

ISSN 1000-5013 CN 35-1079/N CODEN HDZIEF

華僑大學學报

(自然科学版) JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY (NATURAL SCIENCE)

> 第 46 卷 第 2 期 Vol. 46 No. 2

> > 2025

中国 • 泉州 / 厦门 CHINA • QUANZHOU / XIAMEN



《华侨大学学报(自然科学版)》 第七届编辑委员会 The Seventh Editorial Committee of Journal of Huaqiao University (Natural Science)

- 主任 (Director of Editorial Committee) 张云波 (ZHANG Yunbo)
- **副主任 (Vice Director of Editorial Committee)** 陈国华 (CHEN Guohua) 黄仲一 (HUANG Zhongyi)

编 委 (Members of Editorial Committee) (按姓氏笔画为序) 刁 勇 (DIAO Yong) 王士斌 (WANG Shibin) 刘 塨 (LIU Gong) 江开勇 (JIANG Kaiyong) 涛 (SUN Tao) 孙 肖美添 (XIAO Meitian) 吴季怀 (WU Jihuai) 宋秋玲 (SONG Qiuling) 张认成(ZHANG Rencheng) 张云波 (ZHANG Yunbo) 陈国华 (CHEN Guohua) 苑宝玲 (YUAN Baoling) 周树锋(ZHOU Shufeng) 郑力新 (ZHENG Lixin) 徐西鹏 (XU Xipeng) 郭子雄 (GUO Zixiong) 黄仲一 (HUANG Zhongyi) 黄华林 (HUANG Hualin) 葛悦禾 (GE Yuehe) 蒲继雄 (PU Jixiong) 蔡绍滨 (CAI Shaobin)

主 编 (Editor in Chief)

黄仲一 (HUANG Zhongyi)

# 华侨大学学报

# (自然科学版)

2025 年 3 月

总第 202 期

第46卷 第2期

目 次

# 综合述评

知识结构的粗糙集模型与方法研究综述

# 学术论文

RGB-D多模态融合与深度特征增强的固废检测网络

······ 赵崟昊, 刘炳辰, 杨建红, 房怀英 (133)

太阳能电池板支架 6005 铝合金腐蚀失效分析

...... 陈首虹,苏治钦,范袁涛,黄身桂,姜峰,黄进益(142)

采用 3D-DIC 技术的框架填充墙平面外变形特征分析

·······谢鑫尧,郭子雄, BASHA Syed Humayun (147)

SSCFBT 短柱局压性能数值分析与承载力计算方法

······ 姜航, 董思涵, 雷荣煌, 叶勇, 薛联金 (156)

低收缩砂岩洞渣水稳材料的制备及性能分析

...... 谭波,林奕安,张磊,黎官福,邹可轩,陈平(168)

基于迁移学习和卷积神经网络的桥梁图像美学评价 基于 GM(1,1)模型与 GIS 的城市充电设施布局优化 乡村振兴背景下传统村落建筑租养模式 全景动态网络标志物的汽轮发电机定子绕组热故障预警 软硬件协同设计的异构 CNN 加速器 多层螺旋 CT 在青少年长骨骨肉瘤诊断中的临床价值 ······ 王福财,刘卓晟,林懿 (217) 奥拉帕尼治疗铂敏感复发性卵巢癌疗效与安全性的 Meta 分析 采用两阶段超效率 SBM-DEA 模型的创新型省份创新效率评价 Roper-Suffridge 算子和 ε-星形映照 

期刊基本参数: CN 35-1079/N \* 1980 \* b \* A4 \* 120 \* zh \* P \* ¥10.00 \* 1 000 \* 15 \* 2025-03 \* n

# JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY

SCIENCE)

Vol. 46 No. 2

Sum 202

Mar. 2025

# CONTENTS

# **COMPREHENSIVE REVIEW**

Review of Research on Rough Set Models and Methods for Knowledge Structures

(NATURAL

...... XU Bochi, LI Jinjin (121)

# ACADEMIC PAPERS

Solid Waste Detection Network With RGB-D Multimodal Fusion and Deep Feature

Enhancement

..... ZHAO Yinhao, LIU Bingchen, YANG Jianhong, FANG Huaiying (133)

Corrosion Failure Analysis of 6005 Aluminium Alloy for Solar Panel Mounting Brackets

..... CHEN Shouhong, SU Zhiqin, FAN Yuantao,

HUANG Shengui, JIANG Feng, HUANG Jinyi (142)

Analysis on Out-of-Plane Deformation Characteristics of Frame Infilled Wall Using

3D-DIC Technique

..... XIE Xinyao, GUO Zixiong, BASHA Syed Humayun (147)

Numerical Analysis of Local Compressive Performance of SSCFBT Stub Columns and

Calculation Method for Load-Carrying Capacity

..... JIANG Hang, DONG Sihan, LEI Ronghuang, YE Yong, XUE Lianjin (156)

Preparation and Performance Analysis of Low-Shrinkage Sandstone Cave Slag

Water-Stabilized Materials

..... TAN Bo, LIN Yian, ZHANG Lei, LI Guanfu, ZOU Kexuan, CHEN Ping (168)

Aesthetic Evaluation of Bridge Images Based on Transfer Learning and Convolutional

Neural Networks

...... YE Tianzhao, ZHAO Shaojie, YUN Jibiao (176)

Optimisation of Urban Charging Facilities Layout Based on GM(1,1) Model and GIS ..... NAN Qimeng, YE Qing, LI Yue (183) Traditional Village Buildings Rent-and-Maintenance Model Under Background of **Rural Revitalization** ..... LIU Xiaofang, YANG Yanni, ZHOU Jing, HE Xinyi, YANG Sisheng (192) Early Warning of Thermal Fault in Turbine Generator Stator Winding of Landscape Dynamic Network Marker ...... ZENG Sijia, FANG Ruiming, PENG Changqing, ZHUANG Jienong, SHANG Rongyan (201) Heterogeneous CNN Accelerator Based on Hardware-Software Co-Design ..... XIE Zhihao, LI Guogang (209) Clinical Value of Multi-Slice Spiral CT for Long Bone Osteosarcoma Diagnosis in Adolescents ..... WANG Fucai, LIU Zhuosheng, LIN Yi (217) Meta-Analysis of Efficacy and Safety of Olaparib in Treating Platinum-Sensitive Recurrent Ovarian Cancer ..... WANG Hua, DU Qiyue, XU Sennan, WANG Kun, WU Xiaofeng, ZHANG Liangliang, QIU Yan, YANG Jiayong (223) Evaluation of Innovation Efficiency of Innovative Provinces Using Two-Stage Super-Efficiency SBM-DEA Model Roper-Suffridge Operators and ε-Starlike Mappings ..... CHEN Mingxin, LIN Xiong, WANG Jianfei (237) DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202503022



# 知识结构的粗糙集模型与方法研究综述

徐博驰1,李进金1,2,3

(1. 华侨大学 数学科学学院,福建 泉州 362021;
2. 泉州师范学院 数学与计算机科学学院,福建 泉州 362000;
3. 闽南师范大学 数学与统计学院,福建 漳州 363000)

**摘要:**知识空间理论(KST)是一种研究教育规律的科学方法,而粗糙集理论(RST)是分析不确定性的重要 数学框架。经过四十年的发展,这两种理论均取得一系列研究成果。文中分别梳理了知识空间理论与粗糙集 理论的重要进展,以及近年来两者交叉研究的成果,分析了当前研究中存在的关键科学问题,并提出未来可能 的重要研究方向。

关键词: 知识空间理论;知识结构;粗糙集理论;技能约简;变精度模型 中图分类号: TP 182 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2025)02-0121-12

# Review of Research on Rough Set Models and Methods for Knowledge Structures

XU Bochi<sup>1</sup>, LI Jinjin<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Mathematics and Statistics, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;

School of Mathematics and Computer Science, Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, China;
 School of Mathematics and Statistics, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, China)

**Abstract**: Knowledge space theory (KST) is a scientific methodology for investigating educational principles, while rough set theory (RST) serves as a crucial mathematical framework for analyzing uncertainty. Over four decades of development, both theories have achieved significant research advancements. This paper systematically reviews the major progress in KST and RST respectively, synthesizes recent interdisciplinary research achievements, critically examines existing scientific challenges in current studies, and proposes potential research directions for future exploration. The findings aim to provide valuable references for further investigations in this interdisciplinary field.

Keywords: knowledge space theory; knowledge structure; rough set theory; skill reduction; variable precision model

知识空间理论(knowledge space theory,KST)是由比利时数学心理学家 Doignon 和美国数学心理 学家 Falmagne于 1985 年提出的一种旨在用于知识评估的数学理论<sup>[1]</sup>。KST 基于教育学和心理学等 理论建立了一整套研究背景和意义非常明确的数学框架。这是一种有效的研究教育的数学理论,它不 仅对教育评估和个性化学习有着深远的影响,还在计算机自适应教育认知诊断等领域展现出广泛的应

**收稿日期:** 2025-02-25

通信作者: 李进金(1960-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事信息技术和不确定性的数学理论与方法的研究。 E-mail:jinjinlimnu @126.com。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(12271191,11871259);福建省自然科学基金资助项目(2023J01122, 2023J01125,2023J05175,2022J01306,2022J05169)

用。知识空间理论最成功的应用之一是人工智能学习和评估系统(assessment and learning in knowledge space, ALEKS)<sup>[2]</sup>,目前已有超过 2 500 万名学生通过该系统学习数学、化学、统计和会计学等学 科。KST 已成为辅助学习和自适应测试等领域中<sup>[3-6]</sup>的重要理论。知识空间理论的初始发展源于纯粹 行为主义视角,其核心目标在于形式化个体知识表征体系,随着后面概念化个体的内在能力,知识空间 理论突破了单纯行为解释的局限。区别于粗糙集理论的核心研究聚焦于对近似算子的关注,以及特定 集合的上、下近似特性分析,知识空间理论着重研究特定集合构成的结构化系统。

知识结构(knowledge structure)是知识空间理论中的核心概念,它为构建领域知识关联框架及评估学习者知识掌握程度提供了理论基础。经典的知识结构采用二元评价模式(完全正确/不正确),并以此发展出了一套成熟有效的理论。随着研究的深入,有研究者认为二元评价模式虽适用于简单问题评估,却难以准确反映复杂问题的部分掌握状态(如 80%正确率)。针对教育学领域多维评价需求,学者提出多分知识结构(polytomous knowledge structure, PKS)的概念<sup>[7:9]</sup>,通过引入多值响应机制(如 Likert五级评分法<sup>[10]</sup>)来实现评估维度的扩展。这种拓展不仅适用于传统认知评估,还可应用于心理咨询、态度测量等多元场景。通过设置多级响应值(如完全同意至完全不同意),使评价体系能更精准地反映个体实际认知水平。知识结构的有效构建不仅是该领域的关键研究课题,更是实现个性化学习路 径规划的前提。

### 1 构建知识结构的基本方法

本节梳理了构建知识结构(二分)与多分知识结构的常用方法。为了讨论方便,用Q表示非空问题 集,即知识域(domain),S表示非空技能集,采表示由知识状态采(光QQ)构成的集族,且采中至少包含 Ø和Q,(Q,光)表示知识结构。满足并封闭的知识结构为知识空间(knowledge space),满足交封闭的知 识结构为简单闭包空间(simple closure space),既满足并封闭又满足交封闭的知识结构为拟序空间 (quasi ordinal space)。

#### 1.1 知识结构的构建方法

知识结构的构建方法通常有专家问询法、数据驱动法、技能映射等方法。

基于专家问询法(query)构建知识结构的研究可追溯至知识空间理论的发展早期。Falmagne 等<sup>[11]</sup> 于 1990 年系统阐述了知识空间理论,首次提出通过专家咨询构建领域知识结构的可行性。在此基础上,Koppen 等<sup>[12-13]</sup>确立了专家主导的构建范式,强调通过结构化问题序列获取专家对领域内问题关联性的专业判断。Kambouri 等<sup>[14]</sup>进一步完善了该范式的理论基础,建立了专家响应与知识空间的映射机制。为提高构建效率,Dowling<sup>[15]</sup>通过逻辑推理机制优化问询流程,显著减少了冗余判断需求。针对专家判断可能存在的误差问题,Cosyn 等<sup>[16]</sup>提出的 PS-Query 机制通过错误处理算法有效控制了判断失误对知识空间的影响。值得关注的是,Stefanutti 等<sup>[17]</sup>创新性地提出增量式扩展算法,实现了已有知识空间向新问题域的高效拓展,避免了重复性问询过程。

数据驱动型知识结构构建方法通过统计建模实现潜在认知状态的逆向推导。其核心范式通常遵循 三阶段建模框架:1)构建候选知识结构集;2)基于拟合准则测试筛选模型;3)确定最优拟合模型<sup>[18]</sup>。 该方法假设观测数据由潜在真实知识结构与随机误差的叠加而成,其核心挑战在于同步推断知识结构 与响应误差概率。现有的研究可分为两个分支。其中一个分支是将特定属性赋予数据底层的知识结构,典型技术包括基于问卷的布尔分析与项目树分析(item tree analysis,ITA)。如 Schrepp<sup>[19]</sup>验证了 布尔分析在二值问卷分析中的有效性,Theuns等<sup>[20]</sup>则基于共生矩阵构建知识结构。针对 ITA 方法, Schrepp<sup>[21]</sup>提出的 ITA \* 算法通过优化推测关系筛选机制降低结构偏差,Sargin等<sup>[22]</sup>发展的归纳式 ITA(IITA)进一步提升了模型稳健性。另一个分支是不施加任何限制,仅将观察到的响应模式作为构 建结构的知识状态。如 Chiusole等<sup>[23]</sup>提出的 *k*-states 方法突破观测模式限制,通过改进 *k*-modes 聚类 算法<sup>[24]</sup>实现潜在知识状态的增量式提取。

基于技能映射的知识结构构建方法利用项目(item)与技能(skill)间的逻辑关系建立技能映射 (skill map),并通过数学推导构建知识结构。技能映射对Q中的每一个项目(问题)q分配了一个技能 子集,技能映射定义如下: 设技能集 *S* 是与*Q* 对应的非空有限集合, $2^{s}$  是技能集 *S* 的幂集, $\tau$  是从 *Q* 到  $2^{s} \setminus \{\emptyset\}$ 的映射,三元 组(Q,S, $\tau$ )称为一个技能映射。

这种方法始于 Doignon<sup>[25]</sup>提出的技能映射理论,其通过最小化技能分配实现知识结构唯一性生成,显著降低了传统问询方法的复杂度。Spoto 等<sup>[26-27]</sup>建立技能-项目的映射框架,不仅实现心理诊断标准的量化表征,更通过可识别性验证完善了概率模型的评估体系。在方法论创新方面,Suck<sup>[28-30]</sup>突破传统由项目到技能的单向研究范式,首创基于偏序技能集的知识结构逆向构建技术。针对复杂知识领域建模难题,Spoto 等<sup>[31]</sup>开发迭代优化算法,通过最小化知识结构与观测数据的差异实现动态技能映射。在模型扩展维度方面,周银凤等<sup>[32-33]</sup>基于知识空间理论与形式背景理论的对应关系,从析取模型和合取模型两个方面,讨论了知识结构的构建问题。

经典的技能是离散"掌握/未掌握"二分法,考虑到学习者的认知能力的获取是一个从低级到高级的 不断发展趋向成熟的过程,并且不同个体对技能的潜在掌握程度存在显著差异,以及不同题目可能要求 非二元化的技能阈值。Sun 等<sup>[34]</sup>将技能模糊化,提出了模糊技能映射和模糊技能多值映射。前者对问 题 *q* 分配了一个*S*上的模糊子集,后者对问题 *q* 分配了一个*S*上的模糊子集族,然后通过模糊技能映射 和模糊技能多值映射来构造知识结构。Cao 等<sup>[35]</sup>系统研究了模糊技能多值映射在知识结构建模中的 应用,提出基于模糊技能多值映射的可识别与双可识别知识结构,通过消除冗余项目优化测评效率,并 为相对独立知识点的评估提供理论框架。

#### 1.2 多分知识结构的构建方法

与构造经典的二分知识结构不同,多分知识结构的研究起步更晚,构造的方式更加的复杂。多分知 识状态将对问题 q 的解答赋予等级,使得知识状态成为从问题集到问题解决等级集的映射。 Schrepp<sup>[36]</sup>率先突破二值响应限制,通过线性序集构建多分响应层级结构,建立了具有某些封闭性质和 推测关系的多层结构之间的本质联系。Stefanutti等<sup>[7]</sup>将响应维度拓展至完备格结构,其多分知识结构 定义如下:

设 L 为完备格,1 和 0 分别为 L 上的极大极小元,多分知识状态定义为映射 ℋ:Q→L,若 ℋ⊆L<sup>Q</sup> 至 少包含 1<sub>0</sub> 和 0<sub>0</sub>,则三元组(Q,L,ℋ)称为多分知识结构。

Heller<sup>[8]</sup>在此基础上引入拟序关系理论,构建广义多分知识空间框架,其通过考虑了粒度更细的优 先关系,系统整合了 Schrepp<sup>[36]</sup>和 Stefanutti 等<sup>[7]</sup>的研究成果。从多分 KST 的伽罗瓦联络角度出发, Wang 等<sup>[37-38]</sup>针对该框架的数学完备性问题,提出 CD-多分知识空间,并完善了文献[7]中伽罗瓦连络 中闭元的不完全刻画问题。Bartl 等<sup>[39]</sup>基于模糊逻辑中的完备剩余格研究了具有分级知识状态的知识 空间。Ge<sup>[40]</sup>通过定义多分属性完备性,构建了完备多分知识结构的概念。孙晓燕等<sup>[41]</sup>整合程序性知 识评价结果用于构建项目状态空间,进而构造多分知识结构。基于技能映射的知识结构构建方法在多 分知识结构上也有推广,其理论较二分经典情形更为复杂,而许多经典的结果是无法直接作用到多分知 识结构上。

