料温度上升,黏度呈下降趋势;搅拌 5 min 后,浆料黏度的下降趋势变化小,但当温度达到  $44.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  后,温度继续升高对颗粒分散效果的影响程度不大。

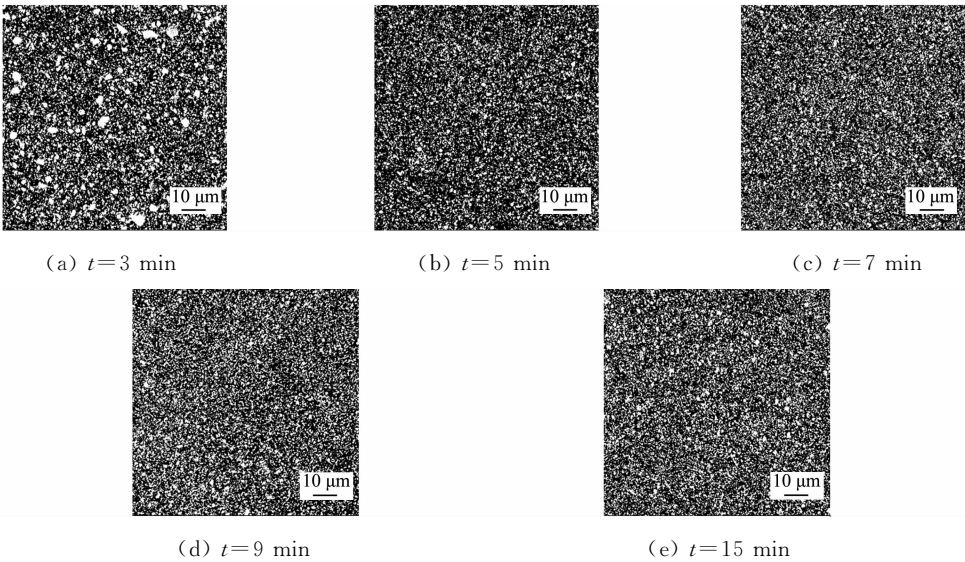


图 4 不同搅拌时间下聚氨酯的微观形貌

Fig. 4 Microscopic morphology of polyurethane under different stirring times

出现上述结果的原因有 2 个方面:1) 随着搅拌时间的增长,在多种不同方向力的作用下,聚氨酯浆料在搅拌头定、转子间隙之间产生较高的能量,长时间反复地剪切和解聚使固化得到的聚氨酯中添加剂颗粒的分散效果更佳;2) 浆料温度随着搅拌时间的增加而升高,进而使其黏度下降,从而使添加剂颗粒的分散效果更好。

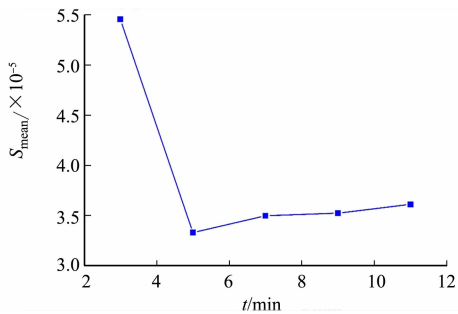


图 5 搅拌时间与颗粒面积分数的关系  
Fig. 5 Relationship between stirring time and particle area fraction

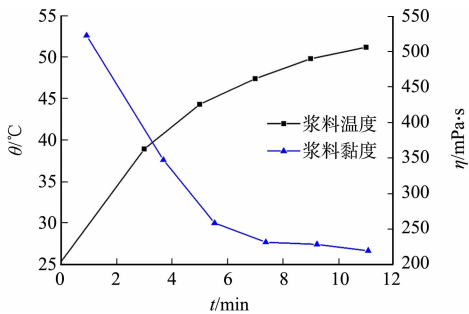


图 6 不同搅拌时间下浆料温度和黏度的变化曲线  
Fig. 6 Variation curves of slurry temperature and viscosity under different stirring times

2.3 颗粒细化对镀铜边缘质量的调控机制

在聚氨酯树脂中分别添加质量分数为 30%、不同研磨时间(0、12、24、36、48、60、72 h)的添加剂，采用高速分散机搅拌 5 min，并在光洁玻璃板上湿固化 24 h 后，得到改性聚氨酯。不同研磨时间下改性聚氨酯的微观形貌，如图 7 所示。研磨时间与颗粒面积分数的关系曲线，如图 8 所示。

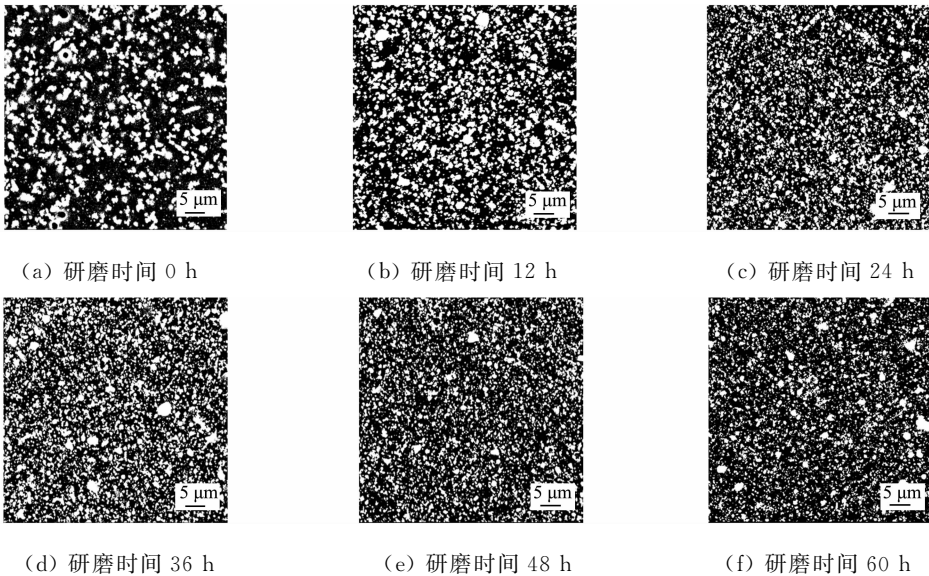


图 7 不同研磨时间下改性聚氨酯的微观形貌

Fig. 7 Microscopic morphology of modified polyurethane under different grinding times

由图 8 可知：未研磨粉末的  $S_{\text{mean}}$  值最大，说明未研磨添加剂颗粒在聚氨酯中的分散性最差；随着研磨时间的增加，添加剂颗粒在聚氨酯中的分散程度也越来越高；当研磨时间达到 48 h 以后，添加剂颗粒在聚氨酯中的分散效果没有显著的区别。原因是没有经过研磨的添加剂颗粒尺寸较大，颗粒之间的团聚明显、分散性差，因此在聚氨酯表面微观形貌中表现出颗粒团聚，颗粒尺寸较大的情况；随着研磨时间的增加，添加剂颗粒粒度下降的同时，其团聚程度也相对减小，从而使添加剂颗粒在聚氨酯中的分散效果更好。

经过激光活化和化学镀铜工艺后在改性聚氨酯表面选择性地镀上铜线条。不同研磨时间下改性聚氨酯表面化学镀铜线条的微观形貌，如图 9 所示。由图 9 可知：添加未研磨的添加剂颗粒，聚氨酯表面化学镀铜后线条的边缘不整齐，效果较差；随着添加剂颗粒研磨时间的增加，镀铜线条边缘越来越整齐。

分析以上结果的原因有以下两方面。

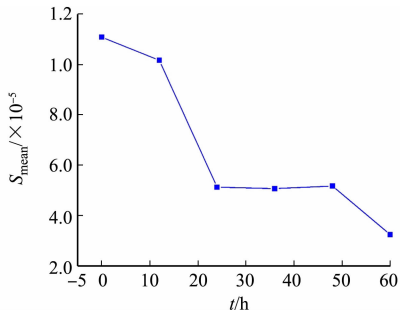


图 8 研磨时间与颗粒面积分数的关系曲线  
Fig. 8 Relationship curve between grinding time and particle area fraction



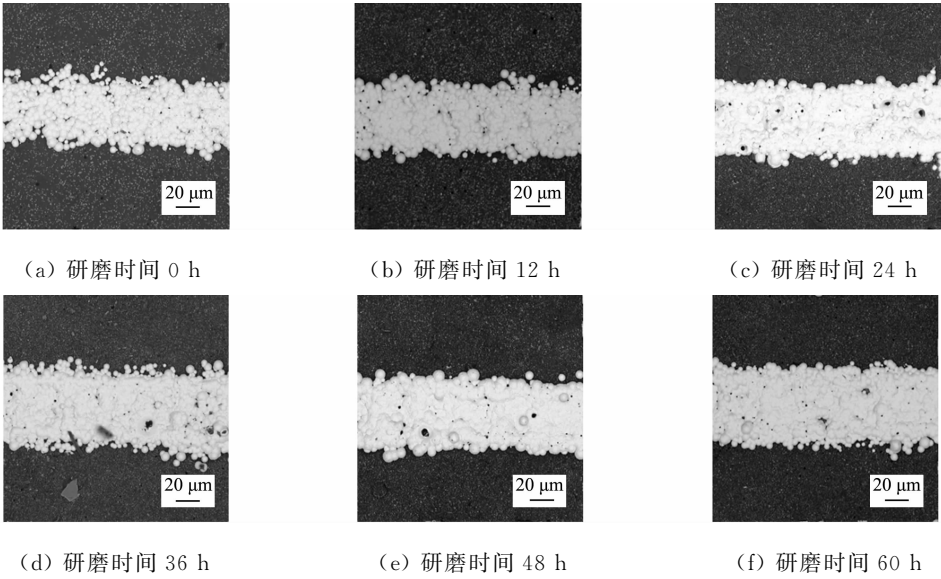


图 9 不同研磨时间下改性聚氨酯表面化学镀铜线条的微观形貌  
Fig. 9 Microscopic morphology of copper plated wires on modified polyurethane surface under different grinding times

1) 从研磨时间来看,随着研磨时间的增长,团聚成大颗粒的情况减少,颗粒之间的分散程度越来越好;颗粒与聚氨酯经高速分散机剪切混合后,原本分散良好的颗粒在聚氨酯中的分散更为充分和均匀。

2) 从激光活化来看,高能量的激光束照射到聚氨酯材料表面,打开了铜原子与聚氨酯分子之间形成的共价键,添加剂中铜元素就以亚铜离子的形式出现在聚氨酯表面的活化区。后续化学镀铜过程是以亚铜离子为催化核心进行铜颗粒的沉积。因此,由越细小颗粒制备的聚氨酯材料在经过激光活化后,暴露出尺寸越细小、分布越均匀的催化中心,这样化学镀铜得到的线条精细化程度也会越来越高。

添加了研磨 48 h 添加剂制备得到的聚氨酯材料化学镀铜线条,如图 10 所示。其激光参数为功率 7 W,脉冲频率 65 kHz,扫描速度  $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,光斑模式  $\text{TEM}_{00}$ 。由图 10 可知:线条分布均匀,一致性较好,测出线条宽度约为  $85.1\text{ }\mu\text{m}$ 。

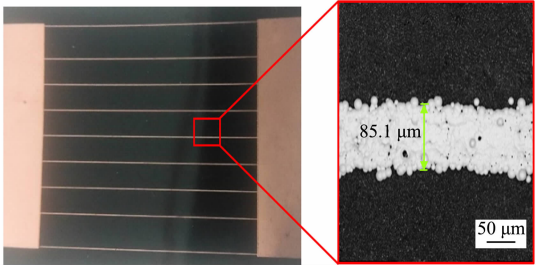


图 10 添加剂研磨 48 h 后制得的化学镀铜线条  
Fig. 10 Chemical copper plated wires prepared after 48 hours griding of additives

3 结论

探究了活性添加剂分散调控对柔性阴极电解加工中镀铜线条精细化的影响,明确了关键工艺参数对添加剂颗粒分散性及镀铜边缘质量的影响。通过实验分析,可以得出以下 3 点主要结论。

- 1) 研磨时间对活性添加剂颗粒细化有显著效果,随着研磨时间的增加(0~48 h),颗粒尺寸越来越小,且分散区间显著缩小;当研磨时间大于 48 h,颗粒细化与分散性趋于平稳,添加剂颗粒在聚氨酯中的分散性最佳,能为后续激光活化提供高密度、均匀化的催化中心。
- 2) 搅拌方式与搅拌时间直接影响添加剂颗粒在聚氨酯的分散效果。采用高速分散机(转速  $> 20\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ )搅拌 5 min,可显著提升颗粒分散性( $S_{\text{mean}}$  降低至  $0.127\,30\times 10^{-4}$ ),优于手动搅拌与低速机械搅拌。当搅拌时间超过 7 min 后,分散效果改善趋于平缓,综合考虑制备效率与分散质量,5 min 为最优搅拌时长。
- 3) 添加剂颗粒细化与分散均匀性对镀铜线条边缘质量具有关键作用。经 48 h 研磨、高速分散机 5 min 搅拌制备的柔性聚氨酯,经过激光活化(功率 7 W,脉冲频率 65 kHz,扫描速度  $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )后,化学镀铜(80 ℃水浴 2 h)所得线条边缘整齐清晰,线宽波动范围最小(约  $85.1\text{ }\mu\text{m}$ )。

通过优化活性添加剂颗粒的分散工艺,实现了镀铜线条的精细化控制,为柔性阴极电解加工中高精

度镀铜线路的制备提供理论与实验依据。

## 参考文献:

- [1] 佚名. LPKF 在中国天津建立激光直接成型三维模塑互连器件应用中心[J]. 印制电路信息, 2008(9):38.
- [2] 刘新民. MID 工艺制程塑模电子互联部件图案金属化工艺[C]//第十届全国转化膜及表面精饰学术年会论文集. 南宁:中国表面工程协会转化膜专业委员会, 2014:144-148.
- [3] 刘述梅,陈红,赵建青,等. 热致液晶高分子膜的表面处理及化学镀铜[J]. 塑料工业, 2024, 52(2):60-65. DOI:10.3969/i. issn. 1005-5770. 2024. 02. 009.
- [4] PAN Chengfeng, KUMAR K, LI Jianzhao, *et al.* Visually imperceptible liquid-metal circuits for transparent, stretchable electronics with direct laser writing [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30: 1706937. DOI: 10. 1002/adma. 201706937.
- [5] 代竟雄. 基于激光诱导的 3D 电子线路成型工艺研究[D]. 绵阳:西南科技大学, 2018.
- [6] 叶玉梅,江开勇,张际亮. 改性塑料表面亚铜化合物的表征及催化化学镀铜作用[J]. 材料科学与工艺, 2014, 22(5): 124-128. DOI:10. 11951/j. issn. 1005-0299. 20140522.
- [7] 平玉清,江开勇. 脉冲激光改性聚氨酯表面无钯化学镀铜的实验研究[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(3):54-59. DOI: 10. 3969/i. issn. 1001-3539. 2015. 03. 011.
- [8] MATSUHISA N, CHEN Xiaodong, BAO Zhenan, *et al.* Materials and structural designs of stretchable conductors [J]. *Chemical Society Reviews*, 2019, 48:2946-2966. DOI:10. 1039/C8CS00814K.
- [9] 王攀,崔开放,钟良. 聚酰亚胺塑料表面激光诱导活化化学镀铜[J]. 电镀与环保, 2020, 40(3):30-33. DOI:10. 3969/j. issn. 1000-4742. 2020. 03. 009.
- [10] XU Haoran, FENG Jin, YU Feifan, *et al.* Laser-induced selective metallization on polymers for both NIR and UV lasers: Preparing 2D and 3D circuits[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2023, 62(1):395-404. DOI: 10. 1021/acs. iecr. 2c03367.
- [11] LU Yinxian. Improvement of copper plating adhesion on silane modified PET film by ultrasonic-assisted electroless deposition[J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256(11):3554-3558. DOI:10. 1016/j. apsusc. 2009. 12. 153.
- [12] SON J, HONG Y, YAVUZ C T, *et al.* Thiourea-based extraction and deposition of gold for electroless nickel immersion gold process[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020, 59(16):8086-8092. DOI:10. 1021/acs. iecr. 0c00493.
- [13] JONES T D A, RYSPAYEVA A, ESFAHANI M N, *et al.* Direct metallisation of polyetherimide substrates by activation with different metals[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2019, 360:285-296. DOI: 10. 1016/j. surfcoat. 2019. 01. 023.
- [14] GU Xin, WANG Zhoucheng, LIN Changjian. An electrochemical study of the effects of chelating agents and additives on electroless copper plating[J]. *Journal of Electrochemistry*, 2004, 11(1):49-55. DOI:10. 61558/2993-074X. 1539.
- [15] 续振林,郭琦龙,沈艺程,等. 陶瓷表面无敏化活化法微细化学镀铜[J]. 电化学, 2005, 11(2):193-198. DOI:10. 13208/j. electrochem. 2005. 02. 016.
- [16] 宋轩. 电解加工表面织构用柔性阴极制备及其加工实验研究[D]. 厦门:华侨大学, 2020.
- [17] 王广阔,杨英贤. 不同超声频率与温度对纳米 ZnO 颗粒分散性能的影响[J]. 纺织科技进展, 2005(2):3. DOI:10. 3969/j. issn. 1673-0356. 2005. 02. 009.
- [18] 何飞,黄振亚,刘靖,等. 复合材料内高含量固体的分散性评价方法[J]. 火炸药学报, 2013, 36(6):4. DOI:10. 3969/j. issn. 1007-7812. 2013. 06. 016.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴跃勤)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202503051



# 近海漂浮垃圾收集器的设计与实现

朱来发<sup>1,2</sup>, 谭忠诚<sup>1</sup>, 金花雪<sup>1</sup>, 杨钟莹<sup>1</sup>, 何隆榕<sup>1</sup>, 范伟<sup>1</sup>

(1. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021;

2. CAD/CAM 福建省高校工程研究中心(莆田学院), 福建 莆田 351100)

**摘要:** 根据已有漂浮垃圾收集装置的实际工作情况,采用自吸和反推结合的结构,提出一种近海漂浮垃圾收集器的设计方法。首先,应用自吸功能引导靠岸垃圾进入收集器,在不影响自吸功能的情况下,利用反推功能,通过差动控制实现高机动性及电机复用。然后,进行样机试制,以验证文中方法的可行性。结果表明:自吸与反推的协同工作可提升收集器对分布广、紧贴岸的漂浮垃圾的处理能力,大幅提高收集效率;样机测试中,在漂浮垃圾分布约为  $0.3 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-2}$  的静水面上,平均收集速率为  $8 \text{ 个} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

**关键词:** 近海漂浮垃圾; 收集器; 自吸功能; 反推功能

中图分类号: TH 122

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2025)04-0386-07

## Design and Implementation of Offshore Floating Garbage Collector

ZHU Laifa<sup>1,2</sup>, TAN Zhongcheng<sup>1</sup>, JIN Huaxue<sup>1</sup>,  
YANG Zhongying<sup>1</sup>, HE Longrong<sup>1</sup>, FAN Wei<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. The Engineering Research Center for CAD/CAM of Fujian Universities (Putian University), Putian 351100, China)

**Abstract:** Based on the operational conditions of existing floating garbage collection devices, a design method for an offshore floating garbage collector was proposed by adopting a structure combining self-priming and reverse pushing. The self-priming function was applied to guide the floating debris into the collector, while the reverse pushing function was used to achieve high mobility and motor multiplexing through differential control, without compromising the self-priming function. A prototype was subsequently developed to verify the feasibility of the proposed design. The results demonstrated that the collaborative operation of self-priming and reverse pushing could improve the collector's ability to handle floating garbage that is widely distributed and closely attached to the shore, thereby greatly improving collection efficiency. During the prototype testing, on the still water surface with a floating garbage density of approximately  $0.3 \text{ pieces per square meter}$ , the average collection rate was  $8 \text{ pieces per minute}$ .

**Keywords:** offshore floating garbage; collector; self-priming function; reverse push function

近年来,海洋垃圾污染已成为国际广泛讨论的重大经济、政治、环境议题。目前,海洋中约有 7 500

收稿日期: 2025-03-29

通信作者: 朱来发(1977—),男,高级实验师,主要从事机械设计和智能制造的研究。E-mail: hquetc\_zhu@hqu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52275530);福建省自然科学基金资助项目(2020J01086);福建省厦门市产学研项目(2024CXY0219);CAD/CAM 福建省高校工程研究中心开放基金资助项目(K202205)

万 t 至 1.99 亿 t 塑料垃圾, 占海洋垃圾总质量的 85% 左右<sup>[1]</sup>。福建省厦门市已率先成立海上环境卫生管理站, 每天对责任海域进行巡回垃圾清理, 实现海上打捞收集<sup>[2]</sup>。

现有两种海洋漂浮垃圾处理方式, 一是传统的人工打捞, 其优势在于高度的灵活性和对漂浮物的精确判断, 当面对一些复杂地形(如海岸边、礁石、桥墩、桥洞等地)时, 能够精准、快速地进行打捞, 但人工打捞存在安全隐患, 且需耗费大量精力; 二是机械全自动或半自动收集漂浮垃圾, 较典型的海洋垃圾收集装置有海上垃圾桶、水上垃圾拦截浮体和专业垃圾清理船等<sup>[3]</sup>。目前, 李文婧等<sup>[4]</sup>提出一种智能海洋垃圾桶的设计方法, 通过垃圾桶内部的升降装置实现对垃圾的自动收集, 通过安置超声波传感器感应垃圾桶的剩余存储空间, 实现垃圾溢满提醒。陈俊均等<sup>[5]</sup>设计一种采用棘轮传动机构原理的海洋漂浮物收集器, 利用波浪能带动装置旋转产生负压, 吸引装置附近的漂浮物, 将漂浮物收集至垃圾网袋中。占金锋<sup>[6]</sup>采用双体船型, 选用排链式打捞装置, 设计一种新型 40 m 双体全自动水上垃圾清扫船, 该船具有功能全、性能强、适用广、效率高等特点。宋怡等<sup>[7]</sup>设计一款专门优化海洋环境的高效垃圾收集装置, 采用改进的卷积神经网络(CNN)图像处理技术, 实现目标检测和位置定位。孟泓宇等<sup>[8]</sup>设计一种既可清理固体垃圾, 又可清理液体垃圾的回收船。张志高等<sup>[9]</sup>提出一种基于循环梯级的结构, 实现水面漂浮垃圾的采集、传输和储存。张智远等<sup>[10]</sup>从机械结构和控制模块两个方面进行改进, 设计一款太阳能智能海洋漂浮垃圾收集船。林思源等<sup>[11]</sup>研制出一种以波浪能和太阳能为动力, 由 V 字型浮围栏和垃圾收集系统组成的近海漂浮垃圾自驱动收集装备。朱永强等<sup>[12]</sup>设计一种海洋垃圾回收船, 实现垃圾的收拢、导流、传输和分流。

海上垃圾桶在风浪较小的封闭水域具有较好的收集效果, 但面对风浪大且垃圾分布广的近海沿岸等开阔水域, 则收集效果不佳; 海上垃圾收集船因过于庞大而无法对沿岸浅水水域的漂浮垃圾进行收集, 此外, 当面对封闭水域时, 存在设备搬运困难、运行成本高等问题。基于此, 本文提出一种近海漂浮垃圾收集器的设计方法。

# 1 近海漂浮垃圾收集器的设计

## 1.1 设计方案

近海漂浮垃圾收集器设计框图, 如图 1 所示。设计内容包括电路连接、电器元件选择和系统结构设计。整个装置可遥控, 有效范围约为 800 m, 能够轻松应对近海海面等工作环境。

近海漂浮垃圾收集器工作示意图, 如图 2 所示。收集器两侧及后侧封闭, 由水下无刷电机驱动螺旋桨, 在装置内制造负压并形成一定的液面差, 收集器前方一定范围内形成流向装置中间的单向水流, 将漂浮垃圾引导到收集器的收集装置中。凭借“吸引”能力能更好地处理贴岸的漂浮垃圾。收集器在前方形成的负水压的强弱可由无刷电机控制, 在反推装置的配合下, 负水压的强弱不会影响收集器的运动。

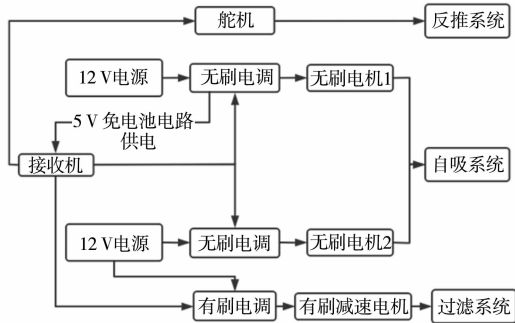
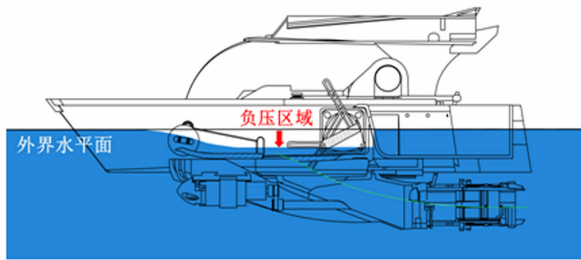
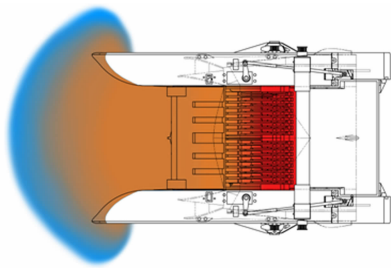


图 1 近海漂浮垃圾收集器设计框图  
Fig. 1 Design block diagram of offshore floating garbage collector



(a) 液面差



(b) 负压范围

图 2 近海漂浮垃圾收集器工作示意图

Fig. 2 Work schematic diagram of offshore floating garbage collector



反推系统能够线性调节反推比例的大小,与无刷电机配合,在提供吸力的同时,实现多种运动模式。自吸作用与反推作用协同工作,可提高收集效率,在处理贴岸漂浮垃圾时,还可依靠吸引力让船靠岸即可收集垃圾,极大地降低了搁浅的风险,填补了传统漂浮垃圾收集装置难以对贴岸漂浮垃圾收集的空缺。为了尽量线性控制反推比例,在反推尾喷中设计开合结构,引导水流分流。反向水流形成的向后推力与向后水流形成的向前推力的合力即整个收集装置单侧的推力。通过改变左、右两侧的推力,可实现差动转向、原地掉头等功能。部分反推时尾喷口的水流流向,如图 3 所示。

由于驱动和形成自吸的水泵复用,要求水流通道具备较高的过滤能力,防止细小垃圾被吸入尾喷口,从而影响设备的行动能力。设计一种双层错位格栅式过滤网,可有效提高过滤能力。同时,勾爪的旋转运动,将过滤网上的垃圾转运到后方的储存箱中。过滤网和勾爪两个部件组成了过滤装置。过滤系统,如图 4 所示。

由于海水具有腐蚀性,与海水直接接触的部件需选择具有较强抗腐蚀能力的材料。结合材料加工性能,选择聚乙烯为基础材料<sup>[13]</sup>。考虑到装置只在工作时间需要浸入水中,故其他部件不做特殊处理。

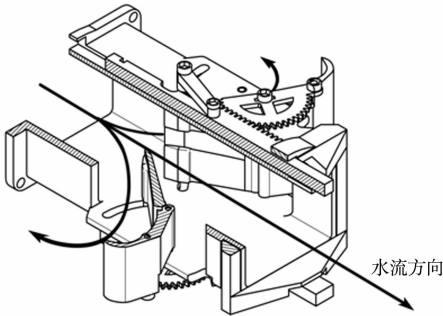


图 3 部分反推时尾喷口的水流流向  
Fig. 3 Water flow direction of tail nozzle during partial reverse pushing

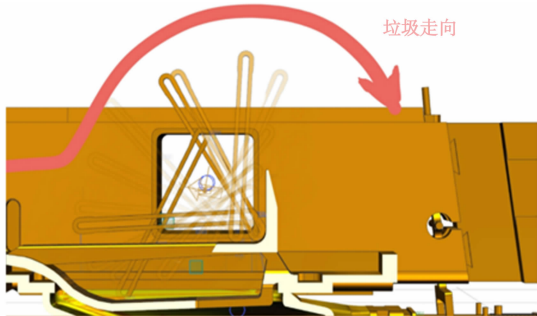


图 4 过滤系统  
Fig. 4 Filtration system

1.2 电控设计

电器元件选装,如表 1 所示。

表 1 电器元件选装  
Tab. 1 Optional installation of electrical components

| 类别   | 电子配件   | 型号                | 数量 |
|------|--------|-------------------|----|
| 动力部分 | 水下无刷电机 | 12 V 无刷电机(200 W)  | 2  |
| 过滤部分 | 减速电机   | 25GA-370 型(5.4 W) | 2  |
| 反推部分 | 舵机     | MG996R 型          | 2  |
| 电控部分 | 电调     | 30 A 无刷电调         | 2  |
|      |        | 双路单向有刷电调          | 1  |
|      | 接收机    | MC9002 型双天线接收     | 1  |

电器元件有以下 6 种连接方式。

- 1) 两个 12 V 电源分别直接连接 2 个无刷电调。无刷电调可通过免电池电路(BEC)为接收机提供 5 V 电压。为避免两个无刷电调的供电冲突,将其中一个电调的 BEC 供电线挑出分离。
- 2) 无刷电调为接收机供电的同时,能够控制接收机的调速,对水下三相无刷电机进行调速。
- 3) 舵机额定电压为 5 V,可由接收机直接供电,同时控制舵机摇杆位置,再通过摇杆、连杆、齿轮齿条等装置,对反推量进行线性控制。
- 4) 1 个 12 V 电源另外连接有刷电调。有刷电调与接收机通过有线连接,需去掉一个供电 BEC 供电线。有刷电机直接连接有刷电调。共有两个有刷减速电机,且只需要单向运转,因此,选用有刷双路单向电调。
- 5) 接收机连接方式<sup>[14]</sup>。一通道连左边舵机,二通道连右边电机,三通道连左边无刷电调,四通道空缺,五通道连右边无刷电调,六通道空缺,七通道空缺,八通道连有刷电调。
- 6) 混控设置。 $\text{二通道信号值} = \text{一通道信号值} \times 100\%$ ;  $\text{一通道信号值} = \text{二通道信号值} \times (-50\%)$ ;



五通道信号值=三通道信号值×100%。

1.3 整体结构及工作原理

海洋垃圾收集器整体结构设计紧凑, 多处使用卡扣、榫卯等结构, 组装简单。船体下方使用浮块进行填充, 提高船体的浮力并减小船体运动阻力; 水下无刷电机及电池设计在靠下位置, 保证装置有良好的稳定性。近海漂浮垃圾收集器的整体结构, 如图 5 所示。

主动吸引模块, 如图 6 所示。水下无刷电机通过同步带与螺旋桨相连, 可有效减少噪音和抖动, 降低装配要求, 在保证扭矩传输的同时, 能防止螺旋桨卡死而导致的电机过载。通过螺旋桨产生向后的高速水流, 在进水口及前板位置形成较大的负压。两侧电机功率相同, 产生等大的推力, 最终产生的单侧推力大小由后方反推尾喷控制。

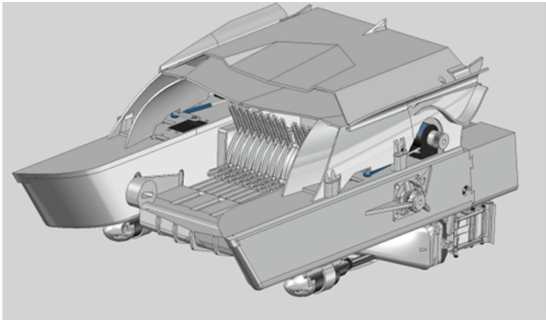


图 5 近海漂浮垃圾收集器的整体结构

Fig. 5 Overall structure of offshore floating garbage collector

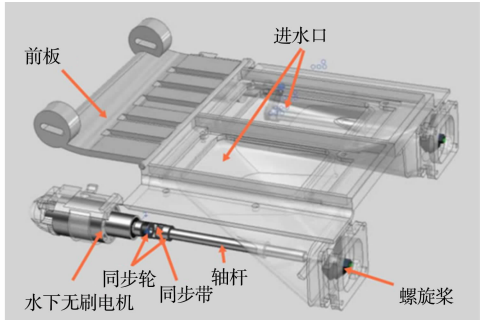


图 6 主动吸引模块

Fig. 6 Module of active suction

由螺旋桨产生的高速水流将穿过反推尾喷。舵机为反推尾喷装置的动力装置, 连杆及齿轮、齿条机构组合而成的传动结构将舵机旋转运动转化为反推尾喷上齿条的直线运动。通过调节舵机角度, 可较为线性地控制反推尾喷内分流板的开合度, 以此控制水流所占比例的大小。通过对两侧推力的协同控制, 可以产生向前或向后的推力。控制控制两侧推力差, 形成横摆力矩, 可获得以任意转向半径进行转向的能力。尾喷反推模块, 如图 7 所示。

当螺旋桨工作时, 水流将从常压区流向负压区。工作状态下水流情况示意图, 如图 8 所示。图 8 中: 箭头表示反推比例为 0% 时的水流路径。漂浮垃圾将随水流进入收集装置, 并由过滤网进行分离。

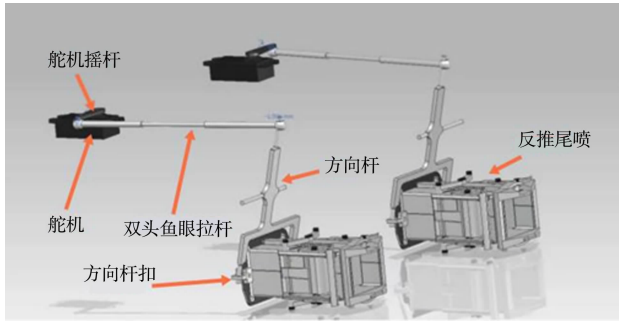


图 7 尾喷反推模块

Fig. 7 Reverse push module of tail nozzle

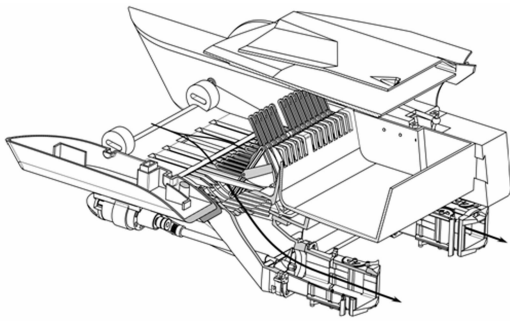


图 8 工作状态下水流情况示意图

Fig. 8 Schematic diagram of water flow situation under working condition

因减速电机不能防水, 为提高设备稳定性, 将其设置于水面之上, 减速电机通过同步带驱动三角转子旋转。三角转子装配图, 如图 9 所示。转子带动勾爪旋转, 将过滤网上的漂浮垃圾转运到后方的垃圾储存箱中, 结合等边曲线(勒洛三角形)的特殊运动轨迹, 可以使勾爪达到水平时处在更低的位置, 尽可能地减小将漂浮垃圾往前推的趋势。

样机前板材料密度略大于水, 两侧圆柱为中空结构, 前板可上下浮动, 自动调整吃水深度。前板上移示意图, 如图 10 所示。图 10 中: 箭头表示水流路径, 在快速前进时, 水流将抬起前板, 更多水流直接从前板下方流入, 降低整体的阻力, 并保证足够的进水量, 有效提升最大速度。由于材料密度略大于水, 因此, 当速度减慢时, 前板后端会自动下沉, 使进水通道依旧保持在前板上方。

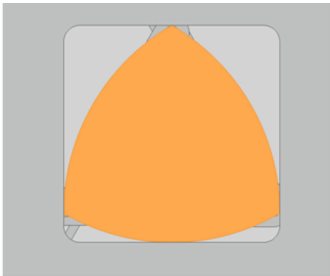


图 9 三角转子装配图

Fig. 9 Assembly diagram of triangle rotor

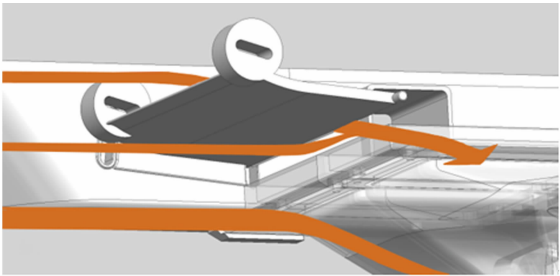


图 10 前板上移示意图

Fig. 10 Schematic diagram of front board moving up

2 数据分析

2.1 基本尺寸设计

调查结果显示,中块和小块垃圾占漂浮垃圾的 98% 以上<sup>[15]</sup>,且垃圾分布范围广而远。这要求装置具有良好的行动力,尽可能地发挥远程遥控操作的优势。近海漂浮垃圾收集器的尺寸,如图 11 所示。

近海漂浮垃圾收集器的最高水位线为 252.50 mm,最低水位线为 192.50 mm。超过最高水位线,可能会导致进水;低于最低水位线,可能因进水不足引起水泵空转。通过配重使水位接近最高水位线,从而充分保证进水量,有利于垃圾随着水流进入收集器中。

2.2 部分构件的有限元分析

2.2.1 方向杆有限元分析 MG996R 型舵机的额定扭矩为 13 kg · cm,舵机摇杆臂长为 20 mm,力传动比约为 0.92,经计算可得方向杆最大负载约为 58.6 N,将其作为方向杆载荷。

方向杆有限元分析,如图 12 所示。由图 12 可知:圆杆与主板接触位置变形最大;方向杆的最小屈

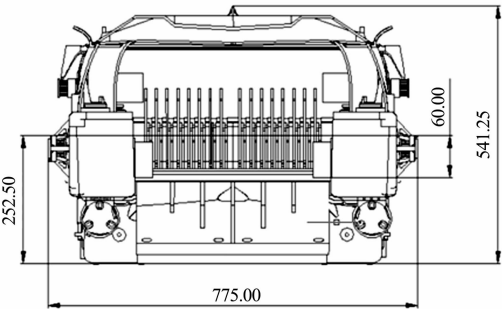
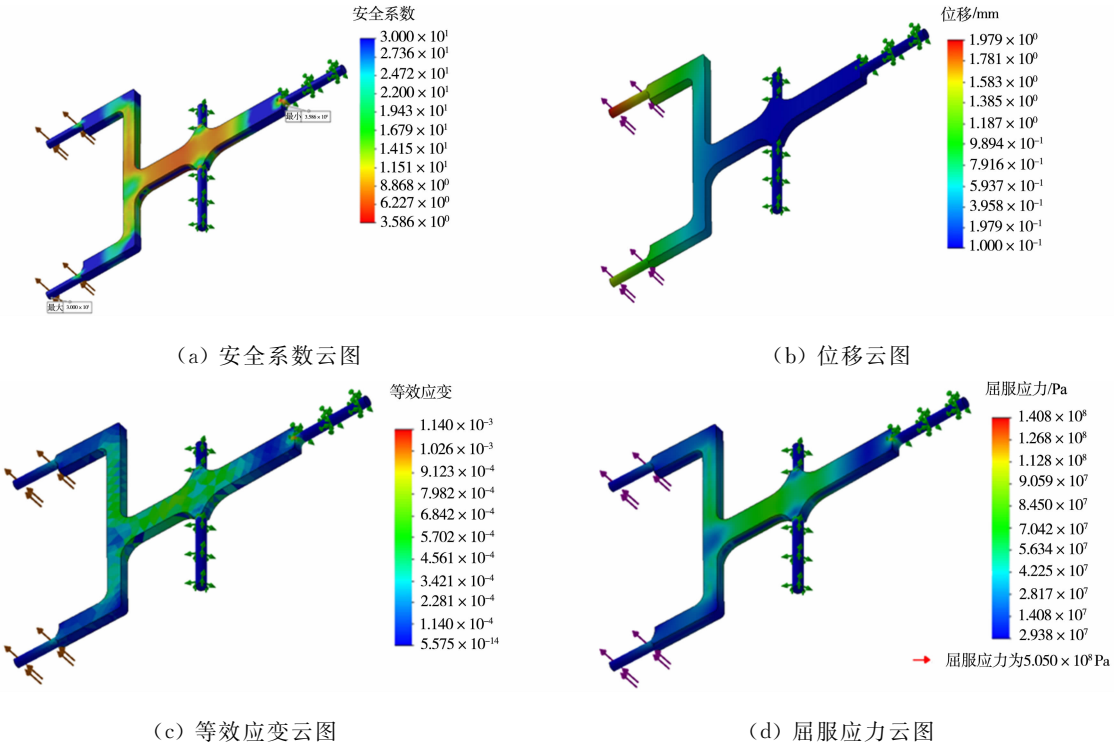


图 11 近海漂浮垃圾收集器的尺寸(单位: mm)

Fig. 11 Dimensions of offshore floating garbage collector (unit: mm)



(a) 安全系数云图

(b) 位移云图

(c) 等效应变云图

(d) 屈服应力云图

图 12 方向杆有限元分析

Fig. 12 Finite element analysis of directional rods

服应力为 2.938 MPa,最大屈服应力为 140.8 MPa,最大位移为 1.979 mm,最小安全系数为3.6。方向杆的材料为 7075 铝合金,无热处理,屈服强度为 503 MPa,材料强度满足要求。

2.2.2 反推尾喷拉杆有限元分析 电机最大推力为 19.6 N,当反推比例为 100%时受力最大。结合尾喷口的几何参数,受力点等效于分流板中心位置,经计算可得反推尾喷拉杆的最大压力为 2.5 N。由于该结构为二力杆件,压力沿杆轴向。

将 2.5 N 作为杆件载荷进行有限元仿真。反推尾喷拉杆有限元分析,如图 13 所示。由图 13 可知:变形最大处为轴孔位置;反推尾喷拉杆的最小屈服应力为 113.3 Pa,最大屈服应力为 0.428 MPa,最大位移为 5.81  $\mu\text{m}$ ,最小安全系数为 70.0。反推尾喷拉杆的材料选用光敏树脂,屈服强度约为 30 MPa,材料强度满足要求。

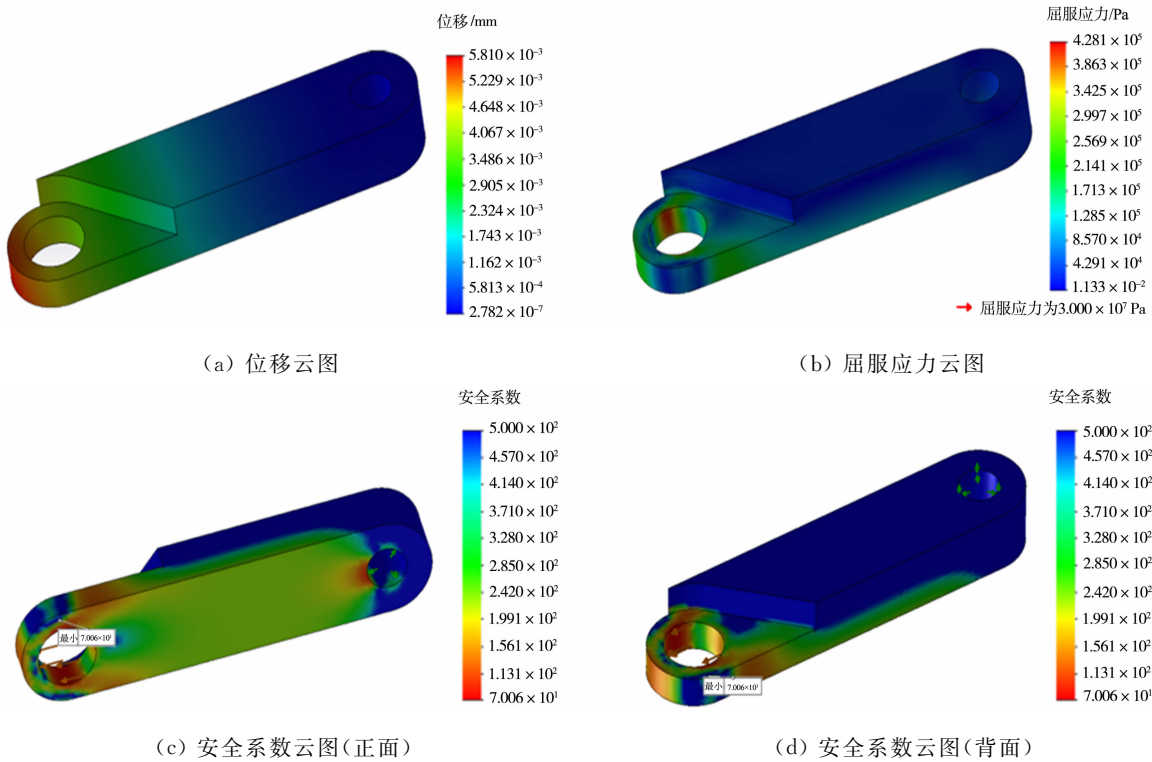


图 13 反推尾喷拉杆有限元分析

Fig. 13 Finite element analysis of reverse push tail nozzle rod

综上可知,主要受力连接件安全系数均大于 3,满足强度要求;变形量均在允许范围内,不存在因过度变形而产生的失效。

2.3 样机实物数据测算

样机静态实拍图,如图 14 所示。

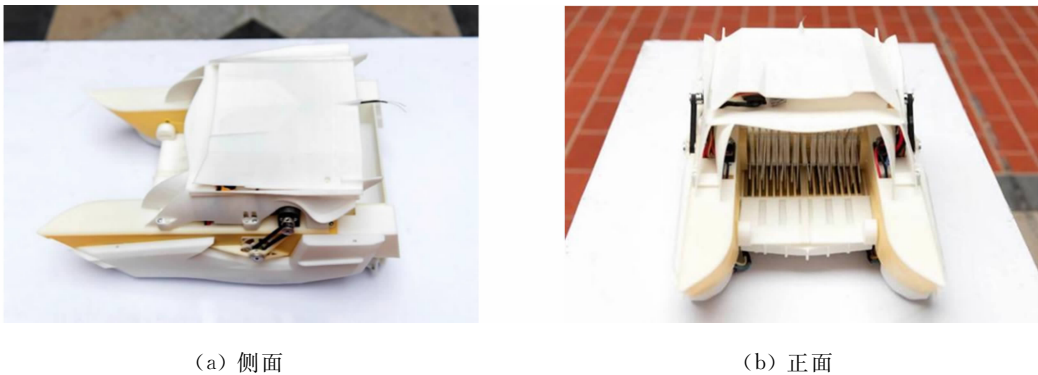


图 14 样机静态实拍图

Fig. 14 Static real shot image of prototype

无风环境下,样机实测数据,如表 2 所示。

样机电池容量为  $9\,000\text{ mA}\cdot\text{h}^{-1}$ ,电压为  $12\text{ V}$ 。整机最大总功率为  $410.8\text{ W}$ ,经计算可得续航时间为  $0.263\text{ h}$ ,根据实测航速,经计算可得续航里程。

表 2 样机实测数据  
Tab. 2 Measured data of prototypes

| 参数       | 数值        | 参数                                 | 数值   |
|----------|-----------|------------------------------------|------|
| 样机与实物的比例 | 1.0 : 2.5 | 质量/kg                              | 2.32 |
| 电机推力/N   | 19.6      | 最大航速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | 0.7  |
| 吸引半径/m   | 0.4       | 续航里程/km                            | 0.67 |

在漂浮垃圾分布约为  $0.3\text{ 个}\cdot\text{m}^{-2}$  的静水面上,平均收集速率为  $8\text{ 个}\cdot\text{min}^{-1}$ ,收集速率较高,但在垃圾靠岸情况下,收集速率会降低。

### 3 结束语

设计一种近海漂浮垃圾收集器,通过自吸功能,有效提高了贴岸漂浮垃圾的收集能力;通过反推控制,实现了收集器的机动性,以及吸力与动力的电机复用。样机试制证明了文中方法的可行性,并验证了收集器对处于复杂地形、贴岸的漂浮垃圾的出众收集能力。通过参数设计,使近海漂浮垃圾收集器能适应国内大部分的工作环境,对垃圾少、范围广、难收集的水域效果更加显著。在样机测试中,样机的最大航速为  $0.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,续航里程为  $0.67\text{ km}$ ,形成的吸引半径为  $0.4\text{ m}$ ,在漂浮垃圾分布为  $0.3\text{ 个}\cdot\text{m}^{-2}$  的静水水面上,平均收集速率为  $8\text{ 个}\cdot\text{min}^{-1}$ 。在未来的工作中,将进行与其他辅助装置协作的研究,如声呐、AI 等。此外,也可结合 5G 通讯及高空探查,进一步降低工作强度,扩大收集范围。

#### 参考文献:

[1] 王姣姣,杨小明,韦正峥,等.推进海洋塑料治理和高值化利用[J].环境经济,2024(14):39-43.

[2] 高宇,黄海萍,吴侃侃,等.厦门海洋垃圾防治与管理实践及启示[J].海洋开发与管理,2021,38(11):91-96. DOI: 10.20016/j.cnki.hykyfjgl.2021.11.015.

[3] 房瑞,段志勇,刘在智,等.海洋垃圾治理技术综述[J].综合智慧能源,2023,45(5):70-79.

[4] 李文婧,孙榕,刁鹏飞,等.智能海洋垃圾桶[J].科学技术创新,2021(17):179-180.

[5] 陈俊均,陈田嘉,韩露,等.波浪能海洋漂浮物收集装置设计[J].广州航海学院学报,2019,27(3):30-33.

[6] 占金锋.40 m 双体全自动水上垃圾清扫船的研制[J].江苏船舶,2018,35(3):1-3,12.

[7] 宋怡,于鑫,徐云艳,等.海洋垃圾高效检测与自动收集装置的设计[J].南方农机,2025,56(6):111-113.

[8] 孟泓宇,柳青,韩旭,等.海洋垃圾回收船设计[J].机械工程师,2025(1):68-72.

[9] 张志高,吴丽晓,崔志远,等.一种基于循环梯级的海洋垃圾处理装置[J].科学技术创新,2022(25):189-192.

[10] 张智远,刘观,王瑞,等.太阳能智能海洋漂浮垃圾收集船设计[J].科技视界,2024,14(13):82-85.

[11] 林思源,张振伟,刘必劲,等.近岸海漂垃圾自驱动收集装备的研制及应用[J].厦门理工学院学报,2022,30(1):81-86. DOI:10.19697/j.cnki.1673-4432.202201012.

[12] 朱永强,张平霞.海洋垃圾回收船设计[J].机械设计与制造,2020(1):18-20. DOI:10.19356/j.cnki.1001-3997.2020.01.005.

[13] 姜良朋,何春霞,王磊,等.四种植物纤维/高密度聚乙烯木塑复合材料耐海水腐蚀性能比较[J].复合材料学报,2019,36(7):1625-1632. DOI:10.13801/j.cnki.fhclxb.20181023.001.

[14] 邓群.2.4 GHz 无线航模遥控系统的设计[D].宁波:宁波大学,2013.

[15] 孙伟,汤宪春,徐艳东,等.山东省沿岸海域海洋垃圾分布、组成和变化特征[J].科学技术与工程,2016,16(18):89-94.

(责任编辑:钱筠 英文审校:吴跃勤)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202503023



# 基于卷积神经网络的石材 镶嵌工艺颜色匹配方法

谢标峰<sup>1,2</sup>, 陈首虹<sup>3</sup>, 黄吉祥<sup>1,2</sup>, 李建新<sup>1,2</sup>, 黄身桂<sup>1,2</sup>

(1. 华侨大学 制造工程研究院, 福建 厦门 361021;

2. 南安华大石材产业技术研究院, 福建 南安 362342;

3. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 针对石材镶嵌工艺中人工选料耗时长、得到产品质量不稳定的问题,提出一种基于卷积神经网络模型的石材镶嵌工艺颜色匹配方法。对生产车间的石材扫描样本预处理构建石材图像数据集;训练不同卷积神经网络,筛选出在数据集上分类效果最好的石材分类模型;为验证其分类效果,提取目标图像的颜色区域作为输入进行实际生产。结果表明:采用所提方法匹配的石材生产出的镶嵌产品与目标图像在颜色一致性方面表现优异,视觉感知效果高度接近;所提方法既能提高石材的挑选效率,又保障了产品质量的稳定性。

**关键词:** 镶嵌工艺; 石材分类; 卷积神经网络; 工艺优化

中图分类号: TP 399; TU 564.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2025)04-0393-07

## Color Matching Method for Stone Tessellation Process Based on Convolutional Neural Network

XIE Biaofeng<sup>1,2</sup>, CHEN Shouhong<sup>3</sup>, HUANG Jixiang<sup>1,2</sup>,  
LI Jianxin<sup>1,2</sup>, HUANG Shengui<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Nan'an-HQU Institute of Stone Industry Innovations Technology, Quanzhou 362342, China;

3. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** To address the problem of time-consuming manual material selection and unstable product quality in the stone tessellation process, a color matching method based on convolutional neural network model is proposed. Stone samples scanned from the production workshop were preprocessed to construct the stone image dataset. Different convolutional neural networks were trained to screen out the best stone classification model. In order to validate the model's effectiveness, the color region of the target image was extracted and used as the input for actual production. The results demonstrated that the products produced using the proposed method were excellent in terms of color consistency, and the visual perception effect was highly similar. The proposed method significantly improve the efficiency of stone selection and ensure the stability of product quality.

**Keywords:** tessellation process; stone classification; convolutional neural network; process optimization

石材镶嵌产品具有深厚的历史与文化积淀,活跃于许多公共艺术舞台及家庭装饰中<sup>[1-3]</sup>。将不同颜

收稿日期: 2025-03-12

通信作者: 黄身桂(1981—),男,副教授,博士,主要从事智能制造与高效精密加工、机器人磨抛加工、智能制造装备设计与开发的研究。E-mail: shghuang@hqu.edu.cn。

基金项目: 福建省科技计划资助项目(2022H0018)



色、质地的石材拼接组合成精美图案,能使石材镶嵌产品具有色彩丰富、持久度高、环保等优点<sup>[4-6]</sup>。在石材镶嵌工艺流程中,目前采用的人工选料法虽简单直观,但主观因素很难保证作品的一致性和整体视觉效果。因此,如何从庞大的石材数据库中检索出颜色匹配的石材,是石材镶嵌工艺急需解决的问题。

匹配颜色合适的石材可以归类为石材的颜色分类问题,目前石材的颜色分类研究大多基于传统机器学习,通过对石材图片特征提取,并对经典分类算法加以改进实现分类。杜金华<sup>[7]</sup>提出在 HSV 颜色空间里采用等间距和非等间距等方式提取颜色特征,对颜色特征进行主成分分析降维,并采用分类器对提取的颜色特征进行处理,以实现花岗石图像分类。康利娟<sup>[8]</sup>提出基于图像颜色的石材分类方法,对图像的颜色空间进行转换后提取特征值进行量化处理,采用欧式距离和改进的距离来计算图像之间的相似度值。杨杰等<sup>[9]</sup>采取基于全局和局部的石材图像颜色直方图技术进行分类,将 HSV 色彩空间分别与直方图相交法和环形直方图、角度直方图法相结合,对不同通道给予不同的权重,对不同通道分量进行非等间隔量化以提高石材图像匹配的效率。尽管基于传统机器学习在石材分类上取得了不错的准确率,但传统机器学习依赖于手工特征提取,其准确率在一定程度上依赖于特征工程的质量和数据预处理的效果<sup>[10]</sup>。而深度学习中卷积神经网络(CNN)具有自动从图像中提取多层次的特征,在大规模、复杂的石材分类任务中具有更高的分类准确率<sup>[11-13]</sup>。

近年来,深度学习等前沿技术与工业生产的耦合越来越紧密,使得工业向智能制造方向转型,从而提高了生产效率和自动化水平<sup>[14-15]</sup>。基于当前工业生产智能化的趋势,本文利用实际生产中的石材数据库建立一个高质量的数据集,通过卷积神经网络实现镶嵌工艺流程中石材颜色匹配,以提升石材镶嵌工艺的智能化及自动化水平。

## 1 算法介绍

ResNeXt 是由 Facebook AI Research 的研究人员于 2017 年开发出的一种卷积神经网络,它在 VGG 和 ResNet 等网络基础上进行扩展和改进,丰富了深度学习模型的设计空间,使模型拥有更高的性能和更好的泛化能力<sup>[16]</sup>。作为一种高效的深度学习模型,ResNeXt 通过分组卷积和基数组的设计,能够在减少计算复杂度的同时,提升分类精度和特征提取能力。

ResNeXt 核心思想在于提出的“基数”参数的概念,即在同一层中使用多个并行路。ResNeXt 模块通过增加并行路径的数量(基数)来提高网络的表达能力,而每条路径的结构与 ResNet 模块中的相似(图 1)。这种设计允许网络在保持计算复杂度不变的条件下,通过增加基数来提高性能。

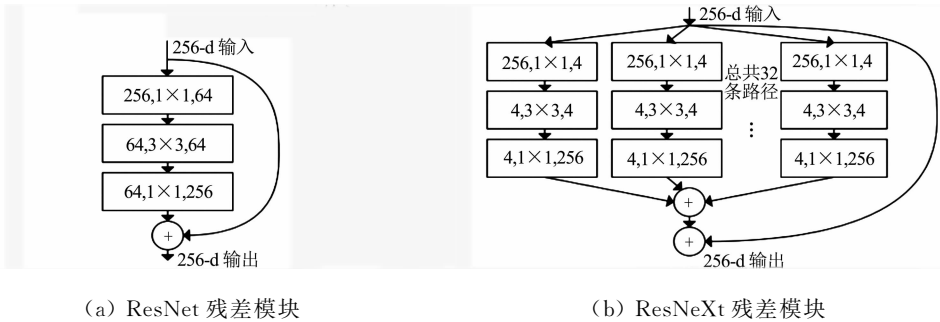


图 1 ResNet 与 ResNeXt 残差模块结构比较

Fig. 1 Comparison of ResNet and ResNeXt residual module structures

以 ResNeXt-50(32×4d)为例,它表示一个包含 50 层、每个残差模块使用 32 个分组卷积、每组通道数为 4d 的卷积网络。ResNeXt 残差模块结构采用 3 层卷积结构,首先通过 1×1 卷积将输入特征通道数降维;然后通过 3×3 卷积进行主特征提取操作;再通过 1×1 卷积升维以恢复通道数;最后将并行路径的输出结果聚合到一起求得最终的输出。一组聚合转换可以表示为

$$F(x) = \sum_{i=1}^c T_i(x)。(1)$$

式(1)中: $F(x)$ 表示一组聚合转换的输出; $T_i(x)$ 表示任意一个可以将输入数据进行映射转换的函数; $c$ 表示基数参数,决定网络的并行路径个数。



## 2 试验方案

### 2.1 石材图像的扫描

用于石材分类模型训练的图像数据均来自南安市水头镇某石材企业实地生产的图像数据。从矿山上开采的原料经过切割、磨削、抛光等加工工序处理后变成一系列规格尺寸的石材大板,通过链石 007 智能扫描仪(图 2)拍摄记录这些石材大板的颜色、尺寸等图像信息。智能扫描仪总功率为 1 000 W,最大扫描尺寸为 4 000 mm×2 200 mm×40 mm,最大扫描速度为 15 m·min<sup>-1</sup>,线阵分辨率为 8 192 px,镜头畸变率不超过 1%,最高采样速率为 50 kHz,输出的图像格式为 JPEG。

### 2.2 数据集的建立

石材大板扫描输出的初始数据集示例,如图 3 所示。扫描图中的石材轮廓复杂,数据信息参差不齐,对模型训练存在干扰,需要对扫描的石材图片进行训练前预处理,剔除石材图像冗余的黑色背景及标尺信息,最大化保留石材部分图像以作为模型训练的数据集样本。



图 2 石材扫描设备  
Fig. 2 Scanning equipment for stone

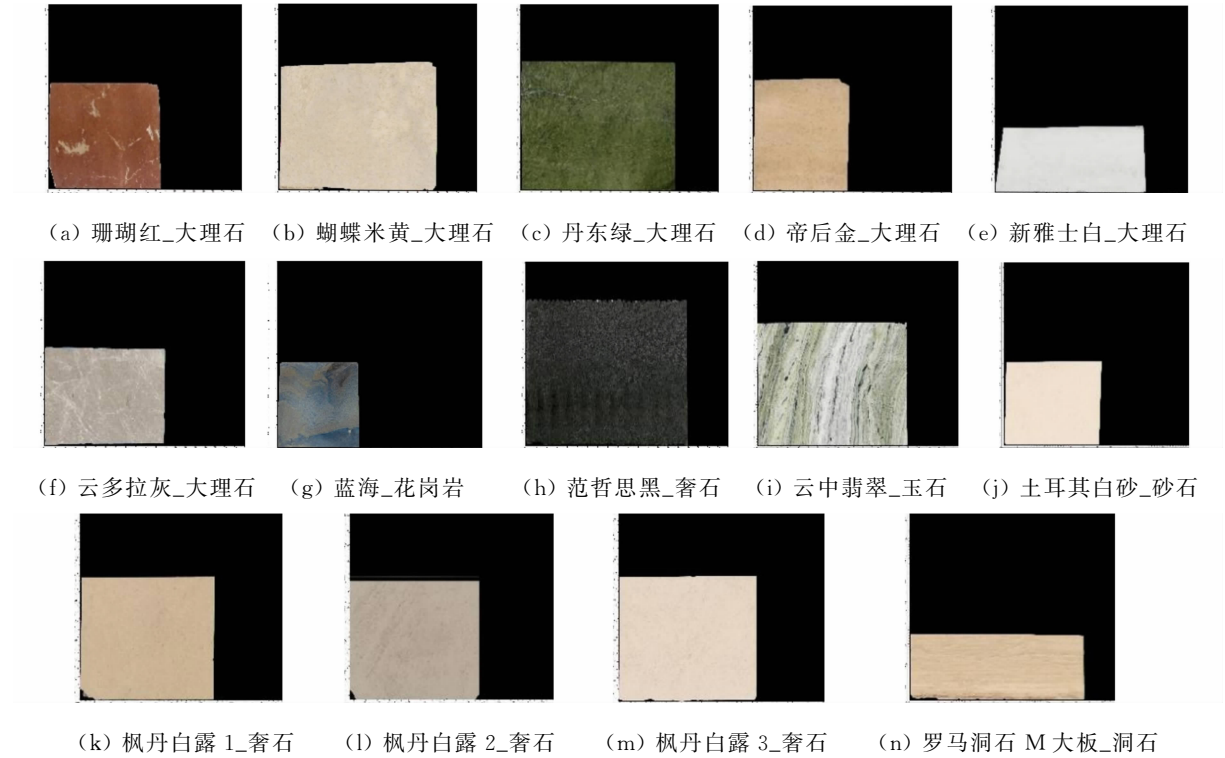


图 3 石材大板扫描输出的初始数据集示例

Fig. 3 Example of initial dataset output from stone slab scanning

采用截取石材部分的最大内接矩形图像的方案,石材图像截取程序,如表 1 所示。

石材图像数据集有 169 种类别,共 12 539 张石材图像,其中包括训练集 10 067 张和测试集 2 472 张。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 分类模型参数

为验证卷积神经网络在石材图像分类中的有效性,采用 ResNeXt 网络作为主干结构,进一步探讨其在图像目标区域颜色选材方面的可行性。考虑网络深度对特征提取能力与

| 表 1 石材图像截取程序                   |  |
|--------------------------------|--|
| Tab. 1 Stone image interceptor |  |
| 程序:石材图像的截取                     |  |
| 输入:石材扫描图像                      |  |
| 输出:石材部分的截取图像                   |  |
| 1:去除背景冗余标尺信息;                  |  |
| 2:转化为灰度图;                      |  |
| 3:提取石材区域轮廓;                    |  |
| 4:基于轮廓找出石材的最大内接矩形;             |  |
| 5:截取出最大内接矩形;                   |  |
| 6:统一截取图像规格大小。                  |  |

计算复杂度的影响,对 ResNeXt50、ResNeXt101 和 ResNeXt152 三种不同深度模型进行训练,比较其在石材分类任务中的表现。同时,将 ResNeXt 与经典网络模型 AlexNet、VGG 和 ResNet 进行对比,分析深层网络在该任务中的优势与局限。其中,AlexNet 作为较早推动深度学习图像分类突破的模型,结构较为简洁,适用于中等规模数据集<sup>[17]</sup>;VGG 通过堆叠大量  $3\times 3$  卷积核加深网络,提高了特征提取的细致度<sup>[18]</sup>;ResNet 引入残差连接,缓解深层网络训练中的梯度消失问题,支持更深的结构构建<sup>[19]</sup>。为确保实验的公平性,在训练不同网络时统一了数据预处理、训练环境、超参数和策略,确保性能差异主要源于模型结构本身。

算法采用 ResNeXt 作为主干网络,使用多分类交叉熵损失函数衡量模型的预测概率分布与真实标签分布之间的差异,从而训练和优化网络模型。优化过程采用随机梯度下降(SGD),以最小化损失函数并优化模型参数。学习率和动量系数为模型训练的超参数,初始设置为 0.01 和 0.9。学习率采用阶梯式下降策略,每 30 个训练周期后,学习率衰减为原来的 0.1 倍,以帮助加速收敛并减少振荡。训练过程共进行 300 次遍历,每个批次的样本数设置为 32。模型训练实验流程,如图 4 所示。

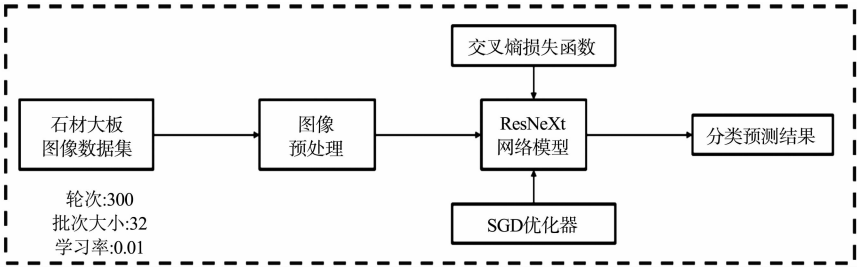


图 4 模型训练实验流程

Fig. 4 Process of model training experiment

3.2 训练分析

不同石材图像分类网络模型训练结果,如表 2 所示。由表 2 可知以下 2 点结论。

1) VGG 和 ResNet 等网络模型都在 50~100 次的迭代周期期间实现收敛,而 ResNeXt 网络模型在 50 次之内就完成收敛。

2) 在基于收集的石材图像数据集进行的图像分类训练实验中,ResNet 系列网络模型的准确率为 70%~80%,VGG 系列网络模型的准确率为 90%~95%,而 ResNeXt 系列网络模型的准确率均达到 97%以上。

表 2 不同石材图像分类网络模型训练结果

Tab. 2 Training results of different stone image classification network models

| 网络模型     | 收敛区间   | 最高准确率/% | 网络模型       | 收敛区间   | 最高准确率/% |
|----------|--------|---------|------------|--------|---------|
| AlexNet  | 未收敛    | —       | ResNet50   | 50~100 | 74.148  |
| VGG11    | 50~100 | 95.698  | ResNet101  | 50~100 | 43.019  |
| VGG13    | 50~100 | 95.008  | ResNet152  | 50~100 | 76.542  |
| VGG16    | 50~100 | 93.669  | ResNeXt50  | 0~50   | 97.362  |
| VGG19    | 50~100 | 90.990  | ResNeXt101 | 0~50   | 97.443  |
| ResNet18 | 50~100 | 74.229  | ResNeXt152 | 0~50   | 97.119  |
| ResNet34 | 50~100 | 80.073  |            |        |         |

3.3 模型效果评估

采用石材图像数据集的测试集对训练后的模型进行验证,通过 Top-1 准确率( $\eta_{A1}$ )、Top-5 准确率( $\eta_{A5}$ )、平均准确率( $\bar{\eta}$ )、平均召回率( $\bar{\eta}_R$ )和 F1 得分( $S_{F1}$ )5 项指标来评估模型的分类效果。

Top-1 准确率用于衡量模型预测的第一选择是否正确,其计算式为

$$\eta_{A1} = \frac{\text{正确预测的样本数}}{\text{总样本数}} \times 100\%。$$
 (2)

Top-5 准确率用于衡量模型在前 5 个预测中是否包含正确答案,其计算式为

$$\eta_{A5} = \frac{\text{包含真实类别的样本数}}{\text{总样本数}} \times 100\%。$$
 (3)

平均准确率是指所有类别的分类准确率的平均值,反映模型对各类别的整体表现,其计算式为

$$\bar{\eta} = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C \frac{\text{正确预测的样本数}}{\text{类别 } i \text{ 的样本总数}} \times 100\%。$$
 (4)

式(4)中:C 是类别数。

平均召回率用来评估模型对正类样本的识别能力,关注对正样本的覆盖程度,其计算式为

$$\bar{\eta}_R = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C \frac{TP_i}{FN_i + TP_i} \times 100\%。$$
 (5)

式(5)中:TP<sub>i</sub> 为类别 i 的真正例样本数量;FN<sub>i</sub> 为类别 i 的假负例样本数量。

F1 得分结合准确率和召回率,综合评估模型的分类性能,其计算式为

$$S_{F1} = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C 2 \times \frac{\eta_{P,i} \times \eta_{R,i}}{\eta_{P,i} + \eta_{R,i}} \times 100\%。$$
 (6)

式(6)中:η<sub>P,i</sub> 为类别 i 的精度;η<sub>R,i</sub> 为类别 i 的召回率。

各网络模型对应的 5 项指标评估结果,如表 3 所示。

表 3 各网络模型对应的 5 项指标评估结果

Tab. 3 Evaluation results of five indicators corresponding to each network model

| 网络模型       | η <sub>A1</sub> / % | η <sub>A5</sub> / % | η / % | η <sub>R</sub> / % | S <sub>F1</sub> / % |
|------------|---------------------|---------------------|-------|--------------------|---------------------|
| VGG11      | 94.01               | 99.88               | 94.87 | 94.54              | 94.44               |
| VGG13      | 93.59               | 99.12               | 91.59 | 92.96              | 92.21               |
| VGG16      | 92.35               | 99.76               | 92.68 | 92.56              | 92.28               |
| VGG19      | 89.89               | 99.60               | 90.53 | 89.26              | 89.19               |
| ResNet18   | 73.14               | 92.68               | 74.46 | 72.12              | 72.18               |
| ResNet34   | 76.05               | 94.17               | 75.46 | 73.81              | 73.44               |
| ResNet50   | 72.73               | 92.19               | 71.20 | 69.29              | 69.09               |
| ResNet101  | 39.52               | 74.03               | 36.96 | 35.35              | 33.59               |
| ResNet152  | 74.31               | 93.65               | 74.35 | 72.79              | 72.63               |
| ResNeXt50  | 96.64               | 100.00              | 97.42 | 97.30              | 97.21               |
| ResNeXt101 | 97.05               | 99.96               | 97.72 | 97.70              | 97.60               |
| ResNeXt152 | 96.52               | 99.96               | 97.50 | 97.27              | 97.24               |

由表 3 可知:AlexNet 网络模型未收敛未记录;ResNet 系列网络模型对应的 5 项评估值都较低;VGG 系列网络模型的 η<sub>A1</sub> 值在 89%~95% 范围内,η 和 η<sub>R</sub> 值在 90%~95% 范围内;而 ResNeXt 系列网络模型的所有指标都达到了最高值。由此可知,相比 AlexNet、VGG 和 ResNet 等网络模型,ResNeXt 系列网络模型更加适用于文中采集的石材图像数据集,说明 ResNeXt 网络模型的多分支架构和组卷积设计能够更高效地捕获石材图像中的复杂特征,进一步验证了 ResNeXt 网络模型在石材图像分类领域的适用性。而 ResNeXt 系列网络模型中,分类效果最好的是 ResNeXt101,ResNeXt101 拥有适中的深度,相比 ResNeXt50,它能更好地捕捉到复杂特征;受限于实际车间建立的训练数据规模,ResNeXt152 的过深网络带来了噪声训练和参数冗余,使其分类效果反而不如 ResNeXt101。

3.4 工程验证

采用具体实例验证基于 ResNeXt 网络模型实现石材大板颜色匹配的可行性及有效性。样例测试图,如图 5 所示。图 5 中包含 3 种主要颜色,采用 ResNeXt101 训练的分类模型对样例图中的每种颜色逐一处理。

首先,借助图像处理技术对样例图中的颜色区域进行标记,明确需要进行分类的具体位置,确保后续处理的针对性和准确性。依据标记区域的坐标从原样例图中裁剪出对应的子图,获得包含单一颜色区域的图像数据。为满足分类模型的输入要求,所有裁剪后的子图被统一调整为固定规格(大小为 224



图 5 样例测试图  
Fig. 5 Sample test chart

px×224 px)。通过标准化处理,消除因图像大小不一致对模型输入造成的干扰,提高预测的稳定性。

其次,将这些裁剪并标准化后的图像输入到预先训练好的 ResNeXt101 网络模型中。模型输出该图像最大概率可能的石材类别,选定为该区域图案的预测结果,如图 6 所示。

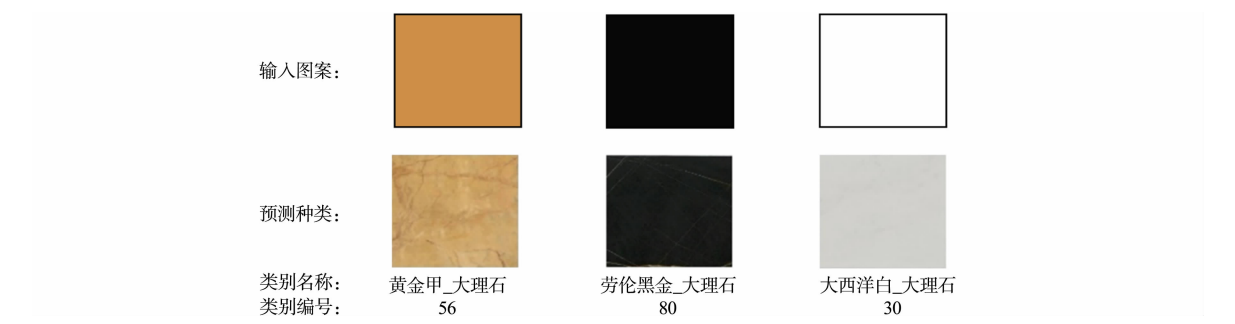


图 6 测试图的预测结果

Fig. 6 Predicted results of test chart

为验证研究的必要性,将模型选材与人工选材进行了样例测试的横向对比。实验中,记录了多名工人根据颜色在石材数据库中进行选材所花费的时间及选择出的石材种类。结果表明,工人在检索数据库时所用的时间与其选择的石材种类存在显著差异。具体来说,由于数据库庞大且种类繁多,工人在从数据库中选择相匹配石材时,通常需要花费较长时间,且选择的石材种类较为多样。而使用基于深度学习模型的自动选材系统能够根据颜色特征自动匹配数据库中的石材类型,模型选材的时间明显减少,且选择出的石材种类具有一致性。

通过上述流程,根据样例图生产出来的镶嵌实物图,如图 7 所示。ResNeXt101 网络模型实现了对样例图中每种颜色的精准识别与分类验证,证明了其在石材大板颜色匹配任务中的适用性和可靠性;与传统人工选材进行了横向对比,表明 ResNeXt101 网络模型能够显著提高选材效率和产品一致性,验证了采用 ResNeXt101 网络模型选材的必要性。



图 7 样例镶嵌实物图

Fig. 7 Picture of sample tessellation

## 4 结论

石材镶嵌产品历史悠久,具有丰富的文化内涵,同时也能带来较高的经济效益。针对在石材镶嵌产品的制作工艺流程中如何从庞大的石材数据库中快速挑选出颜色匹配的石材这一实际需求,提出一种基于卷积神经网络模型的石材镶嵌工艺颜色匹配方法。首先,对石材数据库中复杂多样的石材大板图像进行预处理构建数据集;然后,对比不同卷积神经网络的训练结果,筛选出在该数据集上分类效果最好的网络模型。实验结果表明,ResNeXt101 网络模型在文中构建的数据集上的分类性能最佳。

基于 ResNeXt101 网络模型进行工程验证,提取样例图中的各个颜色区域片段进行标准化处理,作为模型输入,模型输出为该颜色区域片段最大概率归属的石材类别。实际生产表明,输入的颜色图像片段与归类的石材类别在颜色一致性方面表现优异,生产的镶嵌成品与目标图案高度一致。将文中方法运用于石材镶嵌行业,为在大规模石材数据库中进行精准石材匹配提供了高效、实用的解决方案。

参考文献:

[1] 熊瑛子. 石材镶嵌艺术在中国当代壁画创作中的运用[J]. 天工, 2022, 36(1): 90-92. DOI: 10. 3969/j. issn. 2095-7556. 2022. 01. 024

[2] 熊瑛子. 石材镶嵌艺术风格研究[J]. 美术文献, 2019(5): 9-11. DOI: 10. 16585/j. cnki. mswx. 2019. 05. 005.

[3] 熊瑛子. 石材镶嵌艺术材料与创作手法分析[J]. 艺术品鉴, 2019, 15(12): 294-295.

[4] 陈瑶. 中国传统家具镶嵌艺术及现代化技术的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2006.

[5] 陈韞如. 清代宫廷家具中的镶嵌工艺[J]. 文物鉴定与鉴赏, 2022(8): 116-119. DOI: 10. 20005/j. cnki. issn. 1674-8697. 2022. 08.

[6] 李佳明. 传统镶嵌工艺在当代漆艺中的运用[D]. 沈阳: 鲁迅美术学院, 2019.

[7] 杜金华. 基于颜色特征和逻辑回归的饰面花岗岩图像识别技术研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2018.

[8] 康利娟. 基于图像颜色的石材分类算法及测试平台研究与实现[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.

[9] 杨杰, 杨静宜. 基于颜色直方图的石材图像检索[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2009, 31(2): 173-176. DOI: 10. 3963/j. issn. 1007-144X. 2009. 02. 001.

[10] 黄土真, 耿栋. 基于神经网络的建筑装饰石材智能分类研究: 以天然大理石分类为例[J]. 广西城镇建设, 2023(2): 90-97. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-7045. 2023. 02. 011.

[11] AGRAWAL N, GOVIL H. A deep residual convolutional neural network for mineral classification[J]. Advances in Space Research, 2023, 71(8): 3186-3202. DOI: 10. 1016/j. asr. 2022. 12. 028.

[12] TROPEA M, FEDELE G, DE LUCA R, *et al.* Automatic stones classification through a CNN-based approach[J]. Sensors, 2022, 22(16): 6292. DOI: 10. 3390/s22166292.

[13] 刘晨, 赵晓晖, 梁乃川, 等. 基于 ResNet50 和迁移学习的岩性识别与分类研究[J]. 计算机与数字工程, 2021, 49(12): 2526-2530. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-9722. 2021. 12. 020.

[14] 程志清. 基于深度学习的工业机器人视觉引导方法研究[J]. 信息记录材料, 2024, 25(12): 110-112. DOI: 10. 16009/j. cnki. cn13-1295/tq. 2024. 12. 048.

[15] 檀为龙. 深度强化学习在智能制造中的创新应用与趋势展望[J]. 中国战略新兴产业, 2024(33): 161-163. DOI: 10. 3778/j. issn. 1002-8331. 2008-0431.

[16] XIE Saining, GIRSHICK R, DOLLÁR P, *et al.* Aggregated residual transformations for deep neural networks[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Honolulu: IEEE Press, 2017: 5987-5995. DOI: 10. 1109/CVPR. 2017. 634.

[17] BOUDIAF A, BENLAHMIDI S, DAHANE A, *et al.* Development of hybrid models based on alexnet and machine learning approaches for strip steel surface defect classification[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2024, 24(3): 1376-1394. DOI: 10. 1007/s11668-024-01927-5.

[18] WANG Wei, ZHANG Chengwen, TIAN Jinge, *et al.* High-resolution radar target recognition via inception-based VGG (IVGG) networks[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2020, 2020(1): 8893419. DOI: 10. 1155/2020/8893419.

[19] MAHAUR B, MISHRA K K, SINGH N. Improved residual network based on norm-preservation for visual recognition[J]. Neural Networks, 2023, 157: 305-322. DOI: 10. 1016/j. neunet. 2022. 10. 023.

(责任编辑: 黄晓楠      英文审校: 吴跃勤)



DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202501009



# NC-UHPC 界面抗剪性能试验及 基于内聚力模型的仿真分析

黄维<sup>1,2</sup>, 王婷<sup>1,2</sup>, 张雨婷<sup>1,2</sup>, 斯比努尔·下木希奴<sup>1,2</sup>, 周知<sup>3</sup>

(1. 武汉理工大学 新材料力学理论与应用湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070;

2. 武汉理工大学 力学与工程科学系, 湖北 武汉 430070;

3. 武汉理工大学 交通与物流工程学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 为探究超高性能混凝土(UHPC)与普通混凝土(NC)界面抗剪机理,通过 9 组 NC-UHPC 试件双面剪切试验,研究钢纤维掺量、混凝土龄期及边界约束条件对界面力学性能的影响规律。结合 ABAQUS 软件建立含界面粘结-滑移特性的精细化有限元模型,并通过理论推导构建界面粘结应力分布模型。结果表明:在无约束工况下,低钢纤维掺量(体积分数为 0%~1%)试件呈现单面破坏特征,而固定 NC 试块下端可有效激发双剪破坏模式;UHPC 钢纤维掺量与界面抗剪强度呈正相关,而界面刚度受钢纤维掺量影响较小;UHPC 龄期增长可提升界面刚度,而 NC 龄期增加则产生抑制作用;建立的有限元模型能有效表征界面损伤演化过程,但对双剪试件非对称应变场的模拟存在局限性;基于能量守恒原理建立界面荷载-位移两参数模型,其预测结果与试验数据具有良好一致性。

**关键词:** NC-UHPC 界面; 单推试验; 数字图像相关; 有限元; 内聚力模型

**中图分类号:** U 454

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5013(2025)04-0400-10

## NC-UHPC Interface Shear Performance Test and Simulation Based on Cohesive Zone Model

HUANG Wei<sup>1,2</sup>, WANG Ting<sup>1,2</sup>, ZHANG Yuting<sup>1,2</sup>,  
SIBINUER · Xiamuxinu<sup>1,2</sup>, ZHOU Zhi<sup>3</sup>

(1. Hubei Key Laboratory of Theory and Application of Advanced Materials Mechanics,

Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Department of Mechanics and Engineering Sciences, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

3. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** To investigate the shear mechanism at the interface between ultra-high performance concrete (UHPC) and normal concrete (NC), nine groups of double-sided shear tests were conducted on NC-UHPC specimens, the effects of steel fiber content, concrete age, and boundary constraint conditions on interfacial mechanical properties were studied. Combining with ABAQUS software, a refined finite element model considering interfacial bond-slip characteristics was established, and an interfacial bond stress distribution model was constructed through theoretical derivation. The results show that under unrestrained conditions, specimens with low steel fiber content (0%-1% volume fraction) exhibit single-surface failure characteristics, while

**收稿日期:** 2025-01-09

**通信作者:** 黄维(1986—),男,副教授,博士,主要从事工程材料力学性能的研究。E-mail:whuang@whut.edu.cn。

**基金项目:** 湖北省青年科技人才联合项目(2023DJC001);国家级大学生创新创业训练计划项目(S202310497204)



fixing the bottom of the NC blocks effectively activates a dual-surface failure mode. The steel fiber content in UHPC positively correlates with the interfacial shear strength, while the interfacial stiffness is less affected by the steel fiber content. The increase of UHPC age enhances interfacial stiffness, while higher NC age has the inhibitory effect. The proposed finite element model effectively simulates the damage evolution at the interface, but simulates the asymmetric strain field in double-shear specimens with limitations. Based on the principle of energy conservation, the two-parameter model of interfacial load-displacement is established, and its prediction results conforms well with the test data.

**Keywords:** NC-UHPC interface; pushout test; digital image correlation; finite element; cohesive zone model

由于普通混凝土(NC)与超高性能混凝土(UHPC)界面强度的影响因素众多且复杂,从上个世纪至今,国内外众多学者进行了大量的研究,但至今仍存在可进一步深究的部分,如界面处理方式、界面粘结方式的参数影响规律、界面粘结机理等方面。

国内外学者通过大量实验研究新、旧混凝土界面的粘结性能。郭进军<sup>[1]</sup>采用 Z 字形粘结抗剪试验,建立抗剪强度与界面粗糙度及混凝土强度的关系式。叶果<sup>[2]</sup>研究抗剪性能与界面粗糙度及钢筋摩擦力的关系。张雷顺等<sup>[3]</sup>通过界面抗剪试验,得出植筋率、混凝土抗压强度与粘结强度的关系式。刑强<sup>[4]</sup>发现界面强度与混凝土强度等级、连接界面面积和钢筋面积密切相关,并提出抗剪强度公式。Tayeh 等<sup>[5]</sup>通过劈裂和斜剪试验,揭示 NC-UHPC 界面粘结的不同破坏阶段。Semendary 等<sup>[6]</sup>则通过斜剪、直接拉伸和剪切试验,探讨混凝土强度、表面粗糙度等因素对粘结性能的影响。Al-Madani 等<sup>[7]</sup>研究基体处理方式和养护条件对界面粘结的具体影响。Bastien-Masse 等<sup>[8]</sup>研究纤维分布对界面性能的影响,而 Hussein 等<sup>[9]</sup>发现钢纤维掺量对粘结劈拉强度影响不大。

同时,有限元软件在提升新、旧混凝土界面上也起到了重要作用。党祺<sup>[10]</sup>使用非线性有限元软件 Marc 模拟了 UHPC 层与 NC 层的混合结构,通过 Links-Insert、Contact、Touching 等功能增强了两层结构的连接和钢筋结合,提高了整体强度和稳定性。王兴旺<sup>[11]</sup>利用 ANSYS 研究切槽、凿毛、植筋等技术对混凝土抗剪性能的影响,发现钢筋的应用比其他方法更能有效提升承载力。田稳苓等<sup>[12]</sup>通过剪切实验和数值模型分析新、旧混凝土的抗拉强度,结果显示植筋率的增加和三角形排列能提高粘结力和抗剪强度。Harris 等<sup>[13]</sup>通过劈拉、斜剪和拉拔试验分析混凝土界面粗糙度对粘结性能的影响,并开发了有限元模型评估 UHPC 的应力分布。Dias-da-Costa 等<sup>[14]</sup>利用 DIANA 软件研究混凝土界面的纵向抗剪强度,通过 A 型直剪试件和平面应力双线性有限元模拟,结合 Mohr-Coulomb 摩擦定律,深入分析各参数对抗剪性能的影响。Farzad 等<sup>[15]</sup>开发了一种高效的数值模拟方法,预测不同混凝土层间的抗剪强度,并通过调整参数来提升粘结性能。

虽然国内外学者对 NC-UHPC 界面粘结性能的影响因素与机理开展了大量探索,但仍存在以下关键问题亟待解决:界面抗剪强度对钢纤维掺量与混凝土养护龄期的耦合响应规律尚未量化,现有数值模型因忽略界面粗糙度随机性而难以精确模拟粘结-滑移过程,且缺乏对界面荷载传递动态演化机制的理论解析。针对上述问题,本文通过多变量控制试验量化了钢纤维掺量(体积分数  $\varphi$  为 0%~2%)与混凝土养护龄期(7~28 d)对抗剪强度的协同效应;基于内聚力模型(CZM)构建考虑界面形貌随机特征的精细化有限元模型,模拟了界面损伤萌生、扩展至失效的全过程;最后,结合试验与模拟结果,提出了界面荷载传递的三阶段发展理论,揭示了界面应力重分布与能量耗散的动态规律。

1 试验方案

1.1 试验材料及配合比

C40 混凝土和超高性能混凝土每立方米材料配合比,分别如表 1、2 所示。表 1、2 中: $m$  为质量。

表 1 C40 混凝土每立方米材料配合比 (单位:kg)  
Tab. 1 Material mix proportion per cubic meter of C40 concrete (unit:kg)

| $m$ (水) | $m$ (水泥) | $m$ (细骨料) | $m$ (粗骨料) | $m$ (减水剂) |
|---------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 166.71  | 340.20   | 793.00    | 1 101.00  | 4.76      |

表 2 超高性能混凝土每立方米材料配合比 (单位:kg)

Tab. 2 Material mix proportion per cubic meter of UHPC (unit:kg)

| 试件编号 | $m(\text{水泥})$ | $m(\text{粉煤灰})$ | $m(\text{硅灰})$ | $m(\text{细砂})$ | $m(\text{中砂})$ | $m(\text{粗砂})$ | $m(\text{水})$ | $m(\text{减水剂})$ | $m(\text{钢纤维})$ |
|------|----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|-----------------|-----------------|
| 1    | 754            | 201             | 160            | 469            | 368            | 279            | 200           | 30              | 0               |
| 2    | 754            | 201             | 160            | 469            | 368            | 279            | 200           | 30              | 78.5            |
| 3    | 754            | 201             | 160            | 469            | 368            | 279            | 200           | 30              | 157.0           |

1.2 试件设计

考虑到 NC 与 UHPC 的粘结长度、UHPC 的钢纤维掺量(体积分数)、NC 与 UHPC 的龄期及混凝土强度等级对界面粘结强度的影响,设计并制作了 9 组 NC-UHPC 试件,其中,NC-UHPC 试件由 2 个 150 mm×150 mm×50 mm 的 NC 试件和 1 个 150 mm×150 mm×50 mm 的 UHPC 试件组成,试件尺寸,如图 1 所示。

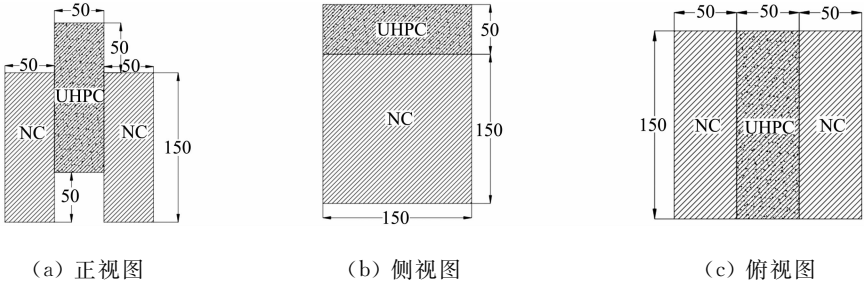


图 1 试件尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Specimen dimensions (unit: mm)

9 组试件对应的工况,如表 3 所示。表 3 中: $t_n$  为 NC 龄期; $t_u$  为 UHPC 龄期。试件 U10-N17-0、U10-N17-1 和 U10-N17-2 在上、下端分别粘结了钢板固定,其加载方式与其他试件有所不同。

表 3 9 组试件对应的工况

Tab. 3 Working conditions corresponding to 9 groups of specimens

| 试件编号     | $\varphi/\%$ | $t_n/d$ | $t_u/d$ | 试件编号      | $\varphi/\%$ | $t_n/d$ | $t_u/d$ | 试件编号      | $\varphi/\%$ | $t_n/d$ | $t_u/d$ |
|----------|--------------|---------|---------|-----------|--------------|---------|---------|-----------|--------------|---------|---------|
| U7-N14-0 | 0            | 14      | 7       | U7-N28-0  | 0            | 28      | 7       | U10-N17-0 | 0            | 17      | 10      |
| U7-N14-1 | 1            | 14      | 7       | U14-N28-0 | 0            | 28      | 14      | U10-N17-1 | 1            | 17      | 10      |
| U7-N14-2 | 2            | 14      | 7       | U28-N28-0 | 0            | 28      | 28      | U10-N17-2 | 2            | 17      | 10      |

1.3 测量方案

采取双面直剪试验测定试件的粘结强度。为了准确得到 NC-UHPC 界面的滑移情况,在界面附近的 NC 上端粘结钢片,布置位移计,获得 NC 滑移情况。在界面 UHPC 侧粘结应变片,以测量界面应变情况,加载装置采用电子万能试验机。采用数字图像相关(DIC)技术设备对试件 U10-N17-0、U10-N17-1 和 U10-N17-2 的界面受力过程进行全程测量。

1.4 试验现象

由于各试件破坏过程相似,以试件 U10-N17-0 为例,对加载破坏过程进行说明,其荷载( $F$ )-位移( $\Delta$ )曲线,如图 2 所示。试件破坏现象,如图 3 所示。

由图 2、3 可知:试验加载初期(点 A),NC-UHPC 界面无明显裂纹,表明此时 NC-UHPC 构件界面还未出现滑移或滑移量很小,其界面应变最大值出现在 NC-UHPC 左侧界面的下侧(图 3(a));随着荷载增加至点 B,NC-UHPC 界面仍然无明显裂纹,应变在 NC-UHPC 两侧界面下侧均达到较大值(图 3(b));随着荷载的进一步加大,在左侧出现微裂缝并迅速增大,但荷载达到峰值点 C 时,右侧界面也出现微小裂缝(图 3(c));随着左侧界面开裂,右侧界面也迅速开裂,最后达到点 D(图 3(d))。

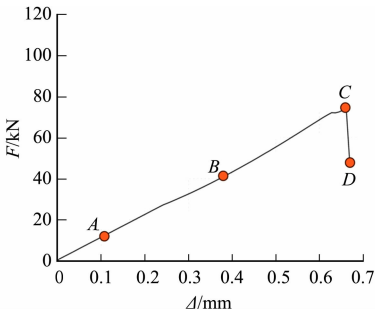
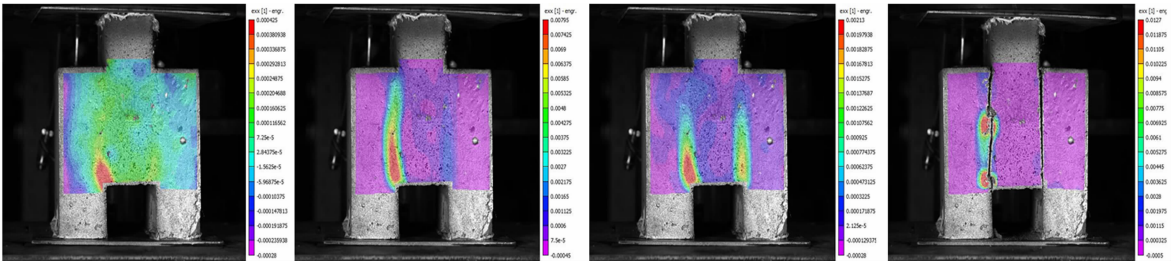


图 2 试件 U10-N17-0 的荷载-位移曲线

Fig. 2 Load-displacement curve of specimen U10-N17-0



(a) 点 A (b) 点 B (c) 点 C (d) 点 D

图 3 试件的破坏现象

Fig. 3 Phenomenon of specimen failure

1.5 荷载-位移曲线

9 组试件的荷载-位移曲线,如图 4 所示。各试件的特征参数,如表 4 所示。表 4 中: $K_G$  为抗剪刚度; $F_n$  为峰值荷载; $\tau_p$  为抗剪强度; $S_n$  为峰值荷载对应的滑移量。

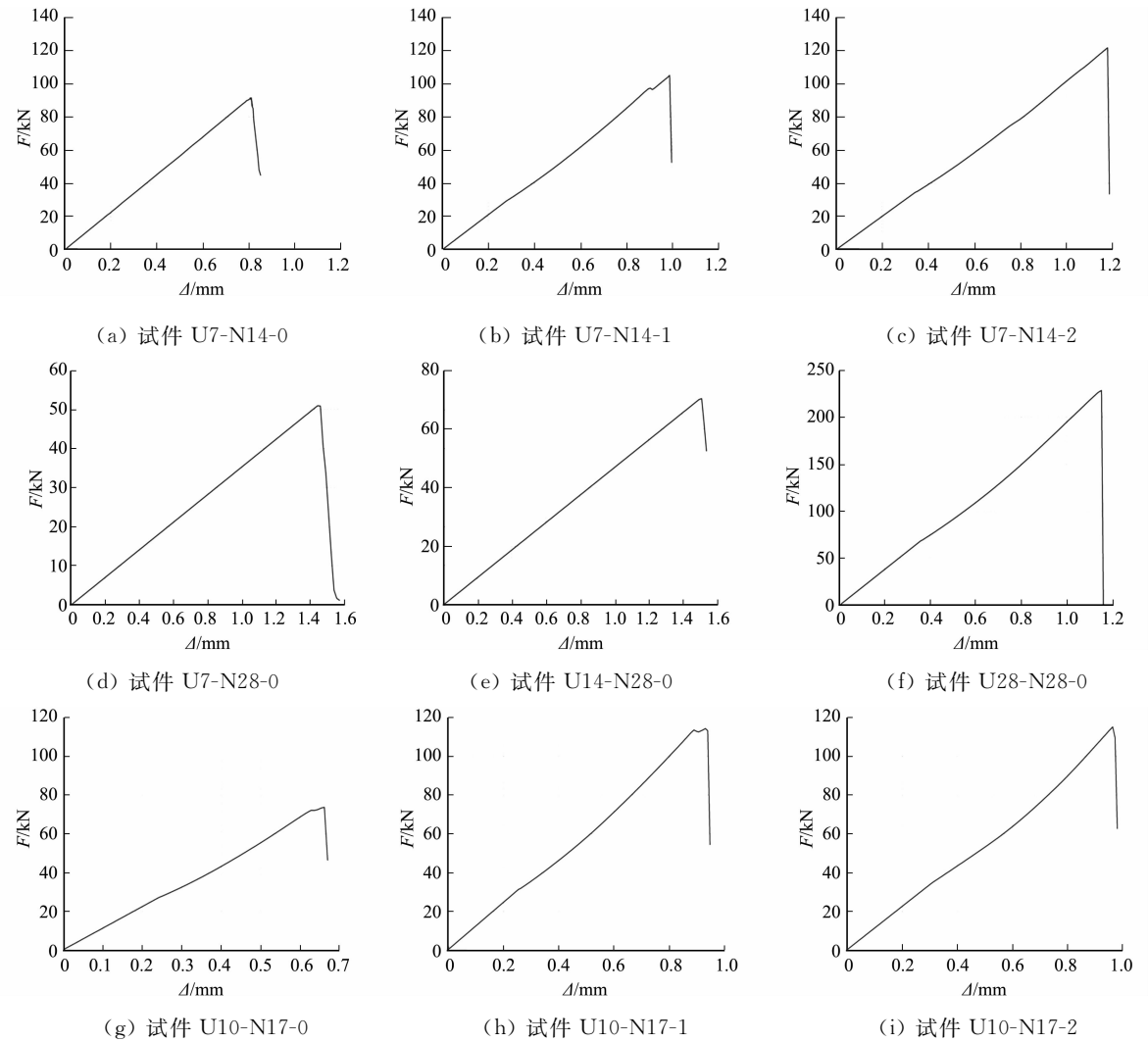


图 4 不同试件的各工况荷载-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curves of different specimens under various working conditions

由图 4 和表 4 可知:当钢纤维掺量从 0% 增至 2% (试件 U7-N14-0、U7-N14-1 和 U7-N14-2) 时,界面峰值荷载与抗剪强度分别提升 32.9% 和 33.3%,峰值滑移量增加 0.37 mm,但界面刚度下降约 9.6%,表明钢纤维的增韧效应在提升界面承载能力的同时会削弱其刚性;在 NC 龄期均为 28 d 条件下,UHPC 龄期由 7 d 延长至 28 d (试件 U7-N28-0、U14-N28-0 和 U28-N28-0),可使界面刚度提升 61.6%,峰值荷载与抗剪强度分别增大 364.2% 和 363.4%,且峰值滑移量增加 1.26 mm (试件 U28-

N28-0 较试件 U7-N28-0),表明 UHPC 水化进程对界面力学性能具有主导作用;双侧约束试件 U10-N17-0 因钢板限制侧向位移,其峰值荷载较无约束试件 U7-N14-0 提高了 6.2%,但钢纤维掺量为 1%的试件 U10-N17-1 出现刚度与抗剪强度异常,刚度较同组试件 U10-N17-0、U10-N17-2 分别提高了 8.8%和 8.6%,抗剪强度分别提高了 37.0%和 6.1%,推测与约束条件下纤维分布均匀性改善有关。

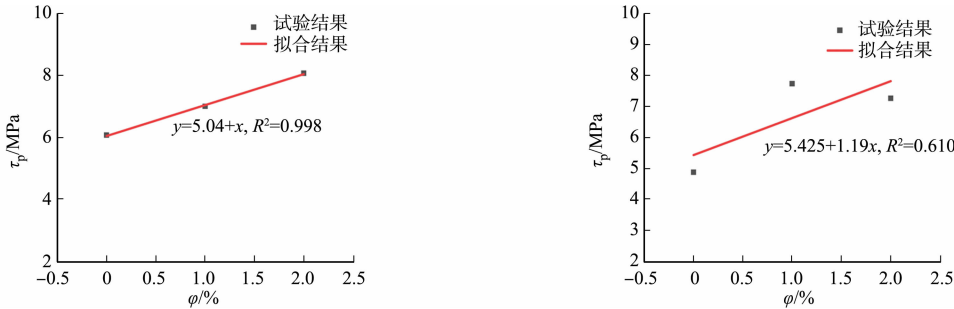
表 4 各试件的特征参数

Tab. 4 Characteristic parameters of each specimen

| 试件编号      | $K_G/\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ | $F_n/\text{kN}$ | $\tau_p/\text{MPa}$ | $S_n/\text{mm}$ | 试件编号      | $K_G/\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ | $F_n/\text{kN}$ | $\tau_p/\text{MPa}$ | $S_n/\text{mm}$ |
|-----------|------------------------------------|-----------------|---------------------|-----------------|-----------|------------------------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| U7-N14-0  | 112.7                              | 91.0            | 6.07                | 0.81            | U28-N28-0 | 124.1                              | 235.8           | 15.71               | 1.90            |
| U7-N14-1  | 106.3                              | 105.0           | 7.00                | 0.98            | U10-N17-0 | 110.8                              | 73.1            | 4.87                | 0.68            |
| U7-N14-2  | 101.9                              | 121.0           | 8.07                | 1.18            | U10-N17-1 | 121.5                              | 111.6           | 7.73                | 0.99            |
| U7-N28-0  | 76.8                               | 50.8            | 3.39                | 0.64            | U10-N17-2 | 111.8                              | 114.1           | 7.26                | 1.16            |
| U14-N28-0 | 96.1                               | 68.3            | 4.55                | 0.67            |           |                                    |                 |                     |                 |

1.6 UHPC-NC 界面抗剪承载力影响因素分析

1.6.1 钢纤维掺量 不同约束条件下的抗剪强度-钢纤维掺量曲线,如图 5 所示。由图 5 可知:无约束条件下,抗剪强度随着钢纤维掺量增加呈线性增长趋势(图 5(a), $R^2=0.998$ );而双侧约束试件中,钢纤维掺量为 1%试件的抗剪强度异常高于钢纤维掺量为 2%的试件(图 5(b))。这一现象与试件浇筑工艺密切相关,采用先浇筑 NC 基体、后浇筑 UHPC 的分层施工方法,可能导致钢纤维在界面区域的分布受限(尤其高钢纤维掺量时纤维易在 NC 表面堆积),致使纤维桥联效应未能充分发挥,从而削弱了界面抗剪强度的提升效率。



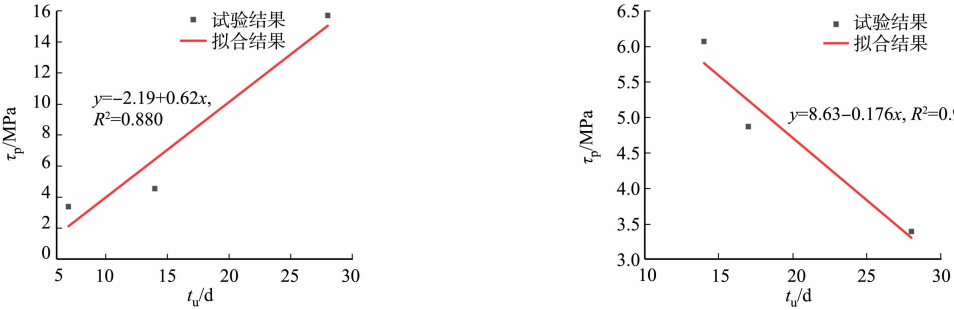
(a) 试件 U7-N14-0、U7-N14-1、U7-N14-2

(b) 试件 U10-N17-0、U10-N17-1、U10-N17-2

图 5 不同约束条件下的试件抗剪强度-钢纤维掺量曲线

Fig. 5 Shear strength-steel fiber content curve of specimens under different constraint conditions

1.6.2 混凝土龄期 进一步分析 UHPC 与 NC 龄期对抗剪强度的影响,结果如图 6 所示。由图 6 可知:UHPC 龄期从 7 d 增至 28 d 时,抗剪强度增长呈现显著线性特征;尽管线性拟合相关系数较低( $R^2=0.880$ ),但龄期 14~28 d 的抗剪强度增幅达 11.16 MPa,是 7~14 d 增幅(1.16 MPa)的 9.62 倍,表明 UHPC 后期水化反应加速了界面过渡区(ITZ)的密实化进程,进而强化了界面力学性能。相比之下,NC 龄期固定为 28 d 时,其抗剪强度发展对界面抗剪性能的贡献趋于稳定。



(a) 试件 U7-N28-0、U14-N28-0、U28-N28-0

(b) 试件 U7-N14-0、U7-N28-0、U10-N17-0

图 6 不同试件的抗剪强度-混凝土龄期曲线

Fig. 6 Shear strength-concrete age curve of different specimens

## 2 NC-UHPC 界面抗剪性能有限元分析

### 2.1 材料及界面本构关系

UHPC 和 NC 采用 ABAQUS 软件中的混凝土损伤塑性 (CDP) 模型, 其压缩拉伸特性采用国家规范 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》中提出的单轴受拉和单轴受压本构, 混凝土本构模型应力( $\sigma$ )-应变( $\epsilon$ )曲线, 如图 7 所示。图 7 中:  $f_{c,r}$  为抗压强度;  $\epsilon_{c,r}$  为与峰值压应力相对应的应变;  $\epsilon_{t,r}$  为与峰值拉应力相对应的应变;  $f_{t,r}$  为抗拉强度。

### 2.2 单元选取

NC-UHPC 构件主体部分为 NC 和 UHPC 试块, 因此, 在建模时所选择的单元类型将直接影响计算的准确性和速度, NC 和 UHPC 单元均选用 8 节点 6 面体线性缩减积分单元 (C3D8R) 进行计算。

NC-UHPC 界面粘结强度在实际工程中起重要作用。为准确模拟单推荷载下 NC 与 UHPC 界面的粘结-滑移特性, 需要在 NC 与 UHPC 之间建立相应的特殊连接单元来实现粘结-滑移效果。选择 Cohesive 单元进行分析, 本构模型为双线性模型, 为剪切牵引力与裂纹滑动位移的关系, 如图 8 所示。图 8 中:  $\tau$  为剪切牵引力;  $\delta$  为裂纹滑动位移;  $\tau_n$ 、 $\delta_n$  分别为峰值切应力及其对应的滑动位移。

### 2.3 模型建立与网格划分

建立几何模型(图 9(a)), 并在试块底部施加固定约束, 在顶部施加位移载荷(图 9(b))。采取结构化网格划分, 为了方便计算, 网格不宜太密, 综合多次试验结果, 网格尺寸选择 10 mm(图 9(c))。试验采用内聚力接触的方法定义接触。定义内聚力接触需要的主要参数包括材料刚度( $K$ )和损伤变量, 均可通过试验数据计算获得。

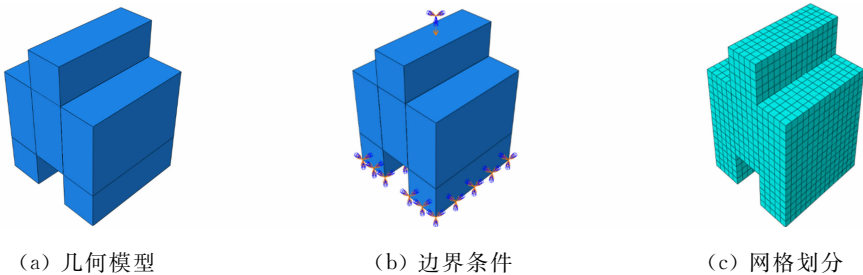
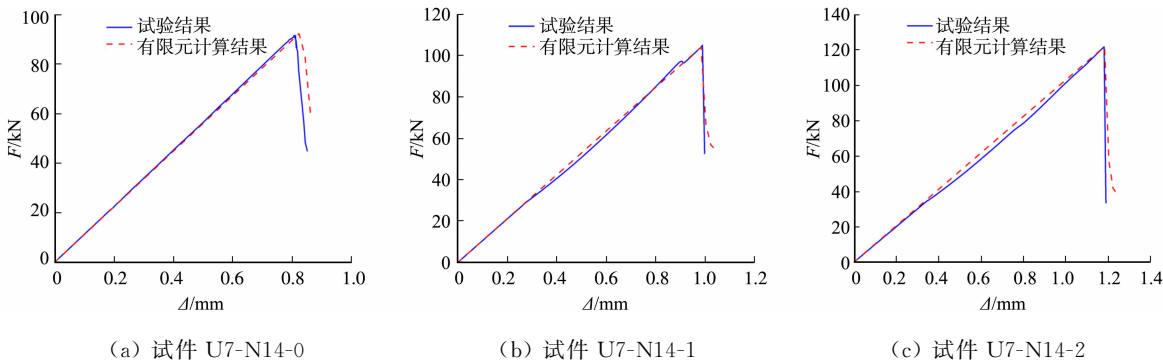


图 9 有限元模型

Fig. 9 Finite element model

### 2.4 有限元计算结果与试验结果的对比分析

从有限元计算结果中提取荷载-位移曲线, 与试件 U7-N14-0、U7-N14-1、U7-N14-2 和试件 U10-N17-0、U10-N17-1、U10-N17-2 的试验结果进行对比, 如图 10 所示。由图 10 可知: 采用内聚力模型建立的 NC-UHPC 粘结界面有限元模型能较好地模拟其界面的受力发展过程, 其计算得到的承载力误差





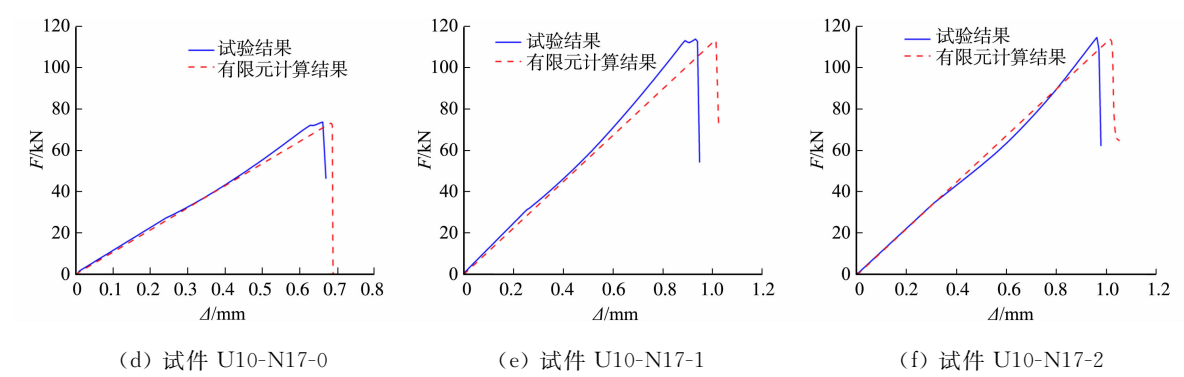


图 10 不同试件的有限元计算结果与试验结果的对比

Fig. 10 Comparison between finite element calculation results and test results of different specimens in 5%以内.