在分析不同技能的重要性的基础上,通过扩展模糊技能映射<sup>[34]</sup>,如 Sun 等<sup>[42]</sup>提出了一种利用模糊 技能构建多分知识结构的方法。Stefanutti<sup>[9]</sup>则通过公理化定义了属性映射,通过属性映射产生多分知 识结构。与 Sun 等<sup>[42]</sup>的模糊技能映射中技能模糊化不同的是,Stefanutti<sup>[9]</sup>研究的属性是二分的(具 备/不具备)。区别于映射方法,Chiusole 等<sup>[43]</sup>开发自适应 *k*-median 聚类算法,通过数据分析方法构建 多分知识结构。由于多分知识结构的研究起步更晚,以及理论更加复杂,许多方法尚在探索中。而在粗 糙集理论中,一些理论方法与知识空间理论在数学上似乎存在某种联系。例如,二元关系的上(下)近似 算子可以产生知识空间(简单闭包空间),通过格值模糊集的上(下)近似恰好可以看作多分知识状态。

知识空间理论还有一些其他的研究方向,由于这些方向目前没有使用粗糙集理论和方法的相应文章,因此这里不做过多的介绍。其他的研究方向可以参考李金海等<sup>[44]</sup>的文章。

## 2 构建知识结构常用的粗糙集方法

本节主要梳理一些常用在构建知识结构中,以及未来可能用在知识空间理论中的一些粗糙集方法。

粗糙集理论(rough set theory,RST)由 Pawlak<sup>[45]</sup>于 1982 年提出,为处理不精确、不完整信息与知 识提供了重要数学框架。粗糙集理论本源植根于结构化数据建模,其方法论核心在于通过等价类划分 的形式化机制实现知识发现。该理论通过建立基于不可区分关系的近似空间,运用上(下)近似算子量 化分类不确定性,构建了基于边界域分析的可计算知识提取框架。

经典 Pawlak 粗糙集模型的核心理论基础是建立于近似空间所导出的对偶近似算子之上的。在经典 Pawlak 模型中,设 U 是非空有限论域, $R \subseteq U \times U$  是 U 上的二元等价关系,R 称为不可分辨关系,序 对(U,R)称为 Pawlak 近似空间。下近似算子和上近似算子分别定义如下:

对任意的  $X \subseteq U, R(X) = \{x \in U \mid [x]_R \subseteq X\}, \overline{R}(X) = \{x \in U \mid [x]_R \cap X \neq \emptyset\}$ 。

这里的关系作为等价关系存在,其严格的数学特性虽保证了理论严谨性,但在实际应用中呈现出显 著的局限性,这一特性促使近似算子的广义定义成为粗糙集理论研究的关键方向。粗糙集理论扩展研 究主要存在两种方法论路径:构造化方法(参见文献[47-52])与公理化方法(参见文献[53-55])。前者 以论域中具体数学结构(包括但不限于二元关系、划分体系、覆盖系统、邻域系统及布尔子代数等)为构 建基础,通过定义具体的近似算子来推导相应的粗糙集代数系统。后者则从抽象算子公理体系出发,以 满足特定公理条件的一元集合算子对作为基本研究对象:一方面,近似算子满足的公理体系可保证对 应类型二元关系的存在性;另一方面,通过构造性方法基于二元关系导出的近似算子必然满足与之对 应的公理系统。这两种方法论形成了理论扩展研究的双向进路,共同推动着粗糙集理论体系的发展。 更详细的粗糙集系统的基本理论可以参考文献[56]。

事实上,这两种方法前者是基于集合论的分析框架,后者为基于算子代数的抽象化描述体系。研究 视角的差异性促使学者采用多元方法论路径,由此衍生出多种具有理论扩展性的粗糙集模型。值得关 注的是,粗糙集理论在处理不确定性问题时展现出独特的理论特征——区别于概率统计、模糊集理论及 证据理论等传统不确定性分析方法。该理论无需依赖数据集之外的先验知识(如概率分布函数或隶属 度参数),从而在知识发现过程中保持更高的客观性。然而,其内在机制对原始数据的不精确性缺乏直 接处理能力,这一理论局限恰与其他不确定性理论形成显著的互补效应。在此背景下,探究粗糙集理论 与相关数学理论(包括但不限于概率论、模糊数学、证据理论)的内在关联性与协同机制,已成为推动不 确定性分析领域发展的重要研究方向,相关成果将有效促进跨学科方法论的融合创新。此外,经典的 Pawlak 粗糙集还以各种方式得到了扩展:

论域(universe)由单论域扩展到双论域。典型研究成果包括:Wu等<sup>[57]</sup>对广义模糊粗糙集进行了 系统研究,其他学者亦对此议题展开探讨(参见文献[58-60]);Li<sup>[61]</sup>构建了双论域框架下的粗糙近似算 子理论体系;Li等<sup>[62]</sup>进一步探讨了双论域粗糙模糊近似算子的数学特性;Zhang等<sup>[63]</sup>系统阐述了双论 域广义区间值模糊粗糙集的表征理论;Liu<sup>[64]</sup>提出基于双论域结构的粗糙集理论及其应用模型;Ali 等<sup>[65]</sup>深化了广义粗糙集的数学性质研究;Hu等<sup>[66]</sup>基于区间值模糊逻辑算子构建了广义区间值模糊粗 糙集理论框架。这一系列研究标志着双论域粗糙集理论体系的逐步完善与深化发展。这一扩展,在知 识空间理论与粗糙集理论交叉研究中产生了将知识状态看作是技能集在项目集中的上近似或下近似集 的观点。

研究对象经历了从分明集向模糊集的理论拓展进程。模糊集是由 Zadeh<sup>[67]</sup>在 1965 年提出的概念, 经过多年的理论发展,模糊集理论在不确定性建模领域同样具有核心价值<sup>[68]</sup>。1990 年,Dubois 等<sup>[69]</sup>率 先实现粗糙集与模糊集的方法整合,开创性地提出了粗糙模糊集与模糊粗糙集理论体系。随后,Nanda 等<sup>[70]</sup>系统构建了模糊粗糙集数学模型,而 Moris 等<sup>[71]</sup>则建立了模糊粗糙集的公理化体系。随着模糊粗 糙集理论的一系列建立,模糊集也从经典的模糊集拓展到一些特殊的模糊集上。如 Samanta 等<sup>[72]</sup>深入 探讨了直觉模糊粗糙集与粗糙直觉模糊集的交互机理; Cornelis 等<sup>[73]</sup>建立了直觉模糊粗糙集的形式化 描述框架; Dubois 等<sup>[74]</sup>成功将模糊粗糙集理论拓展至区间值模糊集合领域; Zhang<sup>[75]</sup>提出区间值直觉 模糊粗糙集建模方法; Zhang<sup>[76]</sup>系统研究了区间二型粗糙模糊集的数学特征; Yang 等<sup>[77]</sup>构建了犹豫 模糊粗糙集的构造化方法与公理化体系; Wang<sup>[78]</sup>基于扩展 t-模运算建立了二型模糊粗糙集理论框架; Yang 等<sup>[79-80]</sup>创新性地提出基于模糊覆盖的粗糙集模型。这一系列理论突破显著拓展了粗糙集方法在 复杂不确定性建模中的应用边界。

关系(relation)实现了从经典等价关系向广义关系、模糊关系<sup>[81]</sup>、支配关系<sup>[82]</sup>、区间值模糊关 系<sup>[60]</sup>,以及二型模糊关系及区间值二型模糊关系<sup>[83]</sup>的理论拓展。其中模糊关系和 L-模糊关系在知识 空间理论与粗糙集理论交叉研究中有着重要应用,它们可以通过上(下)近似算子生成多分知识结构。 其代表性研究成果包括:Radzikowska等<sup>[50]</sup>基于剩余格理论提出 L-模糊粗糙集<sup>[84]</sup>概念;Greco等<sup>[85]</sup> 深入探讨了模糊粗糙集的数学性质;Kondo<sup>[86]</sup>建立了广义粗糙集的结构化理论体系;Kotłowski等<sup>[87]</sup> 开发了面向序分类问题的随机支配粗糙集模型;Leung等<sup>[88]</sup>提出区间值信息系统下基于粗糙集的分类 规则发现方法;Zhang<sup>[89]</sup>系统阐述了广义区间二型模糊粗糙集的表征理论;Du等<sup>[90-91]</sup>针对不完备序信 息系统提出了基于支配关系的粗糙集方法及其在规则归纳中的应用模型。作为对粗糙集概念的进一步 概括推广,Qiao等<sup>[92]</sup>从构造法和公理化方法两方面提出基于剩余格(residuated lattice)和共同剩余格 (co-residuated lattice)上的(①, & )-模糊粗糙集;Sun<sup>[93]</sup>讨论了 L-模糊近似算子的表示理论; Kondo<sup>[94]</sup>通过算子方法深入探讨了 L-模糊关系与L-正规算子的代数特性。这一系列突破性研究显著 拓展了粗糙集理论在多类型关系建模中的适用边界。

此外,算子上实现了从经典合取/析取运算向三角模与三角余模<sup>[63]</sup>以及扩展型三角模/余模<sup>[95-96]</sup>等的方法演进。由于这一部分目前没有与知识空间理论上应用的交叉研究,故而不做过多的介绍。将三 角模与三角余模以及扩展型三角模/余模等方法在知识空间理论找到相应的背景意义,并应用到知识结 构构造上也是未来一个研究方向。

## 3 知识结构的粗糙集模型与方法

近年来,随着知识空间理论与粗糙集理论的交叉研究不断深入,研究者发现了它们之间的紧密联系。早在 2009 年,王国胤等<sup>[97]</sup>就指出:"粗糙集理论和知识空间理论都是研究知识结构的理论;但他 们用于解决不同的实际问题。粗糙集主要研究如何对数据进行分析及知识发现;而知识空间着重对问 题集进行分析,从而对个体知识状态进行评估。如何将知识空间理论和粗糙集理论结合正在成为一个 新的研究方向。"

在知识空间理论中,技能映射的提出建立了知识状态中技能要素与测试项目间的关联机制。在技能映射中,可能还存在着冗余的技能,即使约简掉这些技能也不会改变现有的知识结构。粗糙集中属性约简的思想促进了知识空间理论中技能约简的研究。为此,Xu 等<sup>[98]</sup>结合粗糙集属性约简方法来寻找最小技能集。高纯等<sup>[99]</sup>也给出了一种最小技能集的生成方法。

值得注意的是,Yao 等<sup>[100]</sup>提出了一种基于集合论的粒空间统一框架,用于整合粗糙集分析与知识 空间理论中的粒结构及近似方法。主要工作包括:将粒定义为满足特定条件的集合,通过逻辑语言和 集合操作构建多层次粒结构,并形式化定义了粒空间三元组;基于等价关系划分的粒空间,提出了上 (下)近似算子,以可定义粒逼近任意集合,并给出了其性质;通过知识空间理论中的推测关系与推测系 统构建闭包结构和知识空间,扩展了粗糙集的近似方法,定义了非对偶的上(下)近似;对比了两类理论 在粒结构构建与近似机制上的共性与差异,揭示了粒空间框架的通用性。

Liu<sup>[101]</sup>通过整合经典的知识空间理论与粗糙集理论,系统研究了粗糙集理论在知识结构建模中的应用,建立了知识空间理论与粗糙集、形式概念分析间的理论关联。主要工作包括:利用上(下)近似算子刻画知识结构的代数特性,证明了知识空间、闭包空间可被诠释为个体技能集合在序列关系下的上近似与下近似集族生成,进而将知识状态重新定义为项目域中内在技能集合的上(下)近似;提出覆盖约简算法,将最小技能映射问题转化为覆盖约简问题,应用了粗糙集中属性约简的思想实现了技能映射的优化;针对技能多映射的合取模型与析取模型,证明了知识结构在并/交运算下的封闭条件,解决了Falmagne等<sup>[6]</sup>提出的开放性问题;通过形式背景构建概念格,揭示了知识空间与 Alexandroff 拓扑、单调伽罗瓦联络的深层对应关系。

同时,随着多分知识结构的理论研究取得显著进展,粗糙集理论中的方法与多分知识结构是否也有 相应的联系得到了人们的关注。Wang 等<sup>[102]</sup>提出了一种基于 L-模糊 S-近似算子构建多分知识结构的 方法。S-近似空间是经典粗糙集的推广,经典粗糙集及其众多扩展如双论域粗糙集,T-粗糙集,变精度 粗糙集等,都可以由 S-近似空间表示,S-近似空间定义如下: S·近似空间是一个四元组*G*=(*U*,*W*,*T*,*S*),其中*U*和*V*是两个非空有限论域,知识映射*T*:*U*→ 2<sup>*W*</sup>,决策映射*S*:2<sup>*W*</sup>×2<sup>*W*</sup>→{0,1}。

设 A 是 W 的任意子集, A 的下近似和上近似分别定义为

 $G(A) = \{x \in U \mid S(T(x), A) = 1\}, \qquad \overline{G}(A) = \{x \in U \mid S(T(x), A^{c}) = 0\}.$ 

他们的主要工作包括:将 L-模糊集嵌入 S-近似空间,定义了 L-模糊 S-近似算子,证明了其在 S<sub>min</sub> 条件下满足并、交运算的封闭性及对偶性等关键性质;通过上(下)L-模糊 S-近似算子生成多分知识(闭 包)空间,刻画了多分知识结构;提出四类特殊 L-模糊 S-近似算子,将其与模糊技能映射结合,构建了 多分知识结构的析取模型与合取模型;通过实例验证模型的有效性,阐明模糊技能水平与问题解决能 力的映射关系;最后,探讨了前向分级与后向分级知识结构的充要条件,扩展了传统 KST 在能力评估 中的应用。

变精度模型是粗糙集理论中的一种重要模型<sup>[103-107]</sup>。杨桃丽等<sup>[108-110]</sup>针对知识空间理论中传统技能映射模型未充分考虑个体掌握技能数量差异的问题,引入粗糙集中变精度模型,提出基于技能包含度的概念。即

设(*Q*,*S*,*τ*)是一个技能映射, オ*q*∈*Q*,*T*⊆*S*,称*D*(*T*/*τ*(*q*))= $\frac{|\tau(q) \cap T|}{|\tau(q)|}$ 为关于*q*和*T*的技能包含 度。然后依靠技能包含度的概念提出了 *α*-变精度模型:

设 $(Q, S, \tau)$ 是一个技能映射,对 $q \in Q, T \subseteq S, \alpha \in (0, 1]$ ,由 T 通过变精度 $\alpha$ -模型诱导的知识状态为  $K_{T}^{\alpha} = \{q \in Q \mid D(T/\tau(q)) \ge \alpha\}$ 。

对  $\alpha \in (0,1]$ ,显然有  $K_{\infty}^{\epsilon} = \emptyset, K_{s}^{\epsilon} = Q$ 。因此,由技能映射( $Q, S, \tau$ )通过变精度  $\alpha$ -模型诱导的所有 知识状态的集合构成知识结构。即

$$\mathscr{K}^{\alpha} = \{ K^{\alpha}_{T} \mid T \subseteq S \}$$
 ,

这类知识结构的适用范围更广。其主要工作包括:提出技能包含度概念,定义为个体掌握的技能占问题所需技能的比例,量化技能掌握程度,构建变精度 α模型;证明不同 α值生成的知识结构具有对偶性;提出知识结构间的序关系,刻画其层次性与演化路径;设计算法自动计算技能包含度集并生成知识结构图;基于 COVID-19 监测数据的实验表明,模型能灵活区分不同个体的知识状态,生成对称且层次分明的知识结构,验证了方法的有效性;讨论了技能子集约简问题。

Xu 等<sup>[111]</sup>则针对模糊技能映射在知识结构建模中的局限性,将技能包含度这一概念扩展到模糊技能映射上。即设( $Q,S,\tau$ )为模糊技能映射。对 $\forall q \in Q$ 以及模糊技能集 $A, \pi$ 

$$D(A/\tau_q) = \frac{\left| \left\{ s \in S \mid 0 < \tau_q(s) \leq A(s) \right\} \right|}{\left| \left\{ s \in S \mid \tau_q(s) > 0 \right\} \right|}$$

是关于 τ<sub>q</sub> 和 A 的模糊技能包含度。其主要工作包括:提出了模糊技能包含度的新概念,并构建了变精 度 α 模型以细化知识状态分类;通过定义技能包含度(即满足最低要求的技能占比),量化了技能掌握 水平,克服了模糊技能的析取与合取模型的极端约束;基于包含度构建了变精度 α 模型,将知识结构划 分为不同层次,证明了其有限性及对偶性质,并通过实例验证了模型的有效性;进一步将该模型扩展至 模糊技能多映射,提出变精度 α 能力模型,丰富了知识结构的刻画方式;说明了传统析取与合取模型为 该文模型的特殊情形。

黄传义等<sup>[112]</sup>则基于变精度 α模型提出了三种变精度 γ-模型,探讨了其构建知识结构的性质,并研 究了这些模型之间的联系;通过研究矩阵乘法与技能包含度的关系,提出了基于变精度模型的矩阵方 法来构建知识结构的方法。

## 4 未来研究方向

在粗糙集理论与知识空间理论交叉研究中,目前的研究问题主要集中在通过技能约简寻找最小技能集、变精度模型构造知识结构,以及通过粗糙集近似算子构建知识结构等。然而,还有许多粗糙集的方法并未引入到知识空间理论之中,许多有趣的问题也亟待解决。例如,与技能约简相对应,实际应用中问题(项目)集中也可能存在冗余问题的情况,这可能导致学生做了许多重复的问题而降低了学习效