试件 U10-N17-0、U10-N17-1 和 U10-N17-2 峰值荷载对应应变分布的有限元计算结果与试验结果的对比,如图 11 所示。

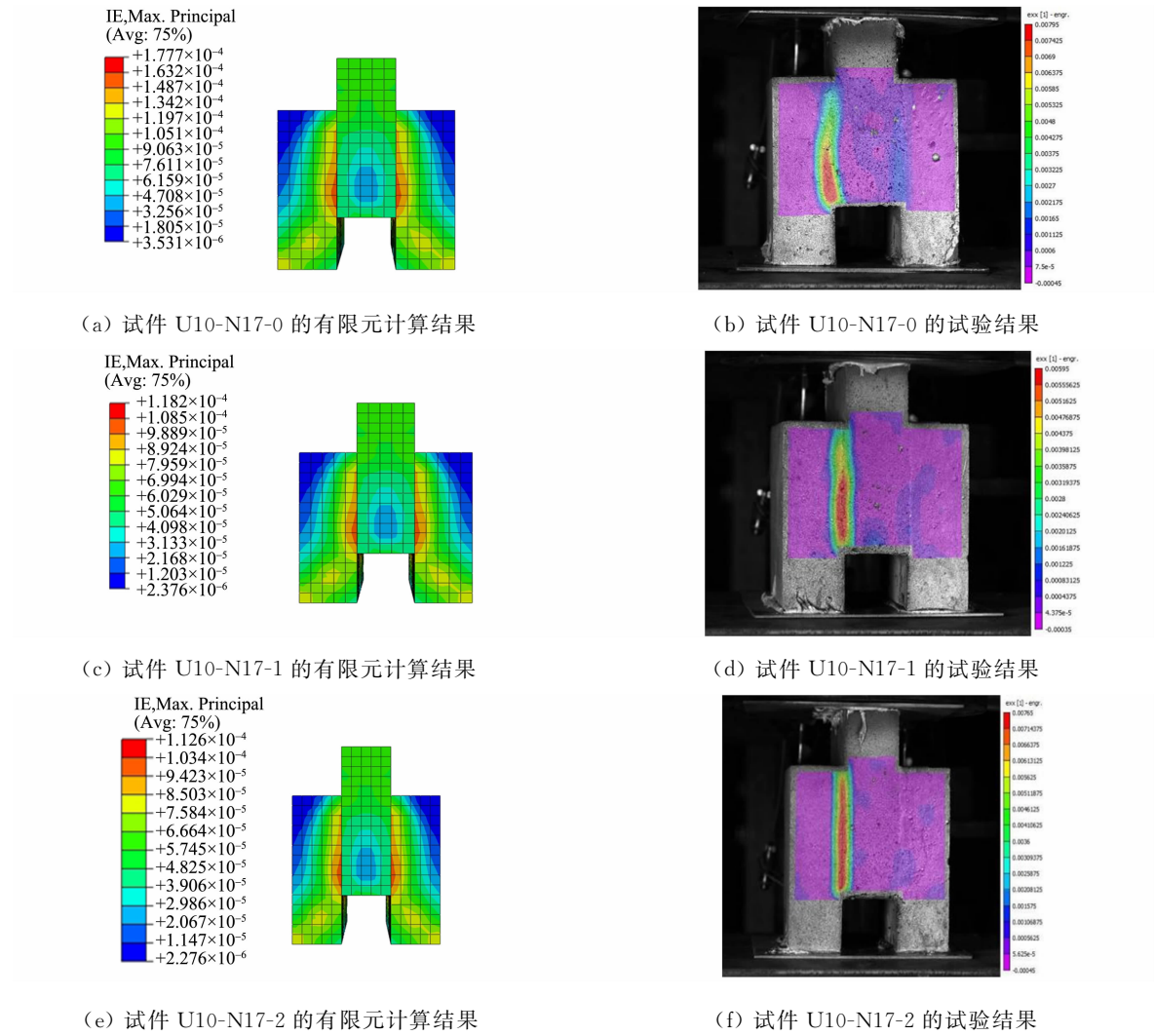


图 11 不同试件的峰值荷载对应应变分布的有限元计算结果与试验结果的对比

Fig. 11 Comparison between finite element calculation results and test results of strain distribution under peak load of different specimens

由图 11 可知:采用文中方法得到的峰值荷载有限元计算结果比试验结果小;有限元计算结果应变分布对称,而试验结果应变偏向一侧。产生这种现象的原因是建立的有限元模型为对称模型,而试验因为界面存在初始差异,造成界面一侧达到最大,而另一侧处于相对较小的应变状态。这也说明采用内聚



力模型建立的有限元模型能较好地反映界面整体的受力过程,但无法精确考虑因实际缺陷产生的偏差。

### 3 NC-UHPC 界面抗剪受力分析

#### 3.1 NC-UHPC 界面抗剪粘结应力分布

为了分析普通混凝土与超高性能混凝土之间的相对滑移,参考殷小澍<sup>[16]</sup>的理论分析结果,对新、旧混凝土界面粘结应力进行推导。根据文献[17]研究表明,UHPC-NC 界面粘结应力  $\tau$  在试验荷载上升阶段沿截面位置  $d$  呈现负指数分布,其表达形式为

$$\tau(d)=Ae^{-Bd}。 \tag{1}$$

粘结界面任意截面位置  $d$  处的相对滑移  $S(d)$  的计算式为

$$S(d)=S(0)+(k_c-k_s)\frac{1}{B^2}+\left[\frac{1}{B^2L}(k_c-k_s)\times\right. \\ \left.(BL e^{-BL}+2e^{-BL}-2)-\frac{P}{E_cA_c}\right]d-(k_c-k_s)\frac{1}{B^2}e^{-Bd}。 \tag{2}$$

由最小势能原理和平衡方程可以得

$$S(L)=S(0)-\frac{PL}{E_cA_c}+\frac{1}{B^2}(k_c-k_s)\cdot(BLe^{-BL}+e^{-BL}-1), \tag{3}$$

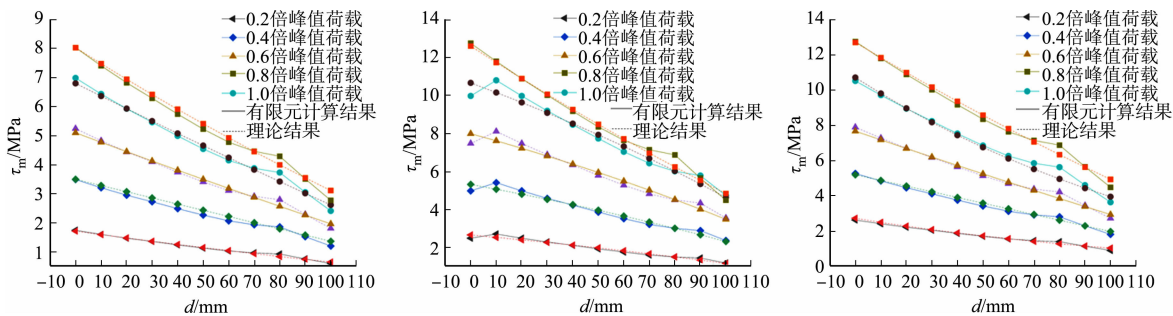
$$P=\frac{C_sA}{B}(1-e^{-BL})。 \tag{4}$$

式(1)~(4)中: $A$ 、 $B$  为待定系数; $P$  为外力荷载; $L$  为粘结长度; $E_c$  为 NC 的弹性模量; $A_c$  为 NC 的横截面积; $C_s$  为粘结面宽度的 2 倍;系数  $k_s=\frac{AC_s}{E_sA_s}$ ,  $k_c=-\frac{AC_s}{E_cA_c}$ , 其中,  $E_s$  为 UHPC 的弹性模量,  $A_s$  为 UHPC 的横截面积。

$S(L)$ 、 $S(0)$  可通过加载端位移计测得,外力荷载  $P$  可通过试验测得,则通过式(3)、(4)可计算得  $A$  和  $B$ ,代入式(1)可得粘结应力分布曲线。

#### 3.2 NC-UHPC 界面粘结应力计算结果与试验结果对比

计算得到试件 U10-N17-0、U10-N17-1 和 U10-N17-2 在 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 倍峰值荷载时的界面粘结应力分布,如图 12 所示。图 12 中: $\tau_m$  为界面粘结应力。由图 12 可知:理论结果与有限元计算结果基本吻合,界面粘结应力沿粘结长度呈现负指数分布;随着外荷载的增大,加载端部的应力增加幅值明显。



(a) 试件 U10-N17-0

(b) 试件 U10-N17-1

(c) 试件 U10-N17-2

图 12 试件 U10-N17-0、U10-N17-1 和 U10-N17-2 在不同峰值荷载时的界面粘结应力分布

Fig. 12 Interface bonding stress distribution of specimens U10-N17-0, U10-N17-1 and U10-N17-2 under different peak loads

将不同试件 DIC 测量得到的 0.6 倍、0.8 倍和 1.0 倍峰值荷载时对应的界面粘结应力分布试验结果与理论结果、有限元计算结果进行对比,如图 13 所示。

由图 13 可知: DIC 测量得到的界面粘结应力分布试验结果与理论结果、有限元计算结果变化趋势相同,但在数值上存在一些差异。产生这种现象的原因主要是试件界面不均匀,试件界面粗糙及微裂缝发展使 DIC 测量存在一定的误差。

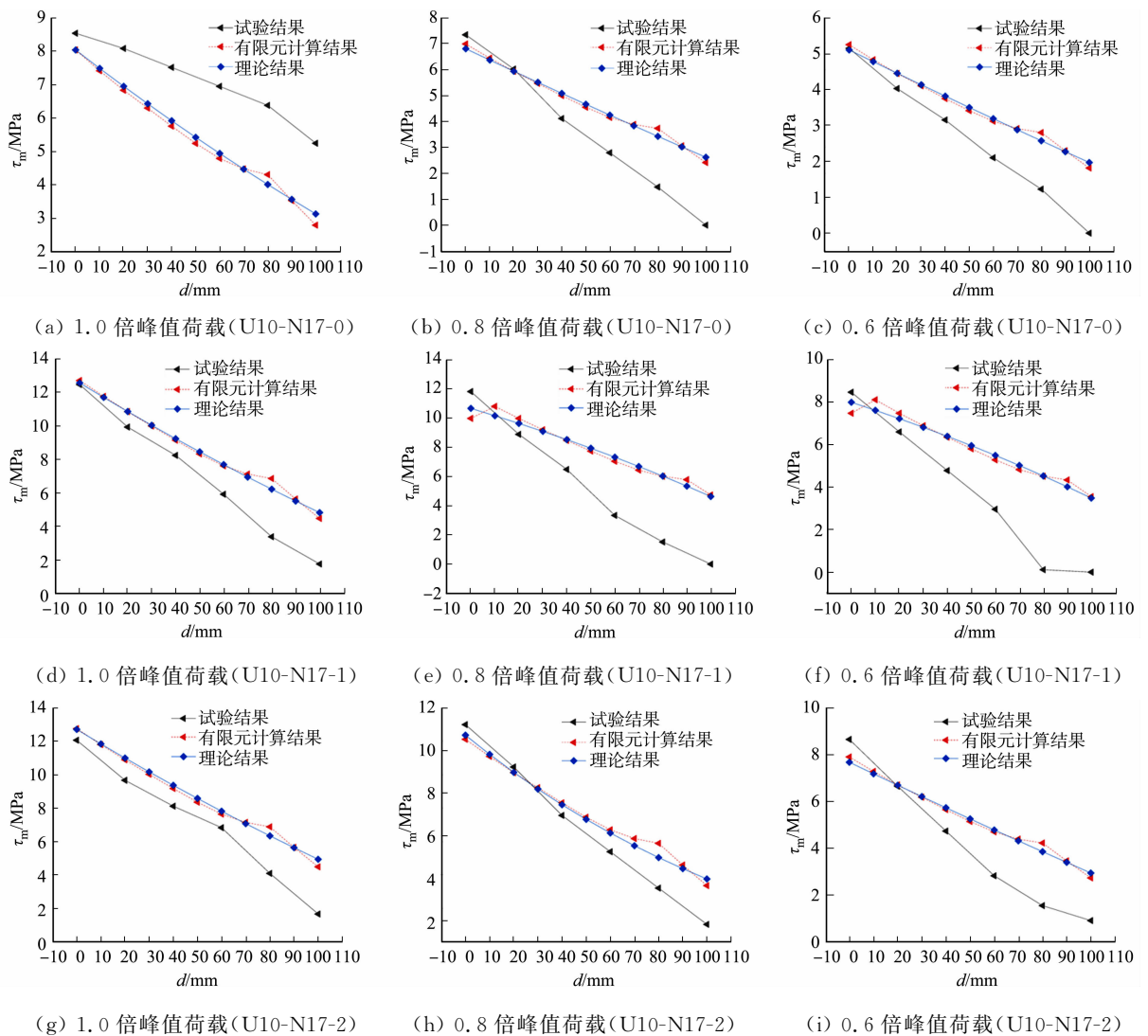


图 13 界面粘结应力分布的试验结果、理论结果和有限元计算结果的对比  
Fig. 13 Comparison of test results, theoretical results and finite element calculation results for interface bonding stress distribution

4 结论

针对新、旧混凝土的抗剪性能进行试验和有限元数值模拟,设计 9 组超高性能混凝土和普通混凝土组合构件的界面剪切试验,分析 UHPC 中钢纤维掺量和混凝土养护龄期对界面抗剪强度的影响。

1) 通过 9 组 NC-UHPC 试件界面剪切试验,研究了超高性能混凝土的钢纤维掺量、混凝土龄期及边界约束条件对界面抗剪性能的影响。结果表明:在无边界约束工况下,当 UHPC 钢纤维掺量为 0%~1%时,试件易发生单面破坏;当 NC 试块下端固定时,试件更易出现双剪破坏;UHPC 钢纤维掺量与界面抗剪强度呈正相关,而界面刚度受钢纤维掺量影响较小;界面刚度随着 UHPC 龄期的增加而增加,但随着 NC 龄期的增加而减小。

2) 在 ABAQUS 有限元软件中采用内聚力模型,建立基于界面性能的 NC-UHPC 试块精细有限元模型,将有限元计算模型和试验得到的荷载-位移曲线进行对比,结果表明,试验结果与有限元计算结果相似,峰值荷载相近,误差较小。将峰值荷载对应的应变云图与 DIC 测量得到的试验结果进行对比发现,因双剪试验两界面存在一定差异,其应变发展并不对称。采用内聚力模型计算得到的界面荷载-位移曲线从宏观上反映了界面的发展,但是无法精确模拟界面因构造差异产生的受力不均匀现象。

3) 以 NC-UHPC 试件的单压试验为基础,基于能量分析的方法,运用 ABAQUS 有限元软件中的

内聚力模型的计算方法,得到弹性范围适用的 NC-UHPC 界面荷载-位移曲线沿粘结界面竖向长度的分布及函数表达式。与内聚力模型计算结果和试验结果进行对比,证明了理论公式的适用性。

#### 参考文献:

- [1] 郭进军. 高温后新老混凝土粘结的力学性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2003.
- [2] 叶果. 新老混凝土界面抗剪性能研究[D]. 重庆:重庆大学,2011.
- [3] 张雷顺,王二花,闫国新. 植筋法新老混凝土粘结面剪切性能试验研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2006,27(3):34-37. DOI:10.3969/j.issn.1671-6833.2006.03.008.
- [4] 邢强. 新旧混凝土界面的连接方法及受力性能研究[D]. 西安:西安科技大学,2012.
- [5] TAYEH B A,BAKAR B H A,JOHARI M A M,*et al.* Mechanical and permeability properties of the interface between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete overlay[J]. Construction and Building Materials,2012,36(6):538-548. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2012.06.013.
- [6] SEMENDARY A A,HAMID W,KHOURY I,*et al.* Experimental investigation of direct tension bond performance of high-strength concrete and ultrahigh-performance concrete connections[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2019,31(9):04019171. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002800.
- [7] AL-MADANI M K,AL-OSTA M A,AHMAD S,*et al.* Interfacial bond behavior between ultra high performance concrete and normal concrete substrates[J]. Construction and Building Materials,2022,320(7):126229. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.126229.
- [8] BASTIEN-MASSE M,DENARIÉE,BRÜHWILER E. Effect of fiber orientation on the in-plane tensile response of UHPFRC reinforcement layers[J]. Cement and Concrete Composites,2016,67(2):111-125. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2016.01.001.
- [9] HUSSEIN L,AMLEH L. Structural behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete-normal strength concrete or high strength concrete composite members[J]. Construction and Building Materials,2015,93(3):1105-1116. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.05.030.
- [10] 党祺. UHPC 加固损伤板受弯性能的研究[D]. 长沙:湖南大学,2016.
- [11] 王兴旺. UHPC 与普通钢筋混凝土结构界面抗剪性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2016.
- [12] 田稳苓,宋昭,肖成志,等. 带植筋新老混凝土粘结面剪切试验及有限元模拟分析[J]. 建筑结构,2019,49(23):127-133. DOI:10.19701/j.jzjg.2019.23.024.
- [13] HARRIS D K,CARBONELL MUÑOZ M A,GHEITASI A,*et al.* The challenges related to interface bond characterization of ultra-high-performance concrete with implications for bridge rehabilitation practices[J]. Advances in Civil Engineering Materials,2015,4(2):75-101. DOI:10.1520/ACEM20140034.
- [14] DIAS-DA-COSTA D,ALFAIATE J,JULIO E. FE modeling of the interfacial behaviour of composite concrete members[J]. Construction and Building Materials,2012,26(1):233-243. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2011.06.015.
- [15] FARZAD M,SHAFIEIFAR M,AZIZINAMINI A. Experimental and numerical study on bond strength between conventional concrete and ultra high-performance concrete (UHPC)[J]. Engineering Structures,2019,186:297-305. DOI:10.1016/j.engstruct.2019.02.030.
- [16] 殷小微. 型钢混凝土粘结-滑移推出试验的理论分析[J]. 结构工程师,2010,26(3):48-53. DOI:10.3969/j.issn.1005-0159.2010.03.008.
- [17] 胡海昌. 弹性力学的变分原理及其应用[M]. 北京:科学出版社,1981.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202412038



# 温度作用下超精电子厂房 大跨度楼板力学性能

莫家樑<sup>1</sup>, 陈连健<sup>2</sup>, 方四宝<sup>2</sup>, 李海锋<sup>1</sup>

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 上海宝冶集团有限公司, 上海 201900)

**摘要:** 基于福建省厦门市天马光电子有限公司超精电子厂房项目, 采用 ABAQUS 有限元软件, 对梁板结构进行三维模型仿真模拟, 将模拟数据与施工现场的监测数据进行对比分析。研究板厚、板配筋率、混凝土强度等级等参数在温度作用下对超长结构大跨度楼板的影响, 并提出在实际工程中的参数取值建议。研究结果表明: 温度作用对楼板应力的影响呈正相关。在温度作用下, 板配筋率对楼板应力和变形均有明显的影响, 而混凝土强度等级只对楼板变形有明显影响, 板厚对楼板应力产生一定影响; 温度差对于楼板中心变形有着一定的影响。

**关键词:** 超精电子厂房; 超长结构; 温度作用; 大跨度楼板; 有限元分析

**中图分类号:** TU 391

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5013(2025)04-0410-09

## Mechanical Properties of Large-Span Slab of Ultra-Precision Electronic Factory Under Temperature Action

MO Jiali<sup>1</sup>, CHEN Lianjian<sup>2</sup>, FANG Sibao<sup>2</sup>, LI Haifeng<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Shanghai Baoye Group Limited Company, Shanghai 201900, China)

**Abstract:** Based on the ultra-precision electronic factory of Tianma Optoelectronics Limited Company of Xiamen City, Fujian Province, ABAQUS finite element software was used to simulate 3-dimensional (3D) model of the beam-slab structure, the simulation data and the monitoring data from the construction site were compared. The influence of temperature action on the ultra-long structure with large-span slab was studied from the slab thickness, reinforcement ratios, and concrete strength grades, and parameter value suggestions were proposed for actual engineering. The study shows that the influence of temperature action on the slab stress is positively correlated. Under temperature action, the reinforcement ratios of the slab have a significant impact on the stress and deformation of the floor slab, while the strength grades of concrete only have a significant impact on the deformation of the floor slab, and the the slab thickness has a certain impact on the stress of the floor slab. The temperature difference has a certain impact on the deformation of the central floor.

**Keywords:** ultra-precision electronics factory; ultra-long structure; temperature action; large-span slab; finite element analysis

近些年, 随着国内科技的发展, 电子工业快速崛起, 超精电子厂房的建设也逐渐增加。然而, 超精电

**收稿日期:** 2024-12-08

**通信作者:** 李海锋(1983-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事钢结构的研究。E-mail: lihailfeng@hqu.edu.cn。

**基金项目:** 福建省科技计划项目对外合作项目(2024I0015)

子厂房通常设计成超长结构,即单一结构的单元平面尺寸超长,远远超出规范允许的结构单元尺寸。目前,国内外学者对温度作用下超长结构的力学性能已开展了一些研究。张寒硕等<sup>[1]</sup>为了确定结构不同阶段的温度荷载,提出了关于超长混凝土框架结构温度场的计算方法。文献[2-7]分析了超长结构的设计、温度应力及施工措施等,提出了一系列简便易行、经济实用的新技术措施。范重等<sup>[8]</sup>针对超长结构的特点,得到了温度内力沿结构竖向的变化规律。何本贵等<sup>[9]</sup>探究温度作用影响超长混凝土结构边柱弯矩敏感性大小的先后次序。郑永路等<sup>[10]</sup>分析了超长钢筋混凝土框架结构在温度作用下的内力及变形特点。文献[11-12]提出了一种基于退化三维实体虚拟层合单元的数值方法,得出后浇条的数量和保温时间能有效地改变结构的温度应力的结论。Li 等<sup>[13]</sup>通过实验模拟和有限元分析,研究超长结构的江苏省南京市奥体中心主平台的温度应力和变形。Yang 等<sup>[14]</sup>对椭圆平面钢筋混凝土框架的结构温度效应进行了分析,得到了曲率对环形超长结构的温度应力有明显影响的结论。

关于温度作用下超长结构楼板的力学性能研究较少,本文以福建省厦门市天马光电子有限公司超精电子厂房项目为例,研究温度作用下超精电子厂房大跨度楼板力学性能。

# 1 工程概况

天马光电子有限公司超精电子厂房位于厦门市翔安区田溪路以东、溪东路以西、舫阳东路以南、内垵大道以北的范围内。项目总占地面积为 65 万 m<sup>2</sup>,总建筑面积为 101 万 m<sup>2</sup>。其中,厂房占地面积 10.1 万 m<sup>2</sup>,分为核心区、支持区两部分,结构形式为框架混凝土结构,屋盖为钢筋混凝土,3 层(3F)为有梁板结构,2F、4F 为华夫板结构。超长结构电子厂房图,如图 1 所示。

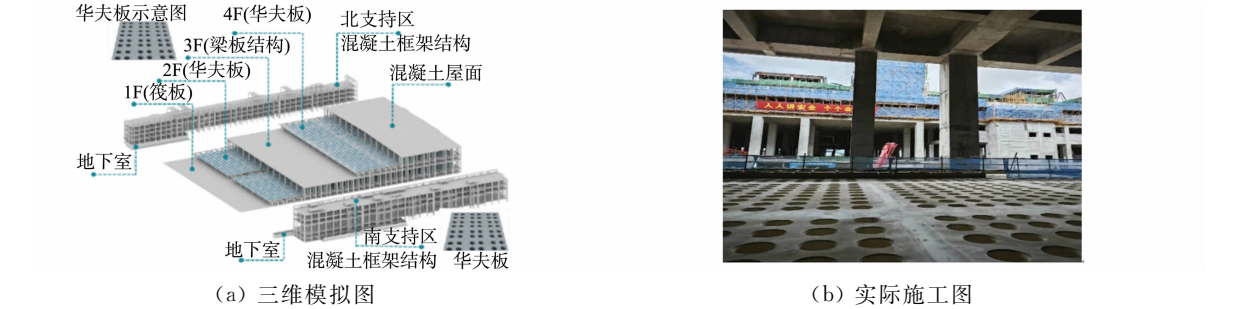


图 1 超长结构电子厂房图

Fig. 1 Diagrams of ultra-long structure electronic factory

# 2 有限元模型校验

## 2.1 模型参数设计

为了使三维有限元模型更加符合实际工程情况,在梁、板构件的基础上,增加了上下层柱子。测点模型参数,如表 1 所示。表 1 中: $a_{柱}$  为柱长度; $b_{柱}$  为柱宽度; $a_{梁}$  为梁长度; $b_{梁}$  为梁宽度; $t$  为板厚。

表 1 测点模型参数

Tab. 1 Parameters of measuring point model

| 编号   | $a_{柱} \times b_{柱} / \text{mm} \times \text{mm}$ | $a_{梁} \times b_{梁} / \text{mm} \times \text{mm}$ | $t / \text{mm}$ |
|------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------|
| 测点 1 | 600×600<br>1 000×1 000                            | 600×1 650<br>1 000×2 000                          | 150             |
| 测点 2 | 600×600<br>1 000×1 000                            | 600×1 650<br>1 000×2 000<br>1 400×2 200           | 150             |
| 测点 3 | 600×600<br>1 000×1 000                            | 600×1 650<br>1 000×2 000<br>1 400×2 200           | 150             |
| 测点 4 | 600×600<br>1 000×1 000                            | 600×1 650<br>1 000×2 000<br>1 400×2 200           | 150             |



2.2 模型材料本构

三维有限元模型涉及的材料均符合连续性、均匀性、各向同性。考虑到实际工程情况,混凝土材料弹性模量为 34.401 GPa、泊松比为 0.2、密度为  $2\,350\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、线膨胀系数为  $1.0\times 10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。钢筋材料为 205 GPa,泊松比为 0.3,密度为  $7\,850\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ <sup>[15-16]</sup>。为方便计算,混凝土采用线弹性模型,钢筋采用双折线模型。

2.3 建模方法

在确保数值模拟分析精度的情况下,为兼顾计算成本,三维有限元模型中混凝土构件均采用 8 节点减积分三维实体单元(C3D8R)进行网格划分模拟分析<sup>[17]</sup>。钢筋构件均采用 2 节点三维桁架单元(T3D2)进行网格划分,模拟分析网格划分情况及边界条件,如图 2 所示。

在三维有限元模型中,混凝土和钢筋的接触约束采用内置区域方法,把钢筋骨架嵌入混凝土中。为了模拟实际工程中柱与楼层的刚性连接,柱子边界条件采用完全固定约束<sup>[18-19]</sup>。

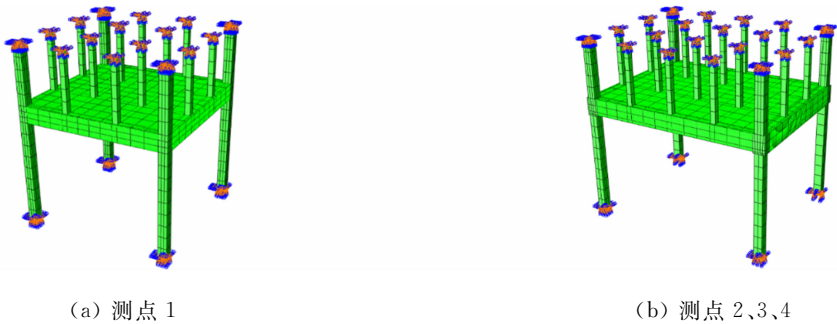


图 2 网格划分情况及边界条件  
Fig. 2 Grid division and boundary conditions

相较于普通跨度楼板,超长结构楼板需要考虑温度效应对楼板的影响。对整个三维有限元模型施加了结构的自质量,还对整个梁板结构施加了实际施工温差(由实际工程记录每日规定时间的厦门市日照温度确定)。实际施工温差  $\Delta T_k$ <sup>[20]</sup> 的计算式为

$$\Delta T_k = T_{s,\max} - T_{0,\min}。$$

(1)

式(1)中: $T_{s,\max}$  为结构最高平均温度; $T_{0,\min}$  为结构最低初始平均温度。

2.4 模型准确性验证

根据施工图纸测点的位置,在楼板的钢筋构件内相应位置建立勘测点,方便观测钢筋应力、变形的变化状况。实际工程与三维有限元模型测点位置的对比,如图 3 所示。图 3 中:圆点位置为实际工程测点所在位置;虚线交点处位置为三维有限元模型测点的位置;M、N、L、K 为轴。

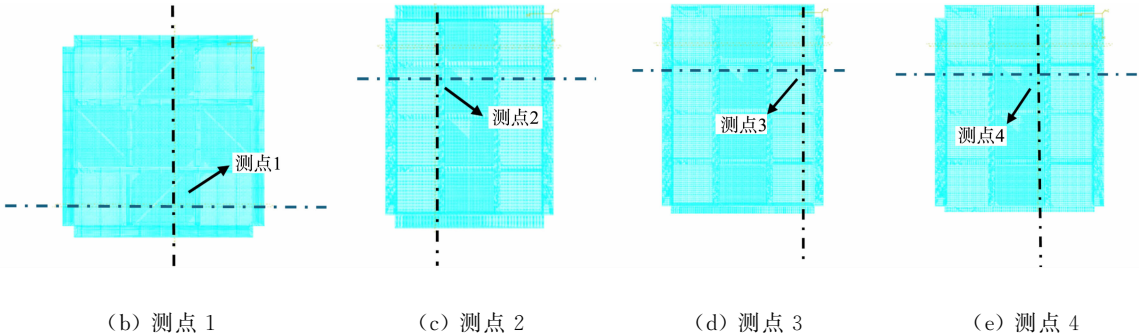
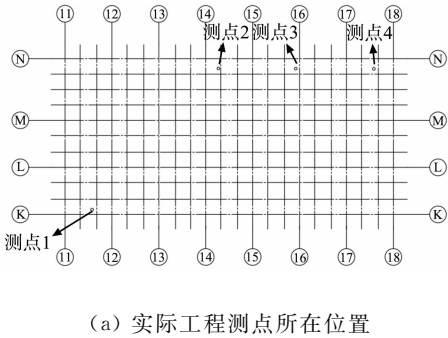


图 3 实际工程与三维有限元模型测点位置的对比

Fig. 3 Comparison of measuring point positions between actual engineering and 3D finite element model  
实际工程测量应力与有限元几何模型中测点应力对比表,如表 2~5 所示。表 2~5 中: $\sigma_1$  为测量应



力; $\sigma_2$  为有限元应力; $\xi$  为相对误差。

表 2 测点 1 的应力对比  
Tab. 2 Measuring point 1 stress

| 序号 | $\Delta T_k/^\circ\text{C}$ | $\sigma_1/\text{MPa}$ | $\sigma_2/\text{MPa}$ | $\xi$ |
|----|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| 1  | 0.5                         | 1.845                 | 2.377                 | 0.224 |
| 2  | 0.8                         | 2.870                 | 3.032                 | 0.053 |
| 3  | 2.5                         | 8.815                 | 6.742                 | 0.235 |
| 4  | 7.8                         | 18.040                | 18.308                | 0.015 |
| 5  | 9.5                         | 25.420                | 22.018                | 0.134 |
| 6  | 10.0                        | 26.445                | 23.109                | 0.126 |

表 3 测点 2 的应力对比  
Tab. 3 Measuring point 2 stress

| 序号 | $\Delta T_k/^\circ\text{C}$ | $\sigma_1/\text{MPa}$ | $\sigma_2/\text{MPa}$ | $\xi$ |
|----|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| 1  | 0.8                         | 3.690                 | 2.547                 | 0.310 |
| 2  | 2.2                         | 6.560                 | 6.131                 | 0.065 |
| 3  | 3.3                         | 5.740                 | 8.948                 | 0.309 |
| 4  | 4.2                         | 14.350                | 11.252                | 0.216 |
| 5  | 5.0                         | 12.710                | 13.301                | 0.046 |
| 6  | 6.0                         | 16.810                | 15.861                | 0.056 |
| 7  | 7.0                         | 17.835                | 18.422                | 0.033 |

表 4 测点 3 的应力对比  
Tab. 4 Measuring point 3 stress

| 序号 | $\Delta T_k/^\circ\text{C}$ | $\sigma_1/\text{MPa}$ | $\sigma_2/\text{MPa}$ | $\xi$ |
|----|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| 1  | 5.7                         | 12.710                | 15.190                | 0.163 |
| 2  | 7.7                         | 20.295                | 20.457                | 0.007 |
| 3  | 9.7                         | 21.935                | 25.725                | 0.147 |
| 4  | 10.7                        | 37.925                | 28.358                | 0.252 |
| 5  | 11.4                        | 31.160                | 30.202                | 0.031 |
| 6  | 13.0                        | 27.470                | 34.410                | 0.202 |

表 5 测点 4 的应力对比  
Tab. 5 Measuring point 4 stress

| 序号 | $\Delta T_k/^\circ\text{C}$ | $\sigma_1/\text{MPa}$ | $\sigma_2/\text{MPa}$ | $\xi$ |
|----|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| 1  | 2.5                         | 12.915                | 7.147                 | 0.447 |
| 2  | 3.5                         | 10.865                | 9.627                 | 0.114 |
| 3  | 4.5                         | 11.070                | 12.108                | 0.086 |
| 4  | 5.7                         | 12.710                | 15.084                | 0.157 |
| 5  | 6.2                         | 11.275                | 16.325                | 0.309 |
| 6  | 8.5                         | 15.170                | 22.030                | 0.311 |
| 7  | 9.0                         | 26.035                | 23.271                | 0.106 |
| 8  | 9.2                         | 19.270                | 23.767                | 0.189 |
| 9  | 9.8                         | 25.010                | 25.255                | 0.010 |

在误差范围之内,三维有限元模型大部分测点结果均能对比成功,表明三维有限元模型模拟精度较高,验证了三维有限元模型的准确性。

### 3 有限元仿真模拟

#### 3.1 力学性能分析

实际工程与三维有限元模型测点应力( $\sigma$ )对比,如图 4 所示。由图 4 可知:根据正态分布概念,测点 1 在最小温差 0.5℃下的测点应力为 2.377 MPa,在最大温差 10.0℃下的测点应力为 23.109 MPa;测

点 2 在最小温差 0.8℃下的测点应力为 2.547 MPa,在最大温差 6.0℃下的测点应力为 18.422 MPa;测点 3 在最小温差 5.7℃下的测点应力为 15.190 MPa,在最大温差 13.0℃下的测点应力为 34.410 MPa;测点 4 在最小温差 2.5℃下的测点应力为 7.147 MPa,在最大温差 9.8℃下的测点应力为 25.255 MPa。

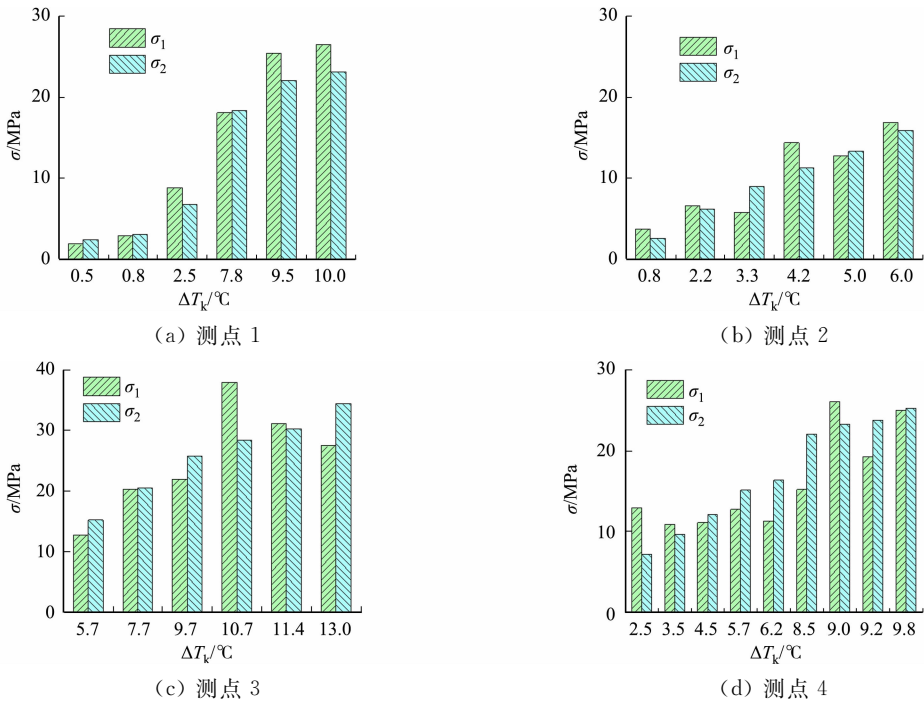


图 4 实际工程与三维有限元模型测点应力对比

Fig. 4 Comparison of stress at measuring point of actual engineering and 3D finite element model

温度作用对楼板应力的影响近似呈正相关,温差越大,楼板应力越大。同时,温度作用产生的附加应力,使考虑温度效应的超长结构楼板应力大于正常跨度的楼板应力。

三维有限元模型整体应力和变形图,如图 5 所示。楼板中心有限元应力和变形图,如图 6 所示。

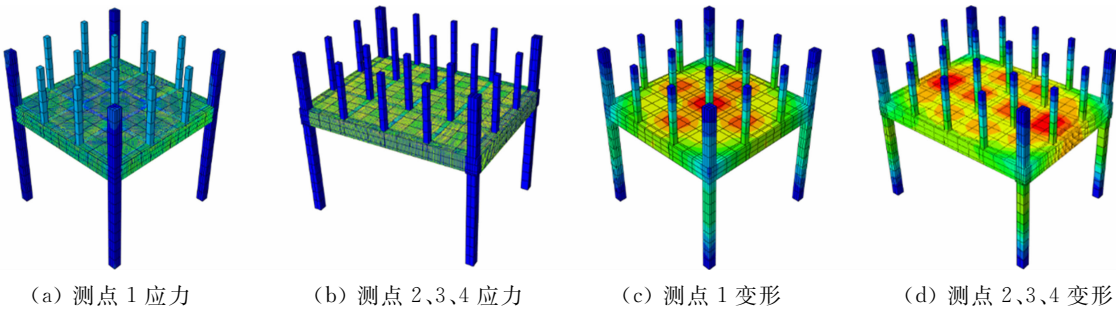


图 5 三维有限元模型整体应力和变形图

Fig. 5 Overall stress and deformation of 3D finite element model

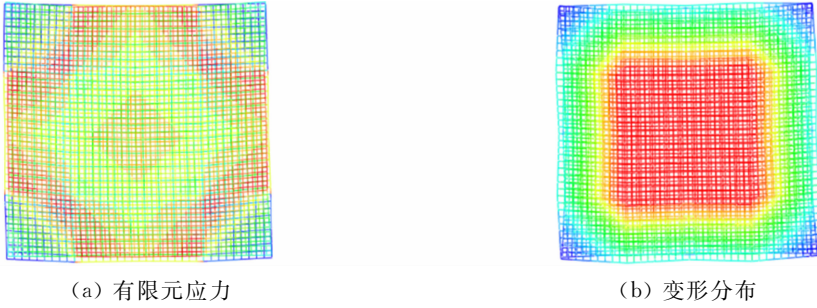


图 6 楼板中心有限元应力和变形图

Fig. 6 Finite element stress and deformation in central floor

由图 5 可知:在同一温度作用下,近梁端钢筋混凝土承受的应力较大,最大应力存在于远离最大尺寸柱的梁板节点处;梁板的变形大小与离最大尺寸柱的距离相关,当梁板形状为规则四边形时,随着距离的增加,变形也逐渐增加,最大变形位于整体楼板中心处;当梁板形状为矩形时,最大变形通常位于短边中心处。由图 6 可知:在同一温度作用下,楼板中心承受最大应力和产生最大变形。

### 3.2 温度作用下参数扩展分析

3.2.1 参数设计 以测点 1 三维有限元模型为例,建立了 7 个有限元扩展模型(M1~M7)。有限元扩展模型参数,如表 6 所示。表 6 中: $\eta$  为板配筋率。

表 6 有限元扩展模型参数  
Tab. 6 Parameters of finite element extended models

| 模型 | $t/\text{mm}$ | $\eta/\%$ | $a_{\text{梁}} \times b_{\text{梁}}/\text{mm} \times \text{mm}$ | 混凝土强度等级 |
|----|---------------|-----------|---------------------------------------------------------------|---------|
| M1 | 150           | 1.0       | 1 000×2 000                                                   | C50     |
| M2 | 120           | 1.0       | 1 000×2 000                                                   | C50     |
| M3 | 180           | 1.0       | 1 000×2 000                                                   | C50     |
| M4 | 150           | 0.8       | 1 000×2 000                                                   | C50     |
| M5 | 150           | 1.2       | 1 000×2 000                                                   | C50     |
| M6 | 150           | 1.0       | 1 000×2 000                                                   | C40     |
| M7 | 150           | 1.0       | 1 000×2 000                                                   | C60     |

3.2.2 板厚影响 合理的板厚可以确保建筑在承受荷载时不会发生破坏,增加板厚可以提高板截面刚度,从而增强承载能力。然而,过厚的楼板也会增加自质量和造价,同时,在温度作用下,板越厚,上下表面温差越大,表面拉应力越大<sup>[21]</sup>。

楼板中心不同板厚的模型应力对比,如图 7 所示。由图 7 可知:1) 随温度差的增加,不同板厚模型的应力都呈现增大的趋势;2) 温度差较低时,M3 的应力远大于其他模型的应力;3) 随温度差的增大,M1 的应力增涨趋势明显,远大于 M2 的应力。

当板厚为 120~150 mm 时,板的自质量影响小于板厚增加承载力作用的影响,当板厚为 150~180 mm 时,板的自质量影响远超过板厚增加承载力作用的影响。板厚在温度差较低时,板厚增加承载力作用的影响较为显著,在温度差较大时,板厚增加承载力作用的影响出现明显下降。不同板厚的模型变形( $\delta$ )对比,如图 8 所示。

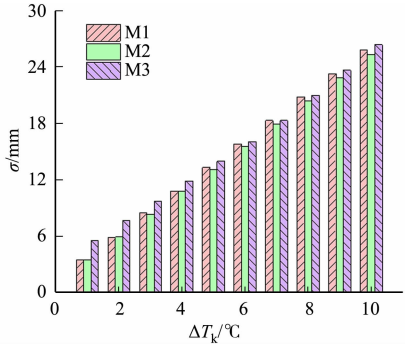
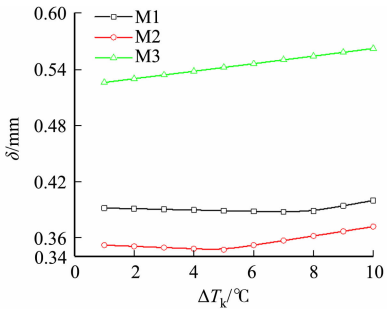
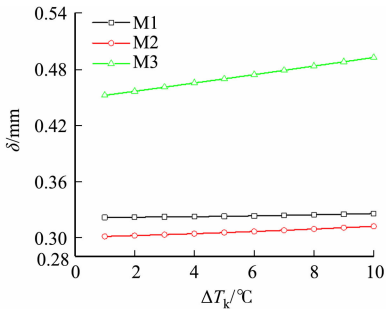


图 7 楼板中心不同板厚模型的应力对比  
Fig. 7 Comparison of stress in central floor of different plate thickness models



(a) 楼板近梁端 (b) 楼板中心

图 8 不同板厚的模型变形对比

Fig. 8 Comparison of deformation in central floor of different plate thickness models

由图 8 可知:1) 随着温度差的增加,M3 的变形均呈现增大的趋势;2) M1、M2 楼板中心的变形缓慢降低,随着温度的增大,变形开始增加。3) 同一温度差下,相同板厚的楼板中心的变形远大于楼板近梁端的变形,变形增加了 10%~20%。

3.2.3 板配筋率影响 板配筋率是影响钢筋混凝土楼板承载能力的重要因素,板配筋率计算式为

$$\eta=\frac{A_s}{A}\times 100\%。$$

(2)

式(2)中: $A_s$  为钢筋面积; $A$  为板截面面积。

楼板中心不同板配筋模型的应力对比,如图 9 所示。由图 9 可知:1) 随着温度差的增加,不同板配筋率模型的应力都呈现增大的趋势;2) 同一温度作用下,板配筋率最小模型的应力最大,板配筋率最大模型的应力最小;3) 温度差较低时,不同配筋率模型的应力均相近,随着温度差增大到一定程度时,板配筋率模型最大的应力明显小于板配筋率模型最小的应力。

不同板配筋率模型的变形对比,如图 10 所示。由图 10 可知:1) 对于近梁端楼板来说,板配筋率大模型随着温度差的增加,变形趋势保持平缓,板配筋率小模型的变形随着温度差的增加呈现逐渐增大的趋势;2) 对于楼板中心,随着温度差的增加,不同板配筋率模型的变形均呈现先减后增的趋势;3) 同一温度差下,相同配筋率模型的楼板中心的变形远大于楼板近梁

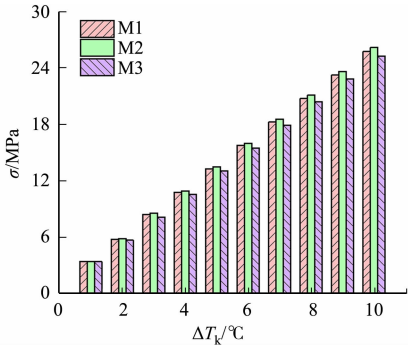
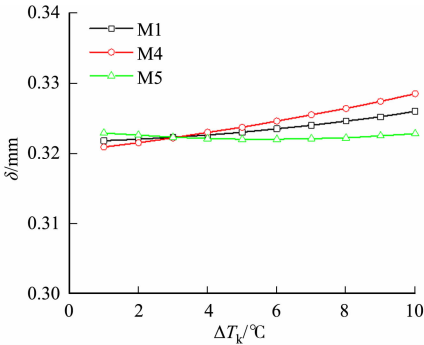
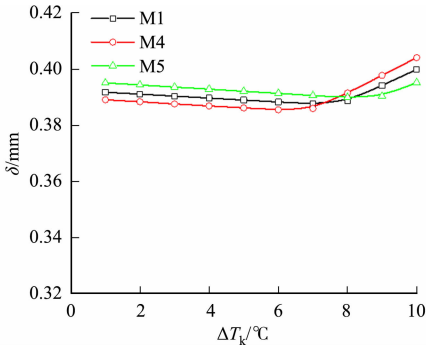


图 9 楼板中心不同板配筋模型的应力对比

Fig. 9 Comparison of stress in centran floor of different plate reinforcement models



(a) 楼板近梁端



(b) 楼板中心

图 10 不同板配筋率模型的变形对比

Fig. 10 Comparison of deformation in different reinforcement models

端的变形,变形增加了 18%~25%。

3.2.4 混凝土强度等级影响 随着混凝土强度等级的提高,楼板的承载能力也随之增强。在高层建筑或大型公共建筑中,为了满足较大的荷载要求,通常会选择较高强度等级的混凝土。因此,以混凝土强度等级 C50 为基准,楼板的刚度( $B$ )<sup>[22]</sup>为

$$B=E_{CS}I_s。$$

(3)

式(3)中: $E_{CS}$ 为楼板的混凝土弹性模量; $I_s$ 为楼板的截面抗弯惯性矩。

在相同截面情况下,高强度等级的混凝土由于较高的弹性模量和抗压强度,能更有效抵抗变形,提高结构的刚度。这有助于减少因变形引起的裂缝开展,提高结构的耐久性和使用性能。另一方面,过高的刚度可能导致结构的自振周期减小,从而使地震作用增大。楼板中心不同混凝土强度等级模型的应力对比,如图 11 所示。

由图 11 可知:1) 随着温度差的增加,不同混凝土强度等级模型的应力都呈现增大的趋势;2) 在同一温度差下,不同混凝土强度等级模型的应力均相接近。

楼板中心不同混凝土强度等级模型的变形对比,如图 12 所示。由图 12 可知:1) 对于楼板近梁端,随着温度差的增加,不同混凝土强度等级模型的变形均呈现增大趋势;2) 对于楼板中心,随着温度差的

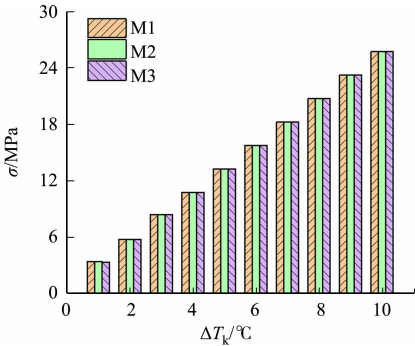


图 11 楼板中心不同混凝土强度等级模型的应力对比

Fig. 11 Comparison of stress in central floor of different concrete strength grades models

增加,不同混凝土强度等级模型的变形均呈现先减后增的趋势;3) 同一温度差下,相同混凝土强度等级模型楼板中心的变形远大于楼板近梁端的变形,变形增加了 20%~25%。

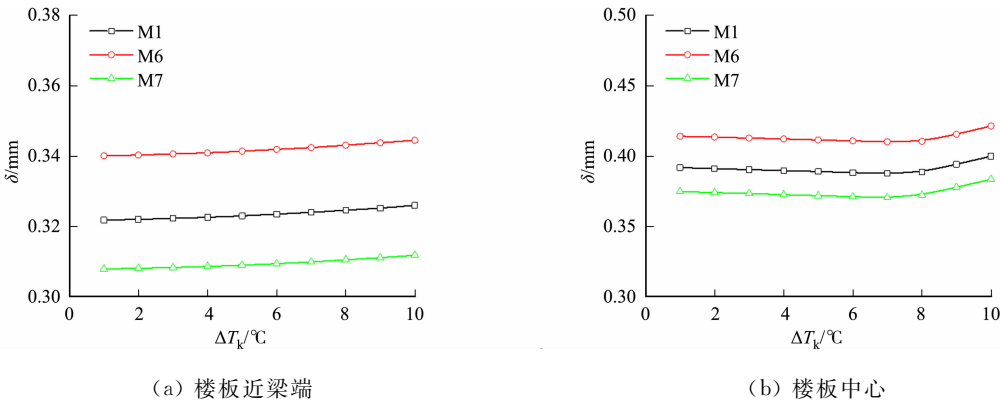


图 12 不同混凝土强度等级模型的变形对比

Fig. 12 Comparison of deformation of different concrete strength grades models

## 4 结论

1) 温度作用对楼板应力的影响近似呈正相关,随着温度差增加,楼板应力越大。在同一温度作用下,楼板应力和楼板变形受到最大尺寸柱的影响。楼板最大应力和最大变形往往发生在楼板中心。

2) 在温度作用下,120~150 mm 板厚对于增加承载力作用的效果较为理想,但板厚对于楼板变形的影响不大。在实际工程中,板厚设计不宜过厚,超过 150 mm 时,需要考虑自质量和温度共同作用的不利影响。

3) 在温度作用下,板配筋率对楼板应力和变形均有明显影响。同时,温度差越大时,板配筋率越大,降低楼板应力和变形的效果越明显。

4) 在温度作用下,混凝土强度等级对楼板变形影响明显。混凝土强度等级越高,楼板变形越小。

5) 温度差的变化对于楼板中心变形有着明显规律,随着温度差的增加,楼板变形一般呈现先减后增的趋势,温度差较低时,一定程度下可以抑制楼板的变形。楼板近梁端的变形通常随着温度差的增加而增大。同时,楼板中心的变形远大于近楼板梁端的变形,变形一般增加了 10%~20%。

## 参考文献:

[1] 张寒硕,卜凡民,聂建国,等. 超长混凝土框架结构温度场模拟与温度效应研究[J/OL]. 工程力学,1-9(2023-11-28) [2024-11-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20231127.1457.047.html>.

[2] 冯健,吕志涛,吴志彬,等. 超长混凝土结构的研究与应用[J]. 建筑结构学报,2001(6):14-19. DOI:10.3321/j.issn:1000-6869.2001.06.002.

[3] 焦彬如,吴彦,陈黎明,等. 超长混凝土墙体温度应力计算及裂缝控制新技术研究[J]. 土木工程学报,2011,44(9):35-41. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2011.09.016.

[4] 陈平友,肖克艰,陈志强,等. 成都双流国际机场 T2 航站楼超长结构中预应力的应用[J]. 建筑结构,2010,40(9):11-13. DOI:10.19701/j.jzjg.2010.09.003.

[5] 蒋方新,陈尚志,邵兴宇,等. 超长混凝土结构在使用阶段温度应力下的裂缝控制[J]. 建筑结构,2021,51(14):107-111. DOI:10.19701/j.jzjg.2021.14.018.

[6] 朱兆聪,梁汝鸣,葛序尧,等. 气温骤降对超长混凝土结构底板温度应力的影响[J]. 建筑结构,2023,53(增刊 1):1723-1727. DOI:10.19701/j.jzjg.23S1255.

[7] 范重,刘学林,刘涛,等. 济南遥墙机场 T2 航站楼超长结构温度及行波效应研究[J]. 建筑结构学报,2023,44(9):1-13. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2022.0833.

[8] 范重,陈巍,李夏,等. 超长框架结构温度作用研究[J]. 建筑结构学报,2018,39(1):136-145. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2018.01.016.

[9] 何本贵,刘芳,常为华,等. 超长混凝土结构温度作用正交分析与研究[J]. 工业建筑,2011,41(增刊 1):714-717.

DOI:10.13204/j.gyz2011.s1.168.

[10] 郑永路,周青,杨会杰.某两层钢筋混凝土框架结构厂房温度作用计算分析[J].建筑结构,2023,53(增刊1):221-224. DOI:10.19701/j.jzjg.23S1150.

[11] JIA Yigang,LU Liangjian,WU Guangyu,*et al.* Temperature stress analysis of super-long frame structures accounting for differences in the linear expansion coefficients of steel and concrete[J]. Processes,2021,9(9):1519. DOI: 10.3390/pr9091519.

[12] JIA Yigang,LU Liangjian,WU Guangyu,*et al.* Spatial nonlinear simulation analysis on the temperature shrinkage effect of a super-long frame structure considering the construction process[J]. Processes,2022,10(9):1874. DOI: 10.3390/pr10091874.

[13] LI Yanying,ZHANG Yongsheng. An analysis of temperature stress and deforming considering shrinkage and creep in super-long frame structure[J]. Key Engineering Materials,2006,326:1467-1470. DOI:10.4028/www.scientific.net/kem.326-328.1467.

[14] YANG Zhiyong,ZHAO Liang,ZHANG Peng,*et al.* Research on temperature stress of annular super-long frame structure by finite element method[J]. Advanced Materials Research,2013,639:1200-1205. DOI:10.4028/www.scientific.net/amr.639-640.1200.

[15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构设计标准:GB/T 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2024.

[16] 王冬晔,董毓利,王卫华,等.混凝土板柱结构抗火性能的有限元分析[J].华侨大学学报(自然科学版),2019,40(6):724-732. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201905008.

[17] 叶勇,薛昱莹,孙大为,等.衬塑钢管海水海砂混凝土短柱轴压性能有限元分析[J].华侨大学学报(自然科学版),2023,44(4):442-450. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202303015.

[18] 何涛,陈文祥.铝模早拆体系下的楼板裂缝控制有限元建模与分析[J].建筑结构,2021,51(增刊1):1361-1367.

[19] 吴健余,杨邦成.房屋结构在地震作用下的有限元分析[J].价值工程,2017,36(7):172-174. DOI:10.14018/j.cnki.cn13-1085/n.2017.07.071.

[20] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

[21] 高志斌.温度应力对机场道面板厚度与分块设计影响研究[J].建筑结构,2011,41(增刊1):1068-1072. DOI:10.19701/j.jzjg.2011.s1.252.

[22] 任思霖,高林,王苏康,等.基于承载性能的混凝土楼盖梁板刚度影响因素分析[J].华北理工大学学报(自然科学版),2024,46(4):100-109. DOI:10.3969/j.jssn.2095-2716.2024.04.012.

(责任编辑: 陈志贤      英文审校: 方德平)



DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202412027



# Low-E 玻璃在厦门某高校教学楼 节能改造中的应用模拟

常明玉, 林姝颖, 李玲真, 吴正旺

(华侨大学 建筑学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 以厦门某高校教学楼为例, 采用实测与 DesignBuilder 软件模拟相结合的方法, 利用模拟数据与实测数据的拟合结果验证模型的可靠性, 设定 3 种窗户改造方案(单层 Low-E 玻璃、中空 Low-E 玻璃、中空普通玻璃)替换原有单层普通玻璃, 分析不同类型 Low-E 玻璃的节能效果。针对南、北走廊教学楼, 共模拟 20 种工况, 对改造前、后的能耗进行对比, 从而评估 Low-E 玻璃的适用性。结果表明: 采用 Low-E 玻璃改造后, 南走廊布局方式的教学楼的能耗较北走廊低 5.6%; 在中空普通玻璃、单层 Low-E 玻璃及中空 Low-E 玻璃等 3 种改造策略中, 中空 Low-E 玻璃节能可达 21.9%, 其他 2 种改造方案的节能均低于 8.1%; 将北走廊教学楼的南侧外窗改造为中空 Low-E 玻璃, 可节能 15.9%; 从经济性看, 采用 Low-E 玻璃的初始投资较大, 在寿命周期内较难收回成本。

**关键词:** 夏热冬暖地区; 教学楼; Low-E 玻璃; 能耗模拟; 节能改造

**中图分类号:** TU 111.19

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5013(2025)04-0419-06

## Simulation of Low-E Glass in Energy-Saving Renovation of University Teaching Buildings in Xiamen City

CHANG Mingyu, LIN Shuying, LI Lingzhen, WU Zhengwang

(School of Architecture, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Taking the university teaching building in Xiamen City as example, a method combining on-site measurements and simulation by DesignBuilder software was adopted, the reliability of the model was verified by fitting the simulation data with the actual measurement data. 3 window renovation schemes (single-layer Low-E glass, hollow Low-E glass and hollow ordinary glass) were set to replace the original single-layer ordinary glass, and the energy-saving effects of different types of Low-E glass were analyzed. For the teaching buildings with south and north corridors, 20 working conditions were simulated to compare the energy consumption before and after the renovation, in order to evaluate the applicability of Low-E glass. The results show that after the renovation with Low-E glass, the energy consumption of the teaching building with south corridor is 5.6% lower than that with north corridor. Among 3 renovation strategies of hollow ordinary glass, the energy-saving of the hollow Low-E glass reaches 21.9%, while the energy savings of the other 2 strategies are less than 8.1%. By replacing the south facing external windows of the north corridor teaching building with hollow Low-E glass, energy saving reaches 15.9%. From the perspective of economic feasibility, the

**收稿日期:** 2024-12-28

**通信作者:** 吴正旺(1972-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事生态设计的研究。E-mail: wuzhengwang@126.com。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51378018)

initial investment of Low-E glass is relatively high, and the cost is difficult to recover within the building's life cycle.