此外,传统知识空间理论研究多基于理想假设,即个体作答无粗心错误或幸运猜测。然而,实际学 习中,观测反应与潜在知识状态间的映射具有随机性,粗心算错与幸运猜对两类误差不可避免,响应 (response)模式与真实的知识状态会有误差。Falmagne 等<sup>[6]</sup>提出基于马尔可夫链和潜在类别模型 (LCM)的概率化知识空间理论框架,将状态概率与作答行为关联,给出了概率知识结构这一概念,建立 了基本局部独立模型(BLIM)。

关于概率知识结构与 BLIM,知识空间理论中也有很多理论研究,参见文献[113-115]。在粗糙集 理论中,概率模型也是一类重要问题,如 Slezak 等<sup>[116]</sup>针对经典粗糙集模型在概率信息处理上的局限 性,提出基于先验概率的贝叶斯粗糙集模型,扩展了变精度粗糙集框架,为非参数化概率粗糙集方法的 研究提供了新思路与工具;Liu 等<sup>[117]</sup>提出基于损失差异的四级概率规则选择准则,通过该准则生成十 类概率粗糙集模型,形成双向概率决策模型与三支概率决策模型两组模型,通过优化决策风险构建新框 架;Ma 等<sup>[118]</sup>提出了在一种双论域概率粗糙集框架下的贝叶斯风险决策方法,扩展了传统单论域模型, 建立了其与贝叶斯风险决策的理论对应关系,证明任意模型均存在匹配的最小风险决策问题,并涵盖单 论域广义概率粗糙集的特例。这两种理论中的概率模型融合,也是一个有趣的研究方向,不但可以扩展 两种理论的广度,还会使得这两种理论发展出更强的生命力。

## 5 结束语

知识空间理论(KST)与粗糙集理论(RST)作为认知建模与不确定性分析的两大数学框架,经过四 十年的发展,已形成较为系统的理论体系。文中首先系统梳理了 KST 在知识结构构建这一核心问题的 研究进展,主要包括:知识结构构建范式从二分向多分体系的演进,显著拓展了教育诊断与认知评估的 应用边界;多分知识空间理论框架的建立,为复杂知识层级建模提供了形式化工具;基于技能映射的 模型深化了知识状态与技能习得的关联分析。随后,文中总结了 RST 的部分理论与方法,并探讨了其 在 KST 研究中的潜在应用,特别是技能约简、变精度模型及基于粗糙集算子构造知识结构的方法。

当前,该交叉研究领域正面临跨学科方法论整合的需求,亟待结合形式概念分析、认知诊断理论等 工具,构建更具适应性的计算教育学框架。未来,粗糙集方法与多分知识空间理论的交叉融合研究或将 成未来突破重点。随着人工智能技术的不断发展,相信该领域今后会涌现出更多、更好的 KST 与 RST 交叉创新方法,并在教育技术等领域发挥重要作用,为知识评估与个性化学习提供更加精准和高效的数 学工具。

### 参考文献:

- [1] DOIGNON J P, FALMAGNE J C. Spaces for the assessment of knowledge[J]. International Journal of Man-Machine Studies, 1985, 25(2):175-196. DOI: 10.1016/S0020-7373(85)80031-6.
- [2] REDDY A A, HARPER M. ALEKS-based placement at the university of illinois[C]//Knowledge Spaces: Applications in Education. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013:51-68.
- [3] 刘艳花,杨贯中.基于扩展知识空间理论的技能自适应测试过程[J].计算机系统应用,2010,19(7):69-73. DOI:10. 3969/j.issn.1003-3254.2010.07.016.
- [4] 刘译蓬.基于知识空间理论的认知诊断自适应测试选题方法研究[D].锦州:渤海大学,2019.
- [5] 谈成群,谢深泉.超文本教学系统中学生知识的自适应测评研究[J].计算机工程与设计,2007,28(20):5072-5075. DOI:10.3969/j.issn.1000-7024.2007.20.077.
- [6] FALMAGNE J C, DOIGNON J P. Learning spaces: Interdisciplinary applied mathematics[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2011.
- [7] STEFANUTTI L, ANSELMI P, DE CHIUSOLE D, et al. On the polytomous generalization of knowledge space theory [J]. Journal of Mathematical Psychology, 2020, 94:102306.
- [8] HELLER J. Generalizing quasi-ordinal knowledge spaces to polytomous items[J]. Journal of Mathematical Psychology, 2021, 101:102515. DOI:10.1016/j.jmp. 2021.102515.

- [9] STEFANUTTI L, SPOTO A, ANSELMI P, *et al.* Towards a competence based polytomous knowledge structure theory[J]. Journal of Mathematical Psychology, 2023, 115:102781. DOI:10.1016/j. jmp. 2023.102781.
- [10] LIKERT R. A technique for the measurement of attitudes[J]. Archives of Psychology, 1932, 22(140):5-55.
- [11] FALMAGNE J C, KOPPEN M, VILLANO M, et al. Introduction to knowledge spaces: How to build, test, and search them[J]. Psychological Review, 1990, 97(2):201-224. DOI:10.1037/0033-295X. 97. 2. 201.
- [12] KOPPEN M, DOIGNON J P. How to build a knowledge space by querying an expert[J]. Journal of Mathematical Psychology, 1990, 34(3): 311-331. DOI:10.1016/0022-2496(90)90035-8.
- [13] KOPPEN M. Extracting human expertise for constructing knowledge spaces: An algorithm[J]. Journal of Mathematical Psychology, 1993, 44(3): 383-407. DOI:10.1006/jmps.1993.1001.
- [14] KAMBOURI M, KOPPEN M, VILLANO M, et al. Knowledge assessment: Tapping human expertise by the Query routine[J]. International Journal of Human-Computer Studies, 1994, 40 (1): 119-151. DOI: 10. 1006/ijhc. 1994. 1006.
- [15] DOWLING C E. Applying the basis of a knowledge space for controlling the questioning of an expert[J]. Journal of Mathematical Psychology, 1993, 37(1):21-48. DOI: 10.1006/jmps. 1993. 1002.
- [16] COSYN E, THIERY N. A practical procedure to build a knowledge structure[J]. Journal of Mathematical Psychology, 2000, 37(1): 1-20. DOI: 10.1006/jmps. 1998. 1252.
- [17] STEFANUTTI L, KOPPEN M. A procedure for the incremental construction of a knowledge space[J]. Journal of Mathematical Psychology, 2003, 47(3):265-277. DOI:10.1016/S0022-2496(02)00022-6.
- [18] ÜNLÜ A, SARGIN A. DAKS: An r package for data analysis methods in knowledge space theory[J]. Journal of Statistical Software, 2010, 37(2):1-31. DOI:10.1016/j.jnca. 2010.03.015.
- [19] SCHREPP M. Explorative analysis of empirical data by boolean analysis of questionaires[J]. Zeitschrift für Psychologie, 2002, 210(2):99-109. DOI:10.1026/0044-3409.210.2.99.
- [20] THEUNS P. Building a knowledge space via Boolean analysis of co-occurrence data[M]. DOWLING C E, RO-BERTS F S, THEUNS P. Recent Progress in Mathematical Psychology: Psychophysica, Knowledge, Representation, Cognition and Measurement. New York: Psychology Press, 1998:173-194.
- [21] SCHREPP M. On the empirical construction of implications between bi-valued test items[J]. Mathematical Social Sciences, 1999, 38(3): 361-375. DOI:10.1016/S0165-4896(99)00025-6.
- [22] SARGIN A, ÜNLÜ A. Inductive item tree analysis: Corrections, improvements, and comparisons[J]. Mathematical Social Sciences, 2009, 58(3): 376-392. DOI: 10.1016/j. mathsocsci. 2009. 06. 001.
- [23] DE CHIUSOLE D, STEFANUTTI L, SPOTO A. A class of k-modes algorithms for extracting knowledge structures from data[J]. Behavior Research Methods, 2017, 49(4):1212-1226. DOI:10.3758/s13428-016-0780-7.
- [24] CHATURVEDI A, GREEN P E, CAROLL J D. k-modes clustering[J]. Journal of Classification, 2001, 18(1): 35-55. DOI:10.1007/s00357-001-0004-3.
- [25] DOIGNIN J P. Knowledge spaces and skill assignments[C] // Contributions to Mathematical Psychology, Psychometrics, and Methodology. New York: Springer-Verlag, 1994:111-121.
- [26] SPOTO A, STEFANUTTI L, VIDOTTO G. Knowledge space theory, formal concept analysis, and computerized psychological assessment[J]. Behavior Research Methods, 2010, 42(1): 342-350. DOI: 10. 3758/BRM. 42. 1. 342.
- [27] SPOTO A, STEFANUTTI L, VIDOTTO G. On the unidentifiability of a certain class of skill map-based probabilistic knowledge structures[J]. Journal of Mathematical Psychology, 2012, 56(4), 248-255. DOI: 10.1016/j. jmp. 2012.05.001.
- [28] SUCK R. Parsimonious set representations of orders, a generalization of the interval order concept, and knowledge spaces[J]. J Discrete Applied Mathematics, 2003, 127: 373-386. DOI:10.1016/S0166-218X(02)00255-X.
- [29] SUCK R. Set representations of orders and a structural equivalent of saturation[J]. Journal of Mathematical Psychology, 2004, 48:159-166. DOI: 10.1016/j. jmp. 2004.03.001.
- [30] SUCK R. Skills first: An alternative approach to construct knowledge spaces[J]. Journal of Mathematical Psychology, 2021, 101:102517. DOI:10.1016/j.jmp. 2021.102517.
- [31] SPOTO A, STEFANUTTI L, VIDOTTO G. An iterative procedure for extracting skill maps from data[J]. Behavior Research Methods, 2016, 48(2):729-741. DOI:10.3758/s13428-015-0609-9.
- [32] 周银凤,李进金,冯丹露,等.形式背景下的学习路径与技能评估[J].模式识别与人工智能,2021,34(12):1069-

1084. DOI:10. 16451/j. cnki. issn1003-6059. 202112001.

- [33] 周银凤,李进金.形式背景下的技能约简与评估[J]. 计算机科学与探索, 2022, 16(3): 692-702. DOI: 10. 3778/j. issn. 1673-9418. 2008024.
- [34] SUN Wen, LI Jinjin, GE Xun, et al. Knowledge structures delineated by fuzzy skill maps[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2021, 407:50-66. DOI:10.1016/j. fss. 2020. 10.004.
- [35] CAO Xiyan, LIN Fucai, SUN Wen, et al. A note on knowledge structures delineated by fuzzy skill multimaps[J].
   Fuzzy Sets and Systems, 2025, 505:109282. DOI: 10.1016/j. fss. 2025.109282.
- [36] SCHREPP M. A generalization of knowledge space theory to problems with more than two answer alternatives[J]. Journal of Mathematical Psychology, 1997, 41(3):237-243. DOI:10.1006/jmps.1997.1169.
- [37] WANG Bo,LI Jinjin,SUN Wen, et al. Notes on the polytomous generalization of knowledge space theory[J]. Journal of Mathematical Psychology, 2022, 109:102672. DOI:10.1016/j.jmp. 2022.102672.
- [38] WANG Bo,LI Jinjin,SUN Wen. CD-polytomous knowledge spaces and corresponding polytomous surmise systems
   [J]. British Journal of Mathematical and Statistical Psychology, 2023, 76(1):87-105. DOI:10.1111/bmsp.12283.
- [39] BARTL E, BELOHLAVEK R. Knowledge spaces with graded knowledge states [J]. Information Sciences, 2011, 181(8):1426-1439. DOI:10.1109/KAM. 2008.106.
- [40] GE Xun. On galois connections between polytomous knowledge structures and polytomous attributions[J]. Journal of Mathematical Psychology, 2022, 110:102708. DOI:10.1016/j.jmp. 2022.102708.
- [41] 孙晓燕,李进金.基于程序性知识学习的项目状态转移函数与多分知识结构[J].模式识别与人工智能,2022,35 (3):223-242.DOI:10.16451/j.cnki.issn1003-6059.202203003.
- [42] SUN Wen, LI Jinjin, LIN Fucai, et al. Constructing polytomous knowledge structures from fuzzy skills[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2023, 461:108395. DOI:10.1016/j.fss. 2022.09.003.
- [43] DE CHIUSOLE D, SPOTO A, STEFANUTTI L. Extracting partially ordered clusters from ordinal polytomous data[J]. Behavior Research Methods, 2020, 52:503-520. DOI:10.3758/s13428-019-01248-8.
- [44] 李金海,张瑞,智慧来,等.知识空间理论研究综述[J].模式识别与人工智能,2024,37(2):106-127. DOI:10. 16451/j.cnki.issn1003-6059.202402002.
- [45] PAWLAK Z. Rough sets[J]. International Journal of Computer and Information Sciences, 1982, 11(5): 341-356.
- [46] PAWLAK Z. Rough set: Theoretical aspects of reasoning about data[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [47] ORŁOWSKA E. Incomplete Information: Rough set analysis[M]. Berlin: Springer Verlag, 1998.
- [48] KRYSZKIEWICZ M. Rough set approach to incomplete information systems[J]. Information Sciences, 1998, 112 (1/2/3/4):39-49. DOI:10.1016/S0020-0255(98)10019-1.
- [49] YAO Yiyu. A comparative study of fuzzy sets and rough sets[J]. Information Sciences, 1998, 109(1/2/3/4): 227-242. DOI: 10.1016/S0020-0255(98)10023-3.
- [50] RADZIKOWSKA A M, KERRE E E. Transactions on rough sets II [M]. Berlin: Springer, 2004.
- [51] ZHU W. Generalized rough sets based on relations[J]. Information Sciences, 2007, 177(22): 4997-5011. DOI: 10. 1016/j. ins. 2007. 05. 037.
- [52] ESTAJI A A,KHODAII S,BAHRAMI S. On rough set and fuzzy sublattice[J]. Information Sciences, 2011,181 (18):3981-3994. DOI:10.1016/j. ins. 2011. 04. 043.
- [53] YAO Yiyu. Constructive and algebraic methods of the theory of rough sets[J]. Information Sciences, 1998, 109(1/ 2/3/4):21-47. DOI:10.1016/S0020-0255(98)00012-7.
- [54] THIELE H. On axiomatic characterizations of crisp approximation operators[J]. Information Sciences, 2000, 129 (1/2/3/4):221-226. DOI:10.1016/S0020-0255(00)00019-0.
- [55] SHE Yanhong, WANG Guojun. An axiomatic approach of fuzzy rough sets based on residuated lattices[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2009, 58(1):189-201. DOI: 10.1016/j. camwa. 2009.03.100.
- [56] 吴伟志,米据生.粗糙集的数学结构[M].北京:科学出版社,2019.
- [57] WU Weizhi, MI Jusheng, ZHANG Wenxiu. Generalized fuzzy rough sets[J]. Information Sciences, 2003, 151:263-282. DOI:10.1016/S0020-0255(02)00379-1.
- [58] RADZIKOWSKA A M, KERRE E E. A comparative study of fuzzy rough sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2002, 126(2):137-155. DOI:10.1016/S0165-0114(01)00032-X.

- [59] MI Jusheng, ZHANG Wenxiu. An axiomatic characterization of a fuzzy generalization of rough sets[J]. Information Sciences, 2004, 160(1/2/3/4):235-249. DOI: 10.1016/j. ins. 2003. 08. 017.
- [60] WU Weizhi, ZHANG Wenxiu. Constructive and axiomatic approaches of fuzzy approximation operators[J]. Information Sciences, 2004, 159(3/4): 233-254. DOI: 10.1016/j. ins. 2003. 08.005.
- [61] LI Tongjun. Rough approximation operators on two universes of discourse and their fuzzy extensions[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2008, 159(22): 3033-3050. DOI:10.1016/j. fss. 2008.04.008.
- [62] LI Tongjun, ZHANG Wenxiu. Rough fuzzy approximations on two universes of discourse[J]. Information Sciences, 2008,178(3):892-906. DOI:10.1016/j. ins. 2007. 09.006.
- [63] ZHANG Hongying, ZHANG Wenxiu, WU Weizhi. On characterization of generalized interval-valued fuzzy rough sets on two universes of discourse[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2009, 51(1): 56-70. DOI: 10.1016/j. ijar. 2009. 07. 002.
- [64] LIU Guilong. Rough set theory based on two universal sets and its applications[J]. Knowledge-Based Systems, 2010,23(2):110-115. DOI:10.1016/j.knosys.2009.06.011.
- [65] ALI M I,DAVVAZ B,SHABIR M. Some properties of generalized rough sets[J]. Information Sciences, 2013, 224: 170-179. DOI:10.1016/j.ins. 2012.10.026.
- [66] HU Baoqing, WONG H. Generalized interval-valued fuzzy rough sets based on interval-valued fuzzy logical operators[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2013, 15(4): 381-391.
- [67] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965, 8(3): 338-353. DOI: 10. 1016/S0019-9958(65)90241-X.
- [68] ZHAI Jun, CHEN Yan, WANG Qinglian, et al. Fuzzy ontology models using intuitionistic fuzzy set for knowledge sharing on the semantic web[C]//12th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design. Xi'an; IEEE Press, 2008;465-469, DOI:10.1109/CSCWD. 2008. 4537023.
- [69] DUBOIS D, PRADE H. Rough fuzzy sets and fuzzy rough sets[J]. International Journal of General Systems, 1990, 17(2/3):191-209. DOI:10.1016/0165-0114(90)90146-W.
- [70] NANDA S, MAJUMDAR S. Fuzzy rough sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1992, 45:157-160. DOI: 10.1016/0165-0114(92)90114-J.
- [71] MORSI N N, YAKOUT M M. Axiomatics for fuzzy rough sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1998, 100(1/2/3): 327-342. DOI:10.1016/S0165-0114(97)00104-8.
- [72] SAMANTA S K, MONDAL T K. Intuitionistic fuzzy rough sets and rough intuitionistic fuzzy sets[J]. Journal of Fuzzy Mathematics, 2001,9(3):561-582.
- [73] CORNELIS C, COCK M D, KERRE E E. Intuitionistic fuzzy rough sets: At the crossroads of imperfect knowledge
   [J]. Expert Systems, 2003, 20:260-270. DOI:10.1111/1468-0394.00250.
- [74] DUBOIS D.PRADE H. Interval-valued fuzzy sets, possibility theory and imprecise probability[C]//Proceedings of the Joint 4th Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology and the 11th Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications, Barcelona: DBLP,2005:314-319.
- [75] ZHANG Zhiming. An interval-valued intuitionistic fuzzy rough set model[J]. International Journal of General Systems, 2010, 39(2):135-164. DOI:10.1080/03081070903393832.
- [76] ZHANG Zhiming. On interval type-2 rough fuzzy sets[J]. Knowledge-Based Systems, 2012, 35: 1-13. DOI: 10. 1016/j. knosys. 2012. 04. 002.
- [77] YANG Xibei, SONG Xiaoning, QI Yunsong, et al. Constructive and axiomatic approaches to hesitant fuzzy rough set[J]. Soft Computing, 2014, 18:1067-1077. DOI:10.1007/s00500-013-1127-2.
- [78] WANG Chunyong. Type-2 fuzzy rough sets based on extended t-norms[J]. Information Sciences, 2015, 305:165-183. DOI:10.1016/j.ins. 2015.01.024.
- [79] YANG Bin, HU Baoqing. A fuzzy covering-based rough set model and its generalization over fuzzy lattice[J]. Information Sciences, 2016, 367/368:463-486. DOI:10.1016/j. ins. 2016.05.053.
- [80] YANG Bin, HU Baoqing. On some types of fuzzy covering-based rough sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2017, 312: 36-65. DOI:10.1016/j. fss. 2016. 10.009.
- [81] BEZDEK J C, HARRIS J D. Fuzzy partitions and relations: An axiomatic basis for clustering[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1978, 1(2):111-127. DOI:10.1016/0165-0114(78)90012-X.