**Keywords:** hot summer and warm winter regions; teaching buildings; Low-E glass; energy consumption simulation; energy-saving renovation

Low-E 玻璃对辐射具有单向传输的特性,因此在建筑中的应用随其造价的降低逐步增加<sup>[1]</sup>。有研究表明,Low-E 玻璃适用于寒冷地区,能在日间利用太阳能并在夜间保温,但在潮湿环境下节能效果不佳,不适用于湿热地区<sup>[2-3]</sup>。近年来,随着玻璃制造与镀膜技术的发展,单层、双层、三玻两腔、高透型及遮阳型 Low-E 玻璃凭借各自突出的性能优势,逐步从研发走向大规模实际应用。在夏热冬暖地区,已有多个案例取得了良好的节能效果。广州科学城二期采用铝合金 Low-E 中空玻璃外窗,显著提高了节能效果和居住质量<sup>[4]</sup>。对深圳市恒大时代金融中心的模拟发现,遮阳型 Low-E 玻璃可大幅减少冷、热负荷<sup>[5]</sup>。遮阳型 Low-E 玻璃中的双银型比普通中空 Low-E 玻璃更适用于夏热冬暖地区,即北方宜使用高透型、南方宜使用遮阳型<sup>[4-8]</sup>。同时,建筑的朝向、开窗等布局也对其能耗有重要影响<sup>[1,9]</sup>。

因此,在南方夏热冬暖地区的建筑设计中,应当采取何种 Low-E 玻璃,如何设计外窗构造,建筑应如何布局,还是一个值得探讨的问题。基于此,本文以厦门市某高校两栋教学建筑为例,监测其标准教室的温、湿度,模拟其围护结构的热工参数,研究 Low-E 玻璃在该地区的适用性。

## 1 模型的建立

### 1.1 建筑概况

福建省厦门市属于典型的夏热冬暖地区。选择厦门市某高校教学建筑群共 8 栋单体,建筑均为 5 层南北向外走廊,每层 4 间教室,每间 10.0 m×7.5 m;窗墙比约为 43%。南走廊和北走廊交替排列。以南走廊为例,标准层教室平面示意图,如图 1 所示。a、b 两栋教学楼标准层平面图,如图 2 所示。图 2 中:a 为南走廊的教学楼;b 为北走廊的教学楼。2 栋教学楼的窗户采用单层普通玻璃(6 mm)。

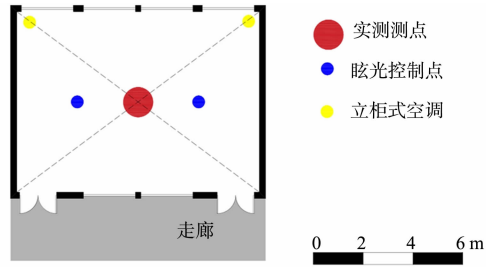


图 1 标准层教室平面示意图

Fig. 1 Plan diagram of standard floor classroom

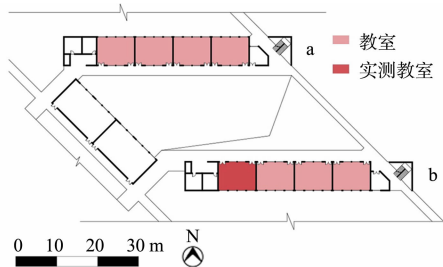


图 2 a 和 b 两栋教学楼标准层平面图

Fig. 2 Plan diagram of a and b teaching buildings standard floor

### 1.2 模型拟合验证

**1.2.1 DesignBuilder 模型的建立** 采用建筑能耗模拟软件 DesignBuilder 对教学建筑进行仿真模拟。选用厦门地区典型的气象年数据,按实际使用情况建立模型,活动时间为每日 8:00—21:00。每间教室配 2 台分体式空调,空调能耗比为 3.15、冷暖电辅,每台空调的循环风量为 2 050 m<sup>2</sup>·h<sup>-1</sup>,室内设计温度为 26 ℃(夏季)和 20 ℃(冬季)。人员密度为 0.5 人·m<sup>-3</sup>,每间教室配备 1 台多媒体设备,散热量为 50 W。根据国家标准 GB 50034—2013《建筑照明设计标准》要求,普通教室的课桌面照度应不低于 300 lx,而有研究表明,500 lx 是舒适和适宜的照度,故将室内照度设定为 500 lx<sup>[10-15]</sup>。此外,设定最大容许眩光值为 22,眩光控制点高度为 0.8 m。

**1.2.2 拟合验证** 于 2024 年 7 月 3 日—2024 年 7 月 9 日,在各测点放置温、湿度仪,自动记录每日 8:00—21:00 的气温。南、北走廊教学楼各选取 1 间标准层教室,将其实测气温数据与模拟数据进行拟合,结果如图 3 所示。图 3 中:θ 为温度;Δθ 为实测温度与模拟温度的差值。

由图 3 可知:北、南走廊教室的实测温度与模拟温度的最大差值分别为 2.33、2.10 ℃,最小差值分

别为 0.01、0.21℃;均方根误差分别为 1.3、1.2;判定系数( $R^2$ )分别为 0.69、0.60;相关系数分别为 0.83、0.78。参照文献[16],将相关系数的绝对值分 3 个等级,0~<0.33 之间为弱相关,0.33~<0.66 为中度相关,0.66~1.00 为高度相关。由此可知,实测数据与模拟结果高度相关,表明 DesignBuilder 模拟的结果具有足够的可靠度,可用于教学楼的能耗模拟。

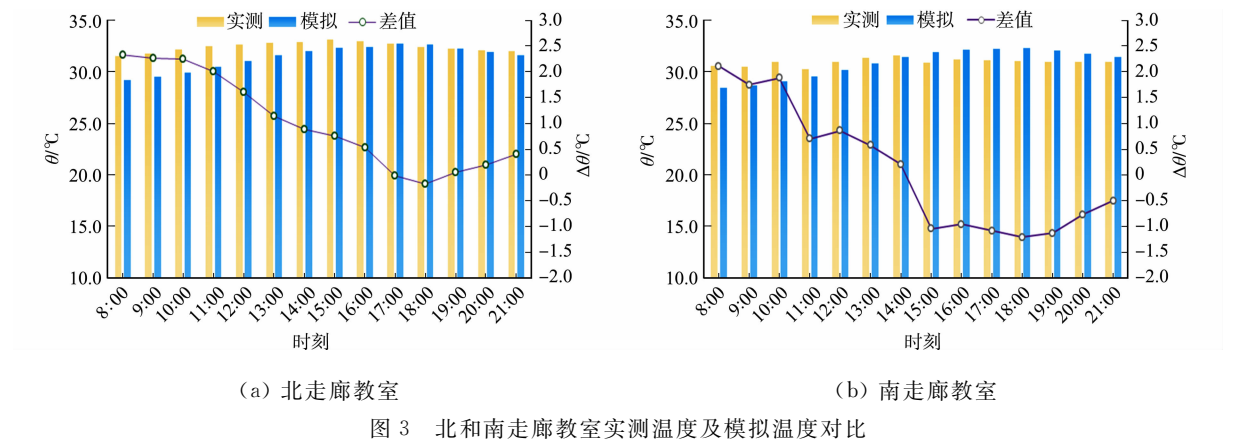


Fig. 3 Comparison of measurement and simulation temperatures in classrooms along north and south corridors

1.3 Low-E 玻璃窗构造设计方案

改造前,该教学楼群采用单层普通玻璃(6 mm)。夏热冬暖地区的节能窗普遍采用遮阳型中空 Low-E 玻璃。采用中空 Low-E 玻璃<sup>[4]</sup>替换原教学楼玻璃窗,将单层普通玻璃、单层 Low-E 玻璃、中空普通玻璃及中空 Low-E 玻璃 4 种玻璃进行比较,如表 1 所示。

表 1 4 种玻璃的热工参数

| 热工参数                                     | 单层普通玻璃 | 单层 Low-E 玻璃 | 中空普通玻璃 | 中空 Low-E 玻璃 |
|------------------------------------------|--------|-------------|--------|-------------|
| 传热系数/W·(m <sup>2</sup> ·K) <sup>-1</sup> | 5.718  | 3.347       | 2.785  | 1.190       |
| 可见光透过率                                   | 0.811  | 0.607       | 0.781  | 0.408       |
| 太阳得热系数                                   | 0.819  | 0.481       | 0.703  | 0.235       |
| 结构示意图                                    |        |             |        |             |

2 改造方案比较

对采用不同工况的教学楼进行全年的能耗模拟。对不同工况进行编号,如表 2 所示。能耗模拟共计 20 种工况,其中,A0、B0 为改造前,即使用单层普通玻璃的 2 种工况;A1~A3、B1~B3 为使用中空

表 2 不同工况对应的编号

| 编号 | 工况                        | 编号 | 工况                        |
|----|---------------------------|----|---------------------------|
| A0 | 南走廊单层普通玻璃                 | B0 | 北走廊单层普通玻璃                 |
| A1 | 南走廊中空 Low-E 玻璃            | B1 | 北走廊中空 Low-E 玻璃            |
| A2 | 南走廊北侧中空 Low-E 玻璃、南侧单层普通玻璃 | B2 | 北走廊北侧单层普通玻璃、南侧中空 Low-E 玻璃 |
| A3 | 南走廊北侧单层普通玻璃、南侧中空 Low-E 玻璃 | B3 | 北走廊北侧中空 Low-E 玻璃、南侧单层普通玻璃 |
| A4 | 南走廊单层 Low-E 玻璃            | B4 | 北走廊单层 Low-E 玻璃            |
| A5 | 南走廊北侧单层 Low-E 玻璃、南侧单层普通玻璃 | B5 | 北走廊北侧单层普通玻璃、南侧单层 Low-E 玻璃 |
| A6 | 南走廊北侧单层普通玻璃、南侧单层 Low-E 玻璃 | B6 | 北走廊北侧单层 Low-E 玻璃、南侧单层普通玻璃 |
| A7 | 南走廊中空普通玻璃                 | B7 | 北走廊中空普通玻璃                 |
| A8 | 南走廊北侧中空普通玻璃、南侧单层普通玻璃      | B8 | 北走廊北侧单层普通玻璃、南侧中空普通玻璃      |
| A9 | 南走廊北侧单层普通玻璃、南侧中空普通玻璃      | B9 | 北走廊北侧中空普通玻璃、南侧单层普通玻璃      |

Low-E 玻璃改造的 6 种工况;A4~A6、B4~B6 为使用单层 Low-E 玻璃改造的 6 种工况;A7~A9、B7~B9 为使用中空普通玻璃改造的 6 种工况。

2.1 不同改造方案的能耗比较

对中空 Low-E 玻璃和单层普通玻璃的能耗进行对比,如图 4 所示。图 4 中: $E$  为能耗。不同单层 Low-E 玻璃和中空普通玻璃应用方案的能耗对比,分别如图 5、6 所示。对比图 4~6,从布局方式和中空 Low-E 玻璃的应用方案两方面,分析 Low-E 玻璃应用于教学楼的节能效果。

2.1.1 不同布局方式 在 20 种工况下,北走廊的布局方式均较南走廊的能耗高。改造前,南走廊教学楼

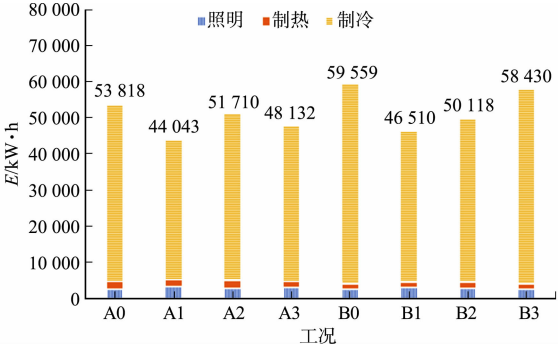


图 4 中空 Low-E 玻璃和单层普通玻璃的能耗对比  
Fig. 4 Energy consumption comparison between hollow Low-E glass and single-layer ordinary glass

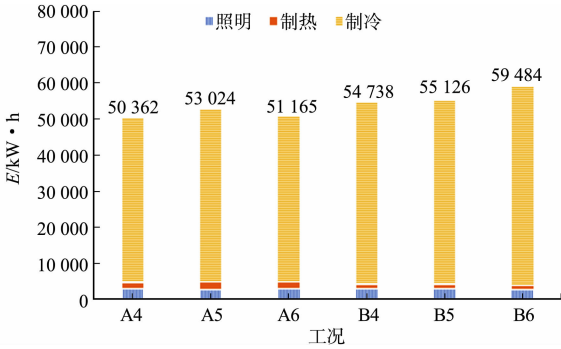


图 5 不同单层 Low-E 玻璃应用方案的能耗对比  
Fig. 5 Energy consumption comparison of different single-layer Low-E glass application schemes

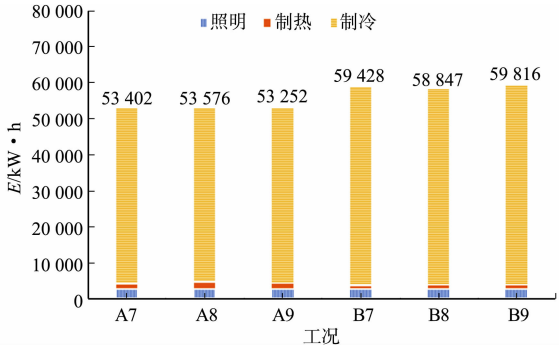


图 6 不同中空普通玻璃应用方案的能耗对比  
Fig. 6 Energy consumption comparison of different hollow ordinary glass application schemes

较北走廊教学楼的照明能耗高 51 kW · h,制热能耗低 805 kW · h,制冷能耗低 11 453 kW · h,总能耗低 14.0%;使用中空 Low-E 玻璃的工况下,南走廊的布局方式较北走廊的照明能耗高 115 kW · h,制冷能耗低 3 063 kW · h,制热能耗低 481 kW · h,总能耗低 5.6%。

2.1.2 不同中空 Low-E 玻璃的应用方案 南走廊布局的教学楼,若两侧均使用中空 Low-E 玻璃,则相较改造前,照明能耗升高了 658 kW · h,制热能耗降低了 396 kW · h,制冷能耗降低了 10 037 kW · h,总能耗降低了 18.0%;若仅在南侧布置中空 Low-E 玻璃,则相较改造前,照明能耗升高了 83 kW · h,制热能耗几乎不变,制冷能耗升高了 2 188 kW · h,总能耗降低仅 3.9%;若仅在北侧布置中空 Low-E 玻璃,则相较改造前,照明能耗升高了 331 kW · h,制热能耗降低了 388 kW · h,制冷能耗降低了 5 629 kW · h,总能耗降低了 10.5%。

北走廊布局的教学楼,若两侧均使用中空 Low-E 玻璃,则相较改造前,照明能耗升高了 589 kW · h,制热能耗降低了 72 kW · h,制冷能耗降低了 13 566 kW · h,总能耗降低了 21.9%;若仅在南侧布置中空 Low-E 玻璃,则相较改造前,照明能耗升高了 346 kW · h,制热能耗降低了 53 kW · h,制冷能耗降低了 9 840 kW · h,总能耗降低了 15.9%;若仅在北侧布置中空 Low-E 玻璃,则相较改造前,照明能耗升高了 46 kW · h,制热能耗降低了 140 kW · h,制冷能耗降低了 1 035 kW · h,总能耗降低仅 1.9%。

单层 Low-E 玻璃的 6 种工况,较改造前能耗降低均不超过 8.1%。中空普通玻璃的 6 种工况,较改造前能耗降低均不超过 1.1%。

2.2 中空 Low-E 玻璃改造方案的经济性比较

经济性是衡量减碳效果的主要标准之一。据调研,6 mm 单层普通玻璃的价格约为 60 元 · m<sup>-3</sup>,中空 Low-E 玻璃的价格约为 260~280 元 · m<sup>-3</sup>[17-19]。净现值(NPV)的表达式为

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}。$$

上式中: $C_t$  为第  $t$  年的现金流, $t$  为时间期数; $r$  为折现率; $n$  为总的时间期数。

取折现率  $r=10\%$ , 电价为  $0.5\text{ 元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$ , 教学楼的使用年限为  $50\text{ a}^{[20-21]}$ 。改造后, 不同中空 Low-E 玻璃工况的经济性对比, 如表 3 所示。

表 3 不同中空 Low-E 玻璃工况的经济性对比  
Tab. 3 Economic comparison of different hollow Low-E glass working conditions

| 指标         | 工况      |         |         |         |         |         |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|            | A1      | A2      | A3      | B1      | B2      | B3      |
| 初始投资/元     | 120 000 | 40 000  | 80 000  | 120 000 | 80 000  | 40 000  |
| 年节约费用/元    | 4 888   | 1 054   | 2 843   | 6 525   | 4 721   | 565     |
| 寿命周期内净现值/元 | -71 536 | -29 550 | -51 812 | -55 306 | -33 192 | -34 398 |
| 静态投资回收期/a  | 24.5    | 38.0    | 28.1    | 18.4    | 17.0    | 70.8    |

由表 3 可知: 6 种中空 Low-E 玻璃工况在寿命周期内的净现值均为负值。中空 Low-E 玻璃应用于北走廊布局的教学楼的节能效果总体优于南走廊。在南走廊的布局方式下, 选择 A1 工况, 即两侧均布置中空 Low-E 玻璃的方案, 其静态投资回收期最短, 但初始投资金额较大。在北走廊的布局方式下, 选择 B2 工况, 即仅在南侧布置中空 Low-E 玻璃的方案, 其静态投资回收期最短, 且初始投资金额较小, 虽然寿命周期内净现值为亏损, 但其节能效果显著, 若产品生产技术改良, 则 B2 工况具有推广的潜力。

### 3 结论

1) 从布局方式看, 对于南、北走廊两种布局的教学楼而言, 南走廊的布局方式更节能, 而采用 Low-E 玻璃改造对北走廊的教学楼更有效。由实测结果可知, 在夏季, 其使用时段内的平均气温比北走廊高  $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。原因可能是南侧走廊遮挡了夏季直射的阳光, 有效降低了气温, 从而降低了能耗。因此, 在相关建筑的设计中, 宜优先采用南走廊的布局。由模拟结果可知, 改造前, 北走廊布局方式的全年能耗比南走廊高  $14.0\%$ , 而两侧普通玻璃均采用中空 Low-E 玻璃外窗改造后, 北走廊教学楼的南向外窗得热量减少, 此时南走廊教学楼的南向外窗由于走廊的遮挡, 得热量减少并不明显。改造后, 北走廊教学楼的全年能耗相比南走廊教学楼的能耗差距从原先的  $14.0\%$  缩小到  $5.6\%$ 。

2) 采用中空 Low-E 玻璃改造的外窗构造有明显的节能效果。在南、北走廊的教学楼中, 若将  $6\text{ mm}$  单层普通玻璃改造成中空 Low-E 玻璃, 则照明能耗均有一定程度的增大, 原因可能是 Low-E 玻璃降低了可见光透过率, 使照明能耗增加。但从总能耗看, 南、北走廊的教学楼分别可以节能  $18.0\%$  和  $21.9\%$ , 每年最多可减少能耗  $10.2\text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

3) 6 种使用中空 Low-E 玻璃的工况中, 对北走廊教学楼的南侧外窗采用中空 Low-E 玻璃改造 (即 B2 工况), 其节能效果较好。对于北走廊的教学楼, 若仅在南面布置 Low-E 玻璃, 比仅在北侧布置 Low-E 玻璃节能增加  $14.0\%$ , 比双侧均布置 Low-E 玻璃节能减少  $6.0\%$ 。而对于南走廊的教学楼, 单侧布置 Low-E 玻璃最多节能  $10.5\%$ , 双侧均布置 Low-E 玻璃可节能  $18.0\%$ 。单侧布置可以减少初始投资, 使节能改造方案更容易被接受。因此, 在节能改造中, 可重点考虑北走廊教学楼, 且为减少初始成本, 可采用仅在南侧布置 Low-E 玻璃的方案。

4) 从经济性看, Low-E 玻璃尚不适用于夏热冬暖地区的教学建筑。虽然使用 Low-E 玻璃进行节能改造可以明显降低能耗, 但成本较高, 在整栋建筑的寿命周期内, 亏损可达  $15\text{ 元}\cdot\text{m}^{-2}$ 。在采用中空 Low-E 玻璃的 6 种工况中, 寿命周期内净现值均为负数。虽然中空 Low-E 玻璃最多全年可节电  $10.2\text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}$ , 但其成本较高, 投资回收周期较长, 初始投资较高, 若着重考虑经济性, 则不宜使用。

### 参考文献:

[1] 范征宇, 肖子一, 刘加平. 多气候区不同窗墙比下功能布局对办公建筑能耗的影响[J]. 建筑节能(中英文), 2023, 51(6): 18-23, 31. DOI:10.16377/j.cnki.issn1673-7237.2023.06.004.

[2] 李保峰. 适应夏热冬冷地区气候的建筑表皮之可变化设计策略研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.

[3] 蒋本俊. 浅析辽南地区住宅门窗的设计沿革与趋势[D]. 大连: 大连工业大学, 2014.

[4] 陈兰娥. Low-E 玻璃窗在夏热冬暖地区居住建筑中节能适用性研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2012.

[5] 贾清清. 夏热冬暖地区 LOW-E 玻璃在高层办公室建筑节能中的适用性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.

[6] ZHENG Caidan, WU Peihao, COSTANZO V, *et al.* Establishment and verification of solar radiation calculation model of glass daylighting roof in hot summer and warm winter zone in China[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 205:2903-2909. DOI:10.1016/j.proeng.2017.10.089.

[7] 王晶, 王亮, 朱沁萱. 农村住宅建筑节能改善策略研究[J]. *制冷与空调(四川)*, 2016, 30(1):26-29, 32.

[8] 雷艳, 黄巧玲, 杜松, 等. 贵州民用建筑围护结构节能技术适应性分析[J]. *建筑节能*, 2016, 44(11):43-45. DOI:10.16315/j.1009-6825.2016.11.011.

[9] HASSIEB M M, RABAB A, MOHAMED F A. Quantifying the influence of window-to-wall ratio (WWR) on indoor air quality and thermal comfort: Classroom study in hot arid climates[C]//15th International Conference on Civil and Architecture Engineering. Cairo: IOP Publishing, 2024:012025. DOI:10.1088/1755-1315/1396/1/012025.

[10] 李章平, 黄玉芬. 计算机视觉视域下智能照明控制系统开发[J]. *中国照明电器*, 2025(1):109-114. DOI:10.3969/j.issn.1002-6150.2025.01.028.

[11] 王燕尼, 杨春宇, 段然. 旨在缓解工作人员疲劳的地铁站健康照明研究: 以重庆地铁车站为例[J]. *照明工程学报*, 2019, 30(6):47-52. DOI:10.3969/j.issn.1004-440X.2019.06.009.

[12] 杨春宇, 汪统岳, 向奕妍, 等. 秋冬季节不同 LED 照明环境下的学习效率变化[J]. *照明工程学报*, 2017, 28(6):60-65. DOI:10.3969/j.issn.1004-440X.2017.06.011.

[13] 张煜垆, 田兴博, 冯建平. 教室健康照明设计及灯具布置分析[J]. *建筑电气*, 2023, 42(12):55-60. DOI:10.3969/j.issn.1003-8493.2023.12.011.

[14] 张煜垆, 田兴博, 冯建平. 教室健康照明控制设计[J]. *建筑电气*, 2024, 43(9):48-52. DOI:10.3969/j.issn.1003-8493.2024.09.010.

[15] 金玲, 薛鹏, 石佳欣, 等. 小学教室天然采光与人工照明的融合调查研究[J]. *建筑科学*, 2024, 40(6):251-263. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2024.06.29.

[16] SEBER G A F. 线性回归分析[M]. 方开泰, 等译. 北京: 科学出版社, 1987.

[17] 王朝红, 杨阳, 魏广龙. 基于效益评价的寒冷地区农宅附加阳光间优化研究[J]. *建筑科学*, 2023, 39(4):130-138. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2023.04.17.

[18] 王剑斌, 赵敬源. 陕北农村住宅建筑能效提升梯度研究[J]. *建筑节能(中英文)*, 2022, 50(3):135-140. DOI:10.3969/j.issn.2096-9422.2022.03.022.

[19] 刘科, 王琴琴, 陈建平. 夏热冬冷地区既有住宅立面低碳优化研究: 以苏州地区为例[J]. *建筑节能(中英文)*, 2024, 52(8):71-76. DOI:10.3969/j.issn.2096-9422.2024.08.010.

[20] 鲍超, 张志尧, 刘启明, 等. 基于合同能源管理模式的既有建筑节能改造项目经济效益评价方法研究[J]. *建筑节能(中英文)*, 2024, 52(7):137-144. DOI:10.3969/j.issn.2096-9422.2024.07.021.

[21] 朱赛鸿, 余兴也. 基于 DeST 的天津既有农宅节能改造经济效益研究[J]. *建筑节能(中英文)*, 2022, 50(6):121-125. DOI:10.3969/j.issn.2096-9422.2022.06.020.

(责任编辑: 黄晓楠      英文审校: 方德平)



DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202503002



# 豫中靠崖窑民居建筑室内 采光分析及提升策略

李显秋<sup>1</sup>, 任婷<sup>1</sup>, 侯智松<sup>2</sup>

(1. 云南农业大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650201;

2. 漯河市发展投资控股集团有限公司, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 以豫中地区传统靠崖窑民居建筑为研究对象,运用现场实测与软件模拟相结合的研究方法,对该地区典型窑洞建筑的室内照度及采光系数进行系统性分析。在不破坏豫中地区靠崖窑民居建筑原有空间格局、建筑风貌及构造特征的基础上,针对 3 个研究样本窑洞提出了 4 种室内天然采光优化策略组合。研究结果表明:文中策略具有可行性。

**关键词:** 豫中地区; 靠崖窑民居; 天然采光; 实测与模拟; 优化策略

**中图分类号:** TU 831

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5013(2025)04-0425-10

## Indoor Lighting Analysis and Improvement Strategy of Cliff Dwelling Buildings in Central Henan

LI Xianqiu<sup>1</sup>, REN Ting<sup>1</sup>, HOU Zhisong<sup>2</sup>

(1. College of Architectural Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. Luohe Development Investment Holding Group Limited Company, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** Taking the traditional cliff dwellings buildings in the central Henan region as the research object, combining on-site measurements and software simulations, a systematic analysis was conducted on the indoor illumination and lighting coefficient of typical cave buildings in the region. On the basis of not destroying the original spatial pattern, architectural style, and structural features of the cliff dwelling buildings in the region, 4 optimization strategies combinations of indoor natural lighting were proposed for 3 research sample caves. The results show that the proposed strategy is feasible.

**Keywords:** central Henan region; cliffside dwelling building; natural lighting; measurement and simulation; optimization strategy

豫中地区广泛分布着传统靠崖窑民居建筑,其中,河南省巩义市、荥阳市等地的黄土丘陵地貌尤为典型,该地区岩土体结构以老黄土为主,其土层厚、土质均匀、垂直壁立稳定性强、湿陷性较小,为靠崖窑的建造提供优越的自然条件<sup>[1-2]</sup>。靠崖窑作为典型的生土建筑,依托山体土层挖掘,拱形结构稳固、具备良好的保温隔热性能,可实现冬暖夏凉。因单侧采光、采光面积小,以及厢房的遮挡,存在室内照度不足、均匀性差等问题<sup>[3]</sup>,影响居住舒适性与功能适应性。随着绿色建筑与文化遗产保护的协同发展,以

**收稿日期:** 2025-03-02

**通信作者:** 李显秋(1973—),女,副教授,主要从事传统村落保护与发展的研究。E-mail:906352703@qq.com。

**基金项目:** 云南省科技厅重点研发计划社会发展专项(202403AC100042)

低干预方式提升传统窑洞光环境性能,成为兼具科学与文化价值的研究课题。近年来,研究多集中于南方合院与北方四合院,传统民居光环境和生土窑洞光环境的研究较为匮乏。文献[4-6]对陕北窑洞热工性能与结构安全进行探讨,Elizabeth 等<sup>[7]</sup>强调历史材料与技术结合对新型乡土建筑的重要性。文献[8-10]评估了靠崖窑光环境现状,提出使用反光镜、人工照明等改善措施,并借助斯维尔软件进行模拟分析<sup>[11]</sup>。然而,现有研究缺乏对豫中地区靠崖窑采光特征的定量分析与针对性优化,现代改造技术应用于传统窑洞易破坏建筑空间原真性与构造特征,导致技术适配性差。因此,亟需探索兼顾传统风貌与光环境提升的创新路径。本文对豫中靠崖窑民居建筑室内采光分析及提升策略进行研究。

## 1 室内光环境现状与分析

### 1.1 室内天然光照度实测

1.1.1 研究样本选取 选取的研究样本(人马寨村王宅)位于河南省荥阳市石洞沟村,该村落于 2016 年被列入第 4 批中国传统村落名录。村内完整保留了 40 余座明清时期的古建筑院落,共计百余间房屋,其建筑具有显著的冬暖夏凉特性,且结构坚固耐用。人马寨村王宅始建于明清时期,于 1989 年进行了修缮,主要对窑脸和内部墙面进行了维护,并增建了厢房和倒座,形成了典型的围合式窑院民居格局。人马寨村王宅现状平面图,如图 1 所示。

人马寨村王宅由 3 孔窑洞组成,建筑朝向为南偏西 12°。

其中,窑洞 1 进深 11.5 m,起居空间进深 7.2 m,面宽 3.1 m,由于窑脸部分被一层厢房遮挡,导致采光条件差;窑洞 2 进深 6.0 m,起居空间进深 6.0 m,面宽 3.1 m,窑脸直接面向庭院且无遮挡,采光条件相对较好但仍显不足,采光较差;窑洞 3 进深 11.8 m,起居空间进深 7.5 m,面宽 3.1 m,窑脸完全被两层厢房遮挡,采光条件极差。这 3 孔窑洞分别代表了豫中地区靠崖窑民居建筑中室内光环境差、较差和极差 3 种典型情况。

1.1.2 实测过程与分析 1) 测点选取。依据 GB/T 5699—2017《采光测量方法》<sup>[12]</sup>要求,在人马寨村王宅的 3 个窑洞内分别设置 3 个实测点(图 2)。所有测点均位于距离墙面 1 m 的南北轴线上,其中实测点 1 设置在距离采光口内墙面 1 m 处,实测点 2 位于轴线中心位置处,实测点 3 则布置在距离储藏空间外墙 1 m 处。

2) 实测过程。采用 TES-1339 型照度计进行现场实测,严格按照 GB/T 5699—2017《采光测量方法》<sup>[12]</sup>技术规范执行。实测工作于 2021 年 12 月 25 日实施,选择 10:00、12:00 和 14:00 三个代表性时段,在符合国际照明委员会标准的无云晴天条件下进行数据采集。测量人员统一着深色服装,以减少测量误差。在每个窑洞的 3 个实测点处(距离地面 750 mm 的平面高度)进行 3 次重复测量,取平均值作为该测点的照度值。测量过程严格遵循规范要求,研究对象实测数据,如表 1 所示。表 1 中: $E$  为照度。

表 1 研究对象实测数据

Tab. 1 Measurement data of research objects

| 研究对象 | $E(\text{测点 1})/\text{lx}$ | $E(\text{测点 2})/\text{lx}$ | $E(\text{测点 3})/\text{lx}$ |
|------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 窑洞 1 | 83.7                       | 3.4                        | 1.1                        |
| 窑洞 2 | 125.2                      | 16.9                       | 5.1                        |
| 窑洞 3 | 14.9                       | 2.2                        | 0.3                        |

实测期间,发放居民调查问卷,收集居民对室内天然采光的主观评价信息。共发放问卷 60 份,回收

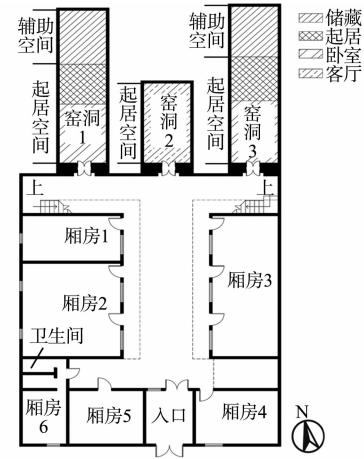


图 1 人马寨村王宅现状平面图  
Fig. 1 Plan of current Wang residence in Renmazhai Village

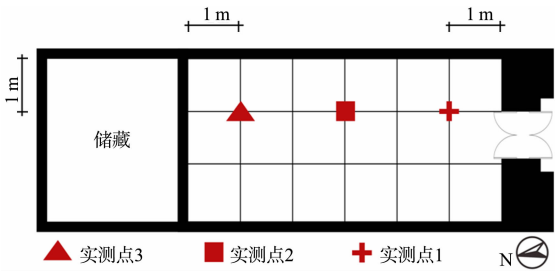


图 2 测点位置示意图  
Fig. 2 Measurement point location

有效问卷 60 份,回收率为 100%。其中,60 岁及以上居民占比 66.67%(40 人),41~59 岁居民占比 26.67%(16 人),40 岁及以下居民占比 6.67%(4 人)。居住时长均超过 10 a,其中,居住时长 20 a 以上占比 53.33%(32 人)。受访者以务农(66.67%)和退休人员(26.67%)为主,具有典型传统民居居住群体特征。调查结果显示,73.33%的受访者(44 份调查问卷)认为室内天然采光环境极差,26.67%的受访者(16 份调查问卷)认为室内天然采光环境较差。问卷调查结果与现场实测数据具有高度一致性,进一步验证了研究结果的可靠性。

研究样本中,3 个窑洞的采光条件呈现明显差异:窑洞 1 的窑脸部分被一层厢房遮挡,导致采光效果差;窑洞 2 的窑脸直接面向庭院且无任何遮挡物,采光条件相对较好但仍显不足,采光效果较差;窑洞 3 的窑脸则完全被两层厢房遮挡,采光效果极差。

1.2 软件模拟与分析

1.2.1 参数设置 根据 GB 50033—2013《建筑采光设计标准》<sup>[13]</sup>和 GB 55016—2021《建筑环境通用规范》<sup>[14]</sup>的相关规定,结合实地调研结果,采用 DBJ41/T 109—2020《河南省绿色建筑评价标准》作为参考标准。照度值为 15 000 lx,分析面高度为 750 mm,光线反射次数为 3 次。材料反射系数根据实际调研结果确定,室内地面和外表面采用红砖,反射系数为 0.33;玻璃材料为乳白色聚酯碳酸,反射系数为 0.16;室内顶棚和墙面为大白粉刷,反射系数为 0.75。

1.2.2 模拟分析 采用 Dali 软件,对 3 个窑洞的采光系数和照度进行模拟分析。所得的数据情况,如表 2、3,以和图 3、4 所示。表 2 中: $E_{\min}$ 为最小照度; $E_{\max}$ 为最大照度; $\bar{E}$ 为平均照度。表 3 中: $P$ (极差)表示采光系数低于 0.5%的区域面积的占比; $P$ (差)表示采光系数在 0.5%~1.0%面积的占比; $P$ (一般)表示采光系数在 1.0%~2.0%面积的占比; $P$ (好)表示采光系数在 2.0%~5.0%面积的占比; $P$ (极好)表示采光系数大于 5.0%面积的占比; $\bar{C}$ 为平均采光系数。图 4 中: $C$ 为采光系数。

表 2 研究对象的室内采光照度分布情况

Tab. 2 Distribution of indoor lighting intensity of research objects

| 研究对象 | $E_{\min}/\text{lx}$ | $E_{\max}/\text{lx}$ | $\bar{E}/\text{lx}$ |
|------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 窑洞 1 | 0                    | 496                  | 27                  |
| 窑洞 2 | 3                    | 533                  | 34                  |
| 窑洞 3 | 0                    | 187                  | 10                  |

表 3 研究对象的采光系数占比

Tab. 3 Proportion of daylighting coefficient of research objects

| 研究对象 | $P$ (极差)/% | $P$ (差)/% | $P$ (一般)/% | $P$ (好)/% | $P$ (极好)/% | $\bar{C}/\%$ |
|------|------------|-----------|------------|-----------|------------|--------------|
| 窑洞 1 | 76         | 10        | 8          | 5         | 2          | 0.54         |
| 窑洞 2 | 75         | 9         | 8          | 6         | 2          | 0.69         |
| 窑洞 3 | 89         | 6         | 3          | 1         | 0          | 0.20         |

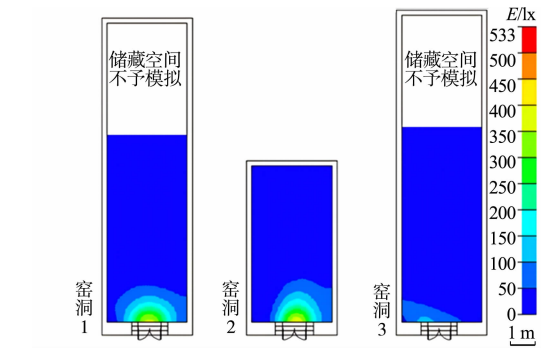


图 3 研究对象的现状照度模拟  
Fig. 3 Simulation of current illumination  
in cave dwellings

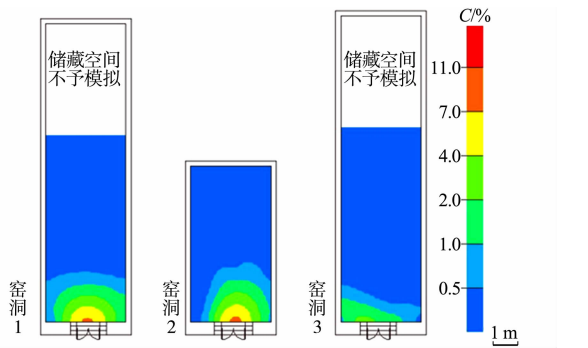


图 4 研究对象的现状采光系数模拟  
Fig. 4 Simulation of current lighting  
coefficient in cave dwellings

根据 GB 50033—2013《建筑采光设计标准》<sup>[13]</sup>和 GB 55016—2021《建筑环境通用规范》<sup>[14]</sup>的相关规定,采光等级应不低于Ⅳ级标准,侧面采光的 $\bar{C} \geq 2.0\%$ ,同时,室内 $\bar{E} \geq 300 \text{ lx}$ <sup>[13]</sup>。因此,窑洞 1、2、3

的室内天然光照度平均值和采光系数均未达到上述标准要求。

## 2 实测数据与模拟数据校验

研究对象实测数据与模拟数据对比,如表 4 所示。由表 4 及相关计算可知:窑洞 1 均方根误差为 7.14%,归一化平均偏差为-6.80%;窑洞 2 均方根误差为 7.98%,归一化平均偏差为-2.85%;窑洞 3 均方根误差为 2.05%,归一化平均偏差为-5.75%。

表 4 研究对象实测数据与模拟数据对比

Tab. 4 Comparison of simulation data and measurement data of research objects

| 研究对象 | 内容   | $E(\text{测点 } 1)/lx$ | $E(\text{测点 } 2)/lx$ | $E(\text{测点 } 3)/lx$ |
|------|------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 窑洞 1 | 实测数据 | 83.7                 | 3.4                  | 1.1                  |
|      | 模拟数据 | 81.2                 | 1.0                  | 0                    |
| 窑洞 2 | 实测数据 | 125.2                | 16.9                 | 5.1                  |
|      | 模拟数据 | 121.3                | 16.7                 | 5.0                  |
| 窑洞 3 | 实测数据 | 14.9                 | 2.2                  | 0.3                  |
|      | 模拟数据 | 14.7                 | 1.7                  | 0                    |

模拟点与实测点的均方根误差和归一化平均偏差均控制在 $\pm 10\%$ 以内,远低于 EN 1791—39《2009 ASHRAE handbook fundamentals》<sup>[15]</sup>规定的 $\pm 25\%$ 误差标准。实测数据与模拟数据产生的误差主要是因为实际材料的透光性参数与模拟软件透光性参数存在不同。在实际情况下,室内家具等存在反射光线,仪器本身存在磨损情况;而在模拟情况下,只考虑永久固定的顶棚、地面、墙面,只计算 3 次光线反射之间产生的误差。因此,模拟软件具有较高的准确性和可靠性。

## 3 靠崖窑光环境提升策略

### 3.1 靠崖窑天然光环境提升策略影响因素

3.1.1 靠崖窑天然光环境单因素影响 人马寨村王宅作为具有历史价值的传统民居建筑,其改造策略的制定需遵循以下原则:在改造过程中,不得破坏建筑原有结构,保持传统风貌特征,且加装的采光装置应具备可拆卸性。

基于上述原则提出 3 种室内天然采光优化方案:

- 1) 采用高透射比采光玻璃替换原有玻璃,以提高透光效率;
- 2) 在室内饰面涂刷浅色涂料,增强天然光的反射效果;
- 3) 结合现有通风口,加装被动式采光通风一体化装置(导光管),以提升室内光照强度。

多点漫射可调节的导光通风管示意图,如图 5 所示。

针对靠崖窑窑体建筑结构特征,采用垂直导光管将降低导光管系统效率。因此,利用窑脸通风窗,设计并申请了实用新型专利<sup>[16]</sup>。该装置具有安装便捷、可拆卸的特点,在增加室内天然光照度的同时,还可实现通风调节功能,用户可根据实际需求灵活控制其开启与关闭。

导光通风管加装策略剖面图,如图 6 所示。

为量化评估靠崖窑室内采光改善效果,综合考虑采光现状、建筑风貌保护、结构安全性和经济性等因素,对 3 种天然采光优化方案的影响因素进行系统分析。

1) 高透射比采光玻璃替换方案(因素 A):根据 GB 50033—2013《建筑采光设计标准》<sup>[13]</sup>,结合经济性考量,选用透射比为 0.92 的 3 mm 透明亚克力玻璃(因素 A1)作为优化材料。

2) 室内浅色饰面涂料方案(因素 B):该方案涉及墙面、顶棚和地面的饰面处理。根据 GB 50033—2013《建筑采光设计标准》<sup>[13]</sup>,墙面与顶棚采用反射系数最高的石膏涂料,反射系数为 0.91(因素 B1);地面则采用反射系数为 0.75 的白水泥涂料(因素 B2),以最大限度提升光反射效果。

3) 导光管加装方案(因素 C):选用 DS530 型多点漫射可调节导光通风管,根据各窑洞采光现状差异确定支管数量(窑洞 1 安装 3 个支管(因素 C1),窑洞 2 安装 2 个支管(因素 C2),窑洞 3 安装 4 个支管(因素 C3))。

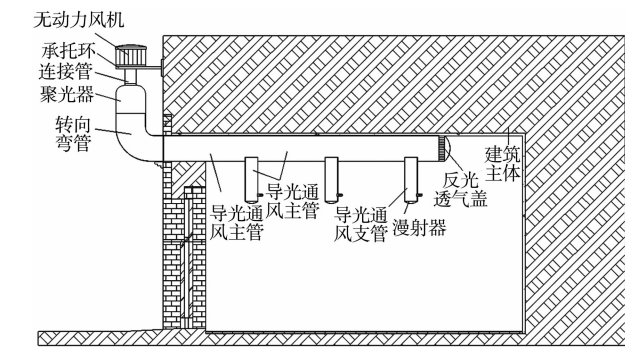


图 5 多点漫射可调节的导光通风管示意图  
Fig. 5 Light guided ventilation duct with adjustable multi-point diffusion

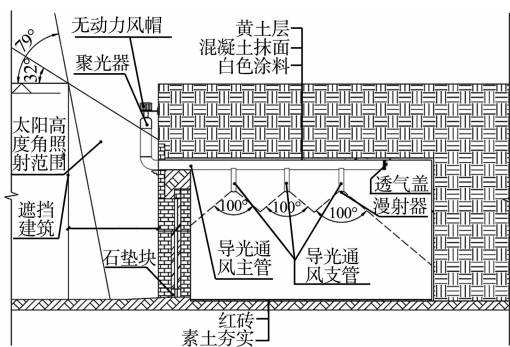


图 6 导光通风管加装策略剖面图  
Fig. 6 Section of installation strategy of light ventilation pipe

导光管漫射器角度设置在  $100^{\circ}$  左右时,能够提供较为稳定的照度输出<sup>[17]</sup>。然而,导光管系统的效率会随着管道长度的增加和弯管数量的增多而降低,且各支管的系统效率存在显著差异。导光管顶部的无动力风帽在室内外温差超过  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  或风速达到  $0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,即可启动旋转换气功能,其排气口平均风速可达  $3.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。根据 JGJ/T 374—2015《导光管采光系统技术规程》<sup>[18]</sup> 的相关规定,确定导光管等效长度。导光管采光系统效率( $\eta$ )<sup>[19-20]</sup> 的计算式为

$$\eta=\tau_1\times\eta_{\text{TTE}}\times\tau_2。$$

上式中: $\tau_1$  为集光器的可见光透射比; $\tau_2$  为漫射器的透射比; $\eta_{\text{TTE}}$  为导光管的传输效率。

根据导光管反射膜材料反射比及其等效长度计算公式,参照各等效长度直管导光管传输效率,得出  $\eta$  和带有弯曲角度的导光管传输效率参考值。

导光管的等效长度( $V$ )计算式为

$$V=L/D。$$

上式中: $L$  为导光管的长度; $D$  为导光管的直径。

河南地区太阳高度角范围为  $32^{\circ}\sim79^{\circ}$ ,集光器和漫射器均采用透光率达 0.99 的 AR(增透)镀膜玻璃( $T_1$ 、 $T_2$ ),计算得出各支管的系统效率。各支管采光系统效率,如表 5 所示<sup>[21-22]</sup>。

表 5 各支管系统采光效率

Tab. 5 Lighting efficiency of each branch pipe system

| 研究对象 | $\eta$ |      |      |      |
|------|--------|------|------|------|
|      | 支管 1   | 支管 2 | 支管 3 | 支管 4 |
| 窑洞 1 | 0.86   | 0.83 | 0.80 | —    |
| 窑洞 2 | 0.86   | 0.82 | —    | —    |
| 窑洞 3 | 0.87   | 0.84 | 0.81 | 0.78 |

由表 5 可知:3 个窑洞的单一优化方案均无法完全满足研究对象的采光要求。

3.1.2 靠崖窑天然光环境多因素组合策略 单一优化措施难以完全满足采光改善需求。因此,将上述优化方案进行系统整合,形成了 4 种组合改造策略:策略 1 为 AC 组合;策略 2 为 BC 组合;策略 3 为 AB 组合;策略 4 为 ABC 组合。窑洞组合改造策略,如表 6 所示。

表 6 窑洞组合改造策略

Tab. 6 Renovation strategies of cave dwelling combination

| 措施   | 窑洞 1 组合  | 窑洞 2 组合  | 窑洞 3 组合  |
|------|----------|----------|----------|
| 策略 1 | A1C1     | A1C2     | A1C3     |
| 策略 2 | B1B2C1   | B1B2C2   | B1B2C3   |
| 策略 3 | A1B1B2   | A1B1B2   | A1B1B2   |
| 策略 4 | A1B1B2C1 | A1B1B2C2 | A1B1B2C3 |

### 3.2 改造策略应用及效果对比

针对 3 个典型研究空间,采用 Dali 软件进行 4 种优化策略的模拟分析,重点评估各策略下的室内照度和采光系数变化。

模拟分析过程数据,如图 7、8,表 7~12 所示。

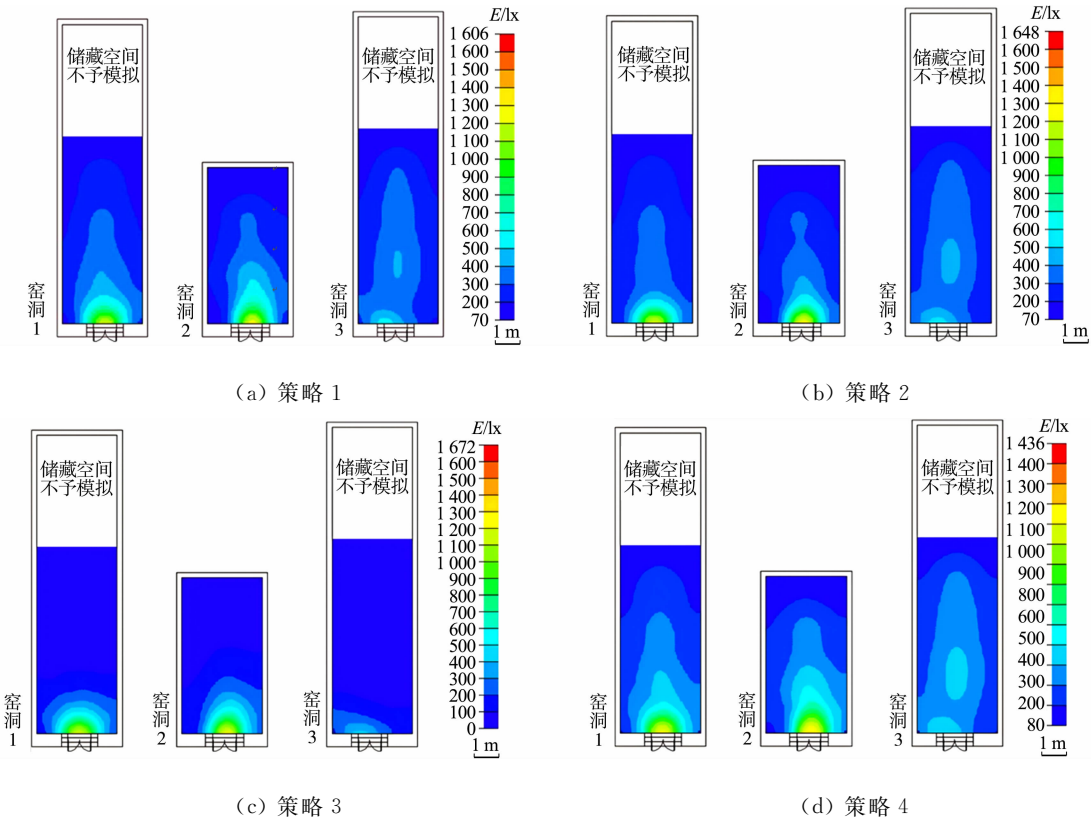


图 7 各策略采光照度模拟

Fig. 7 Simulation of lighting illumination of each strategy

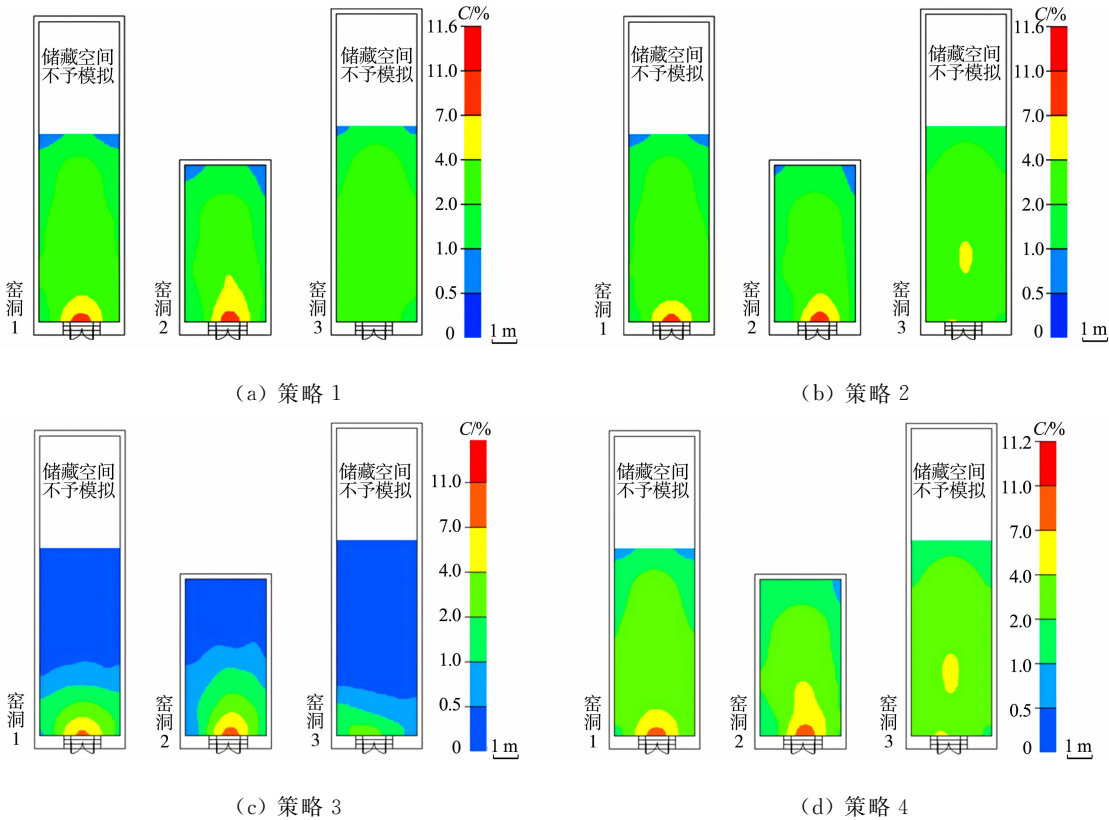


图 8 各策略采光系数模拟

Fig. 8 Simulation of lighting coefficient of each strategy



表 7 窑洞 1 各策略室内天然光照度分布情况  
Tab. 7 Distribution of indoor natural illuminance in cave 1 for each strategy

| 措施   | $E_{\min}/lx$ | $E_{\max}/lx$ | $\bar{E}/lx$ |
|------|---------------|---------------|--------------|
| 策略 1 | 65            | 1 606         | 288          |
| 策略 2 | 71            | 1 572         | 279          |
| 策略 3 | 2             | 1 546         | 116          |
| 策略 4 | 81            | 1 415         | 304          |

表 8 窑洞 1 各策略室内采光系数占比模拟分析  
Tab. 8 Simulation analysis of indoor lighting coefficient proportion in cave 1 for each strategy

| 措施   | $P(\text{极差})/\%$ | $P(\text{差})/\%$ | $P(\text{一般})/\%$ | $P(\text{好})/\%$ | $P(\text{极好})/\%$ | $\bar{C}/\%$ |
|------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|--------------|
| 策略 1 | 0                 | 4                | 28                | 65               | 3                 | 2.52         |
| 策略 2 | 0                 | 3                | 29                | 65               | 2                 | 2.46         |
| 策略 3 | 63                | 13               | 13                | 8                | 2                 | 0.77         |
| 策略 4 | 0                 | 3                | 22                | 72               | 3                 | 2.64         |

表 9 窑洞 2 各策略室内天然光照度分布情况  
Tab. 9 Distribution of indoor natural illumination in cave 2 for each strategy

| 措施   | $E_{\min}/lx$ | $E_{\max}/lx$ | $E/lx$ |
|------|---------------|---------------|--------|
| 策略 1 | 87            | 1 599         | 300    |
| 策略 2 | 93            | 1 648         | 284    |
| 策略 3 | 22            | 1 672         | 119    |
| 策略 4 | 113           | 1 436         | 331    |

表 10 窑洞 2 各策略室内采光系数占比模拟分析  
Tab. 10 Simulation analysis of indoor lighting coefficient proportion in cave 2 for each strategy

| 措施   | $P(\text{极差})/\%$ | $P(\text{差})/\%$ | $P(\text{一般})/\%$ | $P(\text{好})/\%$ | $P(\text{极好})/\%$ | $\bar{C}/\%$ |
|------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|--------------|
| 策略 1 | 0                 | 4                | 36                | 56               | 5                 | 2.52         |
| 策略 2 | 0                 | 2                | 39                | 56               | 4                 | 2.42         |
| 策略 3 | 47                | 21               | 18                | 11               | 3                 | 1.12         |
| 策略 4 | 0                 | 1                | 32                | 62               | 5                 | 2.69         |

表 11 窑洞 3 各策略室内天然光照度分布情况  
Tab. 11 Distribution of indoor natural illumination in cave 3 for each strategy

| 措施   | $E_{\min}/lx$ | $E_{\max}/lx$ | $E/lx$ |
|------|---------------|---------------|--------|
| 策略 1 | 78            | 694           | 294    |
| 策略 2 | 93            | 680           | 293    |
| 策略 3 | 3             | 588           | 51     |
| 策略 4 | 102           | 587           | 303    |

表 12 窑洞 3 各策略室内采光系数占比模拟分析  
Tab. 12 Simulation analysis of indoor lighting coefficient proportion in cave 3 for each strategy

| 措施   | $P(\text{极差})/\%$ | $P(\text{差})/\%$ | $P(\text{一般})/\%$ | $P(\text{好})/\%$ | $P(\text{极好})/\%$ | $\bar{C}/\%$ |
|------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|--------------|
| 策略 1 | 0                 | 2                | 20                | 78               | 0                 | 2.61         |
| 策略 2 | 0                 | 0                | 15                | 85               | 0                 | 2.78         |
| 策略 3 | 80                | 12               | 6                 | 2                | 0                 | 0.34         |
| 策略 4 | 0                 | 0                | 15                | 85               | 0                 | 2.82         |

3.3 通风效果

导光通风管的引入对窑洞室内风环境产生了显著影响。为量化评估其通风效果,在加装导光通风管前后的室内(通风状况),采用绿建斯维尔通风软件 Vent 对 3 个窑洞进行模拟分析。模拟结果表明,导光通风管有效增强了窑洞夏季室内空气的循环流动,显著改善了室内风速分布。这一改进对于缓解窑洞内部潮湿问题具有积极作用。

窑洞夏季改造前后剖面通风模拟对比图,如图 9 所示。图 9 中: $v$  为风速。

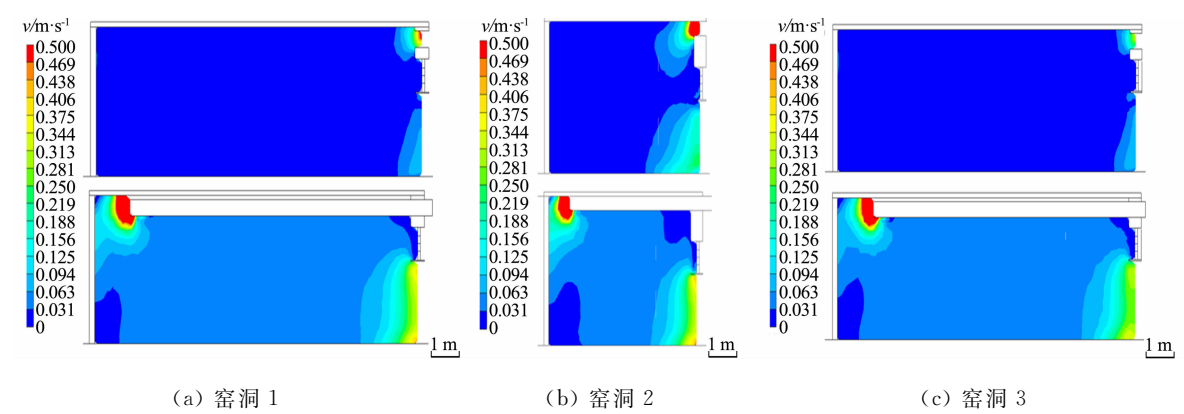


图 9 窑洞夏季改造前后剖面通风模拟对比图

Fig. 9 Comparison of ventilation simulation before and after renovation of cave in summer

3.4 改造策略选择与分析

针对采光条件分别为差、较差和极差的 3 种典型居住功能窑洞,提出了相应的改造策略。提出的策略不仅能够改善目标窑洞的采光状况,同时还能优化室内通风环境,且这些策略同样适用于其他采光条件较好的窑洞。改造策略达标情况,如表 13 所示。

表 13 改造策略达标情况

Tab. 13 Standards of renovation strategies

| 研究对象 | 措施   | 内容                | 改善情况         |
|------|------|-------------------|--------------|
| 窑洞 1 | 策略 1 | 平均天然光照度<br>平均采光系数 | 不达标(表 7、8)   |
|      | 策略 2 | 平均天然光照度<br>平均采光系数 | 不达标(表 7、8)   |
|      | 策略 3 | 平均天然光照度<br>平均采光系数 | 不达标(表 7、8)   |
|      | 策略 4 | 平均天然光照度<br>平均采光系数 | 达标(表 7、8)    |
| 窑洞 2 | 策略 1 | 平均采光系数<br>采光平均时数  | 达标(表 9、10)   |
|      | 策略 2 | 平均天然光照度<br>平均采光系数 | 不达标(表 9、10)  |
|      | 策略 3 | 平均天然光照度<br>平均采光系数 | 不达标(表 9、10)  |
|      | 策略 4 | 平均天然光照度<br>平均采光系数 | 达标(表 9、10)   |
| 窑洞 3 | 策略 1 | 平均天然光照度<br>平均采光系数 | 不达标(表 11、12) |
|      | 策略 2 | 平均天然光照度<br>平均采光系数 | 不达标(表 11、12) |
|      | 策略 3 | 平均天然光照度<br>平均采光系数 | 不达标(表 11、12) |
|      | 策略 4 | 平均天然光照度<br>平均采光系数 | 达标(表 11、12)  |

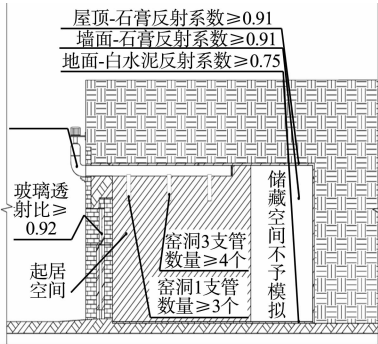
由表 13 可知以下 2 点结论。

1) 对于窑洞 1、3,仅策略 4(表 5、6,图 10(b))能够同时满足平均天然光照度和采光系数的标准要求。主要归因于窑洞 1、3 均采用北向单侧采光模式,并具有一定的空间进深,窑洞 1 的窑脸受到部分遮挡,而窑洞 3 的窑脸则处于完全遮挡状态(图 10(a))。

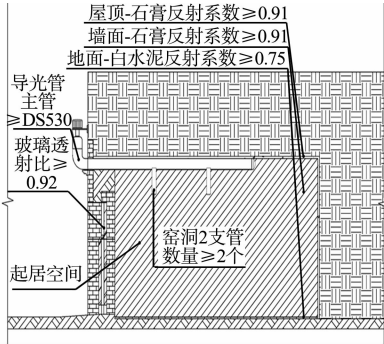
2) 对于窑洞 2,由于窑脸前无任何遮挡物(图 10(a)),策略 1、4 均能达到采光标准,而基于经济性考量,宜采用策略 1 进行改造(表 5、6,图 10(c))。



(a) 窑脸遮挡图



(b) 窑洞 1、3 图纸



(c) 窑洞 2 图纸

图 10 窑洞图纸

Fig. 10 Drawings of cave

## 4 经济效益估算

### 4.1 年节电费用

根据 GB/T 50034—2013《建筑照明设计标准》的相关规定,卧室照明满足照度为 150 lx<sup>[23]</sup>。节电项目概算,如表 14 所示。

表 14 节电项目概算

Tab. 14 Budget estimations for power-saving projects

| 参数                       | 数值       | 参数                     | 数值    |
|--------------------------|----------|------------------------|-------|
| 室内建筑面积/m <sup>2</sup>    | 90.83    | 照明平均时长/h               | 10    |
| 照明功率密度/W·m <sup>-2</sup> | 6        | 民用电费/元·度 <sup>-1</sup> | 0.56  |
| 年照明时间/d                  | 365      | 镇流器耗电比/%               | 20~30 |
| 年节电费用/元                  | 1 392.42 |                        |       |

### 4.2 成本

鉴于导光管系统的使用周期为 25 a,期间无需进行维修管理,同时,室内装修的后期维护费用难以准确预估,故仅针对采光改造的一次性增量投入成本进行计算。增量成本分项内容如下:墙的面积为 83.61 m<sup>2</sup>,石膏粉刷材料单价为 1 000 元·t<sup>-1</sup>,预算总价为 66.89 元,增量成本为 66.89 元;屋顶的面积为 61.45 m<sup>2</sup>,石膏粉刷材料单价为 1 000 元·t<sup>-1</sup>,预算总价为 49.16 元,增量成本为 49.16 元;地面的面积为 45.57 m<sup>2</sup>,白水泥抹面材料单价为 1 000 元·t<sup>-1</sup>,预算总价为 89.35 元,增量成本为 89.35 元;玻璃面积为 2.61 m<sup>2</sup>,3 mm 透明亚克力材料单价为 8 元·m<sup>-2</sup>,预算总价为 20.88 元,增量成本为 66.89 元;导光管有 3 个,规格为 DS530×3,材料单价为 4 000 元·个<sup>-1</sup>,预算总价为 12 000 元,增量成本为 12 000 元;增量成本合计 12 226.28 元。

### 4.3 投资回收期

采用投资回收期( $T$ )作为经济可行性评估指标<sup>[24]</sup>,计算公式为

$$T=M/N。(1)$$

式(1)中: $M$ 为采光改造总成本; $N$ 为年节电费用。

根据计算, $T=12\,226.28/1\,392.42=8.8$  a。因此,改造投资可在 10 a 内收回成本,该改造策略具有经济可行性。

## 5 结论

1) 通过对豫中地区 3 个典型靠崖窑民居建筑的现状实测与模拟数据分析发现,研究对象作为居住功能的窑洞普遍存在室内天然采光不足的问题,其采光指标未能达到相关规范要求。

2) 基于保护地域性建筑风貌、维持原有结构完整性,以及确保经济可行性等原则,对 3 个窑洞模拟各种改造策略,并对其效果进行了评估。对于天然采光较差的窑洞,宜采用提高玻璃透射比与导光管的技术解决方案。对于天然采光极差和差的窑洞,宜采用提高玻璃透射比、浅色内墙粉刷与导光管的综合

改造方案。天然光平均照度和采光系数达到规范要求,同时,有效改善室内空气流通状况。

3) 经济效益分析显示,提出的改造策略组合具有较好的经济可行性。经估算,相关改造措施的一次性投入成本可在 10 a 内收回,具有可实施价值。

参考文献:

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国传统建筑解析与传承: 河南卷[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.

[2] 做满常, 渠滔, 王放. 中国民居建筑丛书: 河南民居[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

[3] 王军, 靳亦冰, 师立华. 中国传统民居建筑建造技术: 窑洞[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.

[4] 郑海, 杨红霞. 陕北地区新型农居冬季室内热环境评价与分析[J]. 建筑节能(中英文), 2021, 49(9): 146-150, 177.

[5] 李知昊, 蒙慧玲. 山西传统砖箍窑洞围护结构节能改造研究[J]. 建筑节能(中英文), 2022, 50(11): 58-62.

[6] 党雨田, 庄惟敏, 常强. 黄土高原地区传统崖窑的立面空间研究[J]. 建筑学报, 2020, 21(增刊 1): 92-97.

[7] ELIZABETH L, ADAMS C. Alternative construction: Contemporary natural building methods[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.

[8] 孙跃杰, 张芳芳. 洛阳市靠山窑民居太阳能改造及后效评估[J]. 建筑技术开发, 2017, 44(21): 3-4.

[9] 刘红莉. 豫西窑居建筑室内物理环境测试分析及模拟研究[D]. 西安: 长安大学, 2021. DOI: 10. 26976/d. 2021. 001807.

[10] 纪哲. 榆林南部窑居建筑地域适应性及更新设计研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021. DOI: 10. 27393/d. 2021. 000673.

[11] 毕昕, 侯智松, 麻永建, 等. 豫西地坑院民居建筑室内采光分析及提升策略研究[J]. 建筑科学, 2022, 38(12): 76-84. DOI: 10. 13614/j. 11-1962/tu. 2022. 12. 10.

[12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 采光测量方法: GB/T 5699—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑采光设计标准: GB 50033—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑环境通用规范: GB 55016—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.

[15] AMERICAN SOCIETY OF HEATING. 2009 ASHRAE handbook fundamentals: EN 1791—39[S]. Atlanta: American Society of Heating, 2009.

[16] 毕昕, 侯智松, 陈伟莹, 等. 一种多点漫射可调节的导光通风管: 202220832595. 7[P]. 2022-09-13.

[17] 李建颖. 西安市高校体育馆夏季室内热环境研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.

[18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 导光管采光系统技术规程: JGJ/T 374—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

[19] 吴新汶, 王春苑, 欧阳金龙. 利用 TracePro 模拟分析导光管的传输效率[J]. 照明工程学报, 2020, 31(2): 145-150.

[20] 罗涛, 林若慈, 王书晓. 天然光导光系统分类及全年采光动态模拟[J]. 建筑科学, 2007, 119(6): 4-8.

[21] 林国成. 自然光导入照明系统[J]. 现代建筑电气, 2013, 4(2): 30-36, 41. DOI: 10. 16618/j. 1674-8417. 2013. 02. 009.

[22] MOHAMMED A, DAVID C. Tubular guidance systems for daylight: Achieved and predicted installation performances[J]. Applied Energy, 83(7): 774-788. DOI: 10. 1016/j. 2005. 08. 001.

[23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑照明设计标准: GB/T 50034—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

[24] 王永祥, 谢丽. 南昌既有建筑节能改造技术经济分析[J]. 华东交通大学学报, 2010(5): 17-21.

(责任编辑: 陈志贤      英文审校: 方德平)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202412014



# C5-12 启动子降低 rAAV1 介导的基因递送后转基因的免疫反应

王晓<sup>1</sup>, 黄晓平<sup>2</sup>, 黎玲<sup>1</sup>, 张红<sup>1</sup>, 刁勇<sup>1</sup>

(1. 华侨大学 医学院, 福建 泉州 362021;

2. 泉州师范学院 化工与材料学院, 福建 泉州 362000)

**摘要:** 通过转基因表达测定、体外抗原递呈、转导阳性细胞清除等实验,探索 C5-12 启动子在减少或消除针对卵清蛋白(OVA)的免疫反应的作用。实验结果表明:在小鼠成肌细胞 C2C12 中,C5-12 启动子不影响 OVA 的表达,而在小鼠骨髓树突状细胞 JAWS II 中,C5-12 启动子显著抑制 OVA 表达和 OVA 抗原肽的递呈;肌肉给药后,C5-12 启动子能维持 OVA 在肌肉组织中持续高表达,体液免疫维持较低水平,肌肉组织中免疫反应较轻且转导阳性细胞清除明显减少。

**关键词:** C5-12 启动子;重组腺相关病毒(rAAV);免疫反应;转基因;卵清蛋白(OVA)

中图分类号: Q 78

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2025)04-0435-07

## C5-12 Promoter Reduces Transgene Immune Response Following rAAV1-Mediated Gene Delivery

WANG Xiao<sup>1</sup>, HUANG Xiaoping<sup>2</sup>, LI Ling<sup>1</sup>,  
ZHANG Hong<sup>1</sup>, DIAO Yong<sup>1</sup>

(1. School of Medicine, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;

2. College of Chemical Engineering and Materials Sciences, Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, China)

**Abstract:** The efficacy of the C5-12 promoter in reducing or abolishing the immune response against ovalbumin (OVA) was explored through experiments such as determination of transgene expression, *in vitro* antigen presentation, and the clearance of transduced positive cells. The experimental results showed that in mouse myoblasts C2C12, the C5-12 promoter had no impact on the expression of OVA, while in mouse bone marrow dendritic cells JAWS II, the C5-12 promoter significantly inhibited both the expression of OVA and the presentation of OVA antigenic peptides. After muscle administration, the C5-12 promoter could maintain the continuous high expression of OVA in muscle tissues, the humoral immunity remained at a relatively low level, the immune response in muscle tissues was relatively mild, and the clearance of transduced positive cells was significantly reduced.

**Keywords:** C5-12 promoter; recombinant adeno-associated virus (rAAV); immune response; transgene; ovalbumin (OVA)

收稿日期: 2024-12-20

通信作者: 刁勇(1967—),男,教授,博士,博士生导师,主要从事基因药物的研究。E-mail: diaoyong@hqu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(81502687, 81371669);福建省自然科学基金资助项目(2021J01439);福建省泉州市科技计划项目(2020C061);福建省高等教育协会 2022 年高等教育科学研究实验室研究专项(22FJSYYB006)

在传染性疾病的防治领域,骨骼肌已成为外源性生产、分泌相关治疗药物极具吸引力的靶向组织之一<sup>[1]</sup>。重组腺相关病毒(rAAV)具备无致病性、低免疫原性、介导外源基因长期表达等多重优势特性,且宿主范围广泛。因此,rAAV 成为当下基因治疗领域最具发展潜力与前景的载体<sup>[2-7]</sup>。大量研究表明,rAAV 具备在多种组织(肌肉组织尤为典型)中进行转基因传递和表达的能力<sup>[8]</sup>。最近,rAAV 的应用范畴得到进一步拓展,rAAV 被用于表达外源广谱中和抗体,或者修饰 CD4-Ig<sub>s</sub>,旨在预防艾滋病<sup>[9-11]</sup>、丙型肝炎<sup>[12]</sup>、疟疾<sup>[13]</sup>和流感<sup>[14]</sup>等感染性疾病。然而,这些方法存在的主要局限是 rAAV 介导的基因递送可导致转基因特异性免疫反应<sup>[15]</sup>,甚至进一步引发针对内源性蛋白的自身免疫现象<sup>[16-17]</sup>。

抗原呈递细胞(APC)的不良转导是转基因诱导的免疫反应的一个众所周知的原因,它会触发宿主对 rAAV 表达的转基因产物的免疫<sup>[18-19]</sup>。在专职 APC(如树突状细胞(DC)、巨噬细胞和 B 淋巴细胞)中,DC 是宿主中最重要的细胞类型,有着最广泛的抗原呈递范围。因此,rAAV 转导 DC 可促使转基因肽表位展示于 MHC I 类分子上,进而激活细胞毒性 CD8<sup>+</sup>T 淋巴细胞(CTL)来清除表达外源蛋白的细胞。C5-12 启动子最初是在筛选 C2C12 肌管中的转基因表达时发现的,它能启动基因在肌肉细胞中实现高表达,并在质粒载体转导肌肉组织的实验中得到证实<sup>[20-21]</sup>。此外,C5-12 启动子已被证明在转基因动物中具有肌细胞特异性,使用它不仅可以达到与传统巨细胞病毒(CMV)启动子驱动的表达系统相当的 F. IX 表达水平<sup>[22]</sup>,还能限定转基因在肌肉组织中表达,消除转基因诱导的免疫反应。基于此,本文构建新型重组 rAAV 载体 rAAV-C5-12-OVA,并对其在小鼠体内的作用效果进行分析。

1 材料与方法

1.1 材料

DMEM 培养基、1640 培养基、小鼠成肌细胞 C2C12、胎牛血清(武汉市普诺赛生命科技有限公司);小鼠骨髓树突状细胞 JAWS II (深圳市赛奥斯科技有限公司);聚乙烯亚胺(PEI,美国 Polysciences 公司);卵清蛋白(OVA)、人抗卵清蛋白 IgG 酶联免疫吸附测定试剂盒(上海市瑞番科技有限公司)。

1.2 rAAV 载体的构建与制备

依据实验室建立的三质粒包装系统进行 rAAV 的包装。首先,将 293T 接种于 15 cm 培养皿中,进行为期 3 d 的培养,待细胞密度达 85%,将转基因质粒、衣壳质粒和辅助质粒按照 1 : 1 : 3 的摩尔比与 PEI 充分混合,静置 10 min 后,添加至培养皿中,转染持续 6 h 后,更换为完全 DMEM 培养基,继续培养至 72 h 后,收获细胞。然后,超声破碎细胞、全能核酸酶(Benzonase)消化,采用氯化铯梯度离心法对 rAAV 进行分离,通过透析密度梯度离心进一步纯化 rAAV,从而获得符合实验要求的 rAAV 载体。最后,对 rAAV 进行实时荧光定量聚合酶链式反应(qPCR)分析。

1.3 OVA 和抗 OVA 抗体质量浓度的测定

采用酶联免疫吸附测定(ELISA)法对细胞培养上清、血清中 OVA 和血清中 OVA 抗体进行检测,具体操作严格遵守说明书的流程。首先,酶标板中加入 100 μL 的 OVA 抗体或 OVA,室温孵育 10 h 后,吸出液体,磷酸盐缓冲液(PBS)漂洗 3 次。然后,将 100 μL 细胞培养上清或血清,与标准品分别加入酶标板中,室温孵育 1 h,吸出液体,含 Tween 20 的磷酸盐缓冲液(PBST)漂洗 3 次。接着,加入辣根过氧化物酶(HRP)标记的 OVA 抗体或抗 OVA 抗体的抗体,室温孵育 1 h,吸出液体,PBS 漂洗 3 次。最后,加入 100 μL 的 3,3',5,5'-四甲基联苯二胺(TMB)于室温显色 30 min,待显色反应充分后,加入 50 μL 1 mol · L<sup>-1</sup> 的 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 终止反应,随即使用酶标仪读取吸光值(D(450))。依据预先绘制的标准曲线,精确计算得出 OVA 及其抗体的质量浓度。

1.4 体外转染

C2C12 在含有胎牛血清(FBS,体积分数为 10%)和青霉素/链霉素(体积分数为 1%)的 DMEM 培养基中进行培养。后续使用 PolyJet 转染试剂将质粒 pAAV-CMV-OVA、pAAV-C5-12-OVA 转染至 C2C12;JAWS II 培养在含有 FBS(体积分数为 10%)、鼠 GM-CSF(5 ng · mL<sup>-1</sup>)、谷氨酰胺(4 mmol · L<sup>-1</sup>)的 α-MEM 中,培养至合适阶段后,收获 2.0 × 10<sup>6</sup> 个细胞,在室温下重悬于 100 μL 电转缓冲液里,再加入 pAAV-CMV-OVA、pAAV-C5-12-OVA,将混合样品加入电击转化杯中,并选择相应的程序进行电转,电转操作完成后继续培养 3 d。最后,收集细胞培养上清液,测定 OVA 质量浓度。



### 1.5 DC 体外对 OVA 抗原递呈分析

首先,用 pAAV-CMV-OVA 和 pAAV-C5-12-OVA 质粒分别电转 JAWS II ,将电转质粒 12 h 后的 JAWS II 和 B3Z 杂交瘤细胞按 1 : 1 个数比进行混合。然后,每孔接种  $1\times 10^5$  个细胞到 12 孔板中,在 37 ℃ ,CO<sub>2</sub> 体积分数为 5 % 的条件下继续培养 24 h。接着,收集细胞,弃培养上清,PBS 漂洗 2 次,加入 0.5 mL 氯酚红-β-d-吡喃半乳糖苷(CPRG)底物缓冲液,待溶液变黄后,酶标仪读取吸光值( $D(570)$ ),或在细胞中加入 X-Gal 染色液进行染色,待细胞形成蓝色产物,进行拍照,并统计阳性细胞数目。

### 1.6 动物实验

雄性 C57BL/6 小鼠(8~10 周龄)购自中国科学院上海实验动物中心,为了保障实验动物的健康状况,将其饲养于独立通风笼具(IVC)系统之中。设置对照组与实验组,每组包含了 3 只小鼠。其中,对照组的小鼠在胫骨前肌部位注射 rAAV1-CMV-OVA,注射剂量为每只小鼠  $1\times 10^{11}$  病毒基因组;实验组的小鼠在胫骨前肌部位注射 rAAV1-C5-12-OVA,注射剂量为每只小鼠  $1\times 10^{11}$  病毒基因组。

在完成注射操作 1 周后,通过眼球静脉丛进行采血,采集的血液收集至 BD 微量血清分离管内,之后每隔 1 周进行一次采血操作,如此持续至完成注射后的第 12 周。收集的血液样本将用于后续分析 OVA 质量浓度。

### 1.7 数据统计

数据用平均值±标准偏差 ( $\bar{x}\pm s$ ) 表示;结果采用 SPSS 统计学分析,\* 表示差异具有统计学意义 ( $P<0.05$ );\* \* 表示差异具有高度统计学意义 ( $P<0.01$ );ns 表示差异不具有统计学意义 ( $P>0.05$ )。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 C5-12 启动子对转基因在不同细胞中表达的影响

为了验证构建的载体在细胞中表达情况,将质粒 pAAV-C5-12-OVA、pAAV-CMV-OVA 分别转染至 C2C12 和 JAWS II 细胞,并用 ELISA 法测定 OVA 表达量(OVA 质量浓度, $\rho(\text{OVA})$ ),结果如图 1 所示。由图 1 可知:经 pAAV-CMV-OVA 转染,JAWS II 、C2C12 中 OVA 质量浓度分别为 213. 3、453. 5 ng · mL<sup>-1</sup>;经 pAAV-C5-12-OVA 转染,JAWS II 中 OVA 质量浓度仅为 18. 6 ng · mL<sup>-1</sup>,而在 C2C12 中 OVA 质量浓度为 405. 2 ng · mL<sup>-1</sup>。

因此,C5-12 启动子不影响 OVA 在 C2C12 细胞中的表达,却使转基因在 JAWS II 细胞的表达效率大幅降低,凸显了 C5-12 启动子的组织特异性。

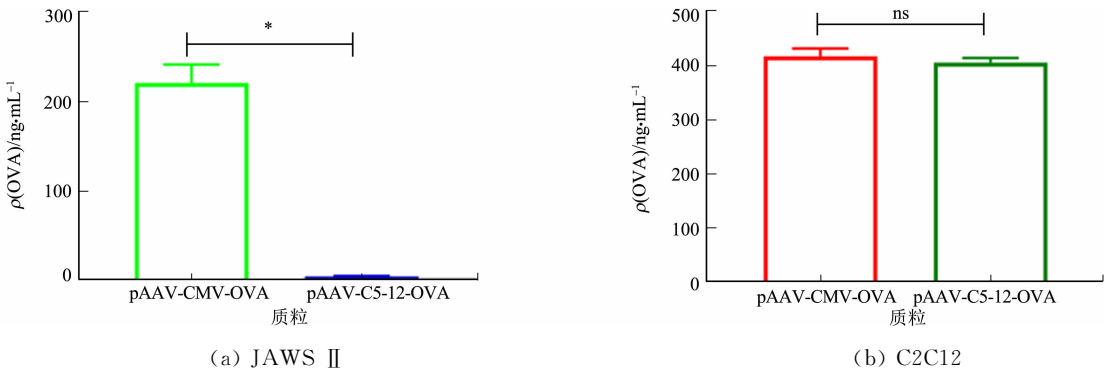


图 1 JAWS II 和 C2C12 细胞中的 OVA 质量浓度

Fig. 1 OVA mass concentration in JAWS II and C2C12 cells

### 2.2 C5-12 启动子对 OVA 抗原递呈的抑制

B3Z 细胞作为一种 CD8+T 细胞的杂合瘤细胞,具备特异性识别小鼠 Kb MHC- I 类分子上递呈的 OVA 抗原肽残基 257-264(SIINFEKL)的能力。与此同时,B3Z 细胞含有受 IL2 增强子的活化 T 细胞核因子(NFAT)元件转录控制驱动的 LacZ 报告基因,一旦 APC 细胞递呈的抗原被 B3Z 细胞识别,便会触发 LacZ 基因的表达,因此,B3Z 细胞成为检测 APC 细胞通过 MHC- I 类途径递呈 OVA 抗原的关键细胞。用 pAAV-C5-12-OVA、pAAV-CMV-OVA 转染 JAWS II 细胞后,将其与 B3Z 细胞共培养。

活化的 B3Z 细胞原位染色,如图 2 所示。对活化的 B3Z 细胞进行 β-半乳糖苷酶定量分析,结果如

图 3 所示。由图 2、3 可知:经 LacZ 原位染色后,转染 pAAV-CMV-OVA 组中表达  $\beta$ -半乳糖苷酶的 B3Z 细胞明显增多,转染 pAAV-C5-12-OVA 组中活化的 B3Z 细胞则明显减少;CPRG 底物显色结果与原位染色结果基本一致,转染 pAAV-C5-12-OVA 组的吸光度明显小于转染 pAAV-CMV-OVA 组。

因此,pAAV-C5-12-OVA 在 JAWS II 细胞中的 OVA 表达量大幅降低,进而使递呈到细胞膜表面的 SIINFEKL 抗原肽显著减少,进一步说明了 C5-12 启动子的特异性。

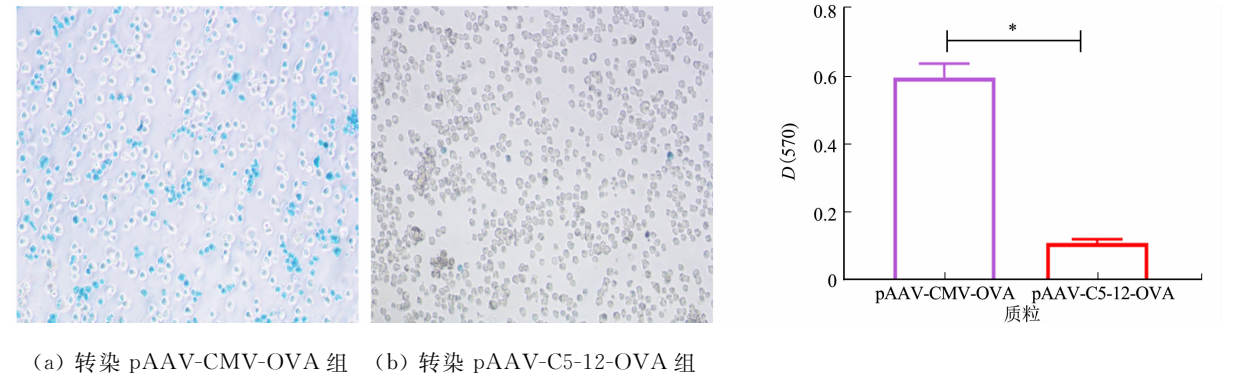


Fig. 2 Activated B3Z cells stained *in situ*

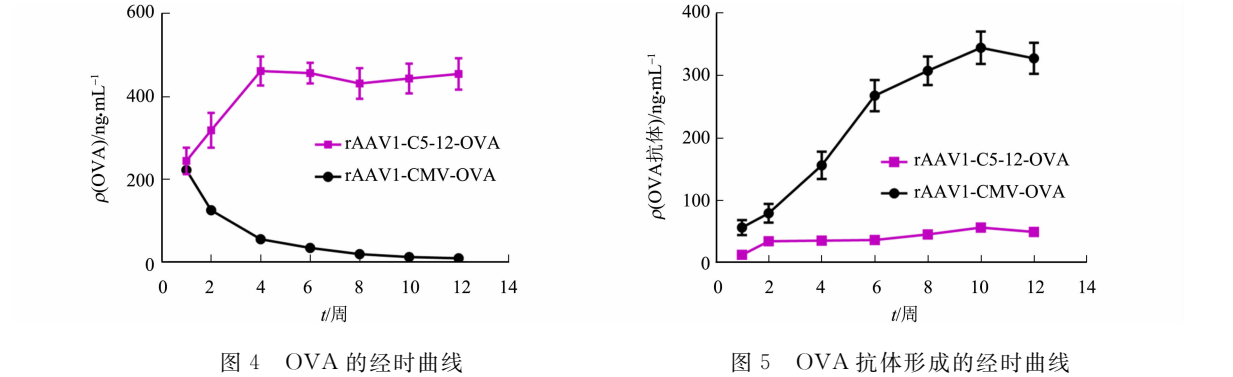
Fig. 3 Quantitative analysis of  $\beta$ -galactosidase

2.3 C5-12 启动子对 OVA 表达和抗体形成的影响

小鼠血清中的 OVA 和 OVA 抗体形成的经时曲线,如图 4、5 所示。图 4、5 中: $t$  为时间; $\rho$ (OVA 抗体)为 OVA 抗体的质量浓度。

由图 4、5 可知:注射 rAAV1-C5-12-OVA 的小鼠,其循环系统中产生高水平且持续稳定的 OVA 表达,与此同时,OVA 抗体(IgG)水平非常低;注射 rAAV1-CMV-OVA 的小鼠在治疗后 2 周,循环系统中 OVA 质量浓度出现急剧下降的态势,并且随着时间的推移,这一现象还伴随着 OVA 抗体水平的持续攀升。

因此,通用的 CMV 启动子使 OVA 转基因引发机体免疫反应,而将 C5-12 启动子整合到 OVA 表达盒中,能够有效规避这种因转基因诱发的免疫。



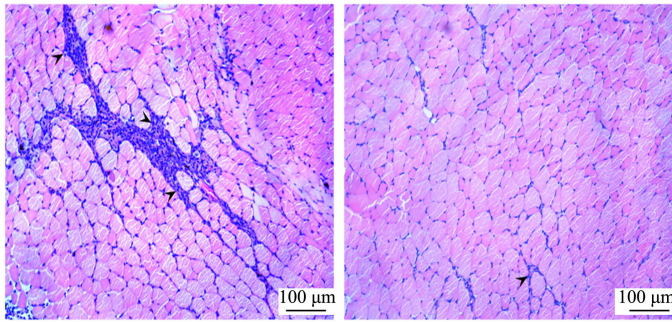
2.4 C5-12 启动子减少转导细胞清除

为进一步对肌肉注射 rAAV 后转导阳性细胞的状况予以验证,对小鼠胫骨前肌经过固定、H&E 染色,分析肌肉组织中 rAAV 基因组的情况。

rAAV1-OVA 肌肉注射后组织 H&E 分析,如图 6 所示。由图 6 可知:注射 rAAV1-CMV-OVA 的小鼠肌肉中出现了大量炎症细胞浸润的现象,直接导致 rAAV 转导细胞被清除。

经过 qPCR 分析,可得肌肉组织每微克 DNA 中 OVA 基因拷贝数( $n$ ),结果如图 7 所示。由图 7 可知:rAAV1-CMV-OVA 组每微克 DNA 中 OVA 基因拷贝数为  $58 \pm 2$ ,而 rAAV1-C5-12-OVA 组每微克 DNA 中 OVA 基因拷贝数为  $1\,358 \pm 25$ 。这一基因拷贝数的分析结果与 H&E 染色结果一致,即炎症细胞的浸润及体内循环的 OVA 抗体共同作用促使转导阳性细胞被清除,而 C5-12 启动子则展现出独特优势,它能够有效减弱免疫反应,抑制转导阳性细胞的清除和 OVA 抗体的产生。由此证明特异性启

动子是降低转基因诱导的免疫反应的一种有效方式。



(a) rAAV1-CMV-OVA 组      (b) rAAV1-C5-12-OVA 组

图 6 rAAV1-OVA 肌肉注射后组织 H&E 分析  
Fig. 6 H&E analysis of tissue after intramuscular injection of rAAV1-OVA

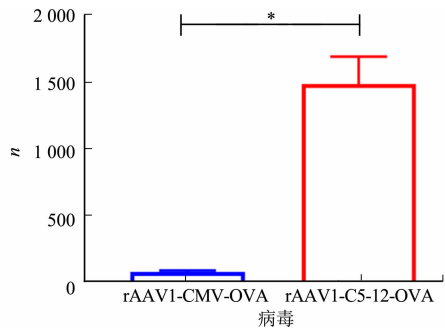


图 7 肌肉组织每微克 DNA 中 OVA 基因拷贝数  
Fig. 7 Copy number of OVA gene per microgram of DNA in muscle tissue

### 3 讨论

rAAV 是一种非常具有前途的载体，能将治疗性基因递送至多种组织，为单基因疾病治疗开辟新路<sup>[23-25]</sup>，其安全性和有效性均已在临床前和临床研究中得到证实<sup>[26-29]</sup>。肌肉是 rAAV 载体介导的基因治疗非常有吸引力的靶组织，是神经肌肉疾病、代谢紊乱和血友病基因治疗的靶组织<sup>[27,30-32]</sup>，因为它易于接近且富含血管血液供应，为分泌的蛋白质提供了有效的运输系统。然而，rAAV 肌肉递送后，常引发机体针对转基因产物的免疫反应，致使转导细胞被清除，基因表达的丧失<sup>[33]</sup>，因此，开发防止转基因产物诱导免疫反应策略成为研究热点。目前，临床多靠免疫抑制药物规避，可这些药物副作用多、易引发并发症<sup>[31-34]</sup>，难以保证预期效果，如杜氏肌营养不良症临床试验尽管使用了免疫抑制，但在 rAAV 载体肌肉递送后仍有一定程度的免疫反应发生<sup>[35-36]</sup>。探究根源，转基因诱导的免疫毒性主要由于抗原呈递细胞的不良转导，随后触发宿主对 rAAV 表达的转基因产物的免疫反应<sup>[37-39]</sup>，故避免 APC 中表达转基因产物已成为研究者的共识。

C5-12 启动子在削减针对 rAAV 肌肉内递送所产生的转基因产物免疫反应层面潜藏的巨大潜力，C5-12 启动子展现出高度的肌肉特异性，在肌肉细胞中可大量表达转基因，而在 APC 中表达量大幅降低。因此，肌肉中转基因表达得以维持，保障治疗效果。同时，OVA 抗体水平明显下降，免疫反应得到有效遏制，肌肉组织中细胞浸润明显减少。综上所述，文中的基因治疗方法像“安全锁”一样适配肌肉 rAAV 载体基因传递，可防控免疫风险，为开发更安全、有效的 rAAV 基因药物提供了新思路。

### 参考文献：

[1] WANG Dan,ZHONG Li,ABU N M,*et al.* The potential of adeno-associated viral vectors for gene delivery to muscle tissue[J]. Expert Opinion on Drug Delivery,2014,11(3):345-364. DOI:10.1517/17425247.2014.871258.

[2] HUANG Xiaoping,WANG Xiao,LI Ling,*et al.* MiR133b-mediated inhibition of EGFR-PTK pathway promotes rAAV2 transduction by facilitating intracellular trafficking and augmenting second-strand synthesis[J]. Journal of Cellular and Molecular Medicine,2023,27(18):2714-2729. DOI:10.1111/jcmm.17858.

[3] HUANG Xiaoping,WANG Xiao,REN Yanxuan,*et al.* Reactive oxygen species enhance rAAV transduction by promoting its escape from late endosomes[J]. Virology Journal,2023,20(1):2. DOI:10.1186/s12985-023-01964-w.

[4] SHEN Weiran,LIU Shengjiang,OU Li. rAAV immunogenicity, toxicity, and durability in 255 clinical trials: A meta-analysis[J]. Frontiers in Immunology,2022,13:1001263. DOI:10.3389/fimmu.2022.1001263.

[5] 刁勇,王启钊,肖卫东,等. 重组腺相关病毒基因药物的细胞免疫毒性及对策[J]. 药学报,2010,45(9):1071-1077. DOI:10.16438/j.0513-4870.2010.09.009.

[6] 刁勇,许瑞安. 重组腺相关病毒载体诱导的天然免疫反应及机制[J]. 微生物学报,2012,52(5):550-557. DOI:10.13343/j.cnki.wsxb.2012.05.002.

[7] 王晓,黄晓平,黎玲,等. 氧化应激促进重组腺相关病毒 2 型体外转导分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2022,

- 43(4):489-497. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202201036.
- [8] SAMULSKI R J, MUZYCZKA N. AAV-mediated gene therapy for research and therapeutic purposes[J]. Annual Review of Virology, 2014, 1(1):427-451. DOI:10.1146/annurev-virology-031413-085355.
- [9] BALAZS A B, CHEN J, HONG C M, *et al.* Antibody-based protection against HIV infection by vectored immunoprophylaxis[J]. Nature, 2011, 481(7379):81-84. DOI:10.1038/nature10660.
- [10] FUCHS S P, MARTINEZ-NAVIO J M, PIATAK M, *et al.* AAV-delivered antibody mediates significant protective effects against SIVmac239 challenge in the absence of neutralizing activity[J]. Plos Pathogens, 2015, 11(8): e1005090. DOI:10.1371/journal.ppat.1005090.
- [11] JOHNSON P R, SCHNEPP B C, ZHANG Jianchao, *et al.* Vector-mediated gene transfer engenders long-lived neutralizing activity and protection against SIV infection in monkeys[J]. Nature Medicine, 2009, 15(8):901-906. DOI:10.1038/nm.1967.
- [12] DE JONG Y P, DORNE M, MOMMERSTEEG M C, *et al.* Broadly neutralizing antibodies abrogate established hepatitis C virus infection[J]. Science Translational Medicine, 2014, 6(254):254ra129. DOI:10.1126/scitranslmed.3009512.
- [13] DEAL C, BALAZS A B, ESPINOSA D A, *et al.* Vectored antibody gene delivery protects against Plasmodium falciparum sporozoite challenge in mice[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(34):12528-12532. DOI:10.1073/pnas.1407362111.
- [14] LIMBERIS M P, ADAM V S, WONG G, *et al.* Intranasal antibody gene transfer in mice and ferrets elicits broad protection against pandemic influenza[J]. Science Translational Medicine, 2013, 5(187):187ra172. DOI:10.1126/scitranslmed.3006299.
- [15] BOENNEMANN C G, BELLUSCIO B A, BRAUN S, *et al.* Dystrophin immunity after gene therapy for duchenne's muscular dystrophy[J]. New England Journal of Medicine, 2023, 388(24):2294-2296. DOI:10.1056/NEJMc2212912.
- [16] CHENUAUD P, LARCHER T, RABINOWITZ J E, *et al.* Autoimmune anemia in macaques following erythropoietin gene therapy[J]. Blood, 2004, 103(9):3303-3304. DOI:10.1182/blood-2003-11-3845.
- [17] GAO Guangping, LEBHERZ C, WEINER D J, *et al.* Erythropoietin gene therapy leads to autoimmune anemia in macaques[J]. Blood, 2004, 103(9):3300-3302. DOI:10.1182/blood-2003-11-3852.
- [18] JOOSS K, YANG Y, FISHER K J, *et al.* Transduction of dendritic cells by DNA viral vectors directs the immune response to transgene products in muscle fibers[J]. Journal of Virology, 1998, 72(5):4212-4223. DOI:10.1128/JVI.72.5.4212-4223.1998.
- [19] MAYS L E, WILSON J M. The complex and evolving story of T cell activation to AAV vector-encoded transgene products[J]. Molecular Therapy, 2011, 19(1):16-27. DOI:10.1038/mt.2010.250.
- [20] DRAGHIA-AKLI R, FIOROTTO M L, HILL L A, *et al.* Myogenic expression of an injectable protease-resistant growth hormone-releasing hormone augments long-term growth in pigs[J]. Nature Biotechnology, 1999, 17(12):1179-1183. DOI:10.1038/70718.
- [21] LI Xuyang, EASTMAN E M, SCHWARTZ R J, *et al.* Synthetic muscle promoters: Activities exceeding naturally occurring regulatory sequences[J]. Nature Biotechnology, 1999, 17(3):241-245. DOI:10.1038/6981.
- [22] LIU Yilin, MINGOZZI F, RODRIGUEZ-COLON S M, *et al.* Therapeutic levels of factor IX expression using a muscle-specific promoter and adeno-associated virus serotype 1 vector[J]. Human Gene Therapy, 2004, 15(8):783-792. DOI:10.1089/1043034041648453.
- [23] PUPO A, FERNANDEZ A, LOW S H, *et al.* AAV vectors: The Rubik's cube of human gene therapy[J]. Molecular Therapy, 2022, 30(12):3515-3541. DOI:10.1016/j.ymthe.2022.09.015.
- [24] SCHULZ M, LEVY D I, PETROPOULOS C J, *et al.* Binding and neutralizing anti-AAV antibodies: Detection and implications for rAAV-mediated gene therapy[J]. Molecular Therapy, 2023, 31(3):616-630. DOI:10.1016/j.ymthe.2023.01.010.
- [25] WANG Jianghui, GESSLER D J, ZHAN Wei, *et al.* Adeno-associated virus as a delivery vector for gene therapy of human diseases[J]. Signal Transduction and Targeted Therapy, 2024, 9(1):78. DOI:10.1038/s41392-024-01780-w.
- [26] GAUDET D, DE WAL J, TREMBLAY K, *et al.* Review of the clinical development of alipogene tiparvovec gene

- therapy for lipoprotein lipase deficiency[J]. *Atherosclerosis Supplements*, 2010, 11(1): 55-60. DOI: 10. 1016/j. atherosclerosis. 2010. 03. 004.
- [27] GAUDET D, METHOT J, KASTELEIN J. Gene therapy for lipoprotein lipase deficiency[J]. *Current Opinion In Lipidology*, 2012, 23(4): 310-320. DOI: 10. 1097/MOL. 0b013e3283555a7e.
- [28] MAGUIRE A M, HIGH K A, AURICCHIO A, *et al.* Age-dependent effects of RPE65 gene therapy for Leber's congenital amaurosis: A phase 1 dose-escalation trial[J]. *Lancet*, 2009, 374 (9701): 1597-1605. DOI: 10. 1016/ s0140-6736(09)61836-5.
- [29] NATHWANI A C, ROSALES C, MCLNTOSH J, *et al.* Long-term safety and efficacy following systemic administration of a self-complementary AAV vector encoding human FIX pseudotyped with serotype 5 and 8 capsid proteins[J]. *Molecular Therapy*, 2011, 19(5): 876-885. DOI: 10. 1038/mt. 2010. 274.
- [30] HANLEY J P, JARVIS L M, ANDREWS J, *et al.* Investigation of chronic hepatitis C infection in individuals with haemophilia: Assessment of invasive and non-invasive methods[J]. *British Journal of Haematology*, 1996, 94(1): 159-165. DOI: 10. 1046/j. 1365-2141. 1996. 6192064. x.
- [31] MANNO C S, CHEW A J, HUTCHISON S, *et al.* AAV-mediated factor IX gene transfer to skeletal muscle in patients with severe hemophilia B[J]. *Blood*, 2003, 101(8): 2963-2972. DOI: 10. 1182/blood-2002-10-3296.
- [32] MENDELL J R, RODINO-KLAPAC L, SAHENK Z, *et al.* Gene therapy for muscular dystrophy: Lessons learned and path forward[J]. *Neuroscience Letters*, 2012, 527(2): 90-99. DOI: 10. 1016/j. neuwet. 2012. 04. 078.
- [33] YUASA K, SAKAMOTO M, MIYAGOE-SUZUKI Y, *et al.* Adeno-associated virus vector-mediated gene transfer into dystrophin-deficient skeletal muscles evokes enhanced immune response against the transgene product[J]. *Gene Therapy*, 2002, 9(23): 1576-1588. DOI: 10. 1038/sj. gt. 3301829.
- [34] KESSLER P D, PODSAKOFF G M, CHEN Xiaojuan, *et al.* Gene delivery to skeletal muscle results in sustained expression and systemic delivery of a therapeutic protein[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1996, 93(24): 14082-14087. DOI: 10. 1073/pnas. 93. 24. 14082.
- [35] ARRUDA V R, FAVARO P, FINN J D. Strategies to modulate immune responses: A new frontier for gene therapy[J]. *Molecular Therapy*, 2009, 17(9): 1492-1503. DOI: 10. 1038/mt. 2009. 150.
- [36] BOENNEMANN C G, BELLUSCIO B A, BRAUN S, *et al.* Dystrophin immunity after gene therapy for duchenne's muscular dystrophy[J]. *New England Journal of Medicine*, 2023, 388 (24): 2294-2296. DOI: 10. 1056/NEJMc 2212912.
- [37] HOFFMAN B E, DOBRZYNSKI E, WANG Lixin, *et al.* Muscle as a target for supplementary factor IX gene transfer[J]. *Human Gene Therapy*, 2007, 18(7): 603-613. DOI: 10. 1089/hum. 2007. 042.
- [38] MUHURI M, ZHAN Wei, MAEDA Y, *et al.* Novel combinatorial microRNA-binding sites in AAV vectors synergistically diminish antigen presentation and transgene immunity for efficient and stable transduction[J]. *Front Immunol*, 2021, 12: 674242. DOI: 10. 3389/fimmu. 2021. 674242.
- [39] XIAO Yuanyuan, MUHURI M, LI Shaoyong, *et al.* Circumventing cellular immunity by miR142-mediated regulation sufficiently supports rAAV-delivered OVA expression without activating humoral immunity[J]. *JCI Insight*, 2019, 5(13): 1-14. DOI: 10. 1172/jci. insight. 99052.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 刘源岗)



DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202501016



# 浑浊水体中模拟水生动物的识别

王孝艳<sup>1,2</sup>, 柴瑜蔓<sup>1,2</sup>, 蒲继雄<sup>1,2</sup>

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 华侨大学 福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 以浑浊水体作为模型, 研究动态散射场景中的物体识别。以模拟水生动物为例, 搭建并训练神经网络, 利用深度学习技术对水生动物的种类与数量进行识别。将未经训练的散斑图像输入训练好的神经网络, 可以输出水生动物的种类和数目。实验结果表明: 利用深度学习技术可以从浑浊水体中成功识别水生动物的种类与数量, 水生动物的数量识别准确率为 100%, 水生动物的种类识别准确率均大于 99%。

**关键词:** 水生动物; 图像识别; 动态散射; 浑浊水体; 深度学习; 神经网络

**中图分类号:** O 436

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5013(2025)04-0442-06

## Recognition of Simulated Aquatic Animal in Turbid Water Environments

WANG Xiaoyan<sup>1,2</sup>, CHAI Yuman<sup>1,2</sup>, PU Jixiong<sup>1,2</sup>

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Key Laboratory of Light Propagation and Transformation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Using turbid water as a model, this study investigates object recognition in dynamic scattering environments. Taking simulated aquatic animal as an example, a neural network is constructed and trained to identify the species and quantity of aquatic animals through deep learning techniques. When untrained speckle images are input into a trained neural network, it outputs the categories and number of aquatic animals. The experiment results demonstrate that deep learning techniques can successfully identify both the categories and quantity of aquatic animals in turbid water. The accuracy of quantity recognition reaches 100%, while the accuracy for species recognition exceeds 99% across all tested categories.