第2期

- [82] GRECO S, MATARAZZO B, SLOWINSKI R. Rough sets theory for multicriteria decision analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 129(1):1-47. DOI:10.1016/S0377-2217(00)00167-3.
- [83] HU Baoqing, WANG Chunyong. On type-2 fuzzy relations and interval-valued type-2 fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2014, 236:1-32. DOI:10.1016/j. fss. 2013.07.011.
- [84] GOGUEN J A. L-fuzzy set[J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 1967, 18: 145-174. DOI: 10. 1016/0022-247X(67)90189-8.
- [85] GRECO S, INUIGUCHI M, SLOWINSKI R. Fuzzy rough sets and multiple-premise gradual decision rules[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2006, 41:179-211. DOI:10.1016/j. ijar. 2005. 06. 014.
- [86] KONDO M. On the structure of generalized rough sets[J]. Information Sciences, 2006, 176(5):589-600. DOI:10. 1016/j. ins. 2005. 01. 001.
- [87] KOTŁOWSKI W, DEMBCZYSKI K, GRECO S, et al. Stochastic dominance-based rough set model for ordinal classification[J]. Information Sciences, 2008, 178(21): 4019-4037. DOI:10.1016/j. ins. 2008. 06.013.
- [88] LEUNG Y,FISCHER M M,WU Weizhi, et al. A rough set approach for the discovery of classification rules in interval-valued information systems[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2008, 47(2):233-246. DOI: 10.1016/j. ijar. 2007. 05. 001.
- [89] ZHANG Zhiming. On characterization of generalized interval type-2 fuzzy rough sets[J]. Information Sciences, 2013,219:124-150. DOI:10.1016/j.ins.2012.07.013.
- [90] DU Wensheng, HU Baoqing. Dominance-based rough set approach to incomplete ordered information systems[J]. Information Sciences, 2016, 346/347:106-129. DOI:10.1016/j. ins. 2016.01.098.
- [91] DU Wensheng, HU Baoqing. Dominance-based rough fuzzy set approach and its application to rule induction[J].
   European Journal of Operational Research, 2017, 261(2):690-703. DOI:10.1016/j.ejor.2016.12.004.
- [92] QIAO Junsheng, HU Baoqing. Granular variable precision L-fuzzy rough sets based on residuated lattices[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2018, 336:54-86. DOI:10.1016/j. fss. 2016. 12.002.
- [93] SUN Yan, SHI Fugui. Representations of L-fuzzy rough approximation operators[J]. Information Sciences, 2023, 645:119324.
- [94] KONDO M. L-fuzzy relations on residuated lattices[C]//54th IIEEE nternational Symposium on Multiple-Valued Logic(ISMVL). Brno: IEEE Press,2024:115-119.
- [95] WALKER C L, WALKER E A. The algebra of fuzzy truth values[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2005, 149: 309-347. DOI:10.1016/j. fss. 2003. 12.003.
- [96] STARCZEWSKI J T. Extended triangular norms[J]. Information Sciences, 2009, 179(6): 742-757. DOI: 10.1016/j. ins. 2008. 11.009.
- [97] 王国胤,姚一豫,于洪.粗糙集理论与应用研究综述[J].计算机学报,2009,32(7):1229-1246. DOI:10.3724/SP.J. 1016.2009.01229.
- [98] XU Feifei, MIAO Duoqiang, YAO Yiyu, *et al*. Analyzing skill sets with or-relation tables in knowledge spaces[C]// 8th IEEE International Conference on Cognitive Informatics. Hong Kong: IEEE Press, 2009:174-180. DOI:10. 1109/COGINF. 2009. 5250759.
- [99] 高纯,王睿智.知识空间理论析取模型下最小技能集的生成[J].计算机科学与探索,2010,4(12):1109-1114. DOI: 10.3778/j.issn.1673-9418.2010.12.005.
- [100] YAO Yiyu, MIAO Duoqiang, XU Feifei. Granular structures and approximations in rough sets and knowledge spaces[M]// ABRAHAM A, FALCÓN R, BELLO R. Rough Set Theory: A True Landmark in Data Analysis. Berlin: Spring-Verlag, 2009;71-84.
- [101] LIU Guilong. Rough set approaches in knowledge structures[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2021,138:78-88. DOI:10.1016/j.ijar.2021.08.003.
- [102] WANG Gongxun,LI Jinjin,XU Bochi. Constructing polytomous knowledge structures from L-fuzzy S-approximation operators[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2025, 179:109363. DOI:10.1016/j. ijar. 2025. 109363.
- [103] MIESZKOWICZ-ROLKA A, ROLKA L. Variable precision rough sets in analysis of inconsistent decision tables [M]// RUTKOWSKI L, KACPRZYK J. Advances in Soft Computing. Heidelberg: Physica-Verlag, 2003; 304-309.

- [104] MIESZKOWICZ-ROLKA A, ROLKA L. Variable precision fuzzy rough sets[M]//PETERS J F, SKOWRON A, GRZYMAŁA-BUSSE J W, et al. Transactions on Rough Sets []. Berlin: Spring-Verlag, 2004:144-160.
- [105] ZHANG Hongying, LEUNG Y, ZHOU Lei. Variable-precision-dominance-based rough set approach to intervalvalued information systems[J]. Information Sciences, 2013, 244:75-91. DOI:10.1016/j. ins. 2013.04.031.
- [106] LIU Guilong, LIU Jie. A variable precision reduction type for information systems[M]//KNIGHT K, ZHANG C, HOLMES G, et al. Artificial Intelligence. Singapore: Springer-Verlag, 2019;240-247.
- [107] SUN Bingzhen, MA Weimin, CHEN Xiangtang. Variable precision multigranulation rough fuzzy set approach to multiple attribute group decision-making based on λ-similarity relation[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019,127:326-343. DOI:10.1016/j. cie. 2018.10.009.
- [108] 杨桃丽,李进金,李招文,等. 基于技能构建知识结构的两种变精度模型与技能子集约简[J]. 模式识别与人工智能,2022,35(8):671-687. DOI:10.16451/j. cnki. issn1003-6059.2022080001.
- [109] YANG Taoli, LI Jinjin, LI Zhaowen, et al. The inclusion degrees of skill maps and knowledge structures[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2023, 45(4):5765-5781. DOI:10.3233/JIFS-222149.
- [110] 杨桃丽. 构建知识结构的两种变精度模型[D]. 漳州:闽南师范大学, 2023.
- [111] XU Bochi,LI Jinjin. The inclusion degrees of fuzzy skill maps and knowledge structures[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2023, 465:108540.
- [112] 黄传义,黄韩亮,杨竞菁,等.变精度模型构建的知识结构[J].山西大学学报(自然科学版),2025,48(1):43-54. DOI:10.13451/j.sxu.ns.2024135.
- [113] STEFANUTTI L, ROBUSTO E. Recovering a probabilistic knowledge structure by constraining its parameter space[J]. Psychometrika, 2009, 74(1):83-96. DOI:10.1007/s11336-008-9095-7.
- [114] ANSELMI P,STEFANUTTI L, DE CHIUSOLE D, et al. The assessment of knowledge and learning in competence spaces: The gain-loss model for dependent skills[J]. British Journal of Mathematical and Statistical Psychology,2017,70(3):457-479. DOI:10.1111/bmsp.12095.
- [115] SPOTO A, STEFANUTTI L, VIDOTTO G. On the unidentifiability of a certain class of skill map-based probabilistic knowledge structures[J]. Journal of Mathematical Psychology, 2012, 56(4):248-255. DOI: 10.1016/j.jmp. 2012.05.001.
- [116] SLEZAK D,ZIARKO W. The investigation of the bayesian rough set model[J]. International Journal of Approximate Reasoning,2005,40:81-91. DOI:10.1016/j.ijar.2004.11.004.
- [117] LIU Dun, LI Tianrui, RUAN Da. Probabilistic model criteria with decision-theoretic rough sets[J]. Information Sciences, 2011, 181(17): 3709-3722. DOI:10.1016/j. ins. 2011.04.039.
- [118] MA Weimin, SUN Bingzhen. On relationship between probabilistic rough set and Bayesian risk decision over two universes[J]. International Journal of General Systems, 2012, 41 (3): 225-245. DOI: 10. 1080/03081079. 2011. 634067.

(责任编辑:黄仲一 英文审校:黄心中)

DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 202410016



# RGB-D 多模态融合与深度特征增强 的固废检测网络

赵崟吴, 刘炳辰, 杨建红, 房怀英

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对建筑固废在线识别中因相似特征导致的 RGB 识别准确率不高的问题,搭建双相机采集实验台,同步采集彩色图像和深度图像,提出一种基于彩色图像和深度图像的多模态融合与深度特征增强网络(DFENet).DFENet能够有效融合固废的彩色图像特征和深度图像特征。通过设计深度特征加强融合模块 PFPD平衡并加强深度特征,显著提升了网络的识别精度。实验结果表明:与RGB+FPN(特征金字塔网络) 方式相比,PFPD方式在 IoU=0.50 上的识别精度从 92.4%提高至 94.7%,在 IoU=0.75 上的识别精度从 90.8%提升至 92.8%;与实例分割网络(Mask R-CNN)相比,DFEnet 识别精度从 86.4%提高至 89.2%;提出 的方法有效地提高了固体废弃物识别的目标检测和实例分割模型识别精度。

关键词: 固废分选; 深度加强; RGB-D图像; 特征融合; 实例分割

中图分类号: TP 183; TP 249 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2025)02-0133-09

# Solid Waste Detection Network With RGB-D Multimodal Fusion and Deep Feature Enhancement

# ZHAO Yinhao, LIU Bingchen, YANG Jianhong, FANG Huaiying

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

Abstract: Aiming at the problem of low accuracy of RGB recognition due to similar features in online construction identification of solid waste, a dual-camera collection experimental platform is established to collect color images and depth images simultaneously. A multimodal fusion and depth feature enhancement network (DFENet) based on color image and depth image is proposed. DFENet can effectively fuse the color and depth image features of solid waste. By designing a deep feature strengthening fusion module (PFPD), the network balances and enhances depth features, significantly improving recognition accuracy. Experimental results show that compared with RGB+FPN (feature pyramid network) method, the recognition precision of PFPD method increases from 92.4% to 94.7% at IoU=0.50, and from 90.8% to 92.8% at IoU=0.75. Compared with the instance segmentation network (Mask R-CNN), the recognition precision of DFENet improvs from 86.4% to 89.2%. The proposed method can effectively improve the recognition precision of object detection and instance segmentation models for solid waste identification.

Keywords: solid waste sorting; depth enhancement; RGB-D image; feature fusion; instance segmentation

智能化分选在固废资源化利用中起到重要作用,非法处理固废会对环境造成破坏[1],分选的关键技

**收稿日期:** 2024-10-30

**基金项目:** 福建省高效产学合作项目(2024H6010);福建省科技计划项目(2023Y3006);第6批福建省泉州市引进 高层次人才团队项目(2023CT003)

通信作者: 房怀英(1978-),女,教授,博士,主要从事固废分选机器人开发等的研究。E-mail:happen@hqu.edu.cn。

术在于固废在线识别,现有的分选系统大多采用破碎、圆盘筛网、磁鼓、人工挑选等多级传统建筑固废分选<sup>[2-3]</sup>,但传统机械结构分选的纯度低,效率无法得到保障,人工捡拾需要投入大量人力,浪费劳动力的 同时也难以满足工业自动化的需求。

随着计算机视觉和人工智能技术的快速发展,将相机采集的 RGB 图像输入神经网络,可以对图像中的每个物体进行目标检测<sup>[4-5]</sup>,其中,端到端的单阶段目标检测有 YOLO 系列方法(代表)<sup>[6-7]</sup>、Segment Anything 方法<sup>[8]</sup>和 Transformer 方法<sup>[9]</sup>。通过语义分割<sup>[10]</sup>划分出轮廓,提出基于颜色特征<sup>[11]</sup>、MobileNet<sup>[12]</sup>、pix2pix、残差神经网<sup>[13]</sup>、YOLOv8<sup>[14]</sup>的固废分选方法。但真实工况通常比较复杂,如对于破碎后具有相近颜色、纹理、大小的砖块和混凝土,被砂浆包裹的砖块等,RGB 图像无法做到有效地区分<sup>[15]</sup>,Segment Anything 方法及 Transformer 方法识别精度较高但推理速度慢,无法满足在线实时检测需求。

多模态融合的方法得到越来越多的关注,热图像可以补充 RGB 的图像特征,以提高 RGB-T 语义 分割性能<sup>[16]</sup>,近红外技术(NIR)解决了复杂工况缺乏纹理信息和照明不足的问题<sup>[17]</sup>,高光谱成像技术 可以有效地获得物体的光谱和空间信息的特点<sup>[18]</sup>。在固废分选领域,利用彩色摄像头和激光轮廓扫描 仪采集 RGB 图像和深度图像<sup>[19]</sup>,实例分割网络(Mask R-CNN)采用不同的方式融合 RGB 和深度图 像,提高固废检测的性能。利用非对称多尺度特征融合网络(AMFFNet),融合固废 RGB 谱信息<sup>[20]</sup>、固 废检测网络<sup>[21]</sup>、固废视觉检测方法识别混凝土和灰砖<sup>[22]</sup>,分别对建筑固废的 RGB 图像和深度图像做 图像处理,都有效提高建筑固废检测识别精度,但是存在 RGB 特征与深度特征不平衡的问题,双主干网 络将 RGB 图像与深度图像进行融合<sup>[23]</sup>,使网络以相同的权重融合两种特征,并在网络中嵌入注意力机 制辅助平横特征<sup>[24-25]</sup>。基于此,本文对 RGB-D 多模态融合与深度特征增强的固废检测网络进行研究。

# 1 数据与实验方法

#### 1.1 实验台搭建与数据采集

双相机采集系统原理图,如图1所示。采集系统包括一个 RGB 成像模块和一个高度成像模块。

RGB 成像模块由彩色线阵相机和发光二极管(LED) 光源组成,用于采集物体的彩色图像,得到丰富的颜 色和纹理信息。高度成像模块为激光轮廓扫描仪, 扫描仪包含一个激光发射器和两个单色相机,用于 采集物体的深度图像,得到形状信息和深度信息,穹 顶光源照明安装在穹顶边缘,指向正上方,使光线从 穹顶的曲面反射出去,从而产生均匀反射。抓取模 块包括分拣机器人和抓取模组,用于接收检测信息 并实时分拣传送带上的物料。

对黑色橡胶、木头、混凝土和砖块4类常见的固 废进行实验,其中,1038张RGB图像和深度图像作 为训练集,455张彩色图像和深度图像作为测试集,

深度图像与 RGB 图像均标定并对齐。数据集部分样本,如图 2 所示。



(a) 黑色橡胶







(d) 砖块



图 1 双相机采集系统原理图 Fig. 1 Schematic diagram of dual camera acquisition system

#### 1.2 固废检测算法

建筑固废多级破碎后,由皮带传输,建筑固废表面通常被砂浆、粉尘覆盖,颜色特征退化严重,破碎 完的建筑固废变得不规则,形状特征无法有效提取。同时,建筑固废在皮带上也会存在堆叠的情况,导 致模型会将粘连的同类物体识别为一个物体。

4 类材料中混凝土与砖块同为灰色,在颜色尺度上有相似的特征,会在一定程度上影响分类的准确度;黑色橡胶与传送皮带也同样具有相似的特征,而传统的 RGB 分割算法主要针对颜色和轮廓信息进行提取,因此,难以得到有效的识别结果。针对上述问题,提出 RGB-D 多模态融合与深度特征加强的检测网络 DFENet。

1)特征融合模块。使用双通道卷积神经网络分别提取 RGB 通道的颜色、纹理等特征和深度通道的深度、边缘等特征,通过对应元素叠加的方式融合 RGB 通道和深度通道的特征。