**Keywords:** aquatic animals; image recognition; dynamic scattering; turbid water; deep learning; neural network

在许多生活场景和科学研究中都存在光经过散射介质传输的现象, 例如, 雾霾环境的光学成像、烟雾场景的目标探测、多模光纤的信息传输等。由于光在散射介质的随机散射效应导致出射端的光场呈现散斑状无序分布, 这意味着原有光场信息的重新分布。从散斑场中恢复原始光场信息, 对于生物组织成像、自动驾驶、复杂环境目标识别等领域具有重要的研究意义和应用价值<sup>[1-3]</sup>。研究人员提出了一系列方法, 有效实现了透过散射介质的成像<sup>[4-6]</sup>。根据光子在散射介质中的传输特点, 可以将光子分为弹道光、蛇形光子和散射光子, 其中, 弹道光基本不与散射介质发生相互作用, 较好地保留了原有的光

**收稿日期:** 2025-01-09

**通信作者:** 王孝艳(1986—), 女, 实验师, 主要从事人工智能与光学技术结合的研究。E-mail: xiaoyan\_wang\_3@foxmail.com。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(62375092)



信息,因此,通过各种技术方法抑制散射光子,获取弹道光子,可以有效改善散射介质带来的负面影响,实现较高质量的成像结果<sup>[7-8]</sup>。随着散射程度的增加,探测器采集到的弹道光子数急剧减少,因此,利用弹道光子直接成像的方法应用于强散射场景具有较大的局限性。

近年来,研究人员提出了一些利用散射光子的新型散射成像技术。散斑相关是基于记忆效应发展的一种散射成像技术,光学的记忆效应指当入射光在一定角度范围内发生倾斜时,被介质散射而形成的散射场是一系列高度相关且具有位移不变性的散斑图样。在记忆效应范围内,Bertolotti 等<sup>[9]</sup>通过计算散斑场的自相关,获得了荧光标记物体的非侵入式成像。Katz 等<sup>[10]</sup>进一步发展了该技术,提出单帧散斑相关成像技术,在单帧散斑场的基础上,通过空间系综平均实现统计计算,但该技术受限于记忆效应,成像视场较小。光通过散射介质的传输过程可以利用传输矩阵进行描述。通过测量散射介质的传输矩阵,并进行矩阵的反演,Popoff 等<sup>[11]</sup>实现了透过散射介质的成像,但这种方法要求散射介质稳定,不适用于动态散射介质。基于波前技术也可以实现散射成像,但该技术需要优化迭代匹配的相位分布,因而相对比较耗时,同样不适用于动态散射场景<sup>[12-14]</sup>。

很多实际散射场景是动态变化的,基于传输矩阵和波前整形的散射成像方法需要散斑场在数据采集过程中保持稳定不变,显然不适用于动态散射介质。光束在散射环境中传输,光场将呈现快速变化的特性。因此,要实现动态散射环境中的成像,通常需要在单次采集散斑场的基础上,实现对被散射物体的还原,这对技术提出了更高的挑战。深度学习技术通过搭建神经网络结构并采集数据对网络进行训练,利用训练好的网络,可以在输入散斑场的基础上,还原散射介质前的物体信息<sup>[15]</sup>。研究人员提出卷积神经网络、生成对抗网络等深度学习方法实现散射成像,但这些研究大多局限于静态散射场景<sup>[16-18]</sup>。基于此,本文以浑浊水体为动态散射场景,对动态散射场景中的物体识别进行研究。

## 1 实验设计

实验装置示意图,如图 1 所示。图 1 中:L1~L3 为透镜。实验以 HNL210LB 型 He-Ne 激光器(美国 Thorlabs 公司)为光源,激光经过扩束后,入射到 Pluto VIS-006 型空间光调制器(德国 Holoeye 公司)。在空间光调制器上,加载水生动物信息,经过空间光调制器反射后的光束将携带水生动物的信息。反射光束经过水缸传输后,由 PikeF421B 型工业相机(德国 AVT 公司)采集光强。

水缸尺寸(长×宽×高)为 24.0 cm×15.5 cm×15.0 cm。为了模拟浑浊水体,将肠内营养剂(TP-HE)溶解于水中。肠内营养剂成分包含矿物质、蛋白质、脂肪和微量元素等,存在形式较为多样化,蛋白质、脂肪分别以胶体和乳浊液形式存在,矿物质和微量元素主要以溶液形式存在,因此,可较好地模拟浑浊水体这一较为复杂的动态散射场景。

实验中,TP-HE 添加量( $v$ )分别为 10、20、30 mL,水的体积为 3 L。随着 TP-HE 体积浓度的增加,水体变得更加浑浊,散射程度也随之增加。实验测量了光束经过不同体积浓度的浑浊水体的光强衰减,并将其与描述散射程度的光学厚度相联系。由实验数据测得:当 TP-HE 添加量分别为 10、20、30 mL 时,对应的光学厚度分别为 7.14、9.03、9.83。

浑浊水体的原始图像和采集图像,如图 2 所示。由图 2 可知:当 TP-HE 添加量为 10 mL 时,隐约观测到生物结构;当 TP-HE 添加量为 30 mL 时,水体呈现很强的散射效应,难以观测到原始光场信息。

以水生动物为例,对浑浊水体的目标识别进行研究。水生动物包括鱼类、贝壳类及软体动物等 10 种不同类型。将这些水生动物图像加载到空间光调制器上,当光束入射到空间光调制器,反射光束就携带了水生动物的信息,该光束最后穿过浑浊水体。利用这个设计,模拟浑浊水体中的光学成像场景,由于浑浊水体的散射效应,携带生物信息的原始光场将被扰乱,探测器采集到的光强为随机无序分布的散斑场,无法直接获取原始光场信息。

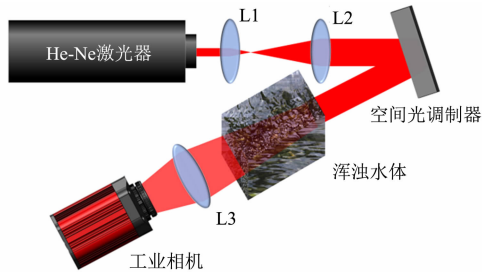


图 1 实验装置示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

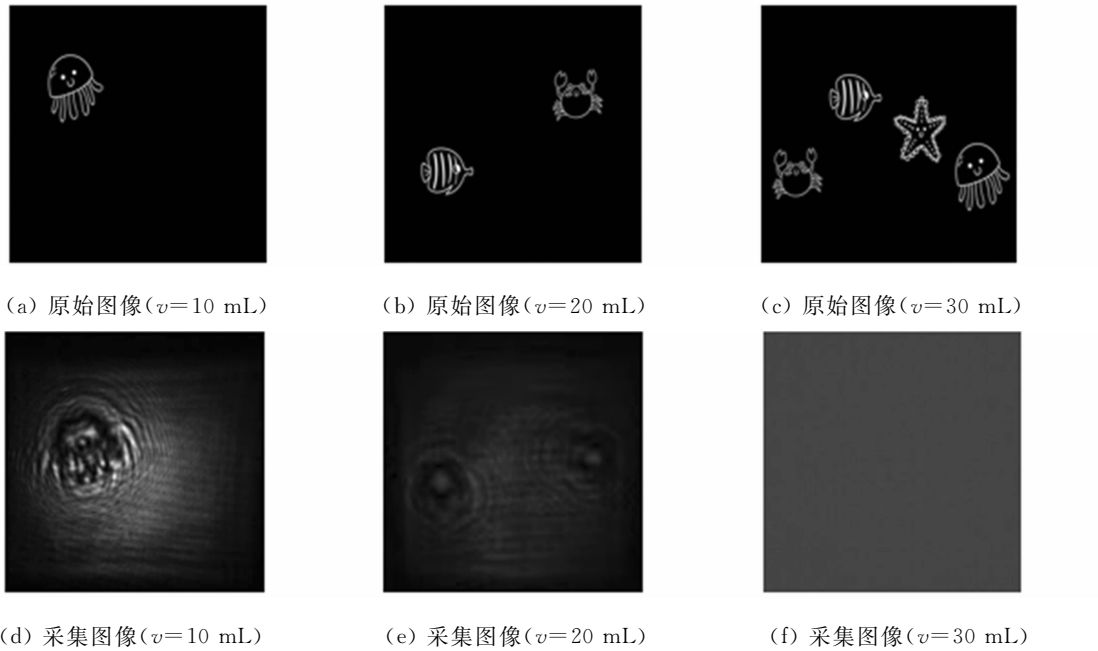


图 2 浑浊水体的原始图像和采集图像

Fig. 2 Original images and collected images of turbid water

2 神经网络结构

为了从失真的散斑图像中识别原始目标信息,设计一种轻量级卷积神经网络结构(图 3)。该网络主要由卷积层、全局最大池化层和全连接层构成,在保证识别精度的基础上,兼顾计算效率与泛化能力。

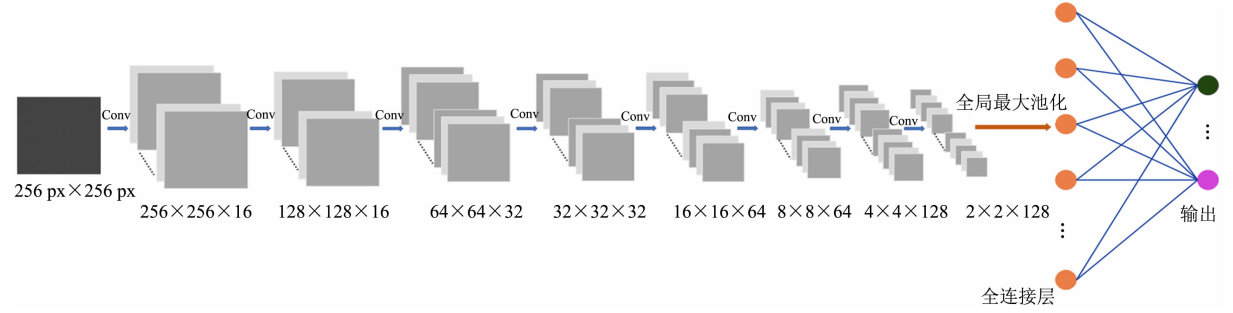


图 3 轻量级卷积神经网络结构

Fig. 3 Lightweight convolutional neural network architecture

为了将输入图像(256 px×256 px)转化为高维特征向量,首先,构建图像降维与特征提取模块。在初始阶段,使用 16 个大小为 4×4、步长为 1 的卷积核对图像进行卷积操作,提取图像中的边缘、纹理等低层次局部特征。然后,网络通过 7 次连续的卷积操作(每次卷积核大小为 4×4,步长为 2),在逐步压缩特征图空间尺寸的同时,提取更高层次的语义特征,如图像内部形状结构和空间分布模式。该过程使特征表达更加紧凑,同时提升了计算效率。

为了增强模型的训练稳定性与收敛速度,在每个卷积层后均引入批量归一化层,动量设置为 0.95。同时,在部分卷积层后引入 Dropout 机制,防止过拟合,提升模型的稳健性。激活函数采用 Leaky-ReLU,相较于传统的 ReLU 函数,其在负值区域保留微小梯度,有助于缓解神经元死亡问题,提升模型的非线性建模能力。经过上述卷积模块处理后,网络输出一个维度为 2×2×128 的高维特征张量,表示从散斑图像中提取出的深层抽象特征。神经网络通过浅层卷积提取低级图像特征(如边缘、纹理),中间层逐步捕捉图像的局部结构与空间关系,高层卷积核则能够通过感受野的扩大学习到全局语义信息,从而实现对水生动物种类与数量的准确判别。

在训练阶段,图像类别信息首先通过独热编码转换为与类别数等长的二进制向量,作为监督学习的目标标签。通过寻找二进制编码中最大值所在位置,即可获得其对应类别。高维特征张量提取完成

后,网络将该张量输入全局最大池化层,该操作在每一个通道内选取最大的响应值,从而在显著压缩空间维度的同时,保留通道中最具代表性的特征信息。池化后的特征向量进一步输入至全连接层,并通过 Softmax 激活函数输出一个长度为类别数的概率向量。

Softmax 函数将输出映射为概率空间,其中,每个元素表示图像属于对应类别的概率值,所有类别的概率总和为 1。在推理阶段,网络将选取概率向量中最大元素对应的索引位置转换为实际类别,实现图像识别任务的输出。

训练的优化器为 Adam,初始学习率为  $1\times10^{-3}$ ,并根据训练过程中的验证集性能动态调整学习率,降低损失,实现更高质量的输出。为了定量评价网络从散斑中还原初始光场信息的能力,定义识别准确率( $\eta$ )为

$$\eta=\frac{N_{\text{cor}}}{N_{\text{tot}}}\times100\%。$$
(1)

式(1)中: $N_{\text{tot}}$ 为预测的总数量; $N_{\text{cor}}$ 为准确预测的数量。

### 3 实验结果与讨论

将不同添加量的 TP-HE 溶解于水中,模拟不同散射程度的浑浊水体。通过设计的实验装置,利用相机采集模拟水生动物经过浑浊水体的散斑图像。输入采集的图像,训练神经网络。将未训练过的散斑图像输入训练网络中,利用网络识别水生动物的种类和数量。

首先,在空间光调制器上随机加载 10 种不同类型的水生动物,每次只加载 1 种水生动物,这些水生动物随机出现在空间光调制器的任意位置,以此模拟浑浊水体中存在一种水生动物的场景。每种水生动物可以出现在 400 个不同位置,相机共采集了 4 000 张散斑图像,将 3 200 张散斑图像作为训练集,将 400 张散斑图像作为测试集,将 400 张散斑图像作为验证集。

水生动物的种类识别结果,如图 4 所示。图 4 中: $L$  为损失。由图 4 可知:训练集和验证集的准确率不断上升,大约经过 20 代的训练后,网络即可准确识别出单个水生动物的类型;当 TP-HE 添加量变大时,水体的散射程度更高,这意味着原始光场信息被破坏得更严重,探测器采集的有效信息量更少,验证集的识别准确率一开始出现一定的震荡,最终的识别准确率略微下降。

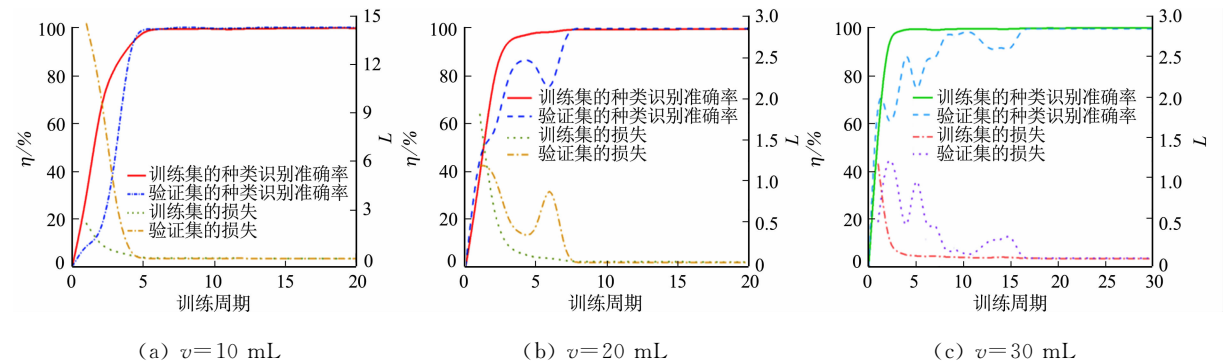


图 4 水生动物的种类识别结果

Fig. 4 Categories recognition results of aquatic animal

使用测试集的 400 张图像进行测试,当 TP-HE 添加量分别为 10、20 mL 时,种类识别准确率为 100%;当 TP-HE 添加量为 30 mL 时,种类识别准确率达 99.8%。

为了测试网络对更为复杂成像场景的识别能力,空间光调制器上加载了不同数量的水生动物。光束经过浑浊水体后,相机共采集 8 395 张散斑图像,将 6 761 张散斑图像作为训练集,将 839 张散斑图像作为测试集,将 840 张散斑图像作为验证集输入神经网络进行训练。其中,水生动物的类型有 10 种,包含有 2、3、4、5 只水生动物 4 种不同的情况。该实验中 TP-HE 添加量为 30 mL,更大的添加量带来更强的散射效应,进一步加大图像识别的难度。

当图像中包含更多复杂信息时,对神经网络的识别能力要求更高,为了使网络能够更有效地识别图像信息,采用大小为  $4\times4$ 、步长为 2 的卷积核代替最大池化层。同时,在卷积层后添加了批量归一化层

用于解决过拟合,并采用 Dropout 机制优化网络的泛化能力。此外,采用多输出方式,提升训练速度并减少网络的参数。

多种水生动物的识别结果,如图 5 所示。由图 5 可知:随着训练次数的不断增加,训练集和验证集的识别准确率均不断上升;大约经过 20 代的训练后,网络即可准确识别出多种水生动物的数量与种类。

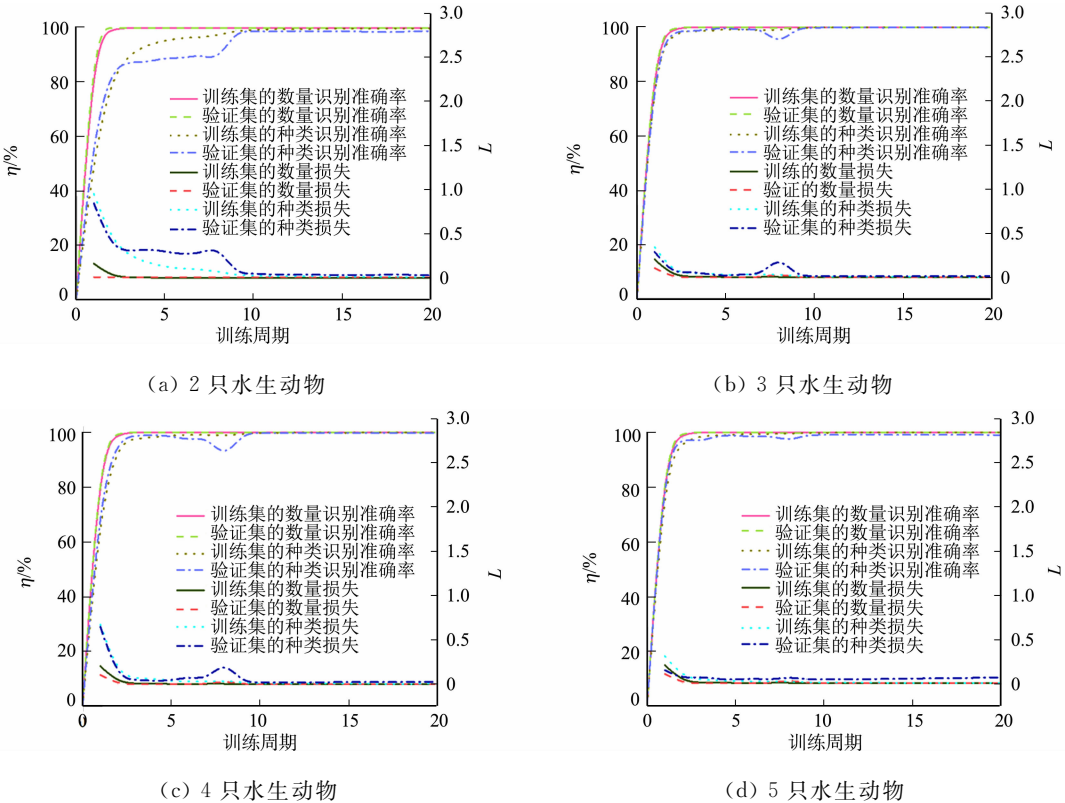


图 5 多种水生动物的识别结果

Fig. 5 Identification results of various aquatic animals

使用测试集的 839 张图像进行测试,神经网络对水生动物的数量识别准确率为 100%;当散斑图像中包含 2 只水生动物时,神经网络的数量识别准确率为 99.6%;当散斑图像中包含 3 只水生动物时,神经网络的数量识别准确率为 99.8%;当散斑图像中包含 4 只水生动物时,神经网络的数量识别准确率为 99.8%;当散斑图像中包含 5 只水生动物时,神经网络的数量识别准确率为 99.7%。

4 结 束 语

以浑浊水体为例,对动态散射场景中的目标识别进行研究。将 TP-HE 溶解于水中,形成浑浊水体,并通过控制 TP-HE 添加量,改变水体的浑浊程度。将 10 种不同类型的水生动物加载在空间光调制器上,光束经空间光调制器反射后入射到浑浊水体中,由于浑浊水体的散射,导致出射光场变为光强无序的散斑状分布,利用相机采集对应的光强分布。为了从散斑场中恢复出原始入射光场信息,设计了一个轻量级卷积神经网络,利用采集的部分数据训练神经网络。将未经训练的散斑场输入训练好的网络,可以输出水生动物的种类和数目。

参 考 文 献:

[1] 左超,陈钱. 计算光学成像:何来,何处,何去,何从? [J]. 红外与激光工程,2022,51(2):158-341. DOI:10. 3788/IR-LA20220110.

[2] 卞耀明,司徒国海. 透过散射介质光学成像技术的研究进展[J]. 中国激光,2024,51(11):256-283. DOI:10. 3788/CJL240678.

[3] 刘飞,吴晓琴,段景博,等. 浅谈计算成像在光电探测中的应用(特邀)[J]. 光子学报,2021,50(10):1011001. DOI: 10. 3788/gzxb20215010. 1011001.



- [4] 陈子阳,陈丽,范伟如,等. 基于相关全息原理的散射成像技术及其进展[J]. 激光与光电子学进展,2021,58(2):9-22. DOI:10.3788/LOP202158.0200001.
- [5] 程雪岷,罗烈玉,张泽森,等. 计算光学框架下的抗散射成像技术研究(特邀)[J]. 红外与激光工程,2025,54(1):36-45. DOI:10.3788/IRLA20240298.
- [6] KANG S,KWON Y,LEE H,*et al.* Tracing multiple scattering trajectories for deep optical imaging in scattering media[J]. Nature Communication,2023,14(1):6871. DOI:10.1038/s41467-023-42525-7.
- [7] BAEK W J,PARK J,CIAO L. Depth-resolved imaging through scattering media using time-gated light field tomography[J]. Optics Letters,2024,49(22):6581-6584. DOI:10.1364/OL.541549.
- [8] WANG Q Z,LIANG X,WANG L,*et al.* Fourier spatial filter acts as a temporal gate for light propagating through a turbid medium[J]. Optics Letters,1995,20(13):1498-1500. DOI:10.1364/OL.20.001498.
- [9] BERTOLOTTI J,VAN PUTTEN E G,BLUM C,*et al.* Non-invasive imaging through opaque scattering layers[J]. Nature,2012,491(4721):232-234. DOI:10.1038/nature11578.
- [10] KATZ O,HEIDMANN P,FINK M,*et al.* Non-invasive single-shot imaging through scattering layers and around corners *via* speckle correlations[J]. Nature Photonics,2014,8:784-790. DOI:10.1038/nphoton.2014.189.
- [11] POPOFF S M,LEROSEY G,CARMINATI R,*et al.* Measuring the transmission matrix in optics: An approach to the study and control of light propagation in disordered media[J]. Physics Review Letters,2010,104:100601. DOI:10.1103/PhysRevLett.104.100601.
- [12] VELLEKOOP I M,MOSK A P. Focusing coherent light through opaque strongly scattering media[J]. Optics Letters,2007,32(16):2309-2311. DOI:10.1364/OL.32.002309.
- [13] WOO C M,ZHAO Qi,ZHONG Tianting,*et al.* Optimal efficiency of focusing diffused light through scattering media with iterative wavefront shaping[J]. APL Photonics,2022,7:046109. DOI:10.1063/5.0085943.
- [14] ZHAO Wenjing,DU Ziheng,ZHAI Aiping,*et al.* Wavefront imaging of a biological sample using DMD-based single-pixel phase-shifting interferometric techniques: An experimental comparison[J]. Optics & Laser Technology,2024,172:110483. DOI:10.1016/j.optlastec.2023.110483.
- [15] TANG Pusong,ZHENG Kanpei,YUAN Weiming,*et al.* Learning to transmit images through optical speckle of a multimode fiber with high fidelity[J]. Applied Physics Letters,2022,121(8):081107. DOI:10.1063/5.0099159.
- [16] LI S,DENG M,LEE J,*et al.* Imaging through glass diffusers using densely connected convolutional networks[J]. Optica,2018,5:803-813. DOI:10.1364/OPTICA.5.000803.
- [17] YANG Kui,HAN Pingli,GONG Rui,*et al.* High-quality 3D shape recovery from scattering scenario *via* deep polarization neural networks[J]. Optics and Laser in Engineering,2023,173:107934. DOI:10.1016/j.optlaseng.2023.107934.
- [18] CHEN Musheng,JI Xin,LIN Shunda,*et al.* Image reconstruction of scattered vortex light field based on deep learning[J]. Optics and Laser Technology,2023,163:109347. DOI:10.1016/j.optlastec.2023.109347.

(责任编辑:钱筠 英文审校:陈婧)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202412016



# 双空间耦合 LDPC 码滑窗译码算法改进

练秋芳, 孙小芳, 陈启望, 鲁紫君, 周林

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 针对基于联合信源信道编码系统的双空间耦合低密度奇偶校验(LDPC)码的译码性能优化问题,提出一种引入监督的滑窗译码算法。首先,在当前译码窗口内加入监督位;其次,监督位监视当前窗口内最可靠的对数似然值和最小平均错误概率,并将其分别放入存储器的对应位置中;然后,窗口内的码字进行下一轮迭代,直至满足译码迭代终止条件;最后,译码器根据存储的对数似然值估计译码结果。仿真结果表明:在加性高斯白噪声信道和瑞利衰落信道下,引入监督的滑窗译码算法性能在错误平层和瀑布区均有显著提升。

**关键词:** 联合信源信道编码; 双空间耦合低密度奇偶校验码; 滑窗译码算法; 监督

**中图分类号:** TN 911.22

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5013(2025)04-0448-07

## Improvement of Sliding Window Decoding Algorithm for Double Spatially Coupled LDPC Codes

LIAN Qiufang, SUN Xiaofang, CHEN Qiwan,  
LU Zijun, ZHOU Lin

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** With regard to the decoding performance optimization issue of double spatially coupled low-density parity-check (LDPC) codes in a joint source-channel coding system, a supervised sliding-window decoding algorithm is proposed. First, supervisor bits are incorporated within the current decoding window. Then, the supervisor bits supervise the most reliable log-likelihood values and the minimum average error probabilities within the current window, they are placed into the corresponding positions in the memory, respectively. Next, the codewords within the window undergo the next round of iteration until the decoding termination conditions are met. Finally, the decoder estimates the decoding result based on the stored log-likelihood values. Simulation results show that under both additive Gaussian white noise and Rayleigh fading channels, the performance of the supervision sliding-window decoding algorithm is significantly improved in both the error floor and waterfall regions.

**Keywords:** joint source-channel coding; double spatially coupled LDPC code; sliding window decoding algorithm; supervision

香农的分离定理一直是通信系统设计的准则,未来 6G 通信系统具备更高可靠性、超低时延、高吞吐量的特点。传统的分离系统因其固有局限,难以满足日益严苛的通信需求。因此,联合信源信道编码(JSCC)系统应运而生。Sayood 等<sup>[1]</sup>将 JSCC 技术应用于图像传输领域,JSCC 系统的信道译码器可以充分利用信源中残留的冗余信息。Hagenauer<sup>[2]</sup>提出软输出维特比译码算法,该算法通过信源序列的

**收稿日期:** 2024-12-12

**通信作者:** 练秋芳(1998—),女,助理实验师,主要从事联合信源信道编码的研究。E-mail:lianqiufang@hqu.edu.cn。

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金资助项目(62101195);福建省科技计划项目(2024I0016)



后验概率来控制信道译码器。2009 年, Fresia 等<sup>[3]</sup>提出信源和信道都是低密度奇偶校验(LDPC)码的 JSCC 系统。若信源熵低于信道容量, 码字无限长的分离系统可以高可靠传输, 但复杂度激增。相较之下, JSCC 系统在低复杂度环境下展现更优性能。JSCC 系统译码端利用信源压缩编码冗余, 实现显著性能提升<sup>[4]</sup>。1999 年, Felstrom 等<sup>[5]</sup>率先引入卷积 LDPC(CC-LDPC)码的概念, CC-LDPC 码的结构更加规则, 易于硬件实现。LDPC 码经耦合形成卷积结构的 LDPC 码, 此类码称空间耦合 LDPC(SC-LDPC)码<sup>[6]</sup>。当 SC-LDPC 码的码长足够长时, 置信传播(BP)译码阈值可达到最大后验译码阈值<sup>[7]</sup>, 但会导致较大的译码延迟。SC-LDPC 码特殊的耦合结构促使译码算法可在固定窗口内执行, 此算法称为滑窗译码(SWD)算法<sup>[8]</sup>, SWD 算法以牺牲部分译码性能来换取减小译码延迟。为提升 SWD 算法的译码性能, 许多学者提出了引入监督<sup>[9]</sup>、窗口可变<sup>[10]</sup>等优化思想。Ali 等<sup>[11]</sup>提出 3 种改善滑窗译码算法的方法, 即有效的译码终止、边信息的重利用和有用信息的放大方法。Golmohammadi 等<sup>[12]</sup>提出双 SC-LDPC(DSC-LDPC)码的 JSCC 系统, 译码器能充分利用信源压缩后的冗余信息进一步提高性能。滑可变窗译码(SVWD)算法被证明在 DSC-LDPC 码的 JSCC 系统中能有效改善译码性能<sup>[13]</sup>。基于此, 本文设计了一种改进的滑窗译码(iSWD)算法。

## 1 基于 DSC-LDPC 码的 JSCC 系统

### 1.1 DSC-LDPC 码的构造

SC-LDPC 码的构造过程, 如图 1 所示。图 1 中:  $L$  为耦合长度;  $t$  为第  $t$  个位置上的 LDPC 码。SC-LDPC 码的原模图由  $b_v$  个变量节点(图 1 中圆形节点, VNs)、 $b_c$  个校验节点(图 1 中方形节点, CNs)和连接两种节点的边组成。SC-LDPC 码是由规则 LDPC 码复制、边扩展和耦合得到<sup>[14-15]</sup>。

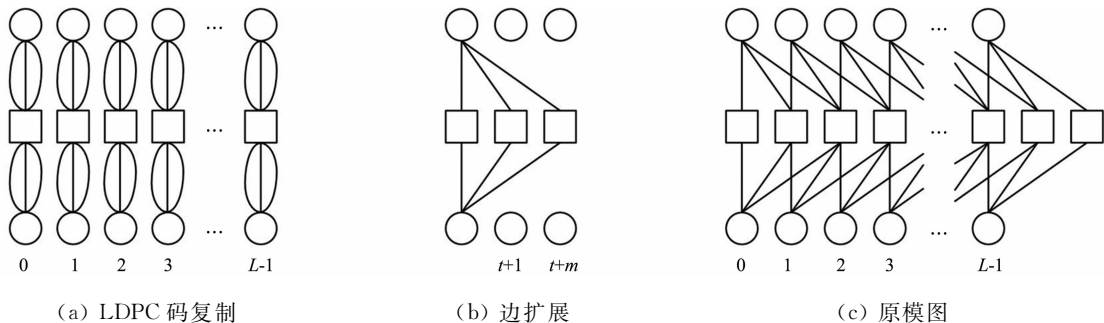


图 1 SC-LDPC 码的构造过程

Fig. 1 Construction process of SC-LDPC code

SC-LDPC 码的原模图单元可用基矩阵  $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 3 & 3 \end{bmatrix}$  表示,  $\mathbf{B}$  的元素表示连接边的数量。通过边扩展<sup>[15]</sup>(图 1(b)), 将第  $t(0 \leq t < L)$  个位置上的  $\mathbf{B}$  划分为  $m+1$  个子基矩阵  $\mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix}, i = \{0, 1, \dots, m\}$ , 并且满足  $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_1 + \dots + \mathbf{B}_m$ ,  $m$  称为耦合宽度。  $\mathbf{B}$  用矩阵表示为

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ \mathbf{B}_m & \cdots & \mathbf{B}_0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & \mathbf{B}_m \end{bmatrix}_{(L+m)b_c \times Lb_v} \quad (1)$$

将基矩阵扩展  $M$  次, 即可得到校验矩阵,  $M$  被称为扩展因子。DSC-LDPC 码的信源是  $(3, 12)$  SC-LDPC 码, 信道是  $(3, 6)$  SC-LDPC 码。为了让系统正常工作, 信源和信道需满足尺寸匹配条件  $b_v^{\text{sc}} = b_v^{\text{cc}} - b_c^{\text{cc}}$  和  $L^{\text{sc}} + m = L^{\text{cc}} - m$ ,  $L^{\text{sc}}$  和  $L^{\text{cc}}$  分别是信源耦合长度和信道耦合长度。信道和信源参数分别用上标 cc 和 sc 标识区分。DSC-LDPC 码的原模图, 如图 2 所示。图 2 中: 阴影填充的节点为信源的 CNs 连接到信道的 VNs 部分。

因为 DSC-LDPC 码的参数满足  $b_v^{\text{cc}} - b_c^{\text{cc}} - b_c^{\text{sc}} = 0$ , 所以基矩阵可用联合基矩阵  $\mathbf{B}_j$  表示, 即

$$\mathbf{B}_j = \begin{bmatrix} \mathbf{B}^{\text{sc}} & \mathbf{B}^{\text{L}} \\ 0 & \mathbf{B}^{\text{cc}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

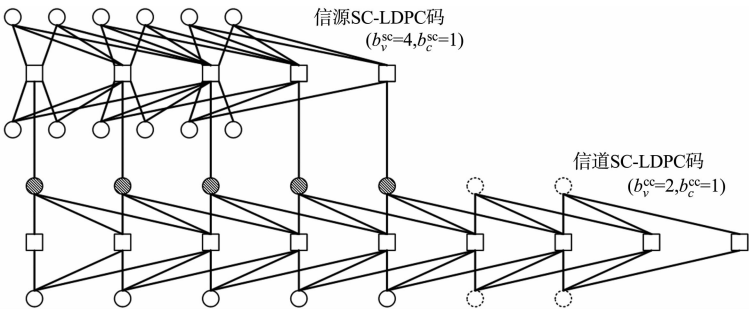


图 2 DSC-LDPC 码的原模图

Fig. 2 Protograph of DSC-LDPC code

式(2)中; $\mathbf{B}_L$  是大小为  $(L^{sc} + m)b_c^{cc} \times L^{cc}b_v^{cc}$  的连接矩阵,表示信源校验节点与信道变量节点的连接关系。

1.2 DSC-LPDC 码的编码

SC-LDPC 码的校验矩阵  $\mathbf{H}$  转置为

$$\mathbf{H}_{[0, L-1]}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_0^T(0) & \cdots & \mathbf{H}_m^T(m) & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & \mathbf{H}_0^T(L-1) & \cdots & \mathbf{H}_m^T(m+L-1) \end{bmatrix} \quad (3)$$

子矩阵  $\mathbf{H}_i(t), 0 \leq i \leq m$  定义为

$$\mathbf{H}_i(t) = \begin{bmatrix} h_i^{(1,1)}(t) & \cdots & h_i^{(1,b_v^M)}(t) \\ \vdots & & \vdots \\ h_i^{(b_c^M,1)}(t) & \cdots & h_i^{(b_c^M,b_v^M)}(t) \end{bmatrix}_{b_c^M \times b_v^M} \quad (4)$$

比特为“1”,概率为  $P_1 < 1/2$  的二进制无记忆伯努利信源可以直接将接收到信息序列  $\mathbf{s}$  用校验矩阵  $\mathbf{H}^{sc}$  进行压缩,编码后得到序列  $\mathbf{u}$ ,即  $\mathbf{u} = \mathbf{s}(\mathbf{H}^{sc})^T$ 。信道 SC-LDPC 码编码采用校验和编码算法<sup>[16]</sup>。信道编码器是一个系统编码器,编码后的码字可以表示为  $\mathbf{v}_i = [v_i^{(0)}, v_i^{(1)}]$ ,  $0 \leq i < L^{cc}$ ,  $v_i^{(0)}$  是信息位(图 2 中阴影填充的 VNs),  $v_i^{(1)}$  是校验位(图 2 中无填充的 VNs)。  $v_i^{(0)}, v_i^{(1)}$  具体编码为

$$\left. \begin{aligned} v_i^j &= u_i^j, & 1 \leq j \leq (b_v^{cc} - b_c^{cc})M, \\ v_i^j &= \sum_{k=1}^{(b_v^{cc}-b_c^{cc})M} v_i^{(k)} h_0^{(j-(b_v^{cc}-b_c^{cc})M,k)}(i) + \sum_{c=1}^m \sum_{k=1}^{b_c^{cc}M} v_{i-c}^{(k)} h_c^{(j-(b_v^{cc}-b_c^{cc})M,k)}(i), \\ & (b_v^{cc} - b_c^{cc})M + 1 \leq j \leq b_v^{cc}M. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

为匹配信源码特性而额外引入不参与信道编码的 VNs 称为删余节点(图 2 中虚线)。

1.3 DSC-LPDC 码的译码

DSC-LDPC 码编码端是用  $\mathbf{H}^{sc}$  和  $\mathbf{H}^{cc}$  单独编码,译码端(SWD 算法)同时对信源和信道进行联合译码。DSC-LDPC 码的 SWD 算法,如图 3 所示。图 3 中: $p$  表示目标符号(绿色横线区域)的位置。一个窗口内有  $b_v^M W$  个 VNs 和  $b_c^M W$  个 CNs,  $W$  表示窗口大小。因为目标符号和上一个窗口有直连的边,所以上一个窗口对数似然值直接传递到当前窗口。当目标符号译码完成,窗口向右移动,译码下一个目标符号,直到整帧码字译码完成。

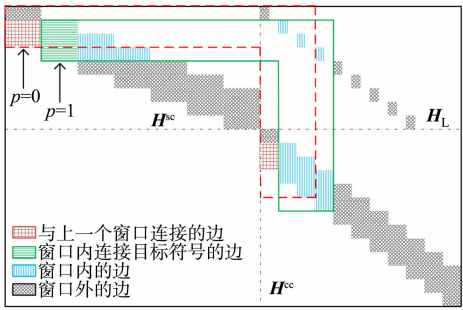


图 3 DSC-LDPC 码的 SWD 算法

Fig. 3 SWD algorithm of DSC-LDPC code

以加性高斯白噪声信道(AWGN)为例,DSC-LDPC 码的 SWD 算法信息传递过程有如下 4 个步骤。

1) 初始化。信源端的初始化可用  $Z_v^{sc} = \lg((1 - p_1)/p_1)$  计算,信源初始化只与信源统计特性有关。信道初始化可表示为  $Z_v^{cc} = 2y/\sigma_n^2$ ,  $y$  为经过信道后的观测值,  $\sigma_n^2$  为信道噪声的方差。

2) 迭代。迭代仅发生在窗口内的节点,且包含水平步骤和垂直步骤。  $L_{c \rightarrow v}^{sc,(k)}$  和  $L_{v \rightarrow c}^{cc,(k)}$  分别为信源和信道中第  $c$  个 CNs 传递给第  $v$  个 VNs 的对数似然值;  $L_{c \rightarrow v}^{sc \rightarrow cc,(k)}$  和  $L_{v \rightarrow c}^{cc \rightarrow sc,(k)}$  分别为信源中第  $c$  个 CNs 传

递给信道中第  $v$  个 VN 的对数似然值和信道中第  $v$  个 VN 传递给信源中第  $c$  个 CN 的对数似然值;  $L_{v \rightarrow c}^{\text{sc},(k)}$  和  $L_{v \rightarrow c}^{\text{cc},(k)}$  分别为信源和信道中第  $v$  个 VN 传递给第  $c$  个 CN 的对数似然值。

用 CNs 传递给 VN 的对数似然比公式(水平步骤)为

$$\tanh\left(\frac{L_{c \rightarrow v}^{\text{sc} \rightarrow \text{cc},(k)}}{2}\right) = \prod_{v'} \tanh\left(\frac{L_{v' \rightarrow c}^{\text{sc},(k)}}{2}\right), \quad c = 1, 2, \dots, (L^{\text{sc}} + m)M. \quad (6)$$

$$\tanh\left(\frac{L_{c \rightarrow v}^{\text{sc},(k)}}{2}\right) = \tanh\left(\frac{L_{v \rightarrow c}^{\text{cc} \rightarrow \text{sc},(k)}}{2}\right) \prod_{v' \neq v} \tanh\left(\frac{L_{v' \rightarrow c}^{\text{sc},(k)}}{2}\right), \quad c = 1, 2, \dots, (L^{\text{sc}} + m)M. \quad (7)$$

$$\tanh\left(\frac{L_{c \rightarrow v}^{\text{cc},(k)}}{2}\right) = \prod_{v' \neq v} \tanh\left(\frac{L_{v' \rightarrow c}^{\text{cc},(k)}}{2}\right), \quad c = 1, 2, \dots, (L^{\text{cc}} + m)M. \quad (8)$$

用 VN 传递给 CN 的对数似然比(垂直步骤)为

$$L_{v \rightarrow c}^{\text{sc},(k)} = Z_v^{\text{sc}} + \sum_{c' \neq c} L_{c' \rightarrow v}^{\text{sc},(k)}, \quad v = 1, 2, \dots, b_v^{\text{sc}} L^{\text{sc}} M. \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} L_{v \rightarrow c}^{\text{cc},(k)} &= Z_v^{\text{cc}} + L_{v \rightarrow c}^{\text{cc},(k-1)} + \sum_{c' \neq c} L_{c' \rightarrow v}^{\text{cc},(k-1)}, \\ v &= (2iM + 1, 2iM + 2, \dots, 2iM + M). \quad 0 \leq i < (L^{\text{cc}} - m). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} L_{v \rightarrow c}^{\text{cc},(k)} &= Z_v^{\text{cc}} + \sum_{c' \neq c} L_{c' \rightarrow v}^{\text{cc},(k-1)}, \\ v &= ((2i + 1)M + 1, (2i + 1)M + 2, \dots, (2i + 1)M + M), \quad 0 \leq i < (L^{\text{cc}} - m). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} L_{v \rightarrow c}^{\text{cc} \rightarrow \text{sc},(k)} &= Z_v^{\text{cc}} + \sum_{c' \neq c} L_{c' \rightarrow v}^{\text{cc},(k-1)}, \\ v &= (2iM + 1, 2iM + 2, \dots, 2iM + M), \quad 0 \leq i < (L^{\text{cc}} - m). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式(9)~(12)中:  $L_{c \rightarrow v}^{\text{sc},(0)} = L_{c \rightarrow v}^{\text{sc},(0)} = L_{c \rightarrow v}^{\text{sc} \rightarrow \text{cc},(0)} = 0$ 。式(10)是计算与信源相连的信道 VN 的对数似然值,而式(11)是计算不与信源相连的信道 VN 的对数似然值。

3) 译码判决。迭代步骤完成后,先计算目标符号的对数似然值,即

$$L(s_v) = Z_v^{\text{sc}} + \sum_c L_{c \rightarrow v}^{\text{sc},(k)}. \quad (13)$$

随后,根据目标符号的对数似然值估计译码结果,当  $L(s_v) \geq 0$  时,译为 0,否则,译为 1。

4) 窗口滑动。若当前窗口满足目标符号的错误概率小于阈值( $\beta = 10^{-6}$ )或迭代次数等于最大值,则表示译码完成,保存译码结果和与下一个窗口内的校验节点相连边(图 3 蓝色竖线区域)的信息,窗口向右滑动一个位置,重复步骤 1~3,直到整个码字译码完成。否则,返回步骤 2,迭代次数  $k+1$ ,重新迭代译码。

## 2 改进的 SWD 算法

为改善 JSCC 系统的 DSC-LDPC 码的译码性能,窗口内引入监督,监控译码过程中平均错误概率  $\bar{P}_e$  可达到的最小值,并保存  $\bar{P}_e$  和  $\bar{P}_e$  为最小值时信源目标符号的对数似然值。

### 2.1 平均错误概率计算

在 SWD 算法中,译码结果都是根据译码终止时产生的对数似然值来估算码字  $\hat{s}$ 。但研究表明,目标符号的平均错误概率  $\bar{P}_e$  不随迭代次数增加而单调减小。因此,当目标符号满足译码停止条件时,平均错误概率  $\bar{P}_e$  未必是这一帧码字译码过程中的最小值,即译码结果不一定是最优的。基于这一译码现象,设计一种改进的 SWD(iSWD)算法。iSWD 算法在窗口内引入监督,监控窗口可达到的最小平均错误概率  $P_{\min}$  和对应的目标符号对数似然值。监督机制可以优化算法的译码性能,使其更加适用于各种噪声和干扰环境。

由式(13)可以得到码字  $s_v$  的后验似然估计值  $L(s_v)$ ,则分别计算  $s_v$  为 1 和 0 的后验概率  $P_1(s_v)$  和  $P_0(s_v)$ 。即

$$\left. \begin{aligned} P_1(s_v) &= \frac{1}{1 + e^{-L(s_v)}}, \\ P_0(s_v) &= \frac{1}{1 + e^{L(s_v)}}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

此次迭代的错误概率取  $P_1(s_v)$  和  $P_0(s_v)$  的最小值,即

$$P_e(s_v)=\min\{P_1(s_v),P_0(s_v)\}。 \tag{15}$$

第  $p$  个窗口的信源目标符号的平均错误概率  $\overline{P_e}(p)$  为

$$\overline{P_e}(p)=\frac{1}{b_v^{sc}M}\sum_{v=pb_v^{sc}M}^{(p+1)b_v^{sc}M-1}P_e(s_v)。 \tag{16}$$

在 iSWD 算法中,窗口内的码字在进行 BP 译码时都会被监督。每个窗口内信源目标符号的个数是  $b_v^{sc}M$ 。存储器 C 的长度为  $b_v^{sc}M$ ,用来存储平均错误概率  $\overline{P_e}(p)$  达到最小值时的目标符号似然估计值。存储器 C 只是存储信源目标符号的似然估计值,因此,其长度与窗口大小无关,从而节省存储空间。当译码终止时,根据存储器 C 中的内容进行译码。存储器 C 里存的具体内容为  $L(s_{pb_v^{sc}M}),L(s_{pb_v^{sc}M+1}),\cdots,L(s_{(p+1)b_v^{sc}M-1})$ 。

2.2 iSWD 算法

iSWD 算法重点在于监测信源目标符号的平均错误概率  $\overline{P_e}(p)$  达到最小值时的似然估计值。首先,初始化  $P_{\min}=1$ ,存储器 C 的内存清空。译码第  $p$  个窗口,接收窗口内的码字,并进行 BP 译码后,算出信源目标符号的  $\overline{P_e}(p)$ 。如果此次迭代的平均错误概率满足  $\overline{P_e}(p)\leq P_{\min}$ 。最小平均错误概率将会被更新,即  $P_{\min}=\overline{P_e}(p)$ 。此次迭代得到的每个信源目标符号似然估计值也会被更新存储在存储器 C 中的对应位置。如果此次迭代的平均错误概率不满足  $\overline{P_e}(p)\leq P_{\min}$ ,则  $P_{\min}$  和存储器 C 中的内容都不进行更新,迭代次数加 1,直接执行下一轮迭代。

iSWD 算法监控的是信源目标符号的平均错误概率,不需要分别监控信源和信道的平均错误概率,从而减小算法复杂度和所需存储器的容量。DSC-LDPC 码中信源和信道直接有信息传递,进行联合译码,所以 iSWD 算法监督信源目标符号就可以提高系统整体性能。

iSWD 算法

- 1: for  $p=0\rightarrow L^c$  do
- 2:  $P_{\min}=1$ ,存储器 C 内存清空;
- 3: 开始迭代,并将迭代次数  $k$  设为 0;
- 4: while  $k<I_{\max}$  do
- 5: 在窗口内执行 BP 算法,  $k=k+1$ ;
- 6: if  $\overline{P_e}(p)\leq P_{\min}$  then
- 7:  $P_{\min}=\overline{P_e}(p)$ ,更新存储器 C;
- 8: end if
- 9: if  $\overline{P_e}(p)\leq 10^{-6}$  then
- 10: 停止此次译码,并跳转至步骤 13;
- 11: end if
- 12: end while
- 13: 基于存储器 C 中的似然估计值估计译码目标符号;
- 14: end for。

3 仿真性能分析

在 iSWD 算法的仿真实验采用  $\frac{1}{4}$  码率的信源码和  $\frac{1}{2}$  的信道码,基矩阵分别为

$$\boldsymbol{H}^{sc}=[3\ 3\ 3\ 3],\quad \boldsymbol{H}^{cc}=[3\ 3]。 \tag{17}$$

耦合宽度  $m=2$ 。此外,耦合长度分别为  $L^{sc}=20$  和  $L^{cc}=16$ ,最大迭代次数  $I_{\max}=30$ 。

每一个码字需要仿 20 000 帧,仿真的码字采用二进制相移键控(BPSK)调制方式。在实验仿真中,为测试 iSWD 算法的性能,分别测试了 AWGN 信道和瑞利衰落信道中不同信噪比( $R_{\text{SN}}$ )下的误码率( $R$ )。通过这两种不同信道的测试,可以更全面地评估算法的性能和稳定性,并确定其不同环境下的

应用潜力。因此,获得的实验结果可以为算法优化和改进提供重要的参考依据。

AWGN 信道下  $W=6, W=10$  的误码率,分别如图 4、5 所示。由图 4、5 可知: 误码率性能最差的是扩展因子为 80 的 SWD 算法,而误码率性能最好的是扩展因子为 160 的 iSWD 算法,即扩展因子越大,误码率性能越好,这是因为扩展因子的大小与码长成正相关,扩展因子为 80、120 和 160 时,DSC-LDPC 码的信息码长分别为 5 120、7 680 和 10 240;iSWD 算法在 AWGN 信道下传输,不同参数条件下,均能改善译码性能,在窗口大小为 6、扩展因子为 120、误码率为  $4 \times 10^{-4}$  时,iSWD 算法相较于 SWD 算法的译码增益约为 0.69 dB,iSWD 算法的改进有限,在窗口大小为 10,扩展因子为 160 时,iSWD 算法的译码增益与 SWD 算法较为接近,这是因为窗口较大和 DSC-LDPC 码的码长较长时,SWD 算法的错误概率在迭代过程中更易收敛到最小值,有更优的译码性能,改进的空间更小。

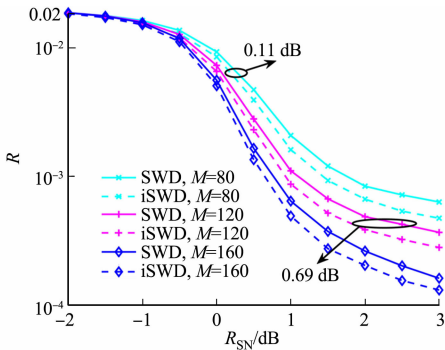


图 4 AWGN 信道下  $W=6$  的误码率  
Fig. 4 Bit error rate with  $W=6$   
under AWGN channels

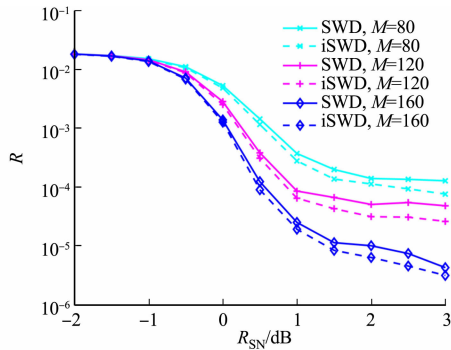


图 5 AWGN 信道下  $W=10$  的误码率  
Fig. 5 Bit error rate with  $W=10$   
under AWGN channels

为验证 iSWD 算法在不同信道中的普适性,iSWD 算法在瑞利衰落信道中也进行了仿真实验。瑞利衰落信道下  $M=80, M=160$  的误码率,分别如图 6、7 所示。

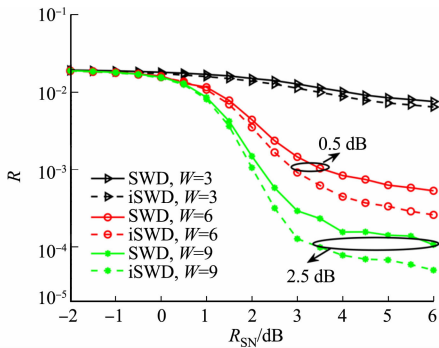


图 6 瑞利衰落信道下  $M=80$  的误码率  
Fig. 6 Bit error rate with  $M=80$   
under Rayleigh fading channels

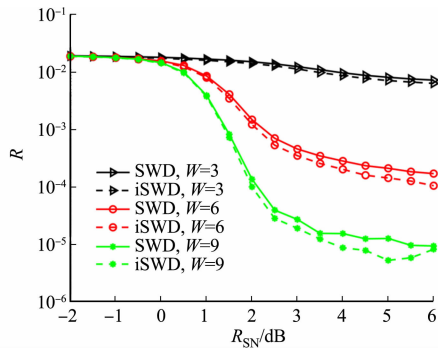


图 7 瑞利衰落信道下  $M=160$  的误码率  
Fig. 7 Bit error rate with  $M=160$   
under Rayleigh fading channels

由图 6、7 可知:当窗口大小为 9、扩展因子为 80、误码率为  $1 \times 10^{-4}$  时,iSWD 算法相较于 SWD 算法,其译码性能有显著的提升,译码增益高达 2.5 dB;而当窗口大小为 6、扩展因子为 80、误码率为  $1 \times 10^{-3}$  时,iSWD 算法的译码增益约为 0.5 dB,这意味着 iSWD 算法可以更有效地对噪声和干扰进行抑制,提高数据传输的可靠性;在瑞利衰落信道中,iSWD 算法对不同参数的 DSC-LDPC 码系统性能均有改善。

## 4 结束语

针对目标符号错误概率不随迭代次数而单调减小的问题,设计了一种适用于 DSC-LDPC 码的 iSWD 算法。该算法的主要思想是监督窗口目标符号错误概率可达到的最小值,并保存对应目标符号的对数似然值。译码终止时,根据保存的对数似然值估算译码结果。改进的算法未增加额外的迭代运算,因此,不会提高译码复杂度。由仿真实验可知,在 AWGN 信道和瑞利衰落信道下,iSWD 算法在瀑

布区和平层区的性能均得到改善,有望应用到未来低延迟、高可靠的流媒体传输中。

参考文献:

[1] SAYOOD K,BORKENHAGEN J C. Use of residual redundancy in the design of joint source/channel coders[J]. IEEE Transactions on Communications,1991,39(6):838-846. DOI:10.1109/26.87173.

[2] HAGENAUER J. Source-controlled channel decoding[J]. IEEE Transactions on Communications,1995,43(9):2449-2457. DOI:10.1109/26.412719.

[3] FRESIA M, PEREZ-CRUZ F, POOR H V. Optimized concatenated LDPC codes for joint source-channel coding [C]//IEEE International Symposium on Information Theory. Seoul:IEEE Press,2009:2131-2135.

[4] 王琳,刘三亚,陈辰,等. 工业互联网低功耗数据链算法设计综述:联合信源信道编码设计的必要性、现实与前景 [J]. 电子与信息学报,2020,42(1):249-262. DOI:10.11999/JEIT190762.

[5] FELSTROM A J,ZIGANGIROV K S. Time-varying periodic convolutional codes with low-density parity-check matrix[J]. IEEE Transactions on Information Theory,1999,45(6):2181-2191. DOI:10.1109/18.782171.

[6] KUDEKAR S,RICHARDSON T J,URBANKE R L. Threshold saturation via spatial coupling: Why convolutional LDPC ensembles perform so well over the BEC[J]. IEEE Transactions on Information Theory,2011,57(2):803-834. DOI:10.1109/TIT.2010.2095072.

[7] LENTMAIER M,SRIDHARAN A,COSTELLO D,*et al.* Iterative decoding threshold analysis for LDPC convolutional codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory,2010,56(10):5274-5289. DOI:10.1109/TIT.2010.2059490.

[8] IYENGAR A R,PAPALEO M,SIEGEL P H,*et al.* Windowed decoding of protograph-based LDPC convolutional codes over erasure channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory,2012,58(4):2303-2320. DOI:10.1109/TIT.2011.2177439.

[9] MO Shiyuan,CHEN Li. Improved sliding window decoding of spatially coupled low-density parity-check codes[C]//IEEE Information Theory Workshop. Taiwan:IEEE Press,2017:126-130. DOI:10.1109/ITW.2017.8277945.

[10] 张娅妹,周林,陈辰,等. 窗口可变的空间耦合 LDPC 码滑窗译码算法[J]. 西安电子科技大学学报,2020,47(3):128-134. DOI:10.11999/JEIT190762.

[11] ALI I,KIM J H,KIM S H,*et al.* Improving windowed decoding of SC LDPC codes by effective decoding termination, message reuse, and amplification [J]. IEEE Access,2018,6:9336-9346. DOI:10.1109/ACCESS.2017.2771375.

[12] GOLMOHAMMADI A,MITCHELL D G M. Concatenated spatially coupled LDPC codes with sliding window decoding for joint source-channel coding[J]. IEEE Transactions on Communication,2022,70(2):851-864. DOI:10.1109/TCOMM.2021.3126750.

[13] LIAN Qiufang,CHEN Qiwan,ZHOU Lin,*et al.* Adaptive decoding algorithm with variable sliding window for double SC-LDPC coding system[J]. IEEE Communications Letters,2023,27(2):404-408. DOI:10.1109/LCOMM.2022.3222560.

[14] DIVSALAR D,DOLINAR S,JONES C R,*et al.* Capacity approaching protograph codes[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2009,27(6):876-888. DOI:10.1109/JSAC.2009.090806.

[15] MITCHELL D G M,LENTMAIER M,COETELLO D J. Spatially coupled LDPC codes constructed fromprotographs[J]. IEEE Transactions on Information Theory,2015,61(9):4866-4889. DOI:10.1109/TIT.2015.2453267.

[16] PUSANEA E,FELTSTROM A J,SRIDHARAN A,*et al.* Implementation aspects of LDPC convolutional codes [J]. IEEE Transactions on Communications,2008,56(7):1060-1069. DOI:10.1109/TCOMM.2008.050519.

(责任编辑: 陈志贤      英文审校: 陈婧)



DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202412041



# 基于 UDP 组播协议的土壤数据 实时监测软件的设计与实现

梅小华, 黄彩虹, 董钰莹

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 针对主流土壤监测系统在实时数据监测方面的通用性和可扩展性需求,提出一种基于用户数据报协议(UDP)组播实时数据流的模型-视图-视图模型(MVVM)分层可视化软件设计框架,该框架在外部接口层采用 UDP 组播的方式,从而实现“一对多”的客户端扩展能力,同时在人机交互层采用改进后的 MVVM 模型,实现对土壤的多维数据通用可视化效果。结果表明:该软件能满足农业专家、农户对土壤实时状态的监测需求,摆脱传统线下指导带来的局限,有效地节约了人力资源,助力智慧农业。

**关键词:** 土壤监测; 用户数据报协议; 模型-视图-视图模型; 智慧农业

**中图分类号:** TP 311.52

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5013(2025)04-0455-07

## Design and Implementation of Real-Time Soil Data Monitoring Software Based on UDP Multicast Protocol

MEI Xiaohua, HUANG Caihong, DONG Yuying

(School of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** To address the requirements of generality and scalability in real-time data monitoring of mainstream soil monitoring systems, a hierarchical visualization software design framework for Model-View-View Model (MVVM) based on user datagram protocol (UDP) multicast real-time data stream is proposed. The framework adopts UDP multicast at the external interface layer to achieve “one to many” client extension capability. Meanwhile, an improved MVVM model is adopted at the human-computer interaction layer to achieve universal visualization of multi-dimensional soil data. Experimental results show that the proposed software can meet the real-time soil monitoring needs of agricultural experts and farmers, overcoming the limitations of traditional offline guidance, effectively resucing labor costs, and contributing to the advancement of smart agriculture.