2)注意力机制嵌入模块。使用注意力机制嵌入卷积神经网络,使网络更加关注有用的特征,抑制 冗余信息,减小特征信息的损失,得到特征信息含量更高的信息。

3) 深度特征加强融合模块 PFPD。通过自上而下的左边特征金字塔网络(L-FPN)网络提取更多的 语义信息,再次融合深度特征信息后输入自下而上的右边特征金字塔网络(R-FPN)网络,从而更好地 利用不同特征层之间的信息,恢复顶层损失的深度特征信息。

检测头阶段,将特征图中的候选感兴趣区域(ROI)送入 RPN 网络进行过滤,对剩下的 ROI 区域进行 ROIAlign 操作。

1.2.1 特征融合模块 DEFNet 网络结构图,如图 3 所示。图 3中: $C_i^{\text{Depth}}(i=1,2,3,4)$ 表示为提取到的特征 图。RGB 图像和深度图像分别使用对称 ResNet 进行 特征提取,RGB 分支图像为三通道输入,图像尺寸为 960 px×1 024 px,提取到的特征图表示为  $C_i^{\text{RGB}}(i=1, 2,3,4)$ ,每一层输出的特征图大小依次为 64、128、256、 512。

深度分支图像为单通道输入,图像尺寸为960 px× 1024 px,为了保证提取对称特征并融合,需要将 Res-Net 第一层卷积修改为单通道,每一层输出的特征图大 小与 RGB 输出的尺寸相同,依次为64、128、256、512。 将最后一个特征层的大小平衡在7 px×7 px,对输入的 RGB 和深度分支图像进行预处理,归一化再裁剪,尺寸 为224 px×224 px,将其作为第一层卷积的输入。



图 3 DEFNet 网络结构图



特征融合部分使用 ReLU 激活函数和最大池化层, ReLu 激活函数可以有效避免梯度爆炸和梯度消失的问

题,最大池化层对 RGB 和深度进行下采样,并选择分辨率更高的特征,更好地保留 RGB 纹理特征。 ReLu 激活函数表示为

$$Output = \max(0, w^{Ther}x + b)_{\circ}$$
(1)

式(1)中:x为上一层输入的网络的输入;w<sup>Ther</sup>为权重;b为添加到输入加权总和中的偏置。

通过 Element-wiseAdd 的方式进行一次融合,将特征图对应元素相加,融合后的特征图作为后续 L-FPN 的输入,即

$$\mathbf{T}_{i} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{i}^{\text{RGB}} \oplus \mathbf{C}_{i}^{\text{Depth}} \end{bmatrix}, \qquad i = 1, 2, 3, 4.$$
(2)

式(2)中: $T_i$ 表示通过一次 Element-wiseAdd 融合后的特征图。

ResNet<sup>[26]</sup>的核心思想是引入了残差连接和残差函数,通过这种方式解决了深层网络训练过程中的 梯度消失和梯度爆炸问题。残差连接通过将输入特征与网络的输出进行直接相加,使网络可以更容易 地学习残差,从而优化模型的性能。

$$y = F(x, \{W_i\}) + W_s x_o$$
(3)

残差函数的公式为

136

$$F = W_2 \sigma(W_1 x)_{\alpha}$$

式(3),(4)中:x,y分别为输入和输出;F(x,{W<sub>i</sub>})为需要进行残差学习的函数;W<sub>s</sub>为输入x的维度。 1.2.2 注意力机制嵌入模块 三通道的 RGB 固废图像包含的信息更多,每个通道可以独立控制图像 中相应颜色的强度,而单通道的深度图像包含的信息少,只记录像素的亮度信息,再将亮度信息转化为 实际的深度。RGB 图像特征丰富但存在大量冗余,深度图特征单一但存在噪声,因此,需要将注意力机 制嵌入 RseNet 中,使特征提取网络能更好地提取有效特征,排除冗余,加强各层特征之间的联系,帮助 模型集中于图像中更重要的部分,从而提高特征提取的效率和准确性。

将 RGB 图像特征定义为 input<sup>RGB</sup>  $\in \mathbf{R}^{e^{\times h^{\times w}}}(i = \{1, 2, 3, 4, 5\}), 其中, c 表示通道数, h 和 w 分别表示特征图的高度和宽度。将 input 输入至注意力机制嵌入模块, 尺寸为<math>(h, 1)$ 和(1, w)的池化核分别沿水平坐标和垂直坐标两个方向对通道进行编码, 从而得到  $X_{e}^{w}(w)$ 和  $X_{e}^{h}(h)$ , 即

$$X_{c}^{w}(w) = \frac{1}{h} \sum_{0 \leq j < h} \operatorname{input}_{c}^{\operatorname{RGB}}(j, w), \qquad (5)$$

$$X_{c}^{h}(h) = \frac{1}{w} \sum_{0 \leq i < w} \operatorname{input}_{c}^{\operatorname{RGB}}(h, i) \,. \tag{6}$$

**X**<sup>RGB</sup>对 RGB 特征宽度方向和高度方向分别进行池化操作并沿着空间方向聚合,对信息在水平方向和垂直方向进行拼接,即

$$\boldsymbol{X}_{i,1}^{\text{RGB}} = (\text{AvePooling}(X_c^w(w)), \text{AvePooling}(X_c^h(h)))_{\circ}$$
(7)

式(7)中:AvePooling 为平均池化,表示该窗口的特征; $X_i^{\text{RGB}}$ 为经过平均池化后的特征,使用一个共享的  $1 \times 1$ 的共享卷积层 F进行变换,即

$$\boldsymbol{X}_{i,2}^{\text{RGB}} = F(\boldsymbol{X}_{i,1}^{\text{RGB}})_{\circ}$$
(8)

在原始 RGB 特征图上进行 g<sup>h</sup> 和 g<sup>w</sup> 的乘法加权计算,输出为

$$Output_c^{\text{RGB}}(i,j) = X_i^{\text{RGB}}(i,j) \times g_c^h(i) \times g_c^w(j) \,. \tag{9}$$

首先,通过全局平均池化对每个通道上的特征进行平均池化操作,将特征图的空间维度降为1×1, 得到每个通道的全局特征表示。然后,通过全连接层将全局平均池化后的特征输入到一个全连接层中, 通过学习每个通道的权重系数确定每个通道的重要性。

1.2.3 深度特征加强融合模块 PFPD 深度特征加强的方式采用 对浅层卷积与深层卷积一次融合后,再进行深度特征加强,以充分融 合位置信息与高度特征,避免一次自上而下的特征金字塔,从而失去 整体位置和深度之间的联系。将 L-FPN 的输出特征图 *T<sub>i</sub>* 与深度图 像特征 *C<sub>i</sub>*<sup>Depth</sup> 进行聚合,二次融合,即

把包含固废位置和深度等信息的下层特征与包含固废语义信息的上



图 4 深度特征加强融合模块 PFPD Fig. 4 Deep feature enhancement fusion module PFPD

层特征进行融合,不同尺度特征图都包含丰富的信息。R-FPN 的输入 **D**<sub>i</sub>(*i*=1、2、3、4)使用尺寸为 3×3,步长为 2 的卷积层进行下采样操作,将特征图缩小为原尺寸的 1/2,再依次与前一图相加后完成自下 而上 R-FPN 部分,该部分充分利用深度加强融合后的特征,减少了下层特征信息的传递损失。

# 2 实验结果和分析

#### 2.1 实验参数

训练采用随机梯度下降(SGD),动量参数设置为 0.9,偏置 b 设置为 0,一共训练 100 轮,初始学习

(4)

率参数设置为 0.004,每迭代 30 次,学习率下降为初始学习率的 1/10,训练损失稳步下降。使用 CO-CO2014 数据集对提取特征部分的网络进行预训练,得到预训练权重。在经过非极大值抑制(NMS)结构之后,保留 1 000 个 RoI 区域,选择前景分割过程中得分最高的 100 个实例进行分割,实验评价指标选用平均识别精度(P<sub>A</sub>)对分割结果进行定量的判定,表示对每一类识别的正确的数量与该类总量之比。P<sub>A</sub>、识别精度(P)与召回率(R)之间的关系,即

$$P_{A} = \int_{0}^{1} P \cdot R dr,$$

$$P = \frac{TP}{TP + FP},$$

$$R = \frac{TP}{TP + FN^{\circ}}$$
(11)

式(11)中:TP 为预测与实际标签相同的正样本数量;FP 为预测与实际标签不同的负样本数量;FN 为 以实际为背景但预测为标签的负样本数量。考虑不同的阈值(IoU)对实验结果的影响,选用 0.50、0.75 的 IoU 阈值进行比较。

#### 2.2 基线目标检测模型

为了选择目标检测基线模型,选择双阶段目标检测网络Faster R-CNN、Mask R-CNN<sup>[27]</sup>,以及单阶 段目标检测网络 YOLOv5、YOLOv8 和 Co-DETR 进行对比。目标检测网络识别精度与推理时间(t)对 比,如表 1 所示。

表1 目标检测网络识别精度与推理时间对比

Tab. 1 Comparison between recognition precision and inference time of object detection model

目标检测网络	主干网络	${P}_{ m IoU=0.50}$ / $\%$	t/ms
Faster R-CNN	ResNet50+FPN	83.7	22
Mask R-CNN	ResNet50+FPN	90.4	27
YOLOv5	CSPDarknet53	89.3	21
YOLOv8	Darknet53	91.7	26
Co-DETR	ResNet50	95.8	315

由表1可知:为了能够准确定位建筑固废,确保后续执行机构能够进行抓取和气吹,需要得到目标 固废的掩膜和具有较快的检测速度以满足实时性,因此,目标检测网络选择 Mask R-CNN 作为对比。

# 2.3 注意力机制对比实验

在不同主干网络中分别加入通道注意力机制模块和注意力机制嵌入模块,以强化模型对于特征和 位置的关注,将注意力机制嵌入模块主干网络中,对提取的 RGB 图像特征图和深度图像特征图分别编 码形成对通道、位置和方向感知敏感的注意力图。不同模式识别精度比较,如表 2 所示。

		(单位:%)		
	Tab. 2 Comparison of diffe	precision	(Unit: %)	
模块	主干网络	${P}_{{ m IoU}=0.50}$	$P_{ m IoU=0.75}$	Р
通道注意力机制	ResNet101	93.2	91.4	77.8
	ResNeXt101	93.3	91.8	78.1
注意力机制嵌入	ResNet101	94.7	92.8	77.6
	ResNeXt101	93.8	92.6	78.4

由表2可知:注意力机制嵌入模块在不同主干网络上的检测识别精度都高于通道注意力机制模块, 通道注意力机制模块只关注通道之间的联系,特征相互分离,位置信息忽略。注意力机制嵌入模块能更 好地关注三通道 RGB 图像特征和单通道深度特征之间的联系,沿空间方向捕获特征之间远程依赖关 系,并保留精确的位置关系。

不同注意力机制热图,如图 5 所示。由图 5 可知:4 种单类物体工况下,注意力机制嵌入模块能更加聚焦在目标物体区域,对非感兴趣区域抑制能力更强,通道注意力机制模块关注的范围却更加广泛, 无法有效的针对目标物体;对于混合类,目标物体种类多,工况更加复杂,通道注意力机制模块仅能重点 聚焦一部分感兴趣区域,而注意力机制嵌入模块会对感兴趣区域分区域进行关注,形成多个热点区域。

ResNeXt101<sup>[28]</sup>的特征提取能力强于 ResNet101, 因此,网络本身更加关注细节特征,而深度图像仅为单 通道灰度图,但加入注意力机制嵌入模块后精准无法聚 焦,对于深度图像特征无法起到很好的提取作用,因此 使用注意力机制嵌入模块融合 ResNet101 在特征提取 效果上有很好的效果。



#### 图 5 不同注意力机制热图

92.8

为了验证特征融合与 PFPD 的有效性,使用 MaskR-CNN 输入仅为三通道 RGB 图像(作为基准), Fig. 5 Heat maps of different attention mechanisms 采用 ResNet101 作为主干网络,分别验证了 RGB-D 早期融合(RGB-D E)、RGB-D 中期融合 (RGB-D M)、PFPD的性能。不同融合方式的识别精度比较,如表3所示。

94.7

	表 3 不同融合方式的识别	(单位:%)	
Tab.	3 Recognition precision of dif	(Unit: ½)	
融合方式	$P_{ m IoU=0.50}$	${P}_{ m IoU=0.75}$	Р
RGB+FPN	92.4	90.8	77.3
RGB-D E+FPN	93.3	91.2	76.9
RGB-D M+FPN	93.5	91.2	77.0

由表 3 可知:与 RGB+FPN(特征金字塔网络)方式相比, PFPD 方式在 IoU=0.50 上的识别精度 从 92.4%提高至 94.7%,在 IoU=0.75 上的识别精度从 90.8%提升至 92.8%;相比于仅使用 RGB+ FPN 融合方式,采用 PFPD 的  $P_{IoU=0.50}$ ,  $P_{IoU=0.75}$ 都有提高,这说明深度信息可以作为 RGB 特征的补充 信息,起到有效作用;RGB-D E+FPN 融合方式是将 RGB 图像与深度图像先进行拼接,再输入网络,过 早的融合特征信息使特征提取网络不能区分两种信息之间的差别,识别精度低于 RGB-D M+FPN 融 合方式,而 PFPD 的 P<sub>10U=0.50</sub>, P<sub>10U=0.75</sub>都高于 RGB-D E+FPN、RGB-D M+FPN 融合方式,这个是因为 单通道深度图像特征信息少于三通道 RGB 图像特征信息,而 RGB-D M+FPN 融合方式对于 RGB 特 征和深度特征使用相同的权重,因此,只采用一次融合的方式不能有效利用深度特征。PFPD 可以更有 效地将底层的特征和高层的特征融合起来,在保留高层特征的语义信息的同时,保留低层特征的物体位 置信息,有效提升目标检测识别和定位精度。

#### 2.5 消融实验

将 DFENet 嵌入通用网络 Mask R-CNN 中,并使用不同深度的主干网络进行目标检测和实例分 割,以评价其通用性和有效性。分别使用 ResNet50、ResNet101、ResNeXt50 和 ResNeXt101 作为主干 网络。主干网络识别精度比较,结果如表4所示。

Tab. 4         Comparison of recognition precision of backbone networks							
主干网络 —	М	Mask R-CNN DFENet					
	$P_{ m IoU=0.50}$	${P}_{ m IoU=0.75}$	$P_{\mathrm{A}}$	$P_{ m IoU=0.50}$	$P_{\rm IoU=0.75}$	$P_{\mathrm{A}}$	
ResNet50	90.4	88.5	76.2	93.1	89.8	77.9	
ResNet101	92.4	90.8	77.3	94.7	92.8	77.6	
ResNeXt50	93.2	91.4	77.8	92.5	91.0	77.4	
ResNeXt101	93.0	90.8	76.7	93.8	92.6	78.4	

表 4 主干网络识别精度比较

(单位:%)

77.6

由表 4 可知:对于 ResNet50, DFENe 的 PA 比 Mask R-CNN 提高 1.7%, PloU=0, 50 比 Mask R-CNN 提高 2.7%, P<sub>10U=0.75</sub>比 Mask R-CNN 提高 1.3%; 随着网络层数的加深, 提取特征能力加强, 对于 ResNet101, DFENet 比 Mask R-CNN 的 PA 提高 0.3%, PloU=0.50, PloU=0.75 比 Mask R-CNN 分别提高 2.3%和2.0%。

4 类固废检测结果热力图,如图6所示。图6中:列表示真实类别标签;行表示预测类别标签。由 图 6(a)可知:混凝土(0.89)和砖块(0.92)的检测识别精度较低,主要原因是将混凝土误识别为砖块,黑

2.4 有效性实验

PFPD

色橡胶类的识别结果中,将黑色橡胶误识别为背景,说明只使用 RGB 作为输入,在特征提取阶段,无法 区分有相似纹理的信息,从而在后续识别阶段出现误识别。由图 6(b)可知:DFENet 融合了深度信息 并对深度特征进行加强,可以有效避免与背景误识别的情况,在混凝土类中,识别精度有所提高,砖块的 误识别率也有所下降。



(a) Mask R-CNN 检测结果



图 6 4 类固废检测结果热力图

Fig. 6 Thermal diagrams of detection results for 4 types solid waste

实例分割平均识别精度可以有效地显示模型对每一类物体的分割情况,实例分割平均识别精度比较,如表5所示。由表5可知:与 Mask R-CNN 相比,DFEnet 识别精度从 86.4%提高至 89.2%;相比于 MaskR-CNN,DFENet 在与黑色传送带有相同颜色特征的黑色橡胶平均识别精度提高 1.3%,在有相似颜色形状特征的混凝土和砖块平均识别精度都提高 2.8%,木头类平均识别精度提高 1.9%;相比 YOLOv8,DFENet 在黑色橡胶的平均识别精度有减少 0.8%,但其他三类固废提高 0.2%~4.0%。这 证明了 DFENet 能够很好地融合 RGB 特征和深度特征的优点,对于轮廓的划分更加的精细和准确,更 有利于固废识别检测。

	(单位:%)			
Tab. 5	(Unit: %)			
网络	P <sub>A</sub> (黑色橡胶)	P <sub>A</sub> (混凝土)	P <sub>A</sub> (木头)	P <sub>A</sub> (砖块)
Mask R-CNN	95.1	86.4	94.6	92.2
YOLOv5	91.6	89.6	96.0	93.1
YOLOv8	97.2	85.2	95.3	94.8
DFENet	96.4	89.2	96.3	95.0

## 2.6 可视化结果

网络检测结果,如图7所示。图7(a)中:第1~3列分别为RGB图像、深度图像、真实标签(GT),第4~7列分别为DFENet的检测结果、Mask R-CNN的检测结果、RGB-DE和RGB-DM的检测结果。