**Keywords:** soil monitoring; user datagram protocol; Model-View-View Model; smart agriculture

土壤信息的实时获取有助于掌握农田土壤生态质量状况,在土壤质量评估和农业可持续发展中发挥着重要作用。通过对土壤实时监测,能够及时了解土壤中水分、氮磷钾等养分含量、酸碱度和有机质含量等数据。通过土壤湿度数据的变化趋势可以预测未来的土壤水分状况,从而合理安排灌溉计划;通过土壤养分含量数据,可以提供科学的施肥建议,保证农作物可持续化生长,优化农业产量和质量,降低能耗。因此,需要通过数字化的技术手段实现更精确、更智能的土壤数据实时监测,助力智慧农业<sup>[1]</sup>。基于此,本文提出一种基于用户数据报协议(UDP)组播协议的土壤数据监测软件。

**收稿日期:** 2024-12-31

**通信作者:** 梅小华(1978—),女,讲师,主要从事智能控制与应用系统方向的研究。E-mail:forest999@126.com。

**基金项目:** 福建省厦门市自然科学基金资助项目(3502Z20227032)

1 土壤监测系统概述

1.1 设计原则

土壤监测系统的设计目标主要是精准实时地检测土壤状况,并将监测系统中各类传感器的数据传输至各监测终端软件,以供专家分析和农户跟踪,从而进行有针对性施肥<sup>[2]</sup>。其设计原则主要包括:1) 土壤监测系统由软、硬件系统集成,硬件系统主要实现传感器采集,软件系统主要实现数据的处理和可视化;2) 发挥软件远程数据可视化的优势,将各节点的传感器数据以曲线或图表的方式展示给领域专家和农户;3) 软件与各传感器之间通过一对多的网络通信方式实现实时数据的最大化共享<sup>[3-4]</sup>。

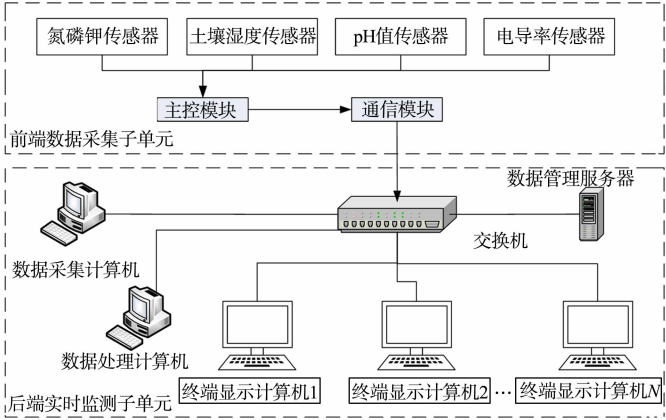


图 1 土壤监测系统硬件部署图

Fig. 1 Hardware deployment diagram of soil monitoring system

1.2 系统部署

土壤监测系统主要由前端数据采集子单元和后端实时监测子单元组成<sup>[5-6]</sup>,其中,前端数据采集子系统包括主控模块、土壤参数检测模块、网络通信模块,后端实时监测子系统主要由数据采集计算机、数据处理计算机、终端显示计算机和数据管理服务器组成。土壤监测系统硬件部署图,如图 1 所示。

传感器组用于对氮磷钾含量、土壤湿度、pH 值和电导率等土壤参数进行实时监测<sup>[7]</sup>;主控模块用于数据采集和组包;通信模块通过网络协议将组包后的土壤数据和设备工作状态数据传输至后端实时监测子系统的交换机。数据采集计算机通过交换机获取通信模块传输过来的数据包分离出土壤数据和设备工作状态数据,解析设备工作状态数据后,将土壤数据发送至数据处理计算机进行解析处理,处理后的设备工作状态数据、土壤数据均发送至终端显示计算机,解析后的设备工作状态数据、土壤数据及各类原始数据均存入数据管理服务器。

后端实时监测子单元由土壤监测系统的多个软件组成,包括土壤数据采集软件、土壤数据处理软件、土壤数据归档软件及土壤数据实时监测软件。土壤监测系统软件部署,如表 1 所示。

表 1 土壤监测系统软件部署

Tab. 1 Functional requirements for soil monitoring system

| 软件         | 软件代号 | 部署设备    |
|------------|------|---------|
| 土壤数据采集软件   | RDG  | 数据采集计算机 |
| 土壤数据处理软件   | RDP  | 数据处理计算机 |
| 土壤数据归档软件   | RDA  | 数据管理服务器 |
| 土壤数据实时监测软件 | RDS  | 终端显示计算机 |

2 土壤数据实时监测软件的设计与实现

在土壤监测系统中,土壤数据实时监测软件作为核心部件,不仅能为农业专家、农户提供实时测试数据,还能在专家、农户需要的时候提供历史土壤数据的查询和下载。RDS 软件通过网络接收来自前端数据采集设备(数据采集计算机、数据处理计算机)的物理量参数,包括土壤数据(氮磷钾含量、土壤湿度、pH 值和电导率等)和设备工作状态(设备数据采集是否正常、数据通信是否正常等)数据,并将解析

后的物理量参数以曲线、表格的方式形象直观地提供给农业专家、农户进行参考和分析,方便用户及时了解土壤状况及土壤监测设备的工作状态。为了实现友好的人机交互效果,RDS 软件采用基于 C# 语言的 WPF 框架进行开发。

### 2.1 软件设计思想

RDS 软件在设计上需要直接面对用户进行数据展示,因此,采用基于 C# 语言的 WPF 框架,利用软件分层与模块化设计,增加软件的通用性,使开发人员只需修改软件配置文件,就可适用不同项目的有效载荷测试需求<sup>[8-9]</sup>。RDS 软件功能模块结构图,如图 2 所示。

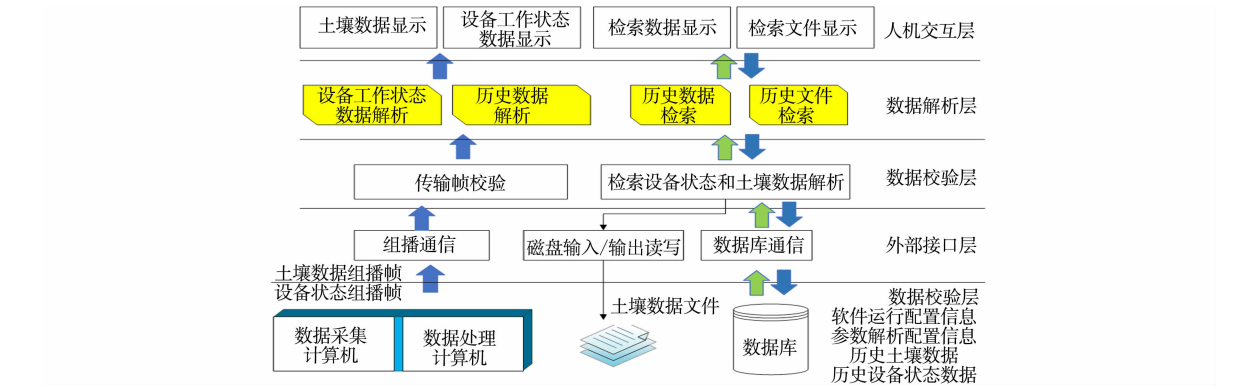


图 2 RDS 软件功能模块结构图

Fig. 2 Functional module structure diagram of RDS software

- 1) 外部接口层。实现 RDS 软件与前端设备、数据库和本地硬盘的数据存储与读取,RDS 软件通过网络接收来自前端数据采集设备的土壤实时监测数据和设备工作状态数据,并且为用户提供数据库的检索功能,从数据库中读取历史数据文件路径、历史土壤监测数据及解析方法等信息,下载需要的历史数据和文件。
- 2) 数据校验层。该层主要完成对实时数据的差错校验与恢复。由于 RDS 软件与前端设备的数据链路采用 UDP 组播通信的方式,可能存在数据帧丢失或解析错误的情况,并且对数据库的数据检索也需要进行必要的日期、字段等校验,所以,数据校验层要提供传输帧校验、检索指令和数据校验等功能。
- 3) 数据解析层。根据土壤监测系统内部数据接口协议,按照偏移位置、解析值和源码等字段对经过校验的实时数据帧进行处理,提取工程参数、遥测参数和设备工作状态数据等物理量,同时根据用户的检索条件,将历史数据和文件的检索条件转换成结构化查询语言(SQL),或将检索到的历史数据和数据文件目录发送至人机交互层进行显示。
- 4) 人机交互层。将数据解析层的计算结果、历史数据和文件的检索结果通过图表等方式实时显示给农业专家和农户,该部分采用面向实时数据流的模型-视图-视图模型(Model-View-ViewModel, MV-VM)设计模式,通过 ViewModel 与 View 的数据绑定模型,提高测试数据的可视化程度。

### 2.2 外部接口层设计

外部接口层包括 UDP 组播通信模块、数据库通信模块和硬盘输入/输出(IO)读写模块,其中,UDP 组播通信模块采用 UDP 组播的方式实时接收来自前端设备的各类测试数据,数据库通信模块采用 ADO 技术进行数据通信。

**2.2.1 UDP 组播通信** RDS 软件部署在多台终端显示计算机上,通过网络接收从接收数据采集计算机、数据处理计算机发送的设备工作状态数据和土壤实时监测数据,支持农业专家、农户实时监视土壤监测数据和系统各传感器的工作状态。RDS 软件与前端数据采集设备的通信采用 UDP 组播技术,而不是传统的传输控制协议(TCP)或 UDP 点对点通信方式,这样可以避免传统通信方式在“一对多”的情况下出现的网络拥塞,减少前端数据采集设备的计算负荷<sup>[10-11]</sup>。

WPF 中实现组播技术有 2 种编程模式:一种是传统的 socket 编程;另一种是封装后的 UdpClient 类,后者对前者进行封装,编程上更简洁,RDS 软件采用 UdpClient 类以轮询的方式接收组播数据<sup>[12-13]</sup>。组播数据接收功能程序块,如图 3 所示。

```
UdpClient receiveUdp;
void InitialUDP()
{
    receiveUdp = new UdpClient();
    receiveUdp.Client.SetSocketOption(SocketOptionLevel.Socket, SocketOptionName.ReuseAddress, true);
    receiveUdp.Client.Bind(ipLocal);
    receiveUdp.JoinMulticastGroup(IPAddress.Parse(strEndIP));
    receiveUdp.Client.SetSocketOption(SocketOptionLevel.IP, SocketOptionName.MulticastTimeToLive, 10);
    iPEPEnd = new IPEndPoint(IPAddress.Parse(strEndIP), int.Parse(strEndPort));
}
void ReadThreadLoop()
{
    int receiveSum = 0;
    receiveUdp.Client.ReceiveBufferSize = 1024*512;//设置大缓冲区可以支持更大的网络数据吞吐量
    while (readThreadLooping)
    {
        byte [] receiveBuffer = null;
        receiveBuffer = receiveUdp.Receive(ref iPEPEnd);// 每次收到后都会改变 iPEPEnd 的值
        receiveSum += receiveBuffer.Length;
        ardOut.WriteData (receiveBuffer);
    }
}
```

图 3 组播数据接收功能程序块

Fig. 3 Multicast data receiving functional program block

上述组播发送函数中,UdpClient 类初始化后得到实例 receiveUdp,receiveUdp 的 receive 方法以阻塞的形式读取组播数据,接收到一个完整的有效载荷工程参数帧或遥测参数帧后,退出 receive 方法,并将接收到的数据通过缓冲区送到数据解析层。

2.2.2 数据库通信 土壤监测系统的数据库部署在 Windows Server2008 的数据管理服务器上,管理服务器上装有 Oracle 数据库软件,RDS 软件采用 ActiveX 数据对象 (ADO) 技术与数据库进行通信,ADO 是微软提出的应用程序接口 (API),用以实现访问关系或非关系数据库中的数据,Oracle 数据库提供对 ADO 框架的托管封装 ODP.NET 驱动,在实际使用过程中,无需安装整个 ODP.NET 驱动套件,RDS 软件只需引用其中的 Oracle.ManagedDataAccess.dll 即可与数据库进行通信<sup>[14]</sup>。数据库访问功能程序,如图 4 所示。

```
public static bool GetDataFromDB(out DataSet dt,string sqlStr)
{
    oconn.Open();
    OracleDataAdapter myAdapter = new OracleDataAdapter(sqlStr, oconn);
    DataSet dtDataSet = new DataSet();
    dtDataSet.Clear();
    myAdapter.Fill(dtDataSet);
    dt = dtDataSet;
    oconn.Close();
    if (dtDataSet.Tables.Count != 1)
        return false ;
    else
        return true;
}
```

图 4 数据库访问功能程序

Fig. 4 Database access function program

由于 RDS 软件对数据库的访问频次不高,农业专家、农户一般根据需要查看数据文件,因此在

查询前连通数据库,查询结果后返回关闭连接,从而有效减少数据库在线维护的新连接数量。

2.3 数据校验层设计

数据校验层提供了对接收到的各类土壤实时监测数据帧、历史数据文件名和字段信息合法性的校验,其中,由于前端数据采集设备与 RDS 软件采用 UDP 组播连接,监视过程中实时接收到的土壤实时监测数据帧不存在干扰导致的数据错误,所以不用进行纠错码校验,但要按照数据帧格式进行必要的帧头、帧长及帧类型等校验。土壤实时监测数据帧字段信息说明,如表 2 所示。

表 2 土壤实时监测数据帧字段信息说明

Tab. 2 Field description of real-time soil monitoring data frames

| 字段    | 说明                                   | 字段   | 说明                                 |
|-------|--------------------------------------|------|------------------------------------|
| 帧头    | 用于标识一帧的开始和同步                         | 系统时间 | 用于查询和显示历史数据的窗体                     |
| 帧类型   | 包括土壤实时监测数据帧和设备工作状态数据帧,用于校验接收到的数据帧合法性 | 帧长   | 指示该帧长度,用于校验由于 UDP 通信产生的数据帧分段或丢失的情况 |
| 信源    | 标识该数据帧的来源终端                          | 信宿   | 标识该数据帧的目的终端                        |
| 帧计数   | 标识本帧序号                               | 保留   | 留作后续软件扩展                           |
| 应用数据段 | 发送的具体物理量信息                           |      |                                    |

2.4 数据解析层设计

数据解析层对接收到的各类土壤实时监测数据帧按照应用数据段的解析配置信息进行解析,同时对用户检索到的历史数据和历史数据文件按字段进行解析,解析后将结果发送至人机交互层进行显示。

其中,实时参数对土壤实时监测数据帧的解析采用数据帧驱动的方式,接收到一帧完整数据帧后才进行解析。RDS 软件数据解析流程图,如图 5 所示。

2.5 人机交互层设计

RDS 软件作为土壤实时监测数据、设备工作状态的显示部件,要求提供友好的数据显示与操作交互界面,便于有效农业专家、农户直观地监视土壤状态、设备的工作状态,及时发现存在的异常信息,因此人机交互层的设计对数据可视化程度和操作安全性要求较高等。

目前主流的软件前端设计模式主要有 3 类:模型-视图-控制器(Model-View-Controller, MVC)、模型-视图-表示模式(Model-View-Presenter, MVP)和 MVVM。Model 提供数据,View 负责显示,Controller/Presenter 负责逻辑的处理,MVP 和 MVVM 是基于 MVC 模式的改进,其主要改进思想是将 View 与 Model 层彻底分离。

MVVM 由微软 WPF 和 Silverlight 的架构师 Ken Cooper 和 Ted Peters 开发,是一种简化用户界面的事件驱动编程方式,由 John Gossman 于 2005 年发表<sup>[15]</sup>。它利用数据绑定、属性依赖、路由事件、命令等特性实现高效灵活的架构,不同于传统 C# 语言的 WinForm 架构,MVVM 的核心是数据驱动即 ViewModel,ViewModel 是 View 和 Model 的关系映射。典型的 MV-VM 软件设计模式,如图 6 所示。

由图 6 可知:传统的 MVVM 设计模式在 Model 层除了有数据实体 Entity(一般采用 Hibernate 持久化技术生成)外,还有大量的业务逻辑。因此,目前 MVVM 主要大量用于 Web 项目的建设,在面向实时数据流的项目领域应用不多,RDS 软件为了实现实时数据流和数据库数据在用户界面(UI)交互上的统一,将所有业务逻辑放置至数据解析层,而 Model 层仅保留数据实体,从而实现实时数据流和数据库数据的实时交互,并支持页面数据显示的自定义布局。RDS 软件实际 MVVM 设计模式图,如图 7 所示。RDS 软件 MVVM 类功能说明,如表 3 所示。

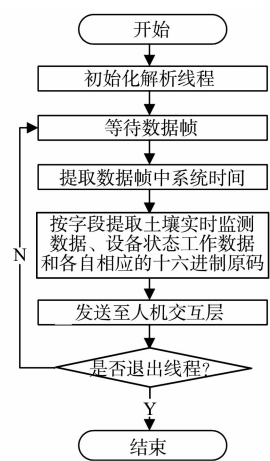


图 5 RDS 软件数据解析流程图  
Fig. 5 Data parsing flowchart of RDS software



图 6 典型 MVVM 设计模式图  
Fig. 6 Typical MVVM design pattern diagram

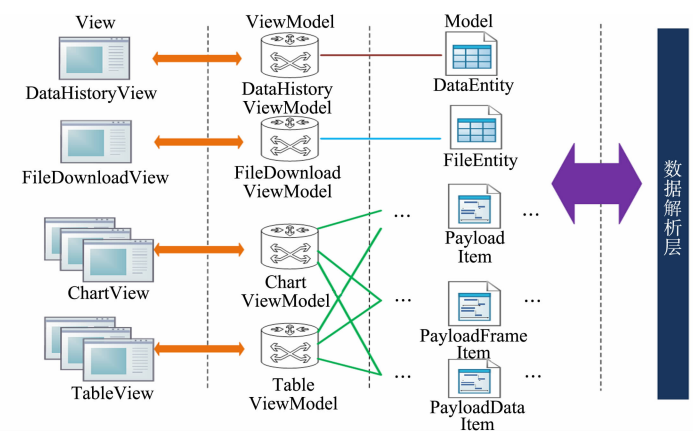


图 7 RDS 软件实际 MVVM 设计模式图  
Fig. 7 Actual MVVM design patten diagram for RDS software

因此,RDS 软件在人机交互层具体实现 MVVM 设计模式时,根据外部接口层的特点,采用与传统 MVVM 不同的方式,主要有以下 2 点不同。

- 1) 传统 MVVM 中 Model 层包含了业务逻辑和实体,而 RDS 软件将 Model 层中的大部分业务逻辑剔除,划分至数据解析层。
- 2) ViewModel 与 View 采用了一对多的设计,可以有多个 View 共享一个 ViewModel。



表 3 RDS 软件 MVVM 类功能说明  
Tab. 3 Function description of RDS software MVVM class

| 层         | 类                     | 功能说明                     |
|-----------|-----------------------|--------------------------|
| View      | TableView             | 显示土壤实时监测数据、设备工作状态数据的表格窗体 |
|           | ChartView             | 显示土壤实时监测数据、设备工作状态数据的曲线窗体 |
|           | FileDownloadView      | 用于查询和下载历史数据文件的窗体         |
|           | DataHistoryView       | 用于查询和显示历史数据的窗体           |
| ViewModel | TableViewModel        | 绑定数据元素与表格支持表格显示参数配置      |
|           | ChartViewModel        | 绑定数据元素与表格支持曲线显示参数配置      |
|           | FileDownloadViewModel | 绑定历史数据文件查询结果支持历史数据文件查询   |
|           | DataHistoryViewModel  | 绑定历史数据查询结果支持历史数据查询       |
| Model     | PayloadItem           | 传感器元素                    |
|           | PayloadFrameItem      | 数据帧元素                    |
|           | PayloadDataItem       | 数据元素                     |
|           | FileEntity            | 数据库中的历史数据文件表             |
|           | DataEntity            | 数据库中的历史数据                |
|           |                       |                          |

此外,农业专家、农户可根据自身需要选取关注的参数,组成新的页面进行显示。该页面不仅提供表格和曲线两种显示方式,还配备越界报警功能。RDS 软件人机交互界面,如图 8~11 所示。

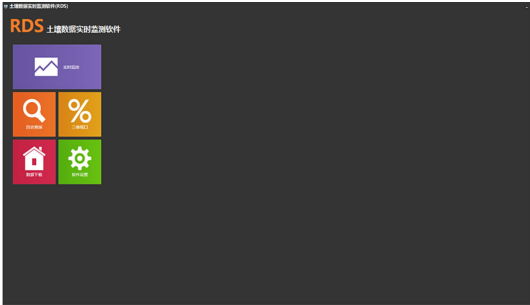


图 8 软件导航界面  
Fig. 8 Software navigation interface



图 9 RDS 软件参数表格显示界面  
Fig. 9 Parameter table display interface of RDS software

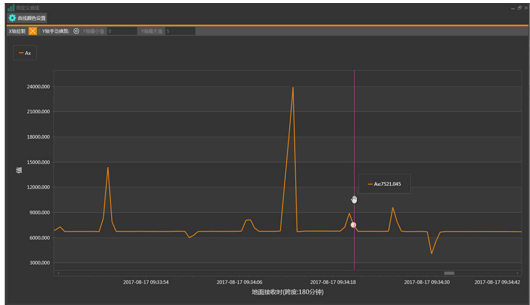


图 10 RDS 软件参数曲线显示界面  
Fig. 10 Parameter curve display interface of RDS software

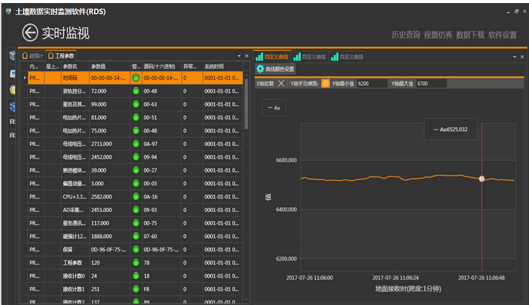


图 11 RDS 软件参数自定义显示界面  
Fig. 11 Parameter custom display interface of RDS software

3 结束语

土壤数据实时监测软件是土壤监测系统与用户的主要交互部件,提供土壤实时监测数据(氮磷钾含量、土壤湿度、pH 值和电导率等土壤参数)和系统硬件设备工作状态的显示,以及支持历史数据及其文件的查询。该软件通过分层模块化设计,并在人机交互层采用 MVVM 设计模式,提高了土壤数据的可视化程度。采用 UDP 组播的数据通信方式,便于显示终端的灵活组网与扩展,具有较好的通用性和可扩展性。土壤监测系统的长期实际运行效果表明,该软件能够满足农业专家、农户对土壤实时状态的监测需求。



参考文献:

[1] 张志颖,李虬,何雅彤,等. 基于物联网的大承包地土壤数据实时分析监测系统[J]. 电脑知识与技术,2024,20(26): 86-90.

[2] 强云涛,杨家桂. 基于多传感器技术土壤质量在线监测系统设计[J]. 电子制作,2024,32(14):15-18. DOI:10. 3969/j. issn. 1006-5059. 2024. 14. 004.

[3] 刘晓霞,李航,商国旭,等. 基于云平台的大田农业土壤墒情数据采集监测系统设计[J]. 赤峰学院学报(自然科学版),2023,39(10):75-82. DOI:10. 3969/j. issn. 1673-260X. 2023. 10. 013.

[4] 李从宏,陈杨渊. 基于 C# 的土壤渗透系数测量系统上位机软件设计[J]. 电脑编程技巧与维护,2024(11):40-42. DOI:10. 3969/j. issn. 1006-4052. 2024. 11. 012.

[5] 谢亮,陈天伟. 数据采集分析软件的设计与实现[J]. 自动化与仪器仪表,2021(12):129-133. DOI:10. 14016/j. cnki. 1001-9227. 2021. 10. 129.

[6] 张春美,全钊锋,吴树添,等. 基于物联网技术的智慧农业环境监测系统设计[J]. 电子制作,2024,32(15):37-40. DOI:10. 3969/ j. issn. 1006-5059. 2024. 15. 010.

[7] 钟国财,郝泽亮,谢东东,等. 土壤墒情远程监测系统软件设计[J]. 物联网技术,2018,8(3):26-28. DOI:10. 16667/j. issn. 2095-1302. 2018. 03. 004.

[8] 张玉民,何鑫,杨百川. 基于 WPF 技术的无人机地面站软件设计与实现[J]. 计算机工程与设计,2019,40(4):1167-1173. DOI:10. 16208/j. issn1000-7024. 2019. 04. 043.

[9] 陈帅. 基于网络/WPF 技术的无人机地空数据传输与监视系统设计[D]. 南京:南京航空航天大学,2020.

[10] SAMPAIO A,SOUSA P. An adaptable and ISP-friendly multicast overlay network[J]. Peer-to-Peer Networking and Applications,2018,12(4):809-829. DOI:10. 1007/s12083-018-0680-y.

[11] AL HASROUTY C,LAMALI M L,AUTEFAGE V,*et al.* Adaptive multicast streaming for videoconferences on software-defined networks[J]. Computer Communications,2018,132: 42-55. DOI: 10. 1016/j. comcom. 2018. 09. 009.

[12] 吴小锋,刘晓波,赵逸飞,等. UDP 协议及 IP 组播通信模型在水电厂监控系统中的应用研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文),2024,22(6):632-639. DOI:10. 13244/j. cnki. jjiwhr. 20240055.

[13] 诸坚彬,秦会斌,崔佳冬,等. 基于组播技术的信息传递[J]. 计算机应用与软件,2016,33(8):172-174,205. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-386x. 2016. 08. 038.

[14] 李远文,耿富强. 基于 ODP. NET 访问 Oracle 空间数据[J]. 矿山测量,2014(3):96-98. DOI:10. 3969/j. issn. 1001-358X. 2014. 03. 33.

[15] 柴青山. 基于 MVVM 模式的 Vue. js 框架在物流软件自动化测试系统中的应用研究[D]. 北京:北京邮电大学,2019.

(责任编辑:黄晓楠      英文审校:陈婧)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202503024



# 采用高光谱技术的川西矿区 周边土壤铬含量反演模型

王光羽<sup>1</sup>, 杨斌<sup>1,2,3</sup>, 魏添翼<sup>1</sup>, 卓思杰<sup>1</sup>, 陈卓尔<sup>1</sup>, 沙英超<sup>1</sup>

(1. 西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010;

2. 西南科技大学 国家遥感中心绵阳科技城分部, 四川 绵阳 621010;

3. 西南科技大学 四川天府新区创新研究院, 四川 成都 610299)

**摘要:** 为快速检测出矿产资源开采及运输过程中对周边土壤的重金属的污染,以川西铜矿周边的土壤为研究对象,对原始光谱反射率进行 0~1 阶分数阶微分(阶数间隔 0.2);通过最小绝对收缩和选择算子(LASSO)算法对变换后的光谱进行特征波段筛选,并利用岭回归、支持向量机回归、自适应提升算法、反向传播神经网络、门控循环单元(GRU)算法构建铬元素含量(质量比)的反演模型。研究表明:与原始光谱相比,经 0.2 阶、0.4 阶微分后最大相关系数提升了 5% 和 9%,筛选出的特征波段集中在近红外光谱区;预测效果最好的模型为 0.4-GRU,其决定系数、均方根误差、相对分析误差分别为 0.799 2、4.875 0、2.300;该模型能较准确地预测出土壤铬含量。

**关键词:** 土壤; 川西矿区; 铬含量; 光谱分析; 高光谱反演; 分数阶微分

中图分类号: X 53(271)

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2025)04-0462-08

## Inversion Model of Soil Cr Content Around Western Sichuan Mining Area Using Hyperspectral Technology

WANG Guangyu<sup>1</sup>, YANG Bin<sup>1,2,3</sup>, WEI Tianyi<sup>1</sup>,  
ZHUO Sijie<sup>1</sup>, CHEN Zhuoer<sup>1</sup>, SHA Yingchao<sup>1</sup>

(1. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

2. Mianyang Science and Technology City Division, National Remote Sensing Center of China,  
Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

3. Sichuan Tianfu New Area Innovation Research Institute,

Southwest University of Science and Technology, Chengdu 610299, China)

**Abstract:** To rapidly detect heavy metals pollution in the soil around caused by mineral resource exploitation and transportation, the soil around the copper mine in western Sichuan was taken as the research object. The original spectral reflectance was processed by fractional-order differentiation from 0 to 1 (an interval of 0.2), and the minimum absolute shrinkage and selection operator (LASSO) algorithm was used to screen the characteristic bands of the transformed spectrum. Inversion models of Cr content (mass ratio) were constructed using ridge regression, support vector regression, adaptive boosting algorithm, back propagation neural net-

收稿日期: 2025-03-02

通信作者: 杨斌(1979—),男,教授,博士后,博士生导师,主要从事遥感科学与技术在地学领域中综合应用的研究。  
E-mail: xjgis@126.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41201541);四川省军民融合研究院项目联合资助项目(39000005)

work, and gated recurrent unit (GRU) algorithms. The research results showed that, compared to the original spectra, the maximum correlation coefficient increased by 5% and 9% respectively after 0.2-order and 0.4-order differentiation, and the selected feature bands were concentrated in the near-infrared spectral region. The best prediction model was 0.4 GRU with determination coefficients of 0.799 2, root mean squared error of 4.875 0, and residual predictive deviation of 2.300. This model could accurately predict soil Cr content.

**Keywords:** soil; western Sichuan mining area; Cr content; spectroscopy analysis; hyperspectral inversion; fractional-order differentiation;

土壤作为陆地生态系统的重要组成部分,与生态系统其他部分不断循环转化<sup>[1]</sup>。埋藏在土壤之下的矿产资源不仅推动了工业化发展,也对地方经济做出巨大贡献。矿产开采过程中的不当排放会导致重金属进入土壤,危害土壤环境<sup>[2]</sup>。这些进入土壤的重金属富集后,随着降雨、地质活动等因素迁移、扩散至周边土壤、地下水和地表水中,并流入食物链,对动植物健康和生态环境构成巨大威胁<sup>[3]</sup>。

根据《全国土壤污染状况调查公报》统计,工矿业是造成土壤污染或超标的重要原因之一,其中,重金属为代表的无机污染物超标点位占全部超标点位的 82.8%。目前,关于矿区的生产、废弃物排放和能源消耗的公开数据缺乏,导致人们不了解矿区周边的受影响状况<sup>[4]</sup>。传统的土壤重金属含量(质量比)获取方法主要基于实验室化学分析,不仅耗时、耗力,还需要专业的仪器设备,很难大规模、动态、快速地进行检测<sup>[5]</sup>。高光谱技术具备高效、可大范围监测等优势,成为土壤重金属监测的研究热点。近年来,土壤高光谱反演的研究热点集中在光谱前处理、反演模型优化等方向。李武耀等<sup>[6]</sup>发现相较于原始光谱,分数阶微分处理的光谱对土壤有机质含量的反演效果更好。丁启东等<sup>[7]</sup>联合分数阶微分与光谱指数对土壤中水分及有机质含量进行估算,水分的模型精度和机质的模型精度分别为 0.970 和 0.983。Zhang 等<sup>[8]</sup>利用深度森林 2021 算法构建了土壤重金属 Cr、Zn 含量预测模型,该模型表现出较高的预测精度。Ye 等<sup>[9]</sup>提出了一种结合地理加权回归与极端梯度提升算法的新模型,并将其应用于土壤重金属 As 含量的反演研究。基于此,本文采用高光谱技术对川西矿区周边土壤铬含量反演模型开展研究。

# 1 实验材料与方法

## 1.1 研究区概述

研究区位于四川省甘孜藏族自治州九龙县,地处攀西平原与青藏高原的过渡地带,地形切割强烈。区域气候冬季干燥寒冷,夏季温凉多雨,降水充沛,温度差较大,四季不分明,并且拥有较长的日照时间,同时植被覆盖率较大。该区域的主要土壤类型包括高山寒漠土、黑毡土、山地暗棕壤、棕壤<sup>[10]</sup>。

## 1.2 土壤采集与光谱测定

研究区采样点分布图,如图 1 所示。

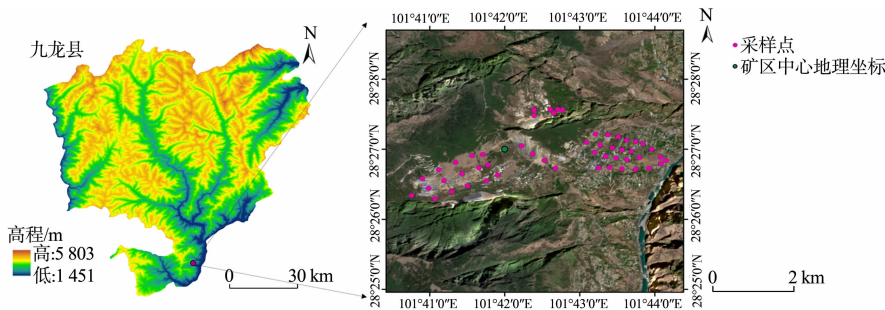


图 1 研究区采样点分布图

Fig. 1 Distribution map of sampling points in research area

研究区采样深度为 0~20 cm,将采集到的土样在实验室中自然风干、研磨过筛、去除杂质。按四分法将样品分为两份,一份通过 ICP-OES 型电感耦合等离子体发射光谱仪测定总铬含量;另一份使用(美国 Spectral Evolution 公司)PSR-2500 型光谱仪测定光谱数据,光谱仪的光谱范围为 350~2 500 nm,其中,350~1 000 nm 波段的采样间隔为 1.5 nm;1 001~2 500 nm 波段的采样间隔为 6 nm。每个土壤样

本测定 5 次光谱,取平均值作为样本的最终光谱反射率。原始光谱中 350~399、2 401~2 500 nm 两个边缘波段信噪比较低,因此,剔除这两个边缘波段<sup>[11-12]</sup>。采用光谱化学特性共生距离(SPHY)算法将 51 个土壤样本按 2 : 1 划分为训练集和验证集。

1.3 光谱预处理

光谱采集误差不可避免受随机因素影响,为了降低噪声的影响,需要对光谱数据进行必要的预处理<sup>[13]</sup>。采用多项式平滑(SG)对光谱数据进行平滑去噪,从而提高光谱数据的信噪比。为达到压缩波段、消除相邻波段间冗余信息的目的,将平滑后的光谱进行 10 nm 的光谱重采样,获得经过处理的原始光谱反射率(R)。分数阶微分(fractional-order differentiation,FOD)将整数阶微分推广到任意阶,其对光谱反射率的细节变化更为敏感,利用 MATLAB R2023a 软件对 R 进行 0~1 阶微分(步长为 0.2)。目前,分数阶微分的定义主要有 Grunwald-Letnikov(G-L)、Riemann-Liouville(R-L)、Caputo 三种形式。已有的研究表明,G-L 定义在处理一维光谱数据时是有效的,并且运行过程简单易行。G-L 的定义<sup>[14-15]</sup>为

$$\frac{d^v f(x)}{dx^v} \approx f(x) + (-v)f(x-1) + \frac{(-v)(-v+1)}{2}f(x-2) + \cdots + \frac{\Gamma(-v+1)}{D(-v+D+1)}f(x-D)。(1)$$

式(1)中: $x$  为自变量; $v$  为微分阶数, $v=0$  为原始光谱, $v=1$  则为一阶微分; $\Gamma$  为 Gamma 函数; $D$  为微分的上下限差。

1.4 特征波段选取

为了消除冗余和无关信息、减小模型复杂度、加快模型运算速度,采用最小绝对收缩和选择算子(LASSO)算法对 R 及光谱数据(经过 FOD 处理后)进行特征波段提取。LASSO 算法筛选特征变量是在回归模型的损失函数中引入一个 L1 正则化项,将不相关或冗余的特征系数压缩为零,只保留对目标变量有显著影响的特征。

1.5 反演模型构建与评价

1.5.1 反演模型 选取 5 种机器学习模型作为反演模型,分别为岭回归(Ridge)、支持向量机回归(SVR)、自适应提升算法(AdaBoost)、反向传播神经网络(BPNN)和门控循环单元(GRU)算法。

Ridge 是一种改良的最小二乘估计法,通过在损失函数中添加正则项来提升模型可靠度。模型中的  $\alpha$  值设定在  $10^{-3} \sim 10^3$ <sup>[16]</sup>,使用交叉验证法确定最佳  $\alpha$  值。

SVR 是支持向量机的一个重要分支,通过将问题映射到高维空间,在高维空间寻找一个线性分离的超平面,从而实现建模。分别构建基于 RBF 核与 Linear 核的 SVR 模型,惩罚系数 C 设定为 0.001~100, $\Gamma$  设置为  $10^{-6} \sim 10$ <sup>[17]</sup>,采用网格搜索对 C 和  $\Gamma$  进行寻优。

AdaBoost 算法是将多个弱回归器进行线性叠加,通过不断迭代调整每个弱分类器的权重,从而提升整体模型的性能。以决策树回归器作为模型的基学习器,学习率设置为 0.001~1、学习器数量设置为 1~150<sup>[18-19]</sup>,最佳参数通过反复训练获取。

BPNN 是深度学习领域中最基本、常用的算法之一,其核心在于通过梯度下降法更新神经网络的权重和偏置,从而优化整体性能。隐含层的激活函数为 tansig,输出层的函数选择 purelin,利用 trainlm 函数完成训练,输入层个数由特征波段数决定,输出层个数为 1。隐含层节点数(M)通过经验公式得出<sup>[20-21]</sup>,即

$$M=\sqrt{m+N}+a。(2)$$

式(2)中: $m$  和  $N$  分别为输入层和输出层个数; $a$  为 $[0,10]$ 之间的任意数。

GRU 算法是循环神经网络(RNN)的变种,其与长短期记忆网络(LSTM)相似,都是通过门控制单元解决 RNN 中不能长期记忆等问题,同时相较于 LSTM,GRU 网络架构更为简化<sup>[22]</sup>。模型的学习率为 0.001,激活函数为 ReLU,训练中使用 Adam 优化器,最大迭代轮数为 400<sup>[23-24]</sup>。

1.5.2 精度评价 选择决定系数( $R^2$ )、相对分析误差( $\epsilon_{PD}$ )和均方根误差( $\epsilon_{RMS}$ )在验证集上评价模型精度。对于模型的评价采用如下现有评价标准。

- 1) 优秀模型为  $R^2>0.9, \epsilon_{PD}>3.0$ ;
  - 2) 良好模型为  $0.9>R^2>0.82, 3.0>\epsilon_{PD}>2.5$ ;
  - 3) 近似模型为  $0.82>R^2>0.65, 2.5>\epsilon_{PD}>2.0$ ;
  - 4) 具有一定的估算能力的模型为  $0.65>R^2>0.50, 2.0>\epsilon_{PD}>1.5$ ;
  - 5) 不具备估算能力的模型为  $R^2<0.50, \epsilon_{PD}<1.5^{[25-26]}$ 。
- 3 个参数的具体定义分别为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2},$$

(3)

$$\epsilon_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}},$$

(4)

$$\epsilon_{PD} = \epsilon_e / \epsilon_{RMS}。$$

(5)

式(3)~(5)中: $y_i$  为样本重金属铬含量的实测值变量; $\hat{y}_i$  为对应的预测值变量; $\bar{y}$  为实测值均值变量; $n$  为预测样本数; $\sigma_e$  为样本重金属铬含量实测值的标准差。

2 实验结果与分析

2.1 土壤重金属 Cr 含量

土壤重金属 Cr 含量统计特征值,如表 1 所示。表 1 中: $w_{max}$  为铬含量最大值; $w_{min}$  为铬含量最小值; $\bar{w}$  为铬含量平均值; $\sigma$  为标准差。

由表 1 可知:研究区内铬含量最大值为  $220.13\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,平均值为  $106.83\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,铬含量平均值高于四川省背景值( $73.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[27]</sup> 及全国背景值( $61\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[28]</sup>,部分点位的铬含量高于国家标准 GB 15618—2018《土壤环境质量-农用地土壤污染风险管控标准(试行)》中有关农业用地的风险筛选值( $150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。

表 1 土壤重金属 Cr 含量统计特征值  
Tab. 1 Statistical characteristics of heavy metal Cr content in soil

| 样品类型 | <i>n</i> /个 | <i>w</i> <sub>max</sub> / <i>mg</i> · <i>kg</i> <sup>−1</sup> | <i>w</i> <sub>min</sub> / <i>mg</i> · <i>kg</i> <sup>−1</sup> | $\bar{w}$ / <i>mg</i> · <i>kg</i> <sup>−1</sup> | $\sigma$ / <i>mg</i> · <i>kg</i> <sup>−1</sup> |
|------|-------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 总样本  | 51          | 220.13                                                        | 61.98                                                         | 106.83                                          | 28.999                                         |
| 训练集  | 34          | 220.13                                                        | 61.98                                                         | 107.03                                          | 34.829                                         |
| 验证集  | 17          | 125.77                                                        | 89.12                                                         | 106.43                                          | 11.213                                         |

2.2 铬含量相关分析与特征波段提取

不同 FOD 处理下光谱与铬含量的相关系数,如图 2 所示。图 2 中: $r$  为相关系数; $|r_{max}|$  为最大相关系数绝对值; $v$  为阶数; $\lambda$  为波长。

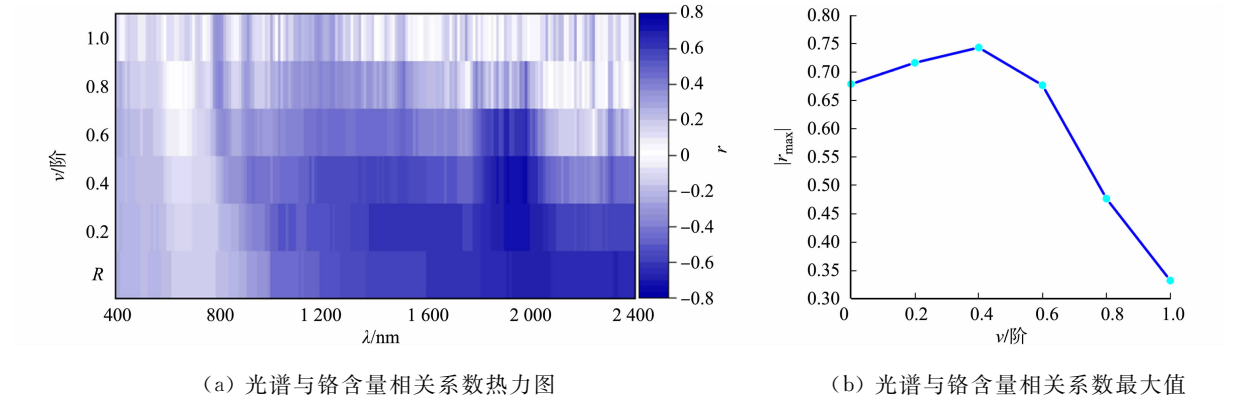


图 2 不同 FOD 处理下光谱与铬含量的相关系数  
Fig. 2 Correlation coefficients between spectra and Cr content under different FOD treatments

由图 2 可知:光谱经 0.2 阶、0.4 阶微分后,其最大相关系数较原始光谱有一定提升,但随着阶数的增加,相关性下降明显; $R$  阶、0.2 阶、0.4 阶、0.6 阶微分在  $1\,900\text{ nm}$  附近有较高的相关性,而 0.8 阶

和 1.0 阶微分在 2 000~2 400 nm 相关性更强。特征波段数量,如表 2 所示。表 2 中: $\lambda_{\text{特征}}$  为特征波长。

表 2 特征波段数量  
Tab. 2 Number of characteristic bands

| $\nu$ /阶 | 筛选波段数量 | $\lambda_{\text{特征}}/\text{nm}$                             | $ r_{\text{max}} $ |
|----------|--------|-------------------------------------------------------------|--------------------|
| $R$      | 8      | 400、620、630、880、890、1 320、1 350、2 350                       | 0.663              |
| 0.2      | 9      | 400、410、610、880、1 180、1 320、1 910、2 340、2 350               | 0.712              |
| 0.4      | 4      | 400、590、1 240、1 980                                         | 0.743              |
| 0.6      | 9      | 400、570、580、800、1 100、1 180、1 240、1 980、2 010               | 0.665              |
| 0.8      | 10     | 400、570、790、1 100、1 180、1 240、1 980、2 000、2 010、2 400       | 0.476              |
| 1.0      | 11     | 400、420、790、1 000、1 030、1 180、1 240、2 220、2 230、2 240、2 400 | 0.332              |

由表 2 可知:特征光谱涵盖了可见光和近红外波段,但更多的特征波段集中在近红外光谱区(780~2 500 nm)。特征波段集中在近红外区是因为不同光谱变化下该区域都有更高的相关系数,并且在前人的研究中,Cr 的特征波段更多的位于该区域<sup>[29-30]</sup>。

2.3 反演模型精度评价

土壤重金属 Cr 含量反演模型精度评价,如表 3 所示。

表 3 土壤重金属 Cr 含量反演模型精度评价  
Tab. 3 Accuracy evaluation of heavy metal Cr content inversion model

| 预测反演模型   | $\nu$ /阶 | 训练集     |                         | 验证集     |                         |                        |
|----------|----------|---------|-------------------------|---------|-------------------------|------------------------|
|          |          | $R^2$   | $\epsilon_{\text{RMS}}$ | $R^2$   | $\epsilon_{\text{RMS}}$ | $\epsilon_{\text{PD}}$ |
| Ridge    | $R$      | 0.798 2 | 15.412 7                | 0.565 0 | 7.174 0                 | 1.563                  |
|          | 0.2      | 0.802 0 | 15.266 5                | 0.580 5 | 7.046 1                 | 1.591                  |
|          | 0.4      | 0.761 9 | 16.741 5                | 0.427 6 | 8.230 0                 | 1.362                  |
|          | 0.6      | 0.700 2 | 18.788 8                | 0.433 7 | 8.186 3                 | 1.370                  |
|          | 0.8      | 0.674 5 | 19.575 4                | 0.340 9 | 8.831 4                 | 1.270                  |
|          | 1.0      | 0.662 3 | 19.939 3                | 0.108 7 | 10.269 6                | 1.092                  |
| SVR      | $R$      | 0.771 6 | 16.399 5                | 0.668 2 | 6.265 9                 | 1.789                  |
|          | 0.2      | 0.750 3 | 17.146 8                | 0.681 8 | 6.136 0                 | 1.827                  |
|          | 0.4      | 0.859 8 | 12.846 3                | 0.600 4 | 6.876 2                 | 1.631                  |
|          | 0.6      | 0.736 9 | 17.600 0                | 0.758 0 | 5.351 3                 | 2.095                  |
|          | 0.8      | 0.682 8 | 19.324 9                | 0.499 7 | 7.694 4                 | 1.457                  |
|          | 1.0      | 0.685 7 | 19.236 0                | 0.042 8 | 10.642 8                | 1.054                  |
| AdaBoost | $R$      | 0.975 8 | 5.338 8                 | 0.709 2 | 5.866 5                 | 1.911                  |
|          | 0.2      | 0.976 6 | 5.248 6                 | 0.612 3 | 6.773 3                 | 1.655                  |
|          | 0.4      | 0.987 7 | 3.804 3                 | 0.321 2 | 8.961 9                 | 1.251                  |
|          | 0.6      | 0.882 5 | 11.762 8                | 0.325 2 | 8.935 5                 | 1.255                  |
|          | 0.8      | 0.996 1 | 2.154 6                 | 0.271 6 | 9.283 7                 | 1.208                  |
|          | 1.0      | 0.999 9 | 0.312 8                 | 0.611 0 | 6.784 1                 | 1.653                  |
| BPNN     | $R$      | 0.802 9 | 12.350 7                | 0.677 8 | 6.174 1                 | 1.816                  |
|          | 0.2      | 0.816 1 | 11.622 0                | 0.600 0 | 6.879 8                 | 1.630                  |
|          | 0.4      | 0.843 2 | 15.137 3                | 0.572 5 | 7.112 7                 | 1.576                  |
|          | 0.6      | 0.817 4 | 14.491 2                | 0.591 5 | 6.952 5                 | 1.613                  |
|          | 0.8      | 0.769 2 | 13.347 0                | 0.152 1 | 10.016 4                | 1.119                  |
|          | 1.0      | 0.462 3 | 30.281 4                | 0.446 6 | 8.092 2                 | 1.386                  |
| GRU      | $R$      | 0.703 4 | 18.687 2                | 0.527 1 | 7.480 7                 | 1.499                  |
|          | 0.2      | 0.999 9 | 0.067 0                 | 0.680 3 | 6.150 5                 | 1.823                  |
|          | 0.4      | 0.685 4 | 19.244 9                | 0.799 2 | 4.875 0                 | 2.300                  |
|          | 0.6      | 0.999 9 | 0.159 0                 | 0.649 1 | 6.443 8                 | 1.740                  |
|          | 0.8      | 0.999 9 | 0.170 9                 | 0.295 2 | 9.132 2                 | 1.228                  |
|          | 1.0      | 0.181 0 | 31.051 9                | 0.154 7 | 10.001 2                | 1.121                  |

由表 3 可知:最佳的预测反演模型为 0.4 阶的 GRU(0.4-GRU),其  $R^2$  值、 $\epsilon_{\text{RMS}}$  值、 $\epsilon_{\text{PD}}$  值分别为



0.799 2、4.875 0、2.300,该反演模型能较为准确地出土壤重金属 Cr 含量;效果最差的反演模型为 1.0 阶的 SVR(1.0-SVR),其  $R^2$ 、 $\epsilon_{PD}$  极低,不具备估算能力;从光谱变换角度来看,0.2、0.4 阶微分能明显地提升反演模型精度;从模型的角度来看,线性 Ridge 与其他几种非线性反演模型的性能存在一定差距;5 种反演模型中,GRU 的性能更为优异,表明该反演模型在小样本非时序数据下也有很好的性能。

不同光谱变换预测散点图,如图 3 所示。图 3 中: $w_p$  为预测值; $w_r$  为实测值。

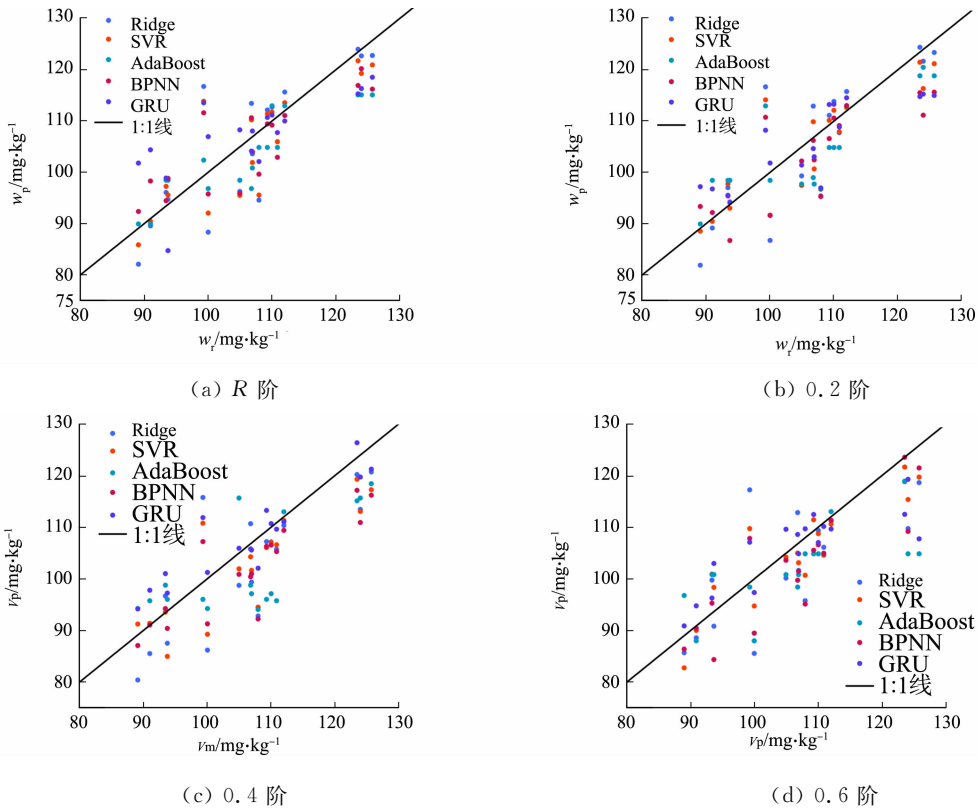


图 3 不同光谱变换预测散点图

Fig. 3 Scatter plots of prediction from different spectral transformations

由图 3 可知:经 0.2 阶、0.4 阶、0.6 阶阶微分处理的反演模型预测值更贴近 1 : 1 线,而经 0.8 阶和 1.0 阶微分变换所构建的反演模型,大部分都不理想,许多预测点偏离 1 : 1 线。因此,较低阶的 FOD 处理能更好地突出光谱细节,基于较低阶微分光谱构建的反演模型具有更好的预测性能,而较高阶的微分光谱可能更强调光谱的细节变化,甚至放大噪声,导致构建出的预测反演模型性能欠佳。

### 3 结论

以川西某铜矿周边土壤作为研究对象,筛选出不同光谱变换方法的特征波段,建立土壤重金属 Cr 含量高光谱反演模型,并分析对比不同模型的优劣,得出以下 3 个结论。

1) 研究区内重金属 Cr 含量高于四川省背景值及全国背景值,部分点位的铬含量高于国家农业用地风险筛选值。相较原始光谱,经过 0.2 阶、0.4 阶微分变换后最大相关系数有一定提升,并且经 0.4 阶微分处理后的光谱与土壤重金属铬的相关性最高。6 种光谱变换方法的特征波段主要集中在近红外光谱区。

2) 构建出的 Cr 含量最佳反演模型为 0.4-GRU,其  $R^2$ 、 $\epsilon_{PD}$  分别为 0.799 2 和 2.300,该模型能较为准确地预测出土壤重金属 Cr 含量。在 5 种模型中,GRU 的预测性能最佳,表明其在小样本非时序数据下的应用潜力。光谱的 FOD 变换能明显地提升模型精度,特别是较低阶 FOD 变换构建的模型有更好的预测能力。

3) 高光谱数据基于实验室实测光谱,并没有与遥感数据结合,导致实验结果缺乏一定的普适性。希望以后的研究中能将地面光谱与遥感影像结合,建立适用于大范围土壤重金属污染定量评估的模型。

由于采样点个数的限制,模型性能是否充分发挥也需进一步验证。后续研究可通过扩大采样点数量,并对不同类型和不同重金属污染程度的土壤进行研究,探索出兼顾普适性和可靠性的反演方法。

参考文献:

[1] ANIKWE M,IFE K. The role of soil ecosystem services in the circular bioeconomy[J]. *Frontiers in Soil Science*, 2023,3:1209100. DOI:10. 3389/fsoil. 2023. 1209100.

[2] ZHANG Yangxi,WEI Lifei,LU Qikai,*et al.* Mapping soil available copper content in the mine tailings pond with combined simulated annealing deep neural network and UAV hyperspectral images[J]. *Environmental Pollution*, 2023,320:120962. DOI:10. 1016/j. envpol. 2022. 120962.

[3] JIANG Xiawei,LIU Wenhong,XU Hao,*et al.* Characterizations of heavy metal contamination, microbial community, and resistance genes in a tailing of the largest copper mine in China[J]. *Environmental Pollution*, 2021,280: 116947. DOI:10. 1016/j. envpol. 2021. 116947.

[4] MAUS V,WERNER T. Impacts for half of the world's mining areas are undocumented[J]. *Nature*, 2024,625 (7993):26-29. DOI:10. 1038/d41586-023-04090-3.

[5] 张霞,孙友鑫,尚坤,等. 基于有机质特征谱段的土壤 Cd 含量高光谱遥感反演[J]. *农业机械学报*, 2024,55(1):186-195. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2024. 01. 017.

[6] 李武耀,买买提·沙吾提,买合木提·巴拉提. 基于分数阶微分的土壤有机质含量高光谱反演研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2023,60(7):404-411. DOI:10. 3788/LOP220715.

[7] 丁启东,王怡婧,张俊华,等. 基于高光谱信息的宁夏引黄灌区中低产田土壤水分和有机质含量估算[J]. *应用生态学报*, 2023,34(11):3011-3020. DOI:10. 13287/j. 1001-9332. 202311. 013.

[8] ZHANG Zihao,GUO Fei,XU Zhen,*et al.* On retrieving the chromium and zinc concentrations in the arable soil by the hyperspectral reflectance based on the deep forest[J]. *Ecological Indicators*, 2022,144:109440. DOI:10. 1016/j. ecolind. 2022. 109440.

[9] YE Miao,ZHU Lin,LI Xiaojuan,*et al.* Estimation of the soil arsenic concentration using a geographically weighted XGBoost model based on hyperspectral data[J]. *Science of the Total Environment*, 2023,858:159798. DOI:10. 1016/j. scitotenv. 2022. 159798.

[10] 陈晓杰,何政伟,薛东剑. 基于模糊综合评价的土壤环境质量研究:以九龙县里伍铜矿区为例[J]. *水土保持研究*, 2012,19(1):130-133.

[11] CHEN Lihan,LAI Jian,TAN Kun,*et al.* Development of a soil heavy metal estimation method based on a spectral index: Combining fractional-order derivative pretreatment and the absorption mechanism[J]. *Science of the Total Environment*, 2022,813:151882. DOI:10. 1016/j. scitotenv. 2021. 151882.

[12] WANG Xi,AN Shi,XU Yaqing,*et al.* A back propagation neural network model optimized by mind evolutionary algorithm for estimating Cd, Cr, and Pb concentrations in soils using Vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy[J]. *Applied Sciences*, 2019,10(1):51. DOI:10. 3390/app10010051.

[13] 杨林婧,杨莎,张圣杨,等. 农田土壤有机碳高光谱特征及定量监测研究[J]. *激光生物学报*, 2024,33(4):316-325. DOI:10. 3969/j. issn. 1007-7146. 2024. 04. 004.

[14] 赵启东,葛翔宇,丁建丽,等. 结合分数阶微分技术与机器学习算法的土壤有机碳含量光谱估测[J]. *激光与光电子学进展*, 2020,57(15):253-261. DOI:10. 3788/LOP57. 153001.

[15] 丁松滔,张霞,尚坤,等. 基于分数阶微分的土壤重金属高光谱遥感图像反演[J]. *遥感学报*, 2023,27(9):2191-2205. DOI:10. 11834/jrs. 20232513.

[16] 郭立笑,陈志超,马彦鹏,等. 基于无人机多光谱和多波段组合纹理的马铃薯 LAI 估算[J]. *光谱学与光谱分析*, 2024,44(12):3443-3454. DOI:10. 3964/j. issn. 1000-0593(2024)12-3443-12.

[17] 王梦迪,何莉,刘潜,等. 基于小麦冠层无人机高光谱影像的农田土壤含水率估算[J]. *农业工程学报*, 2023,39(6): 120-129. DOI:10. 11975/j. issn. 1002-6819. 202207170.

[18] LIN Nan,JIANG Ranzhe,LI Genjun,*et al.* Estimating the heavy metal contents in farmland soil from hyperspectral images based on Stacked AdaBoost ensemble learning[J]. *Ecological Indicators*, 2022,143:109330. DOI:10. 1016/j. ecolind. 2022. 109330.

[19] ZHAN Dexi,MU Yongqi,DUAN Wenxu,*et al.* Spatial prediction and mapping of soil water content by TPE-GBDT model in Chinese coastal delta farmland with sentinel-2 remote sensing data[J]. *Agriculture*, 2023,13(5):1088.

DOI:10.3390/agriculture13051088.

[20] 毛继华,赵恒谦,金倩,等. 河北铅锌尾矿库区土壤重金属含量高光谱反演方法对比[J]. 农业工程学报,2023,39(22):144-156. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.202307092.

[21] 郭云开,刘宁,刘磊,等. 土壤 Cu 含量高光谱反演的 BP 神经网络模型[J]. 测绘科学,2018,43(1):135-139,152. DOI:10.16251/j.cnki.1009-2307.2018.01.023.

[22] YUAN Quan,WANG Jiajun,ZHENG Mingwei,*et al.* Hybrid 1D-CNN and attention-based Bi-GRU neural networks for predicting moisture content of sand gravel using NIR spectroscopy[J]. Construction and Building Materials,2022,350:128799. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.128799.

[23] GHOLAMI H,MOHAMMADIFAR A,GOLZARI S,*et al.* Interpretability of simple RNN and GRU deep learning models used to map land susceptibility to gully erosion[J]. Science of the Total Environment,2023,904:166960. DOI:10.1016/j.scitotenv.2023.166960.

[24] WU Xijun,ZHAO Zhilei,TIAN Ruiling,*et al.* Total synchronous fluorescence spectroscopy coupled with deep learning to rapidly identify the authenticity of sesame oil[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy,2021,244:118841. DOI:10.1016/j.saa.2020.118841.

[25] 张霞,王一博,孙伟超,等. 基于铁氧化物特征光谱和改进遗传算法反演土壤 Pb 含量[J]. 农业工程学报,2020,36(16):103-109. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.013.

[26] SAEYS W,MOUAZEN A M,RAMON H. Potential for onsite and online analysis of pig manure using visible and near infrared reflectance spectroscopy[J]. Biosystems Engineering,2005,91(4):393-402. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2005.05.001.

[27] 胡圆园,张一澜,王英英,等. 四川攀西地区典型金属采选与冶炼企业周边农用地重金属污染评价及来源解析[J]. 四川环境,2024,43(2):72-78. DOI:10.14034/j.cnki.schj.2024.02.010.

[28] 刘茂生. 全国金属采矿业矿区周边土壤重金属污染评价及潜在污染区域识别[D]. 赣州:江西理工大学,2023. DOI:10.27176/d.cnki.gnfyc.2023.000930.

[29] 尹翠景. 青海省湟中区甘河工业园区土壤重金属污染反演研究[D]. 西安:长安大学,2022. DOI:10.26976/d.cnki.gchau.2022.000639.

[30] 杨晗. 三江源区土壤重金属含量高光谱反演研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2020. DOI:10.27671/d.cnki.gcjtc.2020.000859.

(责任编辑: 陈志贤      英文审校: 方德平)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202404043



# Burgers-Huxley 方程的精确行波解

贾惠临, 温振庶, 张晓雅

(华侨大学 数学科学学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 分别采用  $(G'/G)$ -展开法和  $F$ -展开法, 得到 Burgers-Huxley 方程各种形式的精确行波解。研究结果表明:  $(G'/G)$ -展开法只能得到 Burgers-Huxley 方程在  $\lambda^2 - 4\mu > 0$  时的解, 而  $F$ -展开法只能得到 Burgers-Huxley 方程在某些特殊情况下的解。

**关键词:** Burgers-Huxley 方程;  $(G'/G)$ -展开法;  $F$ -展开法; 精确行波解

**中图分类号:** O 175.29

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5013(2025)04-0470-06

## Exact Traveling Wave Solutions of Burgers-Huxley Equation

JIA Huilin, WEN Zhenshu, ZHANG Xiaoya

(School of Mathematical Sciences, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** Various kinds of exact traveling wave solutions of Burgers-Huxley equation by using  $(G/G)$ -expansion method and  $F$ -expansion method are obtained respectively. The research results show that one can only obtain the solutions of Burgers-Huxley equation under the condition  $\lambda^2 - 4\mu > 0$  by  $(G/G)$ -expansion method, while one can only find the solutions of Burgers-Huxley equation under some special conditions by  $F$ -expansion method.

**Keywords:** Burgers-Huxley equation;  $(G'/G)$ -expansion method;  $F$ -expansion method; exact traveling wave solution

### 1 预备知识

Burgers-Huxley(BH)方程是一类重要的非线性反应扩散方程,其形式为

$$u_t + pu_x - u_{xx} + qu(u-1)(u-s) = 0. \quad (1)$$

式(1)中:  $p, q, s$  均为非零常数。

BH 方程(1)的解及其性态研究具有重要的理论和应用价值。目前,已经得到 BH 方程(1)的部分精确解。Fan<sup>[1]</sup>通过符号计算,得到 BH 方程(1)的一些精确解。Yefimova 等<sup>[2]</sup>通过 Cole-Hopf 变换,得到 BH 方程(1)的部分解。基于首次积分法,刘新源等<sup>[3]</sup>得到 BH 方程(1)的部分精确解和隐式解。从动力系统的角度<sup>[4-5]</sup>,王勤龙等<sup>[6]</sup>对 BH 方程(1)的行波解进行研究。基于齐次平衡法,詹雨等<sup>[7]</sup>得到 BH 方程(1)的几种不同形式的行波解;夏鸿鸣等<sup>[8]</sup>尝试选择适当的试探函数,得到 BH 方程(1)的扭状孤波解和奇异行波解。Kushner 等<sup>[9]</sup>基于 BH 方程(1)的动力学,构造其部分精确解。虽然已经找到了 BH 方程(1)的部分解,但基于新的方法可能会找到新的解。基于此,本文分别采用  $(G'/G)$ -展开法<sup>[10]</sup>和  $F$ -展开法<sup>[11]</sup>,得到了 BH 方程(1)的各种形式的精确行波解。

**收稿日期:** 2024-04-20

**通信作者:** 温振庶(1984-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事微分方程与动力系统的研究。E-mail: wenzhenshu@hqu.edu.cn。

**基金项目:** 福建省自然科学基金资助项目(2021J01302)

为了研究 BH 方程(1)的行波解,利用变换  $u(x,t)=u(\xi), \xi=x-ct$ ,将 BH 方程(1)写为

$$-cu' + pu' - u'' + qu(u-1)(u-s) = 0. \quad (2)$$

## 2 利用 $(G'/G)$ -展开法求解 BH 方程(1)

假定  $u(\xi)$  可以展开为关于  $(G'/G)$  的多项式,有

$$u(\xi) = \sum_{i=0}^m a_i (G'/G)^i, \quad a_m \neq 0. \quad (3)$$

式(3)中:  $a_0, a_1, \dots, a_m$  为待确定的常数,且  $G=G(\xi)$ , 满足

$$G'' + \lambda G' + \mu G = 0. \quad (4)$$

式(4)中:  $\lambda, \mu$  为常数。

关于方程(4)的解,可参考文献[10]的式(18)~(20)。利用  $u''$  与  $u(u-1)(u-s)$  之间的齐次平衡,可得式(3)中的最高次幂为  $m=1$ 。把式(3)代入式(2),并利用式(4),可得

$$a_1(a_1^2 q - 2)(G'/G)^3 + a_1(c - p - 3\lambda + qa_1(3a_0 - 1 - s))(G'/G)^2 + (a_1(c - p - \lambda)\lambda - 2a_1\mu + qa_1(3a_0^2 - 2a_0(1+s) + s))(G'/G) + a_1(c - p - \lambda)\mu + qa_0(a_0 - 1)(a_0 - s) = 0. \quad (5)$$

令式(5)中  $(G'/G)^k (k=0, 1, 2, 3)$  的系数为零,可得

$$\left. \begin{aligned} a_1(c - p - \lambda)\mu + qa_0(a_0 - 1)(a_0 - s) &= 0, \\ a_1(c - p - \lambda)\lambda - 2a_1\mu + qa_1(3a_0^2 - 2a_0(1+s) + s) &= 0, \\ a_1(c - p - 3\lambda + qa_1(3a_0 - 1 - s)) &= 0, \\ a_1(a_1^2 q - 2) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

方程组(6)有以下解。

i) 当  $q=2(\lambda^2-4\mu)$  时,有

$$a_0 = \frac{1}{2} \left( 1 \pm \frac{\lambda}{\sqrt{\lambda^2 - 4\mu}} \right), \quad a_1 = \pm \sqrt{\frac{2}{q}}, \quad c = p \pm (2s-1)\sqrt{\lambda^2 - 4\mu}. \quad (7)$$

ii) 当  $q=\frac{2(\lambda^2-4\mu)}{(s-1)^2}, s>1$  时,有

$$a_0 = \frac{1}{2} \left( s+1 \pm \frac{(s-1)\lambda}{\sqrt{\lambda^2 - 4\mu}} \right), \quad a_1 = \pm \sqrt{\frac{2}{q}}, \quad c = p \mp \frac{s+1}{s-1} \sqrt{\lambda^2 - 4\mu}. \quad (8)$$

iii) 当  $q=\frac{2(\lambda^2-4\mu)}{(s-1)^2}, s<1$  时,有

$$a_0 = \frac{1}{2} \left( s+1 \mp \frac{(s-1)\lambda}{\sqrt{\lambda^2 - 4\mu}} \right), \quad a_1 = \pm \sqrt{\frac{2}{q}}, \quad c = p \pm \frac{s+1}{s-1} \sqrt{\lambda^2 - 4\mu}. \quad (9)$$

iv) 当  $q=\frac{2(\lambda^2-4\mu)}{s^2}, s<0$  时,有

$$a_0 = \frac{s}{2} \left( 1 \mp \frac{\lambda}{\sqrt{\lambda^2 - 4\mu}} \right), \quad a_1 = \pm \sqrt{\frac{2}{q}}, \quad c = p \pm \frac{s-2}{s} \sqrt{\lambda^2 - 4\mu}. \quad (10)$$

v) 当  $q=\frac{2(\lambda^2-4\mu)}{s^2}, s>0$  时,有

$$a_0 = \frac{s}{2} \left( 1 \pm \frac{\lambda}{\sqrt{\lambda^2 - 4\mu}} \right), \quad a_1 = \pm \sqrt{\frac{2}{q}}, \quad c = p \mp \frac{s-2}{s} \sqrt{\lambda^2 - 4\mu}. \quad (11)$$

利用式(3), (7)~(11), 以及文献[10]中的式(19), 可得定理1。

**定理1** i) 当  $q=2(\lambda^2-4\mu)$  时, BH 方程(1)有解

$$\begin{aligned} u_1^\pm(\xi) &= \frac{1}{2} \left( 1 \pm \frac{\lambda}{\sqrt{\lambda^2 - 4\mu}} \right) \mp \lambda \sqrt{\frac{1}{2q}} \pm \sqrt{\frac{\lambda^2 - 4\mu}{2q}} \times \\ &\quad \frac{c_1 \exp\left(\frac{1}{2} \sqrt{\lambda^2 - 4\mu} \xi\right) - c_2 \exp\left(-\frac{1}{2} \sqrt{\lambda^2 - 4\mu} \xi\right)}{c_1 \exp\left(\frac{1}{2} \sqrt{\lambda^2 - 4\mu} \xi\right) + c_2 \exp\left(-\frac{1}{2} \sqrt{\lambda^2 - 4\mu} \xi\right)}. \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)中: $\xi=x-ct, c=p\pm(2s-1)\sqrt{\lambda^2-4\mu}$ 。

ii) 当  $q=2(\lambda^2-4\mu)/(s-1)^2, s>1$  时, BH 方程(1)有解

$$u_2^\pm(\xi)=\frac{1}{2}\left(s+1\pm\frac{(s-1)\lambda}{\sqrt{\lambda^2-4\mu}}\right)\mp\lambda\sqrt{\frac{1}{2q}}\pm\sqrt{\frac{\lambda^2-4\mu}{2q}}\times\frac{c_1\exp\left(\frac{1}{2}\sqrt{\lambda^2-4\mu}\xi\right)-c_2\exp\left(-\frac{1}{2}\sqrt{\lambda^2-4\mu}\xi\right)}{c_1\exp\left(\frac{1}{2}\sqrt{\lambda^2-4\mu}\xi\right)+c_2\exp\left(-\frac{1}{2}\sqrt{\lambda^2-4\mu}\xi\right)}。 \tag{13}$$

式(13)中: $\xi=x-ct, c=p\mp\frac{s+1}{s-1}\sqrt{\lambda^2-4\mu}$ 。

iii) 当  $q=2(\lambda^2-4\mu)/(s-1)^2, s\leq 1$  时, BH 方程(1)有解

$$u_3^\pm(\xi)=\frac{1}{2}\left(s+1\mp\frac{(s-1)\lambda}{\sqrt{\lambda^2-4\mu}}\right)\mp\lambda\sqrt{\frac{1}{2q}}\pm\sqrt{\frac{\lambda^2-4\mu}{2q}}\times\frac{c_1\exp\left(\frac{1}{2}\sqrt{\lambda^2-4\mu}\xi\right)-c_2\exp\left(-\frac{1}{2}\sqrt{\lambda^2-4\mu}\xi\right)}{c_1\exp\left(\frac{1}{2}\sqrt{\lambda^2-4\mu}\xi\right)+c_2\exp\left(-\frac{1}{2}\sqrt{\lambda^2-4\mu}\xi\right)}。 \tag{14}$$

式(14)中: $\xi=x-ct, c=p\pm\frac{s+1}{s-1}\sqrt{\lambda^2-4\mu}$ 。

iv) 当  $q=2(\lambda^2-4\mu)/s^2, s<0$  时, BH 方程(1)有解

$$u_4^\pm(\xi)=\frac{s}{2}\left(1\mp\frac{\lambda}{\sqrt{\lambda^2-4\mu}}\right)\mp\lambda\sqrt{\frac{1}{2q}}\pm\sqrt{\frac{\lambda^2-4\mu}{2q}}\times\frac{c_1\exp\left(\frac{1}{2}\sqrt{\lambda^2-4\mu}\xi\right)-c_2\exp\left(-\frac{1}{2}\sqrt{\lambda^2-4\mu}\xi\right)}{c_1\exp\left(\frac{1}{2}\sqrt{\lambda^2-4\mu}\xi\right)+c_2\exp\left(-\frac{1}{2}\sqrt{\lambda^2-4\mu}\xi\right)}。 \tag{15}$$

式(15)中: $\xi=x-ct, c=p\pm\frac{s-2}{s}\sqrt{\lambda^2-4\mu}$ 。

v) 当  $q=2(\lambda^2-4\mu)/s^2, s>0$  时, BH 方程(1)有解

$$u_5^\pm(\xi)=\frac{s}{2}\left(1\pm\frac{\lambda}{\sqrt{\lambda^2-4\mu}}\right)\mp\lambda\sqrt{\frac{1}{2q}}\pm\sqrt{\frac{\lambda^2-4\mu}{2q}}\times\frac{c_1\exp\left(\frac{1}{2}\sqrt{\lambda^2-4\mu}\xi\right)-c_2\exp\left(-\frac{1}{2}\sqrt{\lambda^2-4\mu}\xi\right)}{c_1\exp\left(\frac{1}{2}\sqrt{\lambda^2-4\mu}\xi\right)+c_2\exp\left(-\frac{1}{2}\sqrt{\lambda^2-4\mu}\xi\right)}。 \tag{16}$$

式(16)中: $\xi=x-ct, c=p\mp\frac{s-2}{s}\sqrt{\lambda^2-4\mu}$ 。

$u_1^+$  和  $u_1^-$  (式(12))的波形图,如图 1 所示。其他解的波形图类似。

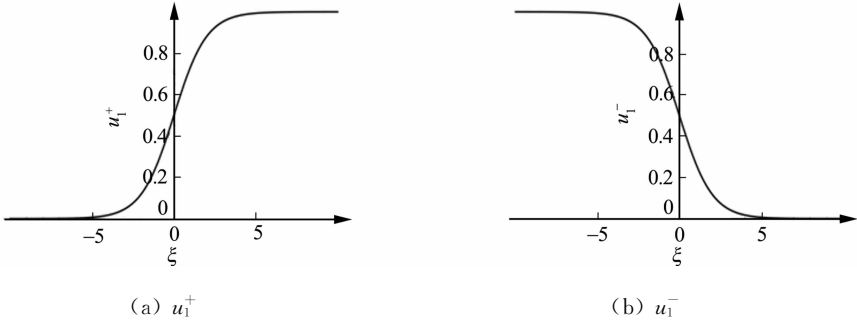


图1  $u_1^+$  和  $u_1^-$  的波形图  
Fig. 1 Waveform diagrams of  $u_1^+$  and  $u_1^-$



### 3 利用 $F$ -展开法求解 BH 方程(1)

假定  $u(\xi)$  可以展开成关于  $F(\xi)$  的多项式, 即

$$u(\xi) = \sum_{i=0}^m a_i F^i(\xi), \quad a_m \neq 0. \tag{17}$$

式(17)中:  $a_0, a_1, \dots, a_m$  为待定的常数, 且  $F(\xi)$  满足一阶常微分方程

$$(F')^2 = q_0 + q_2 F^2 + q_4 F^4. \tag{18}$$

式(18)中:  $q_0, q_2, q_4$  为常数。

根据式(18), 有  $F'F'' = q_2 FF' + 2q_4 F^3 F'$ 。进一步有

$$F'' = q_2 F + 2q_4 F^3. \tag{19}$$

关于方程(14)的解, 可参考文献[11]的表 1。利用  $u''$  与  $u(u-1)(u-s)$  之间的齐次平衡, 可得式(17)中的最高次幂为  $m=1$ 。把式(17)代入式(2), 并利用式(19), 可得

$$\begin{aligned} & a_1(p-c)F'(\xi) + a_1(a_1^2 q - 2q_4)F^3(\xi) + qa_1^2(3a_0 - 1 - s)F^2(\xi) + \\ & (qa_1(3a_0^2 - 2a_0(1+s) + s) - a_1 q_2)F(\xi) + qa_0(a_0 - 1)(a_0 - s) = 0. \end{aligned} \tag{20}$$

令式(20)中  $F'(\xi), F^k(\xi) (k=0, 1, 2, 3)$  的系数为零, 可得

$$\left. \begin{aligned} & a_1(p-c) = 0, \\ & a_1(a_1^2 q - 2q_4) = 0, \\ & qa_1^2(3a_0 - 1 - s) = 0, \\ & qa_1(3a_0^2 - 2a_0(1+s) + s) - a_1 q_2 = 0, \\ & qa_0(a_0 - 1)(a_0 - s) = 0. \end{aligned} \right\} \tag{21}$$

方程组(21)有如下解。

i)  $a_0 = \frac{1}{2}, a_1 = \pm \sqrt{\frac{2q_4}{q}}, s = \frac{1}{2}, c = p, q = -4q_2$ 。

ii)  $a_0 = 1, a_1 = \pm \sqrt{\frac{2q_4}{q}}, s = 2, c = p, q = -q_2$ 。

iii)  $a_0 = 0, a_1 = \pm \sqrt{\frac{2q_4}{q}}, s = -1, c = p, q = -q_2$ 。

利用式(17)和方程组(21)的上述解, 以及文献[11]中的表 1, 可得 BH 方程(1)的解。

**定理 2** i) 假定  $q_0 = 1, q_2 = -2, q_4 = 1$ 。当  $s = \frac{1}{2}, c = p, q = 8$  时, BH 方程(1)有解

$$u_6^\pm(\xi) = \frac{1}{2}(1 \pm \tanh \xi) \text{ 或 } u_7^\pm(\xi) = \frac{1}{2}(1 \pm \coth \xi). \tag{22}$$

当  $s = 2, c = p, q = 2$  时, BH 方程(1)有解

$$u_8^\pm(\xi) = 1 \pm \tanh \xi \text{ 或 } u_9^\pm(\xi) = 1 \pm \coth \xi. \tag{23}$$

当  $s = -1, c = p, q = 2$  时, BH 方程(1)有解

$$u_{10}^\pm(\xi) = \pm \tanh \xi \text{ 或 } u_{11}^\pm(\xi) = \pm \coth \xi. \tag{24}$$

ii) 假定  $q_0 = 0, q_2 = 1, q_4 = -1$ 。当  $s = \frac{1}{2}, c = p, q = -4$  时, BH 方程(1)有解

$$u_{12}^\pm(\xi) = \frac{1}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \operatorname{sech} \xi. \tag{25}$$

当  $s = 2, c = p, q = -1$  时, BH 方程(1)有解

$$u_{13}^\pm(\xi) = 1 \pm \sqrt{2} \operatorname{sech} \xi. \tag{26}$$

当  $s = -1, c = p, q = -1$  时, BH 方程(1)有解

$$u_{14}^\pm(\xi) = \pm \sqrt{2} \operatorname{sech} \xi. \tag{27}$$

iii) 假定  $q_0 = 0, q_2 = -1, q_4 = 1$ 。当  $s = \frac{1}{2}, c = p, q = 4$  时, BH 方程(1)有解

$$u_{15}^{\pm}(\xi)=\frac{1}{2}\pm\frac{1}{\sqrt{2}}\csc \xi \text{ 或 } u_{16}^{\pm}(\xi)=\frac{1}{2}\pm\frac{1}{\sqrt{2}}\sec \xi.$$

(28)

当  $s=2,c=p,q=1$  时,BH 方程(1)有解

$$u_{17}^{\pm}(\xi)=1\pm\sqrt{2}\csc \xi \text{ 或 } u_{18}^{\pm}(\xi)=1\pm\sqrt{2}\sec \xi.$$

(29)

当  $s=-1,c=p,q=1$  时,BH 方程(1)有解

$$u_{19}^{\pm}(\xi)=\pm\sqrt{2}\csc \xi \text{ 或 } u_{20}^{\pm}(\xi)=\pm\sqrt{2}\sec \xi.$$

(30)

定理 2 部分解的波形图,如图 2 所示。其他解对应的波形图类似。

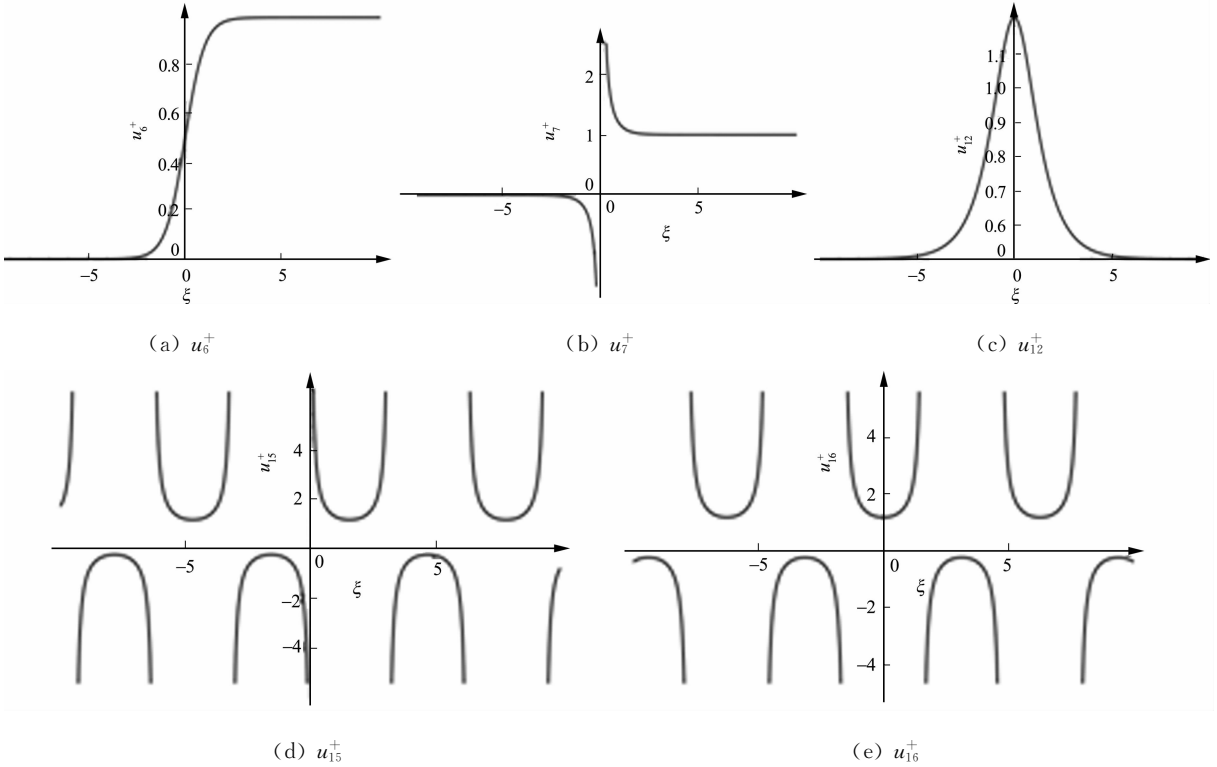


图 2 定理 2 部分解的波形图

Fig. 2 Waveform diagrams of partial solutions in theorem 2

4 结束语

基于 $(G'/G)$ -展开法和  $F$ -展开法,分别得到了 BH 方程(1)的各种形式的精确行波解。通过对解的分析,利用 $(G'/G)$ -展开法只能得到 BH 方程(1)在  $\lambda^2-4\mu>0$  时的解,而无法得到其在  $\lambda^2-4\mu<0$  时的解;而利用  $F$ -展开法只能得到 BH 方程(1)在某些特殊情况下的解。这是由 BH 方程(1)本身的结构造成的。近年来,奇异扰动微分方程也受到广泛的关注<sup>[12-16]</sup>,今后将进一步研究奇异扰动 BH 方程的解的性态。

参考文献:

[1] FAN Engui. Travelling wave solutions of nonlinear evolution equations by using symbolic computation[J]. Applied Mathematics: A Journal of Chinese Universities,2001,16(2):149-155. DOI:10. 1007/s11766-001-0021-3.

[2] YEFIMOVA O,KUDRYASHOV N. Exact solutions of the Burgers-Huxley equation[J]. Journal of Applied Mathematics and Mechanics,2004,68(3):413-420. DOI:10. 1016/S0021-8928(04)00055-3.

[3] 刘新源,姜璐,郭玉翠. Burgers-Huxley 方程新的精确解[J]. 山东理工大学学报(自然科学版),2006,20(5):44-46, 50. DOI:10. 3969/j. issn. 1672-6197. 2006. 05. 012.

[4] WEN Zhenshu. The generalized bifurcation method for deriving exact solutions of nonlinear space-time fractional partial differential equations[J]. Applied Mathematics and Computation,2020,366:124735. DOI: 10. 1016/j. amc.

- 2019, 124735.
- [5] WEN Zhenshu, LI Huijun, FU Yanggeng. Abundant explicit periodic wave solutions and their limit forms to space-time fractional Drinfel'd-Sokolov-Wilson equation[J]. Mathematical Methods in the Applied Sciences, 2021, 44(8): 6406-6421. DOI:10. 1002/mma. 7192.
- [6] 王勤龙, 邓习军. 一类广义 Burgers-Huxley 方程的解与其分支[J]. 数学的实践与认识, 2010, 40(1): 240-245.
- [7] 詹雨, 呼家源. 齐次平衡法与 Burgers-Huxley 方程的精确解[J]. 宝鸡文理学院学报(自然科学版), 2014, 34(4): 1-4. DOI:10. 13467/j. cnki. jlbuns. 2014. 04. 008.
- [8] 夏鸿鸣, 高忠社. Burgers-Huxley 方程的两类精确解[J]. 天水师范学院学报, 2019, 39(5): 115-117. DOI:10. 3969/j. issn. 1671-1351. 2019. 05. 022.
- [9] KUSHNER A, MATVIICHUK R. Exact solutions of the Burgers-Huxley equation via dynamics[J]. Journal of Geometry and Physics, 2020, 151: 103615. DOI:10. 1016/j. geomphys. 2020. 103615.
- [10] 温振庶. 经典的 Drinfel'd-Sokolov-Wilson 方程的非线性波解[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2016, 37(4): 519-522. DOI:10. 11830/ISSN. 1000-5013. 201604026.
- [11] 温振庶. 耦合的修正变系数 KdV 方程的非线性波解[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2014, 35(5): 597-600. DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 2014. 05. 0597.
- [12] HUANG Zihong, WEN Zhenshu. Persistence of kink and periodic waves to singularly perturbed two-component Drinfel'd-Sokolov-Wilson system [J]. Journal of Nonlinear Mathematical Physics, 2023, 30(3): 980-995. DOI:10. 1007/s44198-023-00111-x.
- [13] ZHAO Keqin, WEN Zhenshu. Existence of single-peak solitary waves and double-peaks solitary wave of Gardner equation with Kuramoto-Sivashinsky perturbation[J]. Qualitative Theory of Dynamical Systems, 2023, 22(3): 112. DOI:10. 1007/s12346-023-00811-1.
- [14] HUANG Zihong, WEN Zhenshu. Single-and double-peak solitary waves of two-component Drinfel'd-Sokolov-Wilson system with Kuramoto-Sivashinsky perturbation [J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2023, 33(1): 2350007. DOI:10. 1142/s0218127423500074.
- [15] HUANG Zihong, WEN Zhenshu. Persistence of solitary waves and periodic waves of a singularly perturbed generalized Drinfel'd-Sokolov system[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2023, 33(14): 2350171. DOI: 10. 1142/S0218127423501717.
- [16] DERZIE E, MUNYAKAZI J, DINKA T. A NSFD method for the singularly perturbed Burgers-Huxley equation [J]. Frontiers in Applied Mathematics and Statistics, 2023, 9: 1068890. DOI:10. 3389/fams. 2023. 1068890.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 黄心中)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202407035

上半平面上  $\alpha$ -Bloch 空间的刻画

陈娇, 胡春英

(华侨大学 数学科学学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 利用 Schwarz-Pick 引理, 得到上半平面上 Bloch 空间的性质。给出  $0 < \alpha \leq 2$  条件下上半平面上  $\alpha$ -Bloch 空间的一个刻画, 并借助具体实例验证结论的正确性。结果表明: 文中结果将已有的有界区域上的相应结果推广至无界区域上。

**关键词:** 上半平面; Bloch 空间;  $\alpha$ -Bloch 函数;  $\alpha$ -Bloch 空间

**中图分类号:** O 174.56

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5013(2025)04-0476-05

Characterization of  $\alpha$ -Bloch Space on Upper Half-Plane

CHEN Jiao, HU Chunying

(School of Mathematical Sciences, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** The property of the Bloch space on the upper half-plane is obtained by using Schwarz-Pick lemma. One characterization of  $\alpha$ -Bloch space on the upper half-plane under the condition of  $0 < \alpha \leq 2$  is given, and the conclusion is verified by specific examples. The results show that the proposed results extend the corresponding results on existing bounded domain to unbounded domain.

**Keywords:** upper half-plane; Bloch space;  $\alpha$ -Bloch function;  $\alpha$ -Bloch space

## 1 预备知识

记  $D = \{z \in \mathbf{C}; |z| < 1\}$  为复平面  $\mathbf{C}$  上的单位圆盘,  $\Pi^+ = \{z \in \mathbf{C}; \text{Im } z > 0\}$  为复平面  $\mathbf{C}$  上的上半平面,  $H(D)$  与  $H(\Pi^+)$  分别为  $D$  与  $\Pi^+$  上的全纯函数全体,  $H^\infty(D)$  与  $H^\infty(\Pi^+)$  分别为  $D$  与  $\Pi^+$  上的有界全纯函数全体。用  $\text{Aut}(D)$  表示  $D$  上的全纯自同构群, 即

$$\text{Aut}(D) = \left\{ e^{i\theta} \frac{z-a}{1-\bar{a}z} : a \in D, \theta \in \mathbf{R} \right\}.$$

用  $\text{Aut}(\Pi^+)$  表示  $\Pi^+$  上的全纯自同构群, 即

$$\text{Aut}(\Pi^+) = \left\{ \frac{az+b}{cz+d} : a, b, c, d \in \mathbf{R}, ad-bc=1 \right\}.$$

1980 年, Timoney<sup>[1]</sup> 最早提出单位球上 Bloch 空间的定义。之后, 许多学者采用微分形式、积分形式、Carleson 测度等各种方法来刻画 Bloch 空间<sup>[2-11]</sup>。而  $\alpha$ -Bloch 空间拓展了 Bloch 空间的研究范围。1993 年, Zhu<sup>[12]</sup> 给出  $\alpha$ -Bloch 空间的如下定义。

**定义 1** 设  $\alpha > 0$ ,  $f \in H(D)$ , 若  $f'$  满足

$$\|f\|_{B^\alpha(D)} = \sup_{z \in D} (1 - |z|^2)^\alpha |f'(z)| < \infty,$$

**收稿日期:** 2024-07-29

**通信作者:** 胡春英(1979—), 女, 讲师, 主要从事复分析的研究。E-mail: huchunying\_79@sina.com。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(12071161); 福建省自然科学基金资助项目(2023J01127)

则称  $f$  为  $D$  上的  $\alpha$ -Bloch 函数。所有这样函数之集称为  $D$  上的  $\alpha$ -Bloch 空间, 记为  $B^\alpha(D)$ 。

特别地, 若  $\alpha=1$ , 则  $B^1(D)=B(D)$  为  $D$  上经典的 Bloch 空间。

**注 1** 在  $\|\cdot\|_{B^\alpha(D)}$  下,  $B^\alpha(D)/\mathbb{C}$  成为一个 Bloch 空间。

**定义 2** 设  $\alpha>0, f\in H(\Pi^+)$ , 若  $f'$  满足

$$\|f\|_{B^\alpha(\Pi^+)} = \sup_{z\in\Pi^+} (\operatorname{Im} z)^\alpha |f'(z)| < \infty,$$

则称  $f$  为  $\Pi^+$  上的  $\alpha$ -Bloch 函数。所有这样函数集称为  $\Pi^+$  上的  $\alpha$ -Bloch 空间, 记为  $B^\alpha(\Pi^+)$ 。

特别地, 若  $\alpha=1$ , 则  $B^1(\Pi^+)=B(\Pi^+)$ ,  $B(\Pi^+)$  首先由 Sharma 等<sup>[13]</sup> 给出。

## 2 Bloch 空间

Zhu<sup>[14]</sup> 给出单位圆盘  $D$  上 Bloch 空间有如下性质。

**定理 1** 设  $f\in B(D)$ , 则存在以下 2 个结论。

1) 若  $\varphi:D\rightarrow D$  为全纯函数, 则  $\|f\circ\varphi\|_{B(D)}\leq\|f\|_{B(D)}$ , 而且当  $\varphi\in\operatorname{Aut}(D)$  时,

$$\|f\circ\varphi\|_{B(D)}=\|f\|_{B(D)}。$$

2)  $H^\infty(D)\subsetneq B(D)$ 。

文中证明了  $B(\Pi^+)$  上有类似的性质。

**定理 2** 设  $f\in B(\Pi^+)$ , 则有以下 2 个结论。

1) 若  $\varphi:\Pi^+\rightarrow\Pi^+$  为全纯函数, 则  $\|f\circ\varphi\|_{B(\Pi^+)}\leq\|f\|_{B(\Pi^+)}$ , 而且当  $\varphi\in\operatorname{Aut}(\Pi^+)$  时,

$$\|f\circ\varphi\|_{B(\Pi^+)}=\|f\|_{B(\Pi^+)}。$$

2)  $H^\infty(\Pi^+)\subsetneq B(\Pi^+)$ 。

证明: 1) 由 Schwarz-Pick 引理可得

$$\frac{|\varphi'(z)|}{\operatorname{Im} \varphi(z)} \leq \frac{1}{\operatorname{Im} z}, \quad \forall z\in\Pi^+。$$

上式中: 等号对某点  $z\in\Pi^+$  成立当且仅当  $\varphi\in\operatorname{Aut}(\Pi^+)$ 。

故有

$$\begin{aligned} \|f\circ\varphi\|_{B(\Pi^+)} &= \sup_{z\in\Pi^+} (\operatorname{Im} z) |(\varphi\circ f)'(z)| = \sup_{z\in\Pi^+} (\operatorname{Im} z) |\varphi'(z)| |f'(\varphi(z))| \\ &\leq \sup_{z\in\Pi^+} (\operatorname{Im} \varphi(z)) |f'(\varphi(z))| = \sup_{w\in\Pi^+} (\operatorname{Im} w) |f'(w)| = \|f\|_{B(\Pi^+)}。 \end{aligned}$$

从而  $\|f\circ\varphi\|_{B(\Pi^+)}\leq\|f\|_{B(\Pi^+)}$ 。

当  $\varphi\in\operatorname{Aut}(\Pi^+)$  时,  $\varphi(z)=\frac{az+b}{cz+d}, a, b, c, d\in\mathbf{R}, ad-bc=1$ , 故

$$\|f\circ\varphi\|_{B(\Pi^+)}=\|f\|_{B(\Pi^+)}。$$

2) 当  $f\in H^\infty(\Pi^+)$  时, 设  $|f(z)|\leq 1, z\in\Pi^+$ , 由 Schwarz-Pick 引理可得

$$\frac{|f'(z)|}{1-|f(z)|^2} \leq \frac{1}{\operatorname{Im} z}, \quad \forall z\in\Pi^+。$$

从而  $\sup_{z\in\Pi^+} (\operatorname{Im} z) |f'(z)| \leq \sup_{z\in\Pi^+} (1-|f(z)|^2) \leq 1$ , 即  $f\in B(\Pi^+)$ , 这表明  $H^\infty(\Pi^+)\subset B(\Pi^+)$ 。

现取  $f(z)=\log(1-iz), z\in\Pi^+$ , 则  $f\notin H^\infty(\Pi^+)$ 。但

$$\sup_{z\in\Pi^+} (\operatorname{Im} z) |f'(z)| = \sup_{z\in\Pi^+} (\operatorname{Im} z) \left| \frac{i}{1-iz} \right| \leq \sup_{z\in\Pi^+} (\operatorname{Im} z) \frac{1}{1+\operatorname{Im} z} \leq 1,$$

即  $f\in B(\Pi^+)$ 。故  $H^\infty(\Pi^+)\subsetneq B(\Pi^+)$ 。

## 3 $\alpha$ -Bloch 空间的刻画

1986 年, Holland 等<sup>[15]</sup> 给出了单位圆盘  $D$  上 Bloch 空间的一种刻画。

**定理 3**  $f\in B(D)$  当且仅当

$$\sup_{\substack{u, v\in D \\ u\neq v}} \left| \frac{f(u)-f(v)}{u-v} \right| \sqrt{1-|u|^2} \sqrt{1-|v|^2} < \infty。$$

2007 年,Zhao<sup>[16]</sup>得到满足  $0<\alpha\leqslant 2$  条件下的单位圆盘  $D$  上  $\alpha$ -Bloch 空间的刻画。

**定理 4** 设  $0<\alpha\leqslant 2$ ,若实数  $\lambda$  满足

$$\left. \begin{aligned} 0\leqslant \lambda\leqslant \alpha, & \quad 0<\alpha<1, \\ 0<\lambda<1, & \quad \alpha=1, \\ \alpha-1\leqslant \lambda\leqslant 1, & \quad 1<\alpha\leqslant 2, \end{aligned} \right\}$$

则  $f\in B^{\alpha}(D)$  当且仅当

$$\sup_{\substack{z,w\in D\\ z\neq w}}\left|\frac{f(z)-f(w)}{z-w}\right|(1-|z|^2)^{\lambda}(1-|w|^2)^{\alpha-\lambda}<\infty。$$

下面给出上半平面  $\Pi^+$  上  $\alpha$ -Bloch 空间的刻画。

**定理 5** 设  $0<\alpha\leqslant 2$ ,若实数  $\lambda$  满足

$$\left. \begin{aligned} 0\leqslant \lambda\leqslant \alpha, & \quad 0<\alpha<1, \\ 0<\lambda<1, & \quad \alpha=1, \\ \alpha-1\leqslant \lambda\leqslant 1, & \quad 1<\alpha\leqslant 2, \end{aligned} \right\}$$

则  $f\in B^{\alpha}(\Pi^+)$  当且仅当

$$\sup_{\substack{z,w\in \Pi^+\\ z\neq w}}\left|\frac{f(z)-f(w)}{z-w}\right|(\operatorname{Im} z)^{\lambda}(\operatorname{Im} w)^{\alpha-\lambda}<\infty。$$

为了证明定理 5,引入引理 1。

**引理 1**<sup>[16]</sup> 设  $0<\alpha\leqslant 2$ ,若  $\lambda\in\mathbf{R}$  满足

$$\left. \begin{aligned} 0\leqslant \lambda\leqslant \alpha, & \quad 0<\alpha<1, \\ 0<\lambda<1, & \quad \alpha=1, \\ \alpha-1\leqslant \lambda\leqslant 1, & \quad 1<\alpha\leqslant 2, \end{aligned} \right\}$$

则存在  $M>0$ ,使

$$H(x,y)=\frac{x^{\lambda}y^{\alpha-\lambda}}{y-x}\int_x^y\frac{\mathrm{d}\tau}{\tau^{\alpha}}\leqslant M,$$

对  $\forall x,y>0,x\neq y$  都成立。

**注 2**  $H\left(\frac{1}{x},\frac{1}{y}\right)=\frac{x^{-\lambda}y^{\lambda-\alpha}}{\frac{1}{y}-\frac{1}{x}}\int_{\frac{1}{y}}^{\frac{1}{x}}\frac{\mathrm{d}\tau}{\tau^{\alpha}}\stackrel{\tau=\frac{1}{u}}{=} \frac{x^{1-\lambda}y^{1+\lambda-\alpha}}{y-x}\int_x^y\frac{\mathrm{d}u}{u^{2-\alpha}}。$

定理 5 的证明。1) 充分性。记  $L=\sup_{\substack{z,w\in \Pi^+\\ z\neq w}}\left|\frac{f(z)-f(w)}{z-w}\right|(\operatorname{Im} z)^{\lambda}(\operatorname{Im} w)^{\alpha-\lambda}$ ,则  $L<\infty$ 。从而  $\forall z,w\in \Pi^+,z\neq w$ ,都有

$$\left|\frac{f(z)-f(w)}{z-w}\right|(\operatorname{Im} z)^{\lambda}(\operatorname{Im} w)^{\alpha-\lambda}\leqslant L。$$

令  $w\rightarrow z$ ,可得  $|f'(z)|(\operatorname{Im} z)^{\alpha}\leqslant L$ ,从而

$$\sup_{z\in \Pi^+}(\operatorname{Im} z)^{\alpha}|f'(z)|\leqslant L<\infty,$$

即  $f\in B^{\alpha}(\Pi^+)$ 。

2) 必要性。设  $f\in B^{\alpha}(\Pi^+)$ ,则有  $\|f\|_{B^{\alpha}(\Pi^+)}=\sup_{z\in \Pi^+}(\operatorname{Im} z)^{\alpha}|f'(z)|<\infty$ 。

记  $\Phi(t)=f(tw+(1-t)z),\forall z,w\in \Pi^+,z\neq w$ ,则  $\Phi'(t)=(w-z)f'(tw+(1-t)z)$ 。由于

$$\begin{aligned} |f(w)-f(z)| &= |\Phi(1)-\Phi(0)|=\left|\int_0^1\Phi'(t)\mathrm{d}t\right|= \\ &= |w-z|\left|\int_0^1f'(tw+(1-t)z)\mathrm{d}t\right|\leqslant \\ &= |w-z|\int_0^1|f'(tw+(1-t)z)|\mathrm{d}t\leqslant \\ &= |w-z|\|f\|_{B^{\alpha}(\Pi^+)}\int_0^1\frac{\mathrm{d}t}{[\operatorname{Im}(tw+(1-t)z)]^{\alpha}}。 \end{aligned}$$



当  $\operatorname{Im} z = \operatorname{Im} w$  时,  $|f(w) - f(z)| \leq |w - z| \|f\|_{B^a(\Pi^+)} \frac{1}{(\operatorname{Im} z)^a}$ , 可得

$$\left| \frac{f(z) - f(w)}{z - w} \right| (\operatorname{Im} z)^a \leq \|f\|_{B^a(\Pi^+)} < \infty.$$

当  $\operatorname{Im} z \neq \operatorname{Im} w$  时,  $|f(w) - f(z)| \leq |w - z| \|f\|_{B^a(\Pi^+)} \frac{1}{\operatorname{Im} w - \operatorname{Im} z} \int_{\operatorname{Im} z}^{\operatorname{Im} w} \frac{d\tau}{\tau^a}.$

由引理 1 可得

$$\frac{1}{\operatorname{Im} w - \operatorname{Im} z} \int_{\operatorname{Im} z}^{\operatorname{Im} w} \frac{d\tau}{\tau^a} \leq \frac{M}{(\operatorname{Im} z)^\lambda (\operatorname{Im} w)^{a-\lambda}}.$$

于是

$$\left| \frac{f(z) - f(w)}{z - w} \right| (\operatorname{Im} z)^\lambda (\operatorname{Im} w)^{a-\lambda} \leq M \|f\|_{B^a(\Pi^+)} < \infty.$$

故

$$\sup_{\substack{z, w \in \Pi^+ \\ z \neq w}} \left| \frac{f(z) - f(w)}{z - w} \right| (\operatorname{Im} z)^\lambda (\operatorname{Im} w)^{a-\lambda} < \infty.$$

定理 5 有以下 2 个推论。

**推论 1** 设  $0 < a \leq 2$ , 则  $f \in B^a(\Pi^+)$  当且仅当

$$\sup_{\substack{z, w \in \Pi^+ \\ z \neq w}} \left| \frac{f(z) - f(w)}{z - w} \right| (\operatorname{Im} z)^{\frac{a}{2}} (\operatorname{Im} w)^{\frac{a}{2}} < \infty.$$

**推论 2** 设  $0 < a < 1$ , 则  $f \in B^a(\Pi^+)$  当且仅当

$$\sup_{\substack{z, w \in \Pi^+ \\ z \neq w}} \left| \frac{f(z) - f(w)}{z - w} \right| (\operatorname{Im} z)^a < \infty.$$

## 4 验证实例

**例 1**  $f(z) = \log\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2}iz\right), z \in \Pi^+.$

易知  $f \in B(\Pi^+)$ , 事实上,

$$\sup_{z \in \Pi^+} (\operatorname{Im} z) |f'(z)| = \sup_{z \in \Pi^+} (\operatorname{Im} z) \left| \frac{\frac{1}{2}i}{\frac{1}{2} - \frac{1}{2}iz} \right| \leq \sup_{z \in \Pi^+} (\operatorname{Im} z) \frac{1}{1 + \operatorname{Im} z} \leq 1.$$

注意到

$$\left| \frac{f(z) - f(i)}{z - i} \right| \operatorname{Im} z = \left| \frac{\log\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2}iz\right)}{z - i} \right| \operatorname{Im} z.$$

取  $z = yi (y > 0, y \neq 1)$ , 则

$$\left| \frac{f(yi) - f(i)}{yi - i} \right| \operatorname{Im} (yi) = y \left| \frac{\log \frac{1+y}{2}}{y-1} \right| \rightarrow \infty (y \rightarrow +\infty).$$

从而

$$\sup_{\substack{z, w \in \Pi^+ \\ z \neq w}} \left| \frac{f(z) - f(w)}{z - w} \right| \operatorname{Im} z \geq \sup_{\substack{z \in \Pi^+ \\ z \neq i}} \left| \frac{f(z) - f(i)}{z - i} \right| \operatorname{Im} z \rightarrow \infty.$$

这表明, 当  $a=1, \lambda=1$  时, 定理 5 不成立。

**例 2** 设  $1 < a \leq 2, f(z) = z^{1-a}, z \in \Pi^+.$

易知  $f \in B^a(\Pi^+)$ , 事实上, 由  $f'(z) = (1-a)z^{-a}$ , 可得

$$\sup_{z \in \Pi^+} (\operatorname{Im} z)^a |f'(z)| = (a-1) \sup_{z \in \Pi^+} (\operatorname{Im} z)^a \frac{1}{|z|^a} \leq 1.$$

注意到,当  $0<\lambda<\alpha-1$  时,

$$\left|\frac{f(z)-f(i)}{z-i}\right|(\operatorname{Im} z)^{\lambda}=\left|\frac{z^{1-\alpha}-i^{1-\alpha}}{z-i}\right|(\operatorname{Im} z)^{\lambda}.$$

取  $z=yi(y>0,y\neq 1)$ , 则

$$\left|\frac{f(yi)-f(i)}{yi-i}\right|(\operatorname{Im}(yi))^{\lambda}=y^{\lambda}\left|\frac{(yi)^{1-\alpha}-i^{1-\alpha}}{y-1}\right|=y^{\lambda}\left|\frac{y^{1-\alpha}-1}{y-1}\right|\rightarrow\infty(y\rightarrow 0^{+}).$$

这表明,当  $1<\alpha\leq 2,0<\lambda<\alpha-1$  时,定理 5 不成立。

当  $\lambda>1$  时,取  $z=yi(y>0,y\neq 1)$ , 则

$$\left|\frac{f(yi)-f(i)}{yi-i}\right|(\operatorname{Im}(yi))^{\lambda}=y^{\lambda}\left|\frac{y^{1-\alpha}-1}{y-1}\right|\rightarrow\infty(y\rightarrow+\infty).$$

这表明,当  $1<\alpha\leq 2,\lambda>1$  时,定理 5 不成立。

参考文献:

[1] TIMONEY R M. Bloch functions in several complex variables ( I ) [J]. Bulletin of the London Mathematical Society,1980,12(4):241-267. DOI:10. 1112/BLMS/12. 4. 241.

[2] TIMONEY R M. Bloch functions in several complex variables ( II ) [J]. Journal Fur Die Reine Und Angewandte Mathematik,1980,319:1-22. DOI:10. 1515/crll. 1980. 319. 1.

[3] CHOE J S,KIM H O,PARK Y Y. A Bergman-Carleson measure characterization of Bloch functions in the unit ball of  $\mathbf{C}^n$  [J]. Bulletin of the Korean Mathematical Society,1992,29(2):285-293.

[4] JEVTIC M,PAVLOVIC M. On  $m$ -harmonic Bloch space [J]. Proceedings of the American Mathematical Society,1995,123(5):1385-1392. DOI:10. 2307/2161125.

[5] OUYANG Caiheng,YANG Weisheng,ZHAO Ruhan. Characterizations of Bergman spaces and Bloch space in the unit ball of  $\mathbf{C}^n$  [J]. Transactions of the American Mathematical Society,1995,347(11):4301-4313. DOI:10. 2307/2155039.

[6] STROETHOFF K. The Bloch space and Besov spaces of analytic functions [J]. Bulletin of the Australian Mathematical Society,1996,54(2):211-219. DOI:10. 1017/S0004972700017676.

[7] NOWAK M. Bloch space and Möbius invariant Besov spaces on the unit ball of  $\mathbf{C}^n$  [J]. Complex Variables, Theory and Application: An International Journal,2001,44(1):1-12. DOI:10. 1080/17476930108815339.

[8] OHNO S,STROETHOFF K,ZHAO Ruhan. Weighted composition operators between Bloch-type spaces [J]. Rocky Mountain Journal of Mathematics,2003,33(1):191-215. DOI:10. 1216/RMJM/1181069993.

[9] REN Guangbin,TU Caifeng. Bloch space in the unit ball of  $\mathbf{C}^n$  [J]. Proceedings of the American Mathematical Society,2005,133(3):719-726. DOI:10. 1090/S0002-9939-04-07617-8.

[10] WULAN Hasi,ZHU Kehe. Bloch and BMO functions in the unit ball [J]. Complex Variables and Elliptic Equations,2008,53(11):1009-1019. DOI:10. 1080/17476930802429123.

[11] ZHAO Ruhan. Essential norms of composition operators between Bloch type spaces [J]. Proceedings of the American Mathematical Society,2010,138(7):2537-2546. DOI:10. 1090/S0002-9939-10-10285-8.

[12] ZHU Kehe. Bloch type spaces of analytic functions [J]. Rocky Mountain Journal of Mathematics,1993,23(3):1143-1177. DOI:10. 1216/rmj/1181072549.

[13] SHARMA A K,UEKI S I. Compact composition operators on the Bloch space and the Growth space of the upper half-plane [J]. Mediterranean Journal of Mathematics,2017,14:1-9. DOI:10. 1007/s00009-017-0849-2.

[14] ZHU Kehe. Spaces of holomorphic functions in the unit ball [M]. New York:Springer,2005.

[15] HOLLAND F,WALSH D. Criteria for membership of Bloch space and its subspace, BMOA [J]. Mathematische Annalen,1986,273:317-335. DOI:10. 1007/BF01451410.

[16] ZHAO Ruhan. A characterization of Bloch-type spaces on the unit ball of  $\mathbf{C}^n$  [J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications,2007,330:291-297. DOI:10. 1016/j. jmaa. 2006. 06. 100.

(责任编辑: 钱筠      英文审校: 黄心中)

# 《华侨大学学报(自然科学版)》征稿简则

《华侨大学学报(自然科学版)》是华侨大学主办的,面向国内外公开发行的自然科学综合性学术刊物。本刊坚持四项基本原则,贯彻“百花齐放,百家争鸣”和理论与实践相结合的方针,广泛联系海外华侨和港、澳、台的科技信息,及时反映国内尤其是华侨大学等高等学府在基础研究、应用研究和开发研究等方面的科技成果,为发展华侨高等教育和繁荣社会主义科技事业服务。本刊主要刊登机械工程及自动化、测控技术与仪器、电气工程、电子工程、计算机技术、应用化学、材料与环境工程、化工与生化工程、土木工程、建筑学、数学和管理工程等基础研究和应用研究方面的学术论文,科技成果的学术总结,新技术、新设计、新产品、新工艺、新材料、新理论的论述,以及国内外科技动态的综合评论等内容。

## 1 投稿约定

- 1.1 作者应保证文稿为首发稿及文稿的合法性;署名作者对文稿均应有实质性贡献,署名正确,顺序无争议;文稿中所有事实均应是真实的和准确的,引用他人成果时,应作必要的标注;不违反与其他出版机构的版权协议及与其他合作机构的保密协议;无抄袭、剽窃等侵权行为,数据伪造及一稿两投等不良行为。如由上述情况而造成的经济损失和社会负面影响,由作者本人负全部责任。
- 1.2 自投稿日期起2个月之内,作者不得另投他刊。2个月之后,作者若没有收到反馈意见,可与编辑部联系。无论何种原因,要求撤回所投稿件,或者变更作者署名及顺序,需由第一作者以书面形式通知编辑部并经编辑部同意。
- 1.3 作者同意将该文稿的发表权,汇编权,纸型版、网络版及其他电子版的发行权、传播权和复制权交本刊独家使用,并同意由编辑部统一纳入相关的信息服务系统。
- 1.4 来稿一经刊用,编辑部将按篇一次性付给稿酬并赠送该期刊物。本刊被国内外多家著名文摘期刊和数据库列为收录刊源,对此特别声明不另收费用,也不再付给稿酬。
- 1.5 其他未尽事宜,按照《中华人民共和国著作权法》和有关的法律法规处理。

## 2 来稿要求和注意事项

- 2.1 来稿务必具有科学性、先进性,论点鲜明、重点突出、逻辑严密、层次分明、文字精练、数据可靠。
- 2.2 论文题名字数一般不超过18字,必要时可加副题。文中各级层次标题要简明扼要,一般不超过15字,且同一层次的标题应尽可能“排比”。
- 2.3 署名作者应对选题、研究、撰稿等作出主要贡献并能文责自负,一般以不超过3名为宜。作者单位应标明单位、所在城市、省份及邮政编码。
- 2.4 摘要应包括研究的目的、使用的方法、获得的结果和引出的结论等,应写成独立性短文且不含图表和引用参考文献序号等。其篇幅一般以150~250字左右为宜,关键词以4~8个为宜。
- 2.5 量和单位符号等要符合国家标准和国际标准。
- 2.6 能用文字说明的问题,尽量不用图表;画成曲线图的数据,不宜再列表。图表应有中英文标题。
- 2.7 参考文献仅选最主要的,且已公开发表的,按规范的内容、顺序、标点书写列入,并按其在文中出现的先后次序进行编号和标注。参考文献不少于15篇,未公开发表的资料不引用。
- 2.8 英文摘要尽可能与中文摘要对应,包括题目、作者姓名、作者单位、摘要、关键词。用过去时态叙述作者工作,用现在时态叙述作者结论,并符合英文写作规范。
- 2.9 文稿首页地脚处依次注明收稿日期;通信作者为可联系作者的姓名、出生年、性别、职称、学历、研究方向、电子邮件地址;基金项目为课题资助背景及编号,可几项依次排列。
- 2.10 登录本刊唯一官方网站(<https://hdxh.hqu.edu.cn>)进行在线投稿,本刊不接受其他方式投稿。

- 《中文核心期刊要目总览》
  - RCCSE 中国核心学术期刊
  - 中国期刊方阵“双效期刊”
  - 中国科技论文在线优秀期刊
- ISTIC 中国科技核心期刊
  - 全国优秀科技期刊
  - 华东地区优秀期刊

本刊被以下国内外检索期刊和数据库列为固定刊源

- 美国《化学文摘》(CAS)
  - 波兰《哥白尼索引》(IC)
  - “STN 国际”数据库
  - 中国科学引文数据库
  - 中国科技论文统计期刊源
  - 中国学术期刊(光盘版)
  - 中文科技期刊数据库
  - 中国力学文摘
  - 中国生物学文摘
  - 中国数学文摘
- 俄罗斯《文摘杂志》(AJ, VINITI)
  - 荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus)
  - 德国《数学文摘》(Zbl MATH)
  - 中国学术期刊综合评价数据库
  - 中国期刊网
  - 万方数据库
  - 中国机械工程文摘
  - 中国化学化工文摘
  - 中国无线电电子学文摘
  - 中国物理文摘

华侨大学学报(自然科学版)

Huaqiao Daxue Xuebao ( Ziran Kexue Ban )

( 双月刊, 1980 年创刊 )

第 46 卷 第 4 期 ( 总第 204 期) 2025 年 7 月 20 日

JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY

( NATURAL SCIENCE )

( Bimonthly, Started in 1980 )

Vol. 46 No. 4 ( Sum 204 ) Jul. 20, 2025

主管单位: 福建省教育厅

主办单位: 华侨大学

( 中国 福建 泉州 362021 )

( 中国 福建 厦门 361021 )

编辑出版: 华侨大学学报自然科学版编辑部

电 话: 0595-22692545

电子信箱: journal@hqu.edu.cn

网 址: https://hdxh.hqu.edu.cn

主 编: 黄 仲 一

印 刷: 泉州晚报印刷厂

国内发行: 福建省泉州市邮政局

订 购 处: 全国各地邮政局( 所 )

国外发行: 中国出版对外贸易总公司

( 北京 782 信箱, 邮政编码 100011 )

Competent Authority: The Education

Department of Fujian Province

Sponsor: Huaqiao University

( Quanzhou 362021, Fujian, China )

( Xiamen 361021, Fujian, China )

Editor in Chief : HUANG Zhongyi

Edited and Published by Editorial

Department of Journal of

Huaqiao University ( Natural Science )

Tel: 0595-22692545

E-mail: journal@hqu.edu.cn

https://hdxh.hqu.edu.cn

Distributed by China Publication Foreign

Trading Corporation

( P. O. Box 782, Beijing, 100011, China )

中国标准连续出版物号: ISSN 1000-5013  
CN 35-1079/N

国内邮发代号: 34-41

国外发行代号: NTZ 1050

国内定价: 10.00 元/册  
60.00 元/套

ISSN 1000-5013