(a) 不同融合方式检测结果



(b) 真实工况下 DFENet 检测结果

图 7 网络检测结果 Fig. 7 Detection results of networks

由图 7(a)可知:第 1~3 行均存在木头与砖块堆叠的情况,Mask R-CNN 会只识别为一个物体或误 识别成多个物体,无法有效区分被遮挡部分;第 4 行 RGB-D M 将木头误识别为砖块,说明 RGB-D 中期 融合的方式对于深度特征提取能力不够;第 5 行 Mask R-CNN 将空皮带误识别成黑色橡胶,而采用 RGB-D 融合的方法均能避免该类情况发生;相比于 RGB 输入的 Mask R-CNN,融合深度信息能有效避 免漏检、误检的问题,黑色橡胶与深色传送带之间的区分,对于堆叠的情况,DFENet 也能有效区分不同 的物体。由图 7(b)可知:对于堆叠、粘连情况,DFENet 可以有效识别并分割。

综上所述,DFENet可以在实验测试集中更加准确地进行目标检测和实例分割,其检测结果优于基准 Mask R-CNN 网络。

# 3 结论

1)通过提出 DFENet,在特征提取网络中加入了注意力机制嵌入模块以增加特征提取能力,PFPD 先用自下而上的结构,融合 RGB 图像和深度图像的特征,深度特征加强融合后自上而下进行多尺度特征融合,DFENet 融合方式显著提升了固废目标检测的性能,相较于传统的单模态方法,DFENet 能使目标检测识别精度提高 0.3%, P<sub>IoU=0.55</sub>, P<sub>IoU=0.75</sub>分别提高 2.3%和 2.0%。这证明了融合 RGB 和深度信息对于改善目标检测的效果具有显著的积极影响。

2) 在实例分割任务上也取得了显著的改进,通过融合 RGB 图像和深度图像信息,能够更好地捕捉 目标的边界和细节信息,提高了实例分割的准确性和鲁棒性,并且相较于单模态方法,在实例分割任务 中表现出更好的性能,DFENet 在单类实例分割识别精度上最高提高 2.8%。

模型不足之处在于实验室工况存在少量污染、大量堆叠等情况,在运用于真实工况任务中会表现不 稳定,有较高的误识别率。下一步将针对不同工况进行研究,提高模型的泛化能力。

#### 参考文献:

- [1] FRATERNALI P, MORANDINI L, GONZÁLEZ S L H. Solid waste detection, monitoring and mapping in remote sensing images: A survey[J]. Waste Management, 2024, 189:88-102. DOI:10.1016/j. wasman. 2024. 08.003.
- [2] BONIFAZI G, SERRANTI S. Recycling technologies[C] // Encyclopedia of Sustainability Science and Technology. New York: Springer, 2019:1-57. DOI:10.1007/978-1-4939-2493-6\_116-4.
- [3] JANK A, MÜLLER W, SCHNEIDER I, et al. Waste separation press: A mechanical pretreatment option for organic waste from source separation[J]. Waste Management, 2015, 39:71-77. DOI:10.1016/j. wasman. 2015. 02. 024.
- [4] ROSS T Y, DOLLÁR G. Focal loss for dense object detection [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2017:2980-2988. DOI:10.1109/ICCV. 2017.324.
- [5] LIN T Y, DOLLÁR P, GIRSHICK R, et al. Feature pyramid networks for object detection [C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2017:2117-2125. DOI:10. 1109/CVPR. 2017. 106.
- [6] WANG C Y, YEH I H, LIAO H Y M. Yolov9: Learning what you want to learn using programmable gradient information[C]// European Conference on Computer Vision. Cham: Springer, 2025:1-21. DOI:10.1007/978-3-031-72751-1\_1.
- [7] WANG C Y, BOCHKOVSKIY A, LIAO H Y M. YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2023;7464-7475.
- [8] KIRILLOV A, MINTUN E, RAVI N, et al. Segment anything [C] // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2023; 4015-4026. DOI: 10.48550/arXiv. 2304.02643.
- [9] ZONG Zhuofan, SONG Guanglu, LIN Yu. Detrs with collaborative hybrid assignments training[C]// Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2023; 6748-6758. DOI: 10. 48550/arXiv. 2211. 12860.
- [10] LONG J, SHELHAMER E, DARRELL T. Fully convolutional networks for semantic segmentation[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2015: 3431-3440. DOI:10.1109/TPAMI. 2016.2572683.

- [11] 郑龙海,袁祖强,殷晨波,等.基于机器视觉的建筑垃圾自动分类系统研究[J].机械工程与自动化,2019(6):16-18. DOI:10.3969/j.issn.1672-6413.2019.06.006.
- [12] XU Xiong,ZHAO Beibei,TONG Xiaohua, et al. A data augmentation strategy combining a modified pix2pix model and the copy-paste operator for solid waste detection with remote sensing images[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2022, 15:8484-8491. DOI: 10. 1109/JSTARS. 2022. 3209967.
- [13] DAVIS P, AZIZ F, NEWAZ M T, et al. The classification of construction waste material using a deep convolutional neural network[J]. Automation in Construction, 2021, 122:103481. DOI:10.1016/j.autcon. 2020.103481.
- [14] LI Pan, XU Jiayin, LIU Shenbo. Solid waste detection using enhanced YOLOv8 lightweight convolutional neural networks[J]. Mathematics, 2024, 12(14):2185. DOI:10.3390/math12142185.
- [15] LU Weisheng, CHEN Junjie, XUE Fan. Using computer vision to recognize composition of construction waste mixtures: A semantic segmentation approach[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 178, 106022. DOI:10. 1016/j. resconrec. 2021. 106022.
- [16] DENG Fuqin, FENG Hua, LIANG Mingjian, et al. FEANet: Feature-enhanced attention network for RGB-thermal real-time semantic segmentation[C]//2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE Press, 2021;4467-4473. DOI:10.1109/IROS51168.2021.9636084.
- XIAO Wen, YANG Jianhong, FANG Huaiying, et al. A robust classification algorithm for separation of construction waste using NIR hyperspectral system[J]. Waste Management, 2019, 90:1-9. DOI: 10.1016/j. wasman. 2019. 04.036.
- [18] LU Bing, DAO P D, LIU Jianggui, et al. Recent advances of hyperspectral imaging technology and applications in agriculture[J]. Remote Sensing, 2020, 12(16):2659. DOI:10.3390/rs12162659.
- [19] LI Jiantao, FANG Huaiying, FAN Lulu, et al. RGB-D fusion models for construction and demolition waste detection
   [J]. Waste Management, 2022, 139:96-104. DOI:10.1016/j. wasman. 2021. 12.021.
- [20] CAI Zhenxing, FANG Huaiying, JIANG Fengfeng, et al. AMFFNet: Asymmetric multi-scale feature fusion network of RGB-NIR for solid waste detection[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-10. DOI:10.1109/TIM. 2023. 3300445.
- [21] LI Yangke, ZHANG Xinman. Multi-scale context fusion network for urban solid waste detection in remote sensing images[J]. Remote Sensing, 2024, 16(19): 3595. DOI: 10. 3390/rs16193595.
- [22] ZHUANG Jiangteng, FANG Huaiying, XIAO Wen, *et al*. Recognition of concrete and gray brick based on color and texture features[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2019, 47(4); 3224-3237. DOI:10.1520/JTE20180523.
- [23] HU Xinxin, YANG Kailun, FEI Lei, et al. Acnet: Attention based network to exploit complementary features for rgbd semantic segmentation[C] // IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway: IEEE Press, 2019:1440-1444. DOI:10.1109/ICIP.2019.8803025.
- [24] HE Kaiming, GKIOXARI G, DOLLÁR P, et al. Mask R-CNN[C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Xision. Piscataway: IEEE Press, 2017:2961-2969. DOI:10.1109/ICCV.2017.322.
- [25] HU Jie, SHEN Li, SUN Gang. Squeeze-and-excitation networks[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2018; 7132-7141. DOI: 10. 1109/CVPR. 2018. 00745.
- [26] HOU Qibin,ZHOU Daquan,FENG Jiashi. Coordinate attention for efficient mobile network design[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2021: 13713-13722. DOI:10.1109/CVPR46437.2021.01350.
- [27] MA Wanqi, CHEN Hong, ZHANG Wenkang, et al. DSYOLO-trash: An attention mechanism-integrated and object tracking algorithm for solid waste detection [J]. Waste Management, 2024, 178: 46-56. DOI: 10.1016/j. wasman. 2024. 02.014.
- [28] XIE S,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. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1492-1500. DOI:10.1109/CVPR.2017.634.

**DOI:**10.11830/ISSN.1000-5013.202410011

# 太阳能电池板支架 6005 铝合金 腐蚀失效分析



陈首虹1,苏治钦2,范袁涛2,3,黄身桂2,3,姜峰1,3,黄进益4

(1. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021;

2. 华侨大学 制造工程研究院, 福建 厦门 361021;

3. 南安华大石材产业技术研究院, 福建 南安 362261;

4. 固美金属股份有限公司, 福建 南安 362303)

摘要: 为研究太阳能电池板支撑部件局部腐蚀失效的原因,对 6005 铝合金支架腐蚀位置的宏微观形貌、基体材料和元素组成及质量分数进行能量色散光谱分析,并结合材料生产工艺的过程及运行环境,分析腐蚀产生原因。结果表明:加工过程中的金属挤压成型加工液未清洗干净,造成成型加工液中氯化物的残留,是导致太阳能电池板支架在使用过程腐蚀失效的重要原因。

关键词: 6005 铝合金;太阳能电池板支架;金属挤压成型加工液;腐蚀 中图分类号: TK 51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2025)02-0142-05

# Corrosion Failure Analysis of 6005 Aluminium Alloy for Solar Panel Mounting Brackets

CHEN Shouhong<sup>1</sup>, SU Zhiqin<sup>2</sup>, FAN Yuantao<sup>2,3</sup>, HUANG Shengui<sup>2,3</sup>, JIANG Feng<sup>1,3</sup>, HUANG Jinyi<sup>4</sup>

College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
 Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

3. Nan'an HQU Institute of Stone Industry Innovations Technology, Nan'an 362261, China;
4. Goomax Metal Limited Company, Nan'an 362303, China)

**Abstract:** To study the causes of localized corrosion failure in solar panel support components, the macroand micro-morphologies, matrix material properties, elemental compositions and mass fractions at the corrosion sites of a 6005 aluminium alloy brackets were analyzed using energy dispersive spectroscopy. In addition, the corrosion mechanisms were evaluated considering the products' manufacturing processes and operating environment. The results indicate that the inadequate cleaning of metal extrusion moulding processing fluid lead to chloride residue in the moulding process fluid, which was an important cause of corrosion and failure of the solar panel bracket during service.

Keywords: 6005 aluminium alloy; solar panel bracket; metal extrusion moulding processing fluid; corrosion

近几年,随着"双碳"战略的不断推进,光伏行业作为绿色能源的重要一部分,在西部地区有着十分

**收稿日期:** 2024-10-24

通信作者: 姜峰(1981-),男,教授,博士,主要从事精密超精密加工技术的研究。E-mail:jiangfeng@hqu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52275428)

广泛的应用<sup>[1]</sup>。但是西北部地区昼夜温差大、西南部地区酸雨现象严重,都对光伏设备的使用寿命造成 显著的影响,其中,受到影响最大的是光伏支架的使用寿命。光伏支架作为太阳能电池板的支撑部件, 其可靠性也关系着供电系统的稳定性,若铝合金表面出现腐蚀情况却未及时发现,造成腐蚀面积的扩 大,则会导致铝合金材料强度降低<sup>[2]</sup>、支架稳定性变弱,进而影响光伏电站的稳定运行,产生严重的安全 隐患<sup>[3]</sup>。6005 铝合金由于其密度低、耐腐蚀性强、力学性能优异、可加工性能好等显著优势,在光伏行 业中常被用于太阳能电池板边框和支架的制造<sup>[4]</sup>。因此,对 6005 铝合金腐蚀失效案例进行相应的检测 及分析并提出对应的解决措施,对于光伏电站的稳定运行,减小安全隐患,有着重要意义。

基于此,本文对 6005 铝合金支架腐蚀位置的宏微观形貌、基体材料和元素组成及质量分数进行能量色散光谱(EDS)分析,并结合材料生产工艺的过程及运行环境,分析腐蚀产生原因。

# 1 检验结果与分析

#### 1.1 宏观检测

某厂家在检查安装检修太阳能电池板支架时,发现在 太阳能电池板边框及安装支架上,固定部位的接口边缘处 有部分腐蚀情况(图 1)。为避免安全隐患,对该固定部分 受腐蚀部件进行拆解更换。受腐蚀的太阳能电池板支架部 件使用 6005 铝合金挤压成型,其铝合金腐蚀宏观形貌,如 图 2 所示。由图 2 可以看出,铝合金支架无明显形变,表面 无涂层及喷漆处理,在侧表面位置有较多明显的腐蚀痕迹。



图 1 典型的铝合金光伏支架失效情况 Fig. 1 Typical failure of aluminum alloy brackets

通过对部件腐蚀区域产生的位置进行观察,可以看到腐蚀区域主要集中在材料侧面、固定区域上部及边 角位置,由多个灰黑色的斑点连接而形成。

使用 VHX-1000 型电子显微镜对腐蚀部件进行检查,腐蚀区域放大宏观形貌,如图 3 所示。由图 3 可知:在铝合金表面,无明显凹坑及裂纹,腐蚀产物为灰黑色,呈圆形、片状覆盖于铝合金支架基体之上。



图 2 铝合金腐蚀宏观形貌 Fig. 2 Macroscopic morphology of corrosion of aluminum alloy



图 3 腐蚀区域放大宏观形貌 Fig. 3 Enlarged macroscopic morphology of corroded area

#### 1.2 基材分析

对未腐蚀的铝合金工件截面进行元素成分检测,检测结果如表1所示。表1中:w为质量分数。在 基材成分中可以看出,该基材中主要含有Si、Mg、Cr、Fe、Mn等元素。根据铝合金的GB/T 3190-2020 标准要求<sup>[5]</sup>,该铝合金太阳能支架紧固件的化学成分,符合牌照为6005铝合金的技术要求。

基材					$w/ \frac{0}{0}$				
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
铝合金挤压成型支架	0.85	0.05	0.02	0.03	0.56	0.08	0.03	0.02	余量
6005 技术要求	0.60~0.90	≪0.35	≪0.10	≪0.10	0.40~0.60	≪0.10	≪0.10	≪0.10	余量

Tab. 1 Detection results of cross-sectional elemental composition of a luminum alloy workpiece

## 1.3 腐蚀产物分析

使 JSM-IT500 型用扫描电镜对该样品进行检测,铝合金支撑架腐蚀区域微观形貌,如图 4 所示。 由图 4 可知:在腐蚀区域中,腐蚀产物呈现出堆叠的状态,部分腐蚀区域呈现出类似"蜂窝状"的形貌,并 在腐蚀面积较大的区域,可以观察到有龟裂的痕迹。

对腐蚀区域进行能量色散光谱检测,元素能 谱分析结果如图 5 所示。图 5 中:*I* 为信号强度; *E* 为能量。由图 5 可知:相较于未腐蚀区域,腐蚀 区域中 O 元素质量分数达到 41.70%,而 Al 元素 质量分数则降低至 42.18%,并且在检测中还发 现少量的 Na、S、Cl 等元素。这可能是由于在日 常使用中,铝合金支架表面接触了含有 S、Cl 的物 质,导致铝合金表面长期处于酸性环境中,表面致 密的氧化膜失效,加速了铝合金支架的腐蚀速度。



(a) 扫描电镜图







(b) 元素能谱分析结果

### 图 5 腐蚀区域元素能谱分析

Fig.5 Energy spectrum analysis of elements in corroded areas 为了更好地判断腐蚀区域中不同元素的分布情况,对腐蚀区域的元素分布进行分析,结果如图 6 所 示。对比图 6(c)、(f)可知:O、Al 两种元素呈现出"互补式"的分布,在氧化物与铝合金基体之间,有着 较为明显的"分界线",在腐蚀区域"外围"Al 元素分布较多,而在腐蚀的"中心"区域,则检测出大量的 O 元素。这可能是由于在腐蚀过程中,铝合金工件表面是由"点"到"面"逐步氧化扩散,最终氧化物质会将





500 µm





500 µm

铝合金基体完全覆盖。由图 6(d)、(g)、(i)可知:Na、S、Cl 三种元素在铝合金表面有着较广泛的分布。 从分布情况可以看出,在铝合金表面,Na 元素大多存在于未氧化的区域,已发生氧化区域分布较少;而 S、Cl 两种元素则几乎布满检测区域。这也进一步说明,在腐蚀发生过程中,含有 S、Cl 的物质广泛粘附 于铝合金表面,使得铝合金表面长期处于酸性环境中,这也是铝合金支架产生腐蚀最主要的原因。

00 µm

利用红外光谱法对切削液进行检测,发现其主要成分为矿油、丙烯二甘醇醚、硼酸一乙醇胺、三乙醇 胺、油酸、水、聚氧乙烯醚、石油磺酸钠、氯化聚烯烃,所含金属及卤族元素为 Na、S、Cl。根据腐蚀区域的 元素成分的分布,并结合铝合金挤压成型工艺进行分析。该腐蚀物可能是在生产过程中,金属挤压成型 加工液未清洗干净残留所导致。由于有机氯化物的存在,当太阳能电池板在日常使用中处于降水或空



2)





(i) Cl 元素 图 6 腐蚀表面元素分析



气潮湿的环境时,将导致残留在铝合金表面的氯离子与 铝合金基材表面发生腐蚀,如图7所示。

在铝合金支架使用过程中,如有加工液残留在工件 表面,其与空气中的 H<sub>2</sub>O、O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 在铝合金支架表面 形成了一层电解质水膜,其中充满了 Cl<sup>-</sup>等自由离子, 从而造成电化学腐蚀。如果有酸雨的加入,电解质水膜 内还会加入 SO4<sup>2-</sup>、NO3<sup>-</sup>、F<sup>-</sup>等自由离子。电解质水 膜是阴极,而铝合金材料是阳极,在电化学作用下,阳极 发生溶解,而作为阴极的电解质水膜层会不断补充,造 成铝合金阳极的不断溶解。其反应式为



图 7 金属挤压成型加工液残留导致的腐蚀 Fig. 7 Corrosion induced by residual metal extrusion moulding processing fluid

$$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-, \qquad (1)$$

$$Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^{-}$$
, (

$$Al^{3+} + 3OH^{-} \rightarrow Al(OH)_{3}$$
(3)

#### 腐蚀及失效成因分析 2

综合对铝合金支架及紧固件腐蚀区域成分分析,该材料发生腐蚀失效是由于在铝合金挤压成型过 程中,使用含 Cl<sup>-</sup>的挤压成型加工液,并且在加工后的清洗中未将挤压成型液清洗干净,导致氯化物的 残留,加剧了材料表面发生氧化腐蚀,产生含铝氧化物,导致材料力学性能下降,进而造成材料在使用中 发生腐蚀失效。

1) 环境方面,太阳能电池板安装位置多位于户外,安装环境变化大,条件较为恶劣。发生腐蚀的部 位为铝合金支架的外表面,当外界降水时,外表面与环境接触面积大,加上含氯化物挤压成型液的残留, 使其表面处于极端 pH 值环境中,导致氯离子与铝合金表面的基材发生腐蚀[67]。同时,铝合金内部及 表面含有 S、Na、Mg 等元素,容易在铝合金支架上形成电偶腐蚀,加速铝合金支架的腐蚀,严重时可能 导致支架断裂失效[8-9]。

2) 工艺方面,金属挤压成型加工液的选用也是铝合金腐蚀的重要因素<sup>[10-11]</sup>。在金属挤压成型加工 液中,含有大量的氯离子,会对铝合金零件的加工产生较高的腐蚀作用。若金属挤压成型加工液长时间 不更换,则容易发生加工液的劣化,造成微生物剧增,进而导致电化学腐蚀速率升高[12],最终使得铝合 金支架在加工过程后,更容易发生腐蚀失效。

3) 受力方面,太阳能电池板支架常安装于屋面或地处宽阔的区域,尤其在屋面太阳能电池板应用 时,风载荷对于其受力有着较大的影响[13-14]。太阳能电池板支架作为关键的支撑部件,在受到风吹动 时,会受到吸力作用产生振动,加剧铝合金支架的晃动,造成腐蚀区域断裂裂纹的加剧,进而造成支架的 断裂失效。

#### 结论 3

对 6005 铝合金支架腐蚀位置的宏微观形貌、基体材料和元素组成及质量分数进行 EDS 分析,并结 合材料生产工艺的过程及运行环境,得出导致太阳能电池板支架在使用过程中腐蚀失效的重要原因有 以下3点。

1)金属挤压成型加工液的残留。由于加工液在表面的残留,使氯化物附着于铝合金支架表面,在 使用环境中产生极端 pH 值环境,导致氧化膜遭到破坏,进而造成铝合金支架材料力学性能下降。

2)金属挤压成型加工液的长时间反复使用。由于加工液的反复使用,使加工液中微生物增加,从 而导致电化学腐蚀,进而加快材料腐蚀的速率。

3) 自然条件较为恶劣。在光伏太阳能支架使用过程中,由于太阳能电池板安装大多位于偏远地区,自然环境较为恶劣,加剧了材料破坏的速度。

综合以上分析结论,提出以下保护建议:在生产加工过程中,使用含氯化物较少的挤压成型加工液; 监测清洗液中有机氯成分的残留含量,当超过阈值时更换清洗液。在安装使用时,增加对铝合金支架材 料表面的防腐蚀措施,如增加金属镀层、使用涂漆隔绝水汽、利用阳极氧化等材料保护技术,以延长铝合 金支架的使用年限。

#### 参考文献:

- [1] 朱吉庆,宋雨昂.太阳能光伏发电技术发展现状与前景[J].对外经贸,2024(1):31-34. DOI:10.3969/j.issn.1672-9560.2007.10.003.
- [2] 黄浩东,李志鹏,蔡熙楠,等. 腐蚀条件对 7050 航空铝合金断口形貌及失效机理的影响[J]. 南昌航空大学学报(自 然科学版),2024,38(2):30-38. DOI:10. 3969/j. issn. 2096-8566. 2024. 02. 004.
- [3] HARSIMRAN S, KUMAR S, RAKESH K. Overview of corrosion and its control: A critical review[J] Proceedings on Engineering Sciences, 2021, 3(1):13-24. DOI:10.24874/PES03.01.002.
- [4] 丁发俊. 铝合金在光伏支架上的应用[J]. 轻合金加工技术,2019,47(10):7-9. DOI:10. 13979/j. 1007-7235. 2019. 10. 002.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.变形铝及铝合金化学成分: GB/T 3190-2020[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [6] GRILLI R, BAKER M A, CASTLE J E, et al. Localized corrosion of a 2219 aluminium alloy exposed to a 3.5% NaCl solution[J] Corrosion Science, 2010, 52(9): 2855-2866. DOI: 10.1016/j. corsci. 2010.04.035.
- [7] WANG Liwei, LIANG Jianming, LI Han, et al. Quantitative study of the corrosion evolution and stress corrosion cracking of high strength aluminum alloys in solution and thin electrolyte layer containing Cl<sup>-</sup> [J] Corrosion Science, 2021, 178:109076. DOI:10.1016/j. corsci. 2020.109076.
- [8] 陈鑫,田文明,李松梅,等. 氯离子和温度对铝合金在冷却液中腐蚀的影响[J]. 北京航空航天大学学报,2016,42 (10):2243-2249. DOI:10.13700/j. bh. 1001-5965. 2015. 0627.
- [9] 张宇鹏,王海斗,董丽虹,等. 航空航天铝合金腐蚀疲劳失效与寿命预测研究进展[J]. 中国有色金属学报,2024,34 (6):1893-1913. DOI:10.11817/j. ysxb. 1004.0609.2023-44548.
- [10] 王建录,陈曦,曹荣根,等.切削液腐蚀金属工件表面的机理探讨[J].现代制造工程,2012(6):6-8.DOI:10.16731/j.cnki.1671-3133.2012.06.009.
- [11] 袁世华,王宇,徐强,等. 机加工过程中切削液对航空铝合金零件的腐蚀机理研究[J]. 制造技术与机床,2024(4): 100-106. DOI:10.19287/j. mtmt. 1005-2402. 2024. 04. 016.
- [12] 彭陈元,周瑞红,程浩,等.劣化切削液对铝合金表面腐蚀的行为研究[J].工具技术,2024,58(7):24-30. DOI:10. 3969/j.issn.1000-7008.2024.07.003.
- [13] KOPP G A, FARQUHAR S, MORRISON M J. Aerodynamic mechanisms for wind loads on tilted, roof-mounted, solar arrays[J] Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012, 111:40-52. DOI:10.1016/j.jweia. 2012.08.004.
- [14] 徐悦.单层金属屋面-铝合金太阳能支架系统受力性能研究[D].苏州:苏州科技大学,2019.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴跃勤)

DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 202411009

# 采用 3D-DIC 技术的框架填充墙 平面外变形特征分析



谢鑫尧<sup>1</sup>,郭子雄<sup>1,2</sup>, BASHA Syed Humayun<sup>1,2</sup>

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;2. 华侨大学 福建省结构工程与防灾重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 基于三维数字图像相关(3D-DIC)技术,研究框架填充墙在不同加载阶段下的 Mises 应变场、裂缝宽度和平面内/外(IP/OOP)位移场的变化规律。结果表明:当墙体加载至峰值荷载的 70%~80%时,主裂缝轮廓基本形成,裂缝宽度为 0.96~1.97 mm;当墙体加载至峰值荷载时,最大裂缝宽度达 3.81 mm;墙体平面外曲面呈现类似二次曲面的形态,平面外位移幅值从墙体中心向四周依次递减;墙体各个区块内平面内位移幅 值接近,主裂缝分割的各个区块平面内/外位移场呈现对称分布规律。

关键词: 三维数字图像相关技术;框架填充墙;平面外性能;应变场;位移场

**中图分类号:** TU 375.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2025)02-0147-09

# Analysis on Out-of-Plane Deformation Characteristics of Frame Infilled Wall Using 3D-DIC Technique

XIE Xinyao<sup>1</sup>, GUO Zixiong<sup>1,2</sup>, BASHA Syed Humayun<sup>1,2</sup>

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

2. Key Laboratory for Structural Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province,

Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Based on three-dimensional digital image correlation (3D-DIC) technique, the Mises strain field, crack width and in-plane/out-of-plane (IP/OOP) displacement fields of the frame infilled wall at different loading stages were investigated. The results show that unde 70%-80% peak load, the main crack contour basically forms, and the crack width is 0.96-1.97 mm; unde the peak load, the maximum crack width is 3.81 mm. The outer surface of the wall resembles the shape of a quadric surface, the OOP displacement amplitude value decreases from the center to the edges of the wall. The IP displacement amplitude values of each block of the wall are similar, and the IP/OOP displacement fields of each block divided by the main crack presents the symmetrical distribution.

Keywords: three-dimensional digital image correlation technique; frame infilled wall; out-of-plane performance; strain field; displacement field

框架填充墙平面外(out-of-plane, OOP)的倒塌已经成为导致经济损失和人员伤亡的主要因素之

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(52178485);国家自然科学基金外国学者研究基金资助项目(52350410467)

**收稿日期:** 2024-11-09

通信作者: 郭子雄(1967-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事工程结构抗震防灾的研究。E-mail:guozxcy@hqu.edu.cn。

一,准确评估填充墙平面外变形曲面的特征是研究填充墙平面外倒塌的重要依据<sup>[1-5]</sup>。仅靠应变计和 位移计等传统测量手段无法完成对填充墙的全场应变和全场变形的有效测量。为解决上述困难,引入 三维数字图像相关(3D-DIC)技术,它具备非接触、多方向、全程测量和高精度测量等优点,可突破传统 应变计和位移计测量的局限性,有效监测框架填充墙的三维变形曲面。

早在 20 世纪 80 年代,Yamaguchi<sup>[6]</sup>和 Peters 等<sup>[7]</sup>各自独立提出数字图像相关(DIC)技术。目前, DIC 技术已经成功应用于各种结构体系(包括砌体结构、钢结构和组合结构)。刘聪等<sup>[8]</sup>开展纤维增强 复合材料包裹混凝土柱轴压性能试验,并在圆柱体周围布置 8 个数码相机,获取圆柱体全表面的应变 场。廖健等<sup>[9]</sup>基于二维数字图像相关(2D-DIC)技术开展钢筋混凝土剪力墙拟静力试验,通过对比位移 计和 DIC 技术测得的骨架曲线,验证 DIC 技术的有效性。赵宪忠等<sup>[10]</sup>分析影响 DIC 技术测量精度的 相关因素。刘宇飞等<sup>[11]</sup>介绍数字图像法在识别结构表面裂缝中的应用。许力等<sup>[12]</sup>基于 3D-DIC 技术 研究组合剪力墙外包压型钢板应变场的发展规律。熊二刚等<sup>[13]</sup>采用 DIC 技术获取预制拼装桥墩的应 变场和位移场,研究桥墩塑性饺区处裂缝宽度随时间的变化规律。Xie 等<sup>[14]</sup>利用 3D-DIC 技术研究粘 土砖框架填充墙平面外位移场,基于试验结果提出粘土砖框架填充墙的平面外计算模型。杨子涵等<sup>[15]</sup> 采用 DIC 技术研究混凝土梁剪切试验中裂缝宽度随着时间的变化规律。基于此,本文引入三维数字图 像相关技术,对框架填充墙平面外变形特征进行分析。

# 1 数字图像相关技术

#### 1.1 基本原理

DIC 技术的基本原理,如图 1 所示。由于计算机无法直接对图像进行读取,需利用栅格将图像切割 成若干个小区域。小区域的坐标信息和亮暗程度可以用数字表示。矩阵的第一行和第二行的数字代表 像素点的位置信息,最后一行数字代表像素点的亮暗程度(灰度值)。用数字矩阵记录下图像上像素点 的位置和灰度值信息后,工作站电脑可以直接对矩阵进行处理。



Fig. 1 Fundamentals of DIC technique

测量开始前,需先拍摄一张测量对象的参考照片,再对变形后的试件进行连续拍摄,获得每个时刻的照片。通过比对变形前后的照片寻找对应关系,从而计算出每个像素的位移矢量和应变,获得全场应 变和全场位移。

#### 1.2 相机的安装

相机的安装,如图 2 所示。测量设备 采用 GOM ARAMIS,这是一款集分析、计 算和记录物体变形、位移和速度等动态特 性的系统。系统分为平面单相机系统布置 和立体相机布置,前者布置相对简单,仅可 量测二维空间中物体的位移和变形。双相 机的安装相对复杂,但可以量测三维空间 中物体的位置坐标、位移、变形、速度和加





速度。横梁有 600、1 200、1 600 mm 等 3 种长度可选,不同长度的横梁对应不同的测量体积,横梁配备

照明和激光红外线追踪点灯,用于标定过程中的定位。试验选取1600 mm 横梁,架设在支架上的相机 分辨率为4096 px×3068 px,采样频率为0.1 Hz(低速采集),测量体积(长×宽×高)为3890 mm×3 100 mm×3100 mm。为避免试件表面的反射,两个相机镜头都安装偏振滤光镜。

#### 1.3 散斑的制作

散斑场是一种计算试件表面变形信息的载体,为了给 DIC 软件提供特定的图像特征,需在测量物体表面制作高对比度的随机灰度分布。试验采用手动喷涂,喷涂过程尽量让灰度随机分布,且黑白区域各占 50%。

散斑的制作,如图 3 所示。在墙体表面刷上一层乳胶漆,降低试件表面反光,再用黑色墨水对墙体进行喷涂。此外,还将荧光追踪点粘贴在试件表面的关键位置,获取该处位移场的信息。



图 3 散斑的制作 Fig. 3 Fabrication of speckle

### 1.4 测量头的标定

首次试验前或者改变相机的相对位置都需要对 DIC 测量头进行标定,在标定之前,需要将 DIC 设 备预热 30 min。标定也是一种测量过程,用于调节 DIC 系统,保证测量尺寸的一致性。摄取照片后,根 据若于张照片计算出各个相机的方位,并识别相机镜头的成像特性,这些信息是软件后续的计算基础。

测量头标定,如图 4 所示。测量头根据不同位置标定十字的空间坐标,主要从中间十字位、左侧十 字位和右侧十字位分别摄取标定物的中心点,根据这些数据建立空间直角坐标系。标定程序结束后,软 件会给出标定结果,若标定结果不达标,则需要重新标定,直至标定通过。



图 4 测量头的标定 Fig. 4 Calibration of measuring heads

# 2 基于 3D-DIC 技术的框架填充墙变形特征分析

#### 2.1 试验概况

设计一榀蒸压轻质加气混凝土(AAC)砌体框架填充墙,加气混凝土砌块的几何尺寸(长×宽×高) 为 600 mm×200 mm×200 mm,填充墙面板尺寸(长×高)为 3 150 mm×3 025 mm。加载装置,如图 5 所示。试验加载装置可分为平面外加载装置和限位装置,平面外加载装置包含加载横梁、滚轴和钢支 撑,限位装置包含底部千斤顶和顶部钢梁。平面外加载采用两台液压作动器同步施加位移,加载横梁与 平面外液压作动器通过螺栓连接,滚轴通过螺栓固定在加载横梁上,平面外液压作动器将荷载经由加载 横梁和滚轴传递至填充墙表面。设计的拟静力加载装置旨在等效模拟填充墙在实际地震作用下的第一阶振型<sup>[16]</sup>。文献[2-3]将平面外荷载施加在墙体对角线 1/3 和 2/3 的 4 个集中点处来模拟实际地震作用。考虑到文中足尺框架填充墙的平面外承载力,在填充墙 1/3 和 2/3 高度处采用 2 台 250 kN 的液压 作动器来等效模拟填充墙一阶平面外振型。2 台 250 kN 的液压作动器以 0.02 mm • s<sup>-1</sup>速度单向加载,在平面外位移达到 10 mm 前,每级增量 2.5 mm,此后,每级增量为 5.0 mm,直至墙体即将倒塌时, 停止加载。采用位移计和 DIC 相结合的量测方案,将位移计布置在墙体背面,DIC 测量设备放置在墙 体前方,并辅以蓝灯补光,减少周围光线对墙体表面的干扰。



# Fig. 5 Loading setup (units: mm)

#### 2.2 荷载位移曲线

试件的平面外荷载(Poop)-位移(Δoop)曲线,如图 6 所 为弹性阶段、承载力强化阶段和破坏阶段;在墙体开裂前, 平面外荷载迅速上升,平面外位移增长较缓;荷载和曲线基 本呈现线性关系,墙体可视为处于弹性阶段;当墙体最外层 砌体达到抗拉强度,填充墙达到开裂荷载,其平面外荷载约 为峰值荷载的 30%;由于双向拱机制不断增强,平面外荷 载不断上升,平面外荷载主要由 AAC 砌体抗压强度提供; 达到峰值荷载后,填充墙拱机制逐步失效,砌体大量压碎剥 落,导致填充墙平面外荷载迅速下降。试件最终破坏现象, 如图 7 所示。

对比文中试验(高厚比为 15.13)、文献[3](高厚比为 15.25)和文献[4](高厚比为 22.87)的试验曲线可知,平面 外峰值荷载和峰值变形能力随着高厚比的降低而显著提升

试件的平面外荷载(P<sub>OOP</sub>)-位移(Δ<sub>OOP</sub>)曲线,如图6所示。由图6可知:平面外荷载-位移曲线可分



图 6 试件的平面外荷载-位移曲线 Fig. 6 OOP load-displacement curves of specimens



(a) 文中实验





(平面外荷载提升大于 300%,峰值变形能力提升大于 130%);文中试件裂缝发展更加充分,呈现明显的 双向破坏特征;文献[3-4]的试件出现明显砌体局部破坏,中部阶梯型裂缝发展充分,试件极限变形能力 最大可达 64.50 mm。
40

30

20

10

0

墙体不同测量位置

0.5

1.0

 $\theta_{\rm OOP}$ /%

(a) 第2列位移计

AooP/mm

# 2.3 精度验证

墙体不同测量位置 DIC 和位移计测量结果的对比, 如图 8 所示。图 8 中: $\theta_{OOP}$ 为平面外位移角, $\theta_{OOP} = (2\Delta/$ h)×100%(h 为墙体高度)<sup>[14]</sup>;不同颜色的点表示不同 的测量位置。由图 8 可知:初始状态时,位移计导杆和 墙体表面法向量平行,DIC 与位移计测量结果较吻合: 随着墙体平面外变形的增大,位移计的导杆与墙体表面 法向量偏离,所测结果偏小;在加载中后期,两者偏离程 度越来越大,砌体的局部压溃使部分位移计和墙体脱开 造成结果突降,位移计的测量结果已丧失精度;在加载





图 8 墙体不同测量位置 DIC 和位移计测量结果的对比

Fig. 8 Comparison between DIC and displacement meter measurements results at different positions of wall 后期,即使墙体表面处的散斑随着砌体的压碎剥落,但 DIC 内置的虚拟位移计依然可以根据周围散斑 处位移值二阶插值得到剥落处的平面外位移,充分验证了 DIC 技术在侦测砌体结构试验中的优越性。

提高 DIC 精度主要有以下 3 种方法:1) 尽可能保证散斑场中灰度随机分布,且黑白区域各占 50%;2) 蓝光具有更强的抗干扰能力,采用 100 W 的 LED 蓝灯照射,为测量区域提供稳定且均匀的光 学环境;3)小平面尺寸越小、小平面间距越小且网格越细,则曲面成分精度越高,但计算时间更长。

# 2.4 填充墙应变场和裂缝宽度

DIC 的 Mises 应变场云图可以直观描述框架填充墙在平面外荷载作用下裂缝的形成和发展过程。 Mises 应变场,如图 9 所示。



Mises 应变场 图 9 Fig. 9 Mises strain field

DIC

位移计

2.0

1.5

4

mm/<sup>3</sup> <sup>3</sup> 2

1

0

0

0.5

1.0

 $\theta_{OOP} / \%$ 

15

2.0

为研究不同位置处裂缝的宏观规律,取每一部分裂 缝上足够多测点的平均值来反映该处裂缝宽度(平均 值,wave)随着平面外位移角的变化规律,如图 10 所示。 由图 10 及相关分析可知:在 θoop = 0.33%(峰值荷载的 30%)之前,墙体基本处于弹性阶段,墙体左上角和 1/3 中部高度处出现了细微的裂缝,此时,裂缝最大宽度为 0.23 mm,试件开裂荷载为 36.27 kN;当加载至 θoop = 0.50%(峰值荷载的 40%)时,墙体 1/3 和 2/3 宽度处出 现两条新的竖向裂缝,中部 2/3 高度处出现新的水平裂



图 10 填充墙裂缝宽度随着平面外位移角的变化规律

Fig. 10 Variation of crack width of infill walls with OOP drift

缝,裂缝轮廓基本展现;主斜裂缝最大宽度为 0.52 mm,水平裂缝宽度为 0.33 mm,竖向裂缝宽度为 0.28 mm;当加载至  $\theta_{OOP} = 0.66\%$ (峰值荷载的 53%)时,阶梯型斜裂缝宽度达到 0.83 mm,中间水平裂 缝宽度为 0.49 mm;随着加载进行,裂缝宽度不断加深,当加载至  $\theta_{OOP} = 1.00\%$ (峰值荷载的 74%)时,墙体中部出现新的水平斜裂缝,4条斜裂缝朝墙体 4 个角部不断延伸,并发展出次斜裂缝;当加载至  $\theta_{OOP} = 1.32\%$ 时(峰值荷载的 93%)右上角出现新的阶梯型斜裂缝,裂缝宽度达到 2.22 mm;当加载至  $\theta_{OOP} = 1.65\%$ 时,试件达到峰值荷载 127.73 kN,墙体左下角砌体压溃,左下主斜裂缝宽度达到 3.81 mm,框架填充墙平面外荷载迅速下降。

# 2.5 平面内/外(IP/OOP)位移场

墙体平面外的位移场是通过 ARAMIS SRX 后处理软件基于填充墙曲面成分计算获得。平面外位 移场,如图 11 所示。

由图 11 可知:在  $\theta_{OOP} = 0.33\%$ (峰值荷载的 30%)之前,墙体整体平面外位移较小(小于 3.75 mm),形态接近平面;当加载至  $\theta_{OOP} = 0.50\%$ (峰值荷载的 40%)时,平面外位移场出现更大的位移层



图 11 平面外位移场

Fig. 11 OOP displacement field

级,墙体中点位移达到 7.96 mm,离中点 500 mm 范围内的位移为 5.96~6.23 mm,墙体与框架交界处 的位移较小(0.42~2.98 mm),此时,墙体的 3D 变形面形态由近似平面逐渐转变成较小曲率的曲面; 当加载至 θ<sub>OOP</sub>=0.66%(峰值荷载的 53%)时,墙体平面外位移进一步增大,中点位移达到 10.56 mm, 离中点 500 mm 范围内的位移为 8.01~8.64 mm,但平面外 3D 变形面形态没有显著变化;当加载至 θ<sub>OOP</sub>=1.00%(峰值荷载的 74%)时,墙体中部位移进一步增加,曲面形态从微曲面过渡到二次曲面,墙 体中部位移为 11.84~13.44 mm,墙体与框架交界处位移为 2.08~4.78 mm;当加载至 θ<sub>OOP</sub>=1.32% (峰值荷载的 93%)时,墙体中部右下角观察到砌体的局部压碎,墙体 3D 变形面的不对称程度加剧,具 体表现为墙体上半部分位移(5.07~22.38 mm)更大,下半部分位移(2.08~22.62 mm)相对较小,这是 因为墙体顶梁和底梁平面外约束程度不同导致的,后续填充墙平面外的边界条件还需要进一步研究;当 加载至 θ<sub>OOP</sub>=1.65%时,试件达到峰值荷载,中心点位移为 28.81 mm,墙体左下方砌体压溃,墙体平面 外变形面从较为对称的正方形转变为平行四边形。总体而言,墙体平面外位移场表现出中心最大,从中 心到四周逐渐减小的变化规律,呈现"回"字形分布。

框架填充墙平面内(in-plane, IP)水平和竖直位移场,分别如图 12、13 所示。图 12、13 中:Δ<sub>IP,h</sub>、Δ<sub>IP,v</sub> 分别为平面内水平位移和平面内竖直位移。



图 12 平面内水平位移场 Fig. 12 IP horizontal displacement field



Fig. 13 IP vertical displacement field

由图 12、13 可知:主裂缝将墙体分成上下左右和中间区块;当加载至  $\theta_{OOP} = 0.33\%$ (峰值荷载的 30%)之前,填充墙左区块平面内水平位移略大于右区块,上区块平面内竖向位移略大于下区块,这是由于在加载初期墙体还没有完全受力,导致其位移场并不对称;当加载至  $\theta_{OOP} = 0.50\%$ (峰值荷载的 40%)时,墙体受力重新分布,墙体平面内水平和竖直位移场由先前的不对称转变为较为对称的分布规律;当加载至  $\theta_{OOP} = 0.66\%$ (峰值荷载的 53%)时,墙体平面内位移场分区基本明朗,各个区块位移值基本接近;当加载至  $\theta_{OOP} = 1.00\%$ (峰值荷载的 74%)时,墙体左侧区块位移为-1.06~-1.70 mm,右侧区块位移为 0.75~1.63 mm,上区块位移为 1.25~1.93 mm,下区块位移为-0.89~-1.15 mm;当加载至  $\theta_{OOP} = 1.65\%$ 后,墙体中部和左下角部观察到严重的局部破坏,墙体平面内水平位移场从先前的对称转变为不对称的分布规律,其竖直位移场基本保持对称。

# 3 结论

1)加载至峰值荷载的 30%之前,位移计导杆和墙面基本垂直,位移计和 DIC 测量结果较为接近。随着墙体平面外曲面形态的不断变化,位移计的导杆与墙体表面法向量不再完全平行。砌体的局部压 溃使部分位移计和墙体脱开,造成平面外位移突降,其测量结果与 DIC 相差较大。即使加载后期墙体 表面的散斑剥落,DIC 仍然能够根据周围位移值插值,得到剥落处位置的平面外位移值,充分证明了 DIC 技术在捕捉填充墙 3D 变形曲面上的优越性。

2) Mises 应变场表明,在峰值荷载的 30%之前,裂缝发展不明显,裂缝最大宽度为 0.23 mm;当加载至峰值荷载的 74%时,墙体中部水平裂缝、中部竖向裂缝和 4条阶梯型斜裂缝的轮廓基本形成,向角部延伸的斜裂缝发展出次斜裂缝;在峰值荷载阶段,左下角砌体压溃,裂缝的最大宽度达到 3.81 mm。

3) 平面外位移场表明,加载至峰值荷载的 30%之前,墙体平面外位移场形态接近平面;当加载至峰 值荷载的 40%,墙体中部位移场幅值为 5.96~6.23 mm,四周边界处位移为 0.42~2.98 mm,墙体平面 外曲面形态由近似平面转变成有一定曲率的曲面;当加载至峰值荷载的 74%时,墙体平面外曲面逐渐 过渡到二次曲面形态,位移场总体呈现"回"字形分布规律。

4)加载前期,填充墙平面内水平和竖直位移场并不对称。随着墙体受力重新分布,其平面内位移场由先前的不对称转变为较为对称的分布规律。由平面内/外位移场云图可知,上下左右区块围绕各自支点做近似刚体转动,形成典型的平面外双向拱抵抗机制。随着墙体进入破坏阶段,位移场从先前的对称转变为不对称的分布规律,其平面外双向拱机制逐渐消失。

# 参考文献:

[1] 郭子雄,吴毅彬,黄群贤. 砌体填充墙框架结构抗震性能研究现状与展望[J]. 地震工程与工程振动,2008,28(6):

155

172-177. DOI:10.13197/j. eeev. 2008.06.031.

- [2] 翟长海,王晓敏,孔璟常,等. 砌体填充墙 RC 框架结构抗震性能研究现状及展望[J]. 哈尔滨工业大学学报,2018,50 (6):1-13. DOI:10.11918/j. issn. 0367-6234. 201801073.
- [3] RICCI P, DI DOMENICO M, VERDERAME G M. Experimental assessment of the in-plane/out-of-plane interaction in unreinforced masonry infill walls[J]. Engineering Structures, 2018, 173: 960-978. DOI: 10. 1016/j. engstruct. 2018.07.033.
- [4] DE RISI M T, DI DOMENICO M, RICCI P, et al. Experimental investigation on the influence of the aspect ratio on the in-plane/out-of-plane interaction for masonry infills in RC frames[J]. Engineering Structures, 2019, 189: 523-540. DOI:10.1016/j. engstruct. 2019.03.111.
- [5] XIE Xinyao, GUO Zixiong, BASHA S H. Out-of-plane performance of lightweight AAC infills within RC frames using noncontact full-field strain measurement technique [J]. Journal of Structural Engineering, 2024, 150 (5): 4024043. DOI:10.1061/JSENDH. STENG-12626.
- [6] YAMAGUCHI I. Simplified laser-speckle strain gauge[J]. Optical Engineering, 1982, 21(3): 436-440. DOI: 10. 1117/12.7972927.
- [7] PETERS W H,RANSON W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis[J]. Optical Engineering, 1982,21(3):427-431. DOI:10.1117/12.7972925.
- [8] 刘聪,陈振宁,何小元.3D-DIC 在土木结构力学性能试验研究中的应用[J].东南大学学报(自然科学版),2014,44 (2):339-344.DOI:10.3969/j.issn.1001-0505.2014.02.020.
- [9] 廖健,章红梅,陈杨.基于数字图像相关法(DIC)的剪力墙破坏过程分析[J].结构工程师,2019,35(3):83-90.DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2019.03.012.
- [10] 赵宪忠,李秋云. 土木工程结构试验量测技术研究进展与现状[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2017,49 (1):48-55. DOI:10.15986/j.1006-7930.2017.01.008.
- [11] 刘宇飞,樊健生,聂建国,等.结构表面裂缝数字图像法识别研究综述与前景展望[J].土木工程学报,2021,54(6): 79-98. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2021.06.008.
- [12] 许力,郭子雄,郭亦宸,等. 低剪跨比闭口型压型钢板组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2023,44 (2):109-118. DOI:10.14006/j. jzjgxb. 2021.0467.
- [13] 熊二刚, 巩忠文, 于顺尧, 等. 新型预制节段拼装桥墩抗震性能及塑性铰区变形分析[J]. 土木工程学报, 2024, 57 (9): 68-83. DOI: 10. 15951/j. tmgcxb. 23050414.
- [14] XIE Xinyao, GUO Zixiong, BASHA S H. Out-of-plane behavior of clay brick masonry infills contained within RC frames using 3D-digital image correlation technique[J]. Construction and Building Materials, 2023, 376:131061. DOI:10.1016/j. conbuildmat. 2023.131061.
- [15] 杨子涵,舒江鹏,杨静滢,等.基于 DIC 技术的钢筋混凝土梁剪切裂缝自动提取与量化方法[J].工程力学,2024,41 (增刊1):187-196. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2023.05.S021.
- [16] GNIHOTRI P, SINGHAL V, RAI D C. Effect of in-plane damage on out-of-plane strength of unreinforced masonry walls[J]. Engineering Structures, 2013, 57:1-11. DOI: 10.1016/j. engstruct. 2013. 09.004.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)

DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 202411007



# SSCFBT 短柱局压性能数值分析与 承载力计算方法

姜航1,董思涵1,雷荣煌1,叶勇1.2,薛联金3

(1. 华侨大学 土木工程学院,福建 厦门 361021;
2. 华侨大学 福建省结构工程与防灾重点实验室,福建 厦门 361021;
3. 厦门普诚半导体科技有限公司,福建 厦门 361013)

**摘要:** 为解决海水海砂中氯离子腐蚀问题,选用合理的材料本构关系和有限元建模技术,建立在局压荷载作 用下双金属复合管海水海砂混凝土(SSCFBT)短柱的精细化有限元分析模型。首先,利用已有的试验数据验 证了模型的可靠性。然后,基于验证后的有限元模型,分析 SSCFBT 局压短柱在受力过程中的内力分配规律 和应力云图。最后,利用有限元模型开展参数分析,研究局压面积比、端板厚度、混凝土强度等参数对 SSCFBT局压短柱承载力的影响规律。结果表明:局压面积比和端板厚度是影响 SSCFBT 局压短柱承载力和 变形能力的关键因素。基于参数分析结果,提出适用于 SSCFBT 短柱的局压承载力简化计算公式。 关键词: 双金属复合管;海水海砂混凝土;局部受压;有限元分析;承载力 中图分类号: TU 398.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2025)02-0156-12

# Numerical Analysis of Local Compressive Performance of SSCFBT Stub Columns and Calculation Method for Load-Carrying Capacity

JIANG Hang<sup>1</sup>, DONG Sihan<sup>1</sup>, LEI Ronghuang<sup>1</sup>, YE Yong<sup>1,2</sup>, XUE Lianjin<sup>3</sup>

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

 Key Laboratory for Structural Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

3. Xiamen Pecton Semiconductor Technology Limited Company, Xiamen 361013, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of chloride ion corrosion in seawater and sea sand, a refined finite element analysis model of seawater and sea sand concrete filled bimetallic tube (SSCFBT) stub column under the local compressive load was established by reasonable material constitutive relationship and finite element modeling technology. The reliability of the model was validated using existing experimental data. Based on the verified finite element model, the internal force distribution and stress nephogram during the loading process of SSCFBT local compressive stub columns were analyzed. The parametric analysis was conducted using the finite element model to investigate the influence of parameters such as local compressive area ratio, end plate thick-

**收稿日期:** 2024-11-17

**通信作者:** 叶勇(1985-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事钢-混凝土组合结构的研究。E-mail:qzyeyong@hqu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52278182)

ness, concrete strength on the load-carrying capacity of SSCFBT local compressive stub columns. The results show that the local compressive area ratio and end plate thickness are the key factors affecting the load-carrying capacity and deformation capacity of SSCFBT local compressive stub columns. Based on the results of the parametric analysis, a simplified calculation formula for the local compressive load-carrying capacity of SSCFBT stub columns is proposed.

Keywords: bimetallic tube; seawater and sea sand concrete; local compression; finite element analysis; loadcarrying capacity

随着城市化进程的加速,建筑行业对混凝土材料的需求不断增加。作为传统混凝土的主要原材料 之一,河砂由于资源有限,正面临日益严重的供应短缺问题。河砂短缺不仅增加建筑成本,过度开采河 砂还将对生态环境造成负面影响。为解决这一资源紧缺问题,研究人员开始探索使用海水和海砂替代 传统混凝土中的淡水和河砂,提出海水海砂混凝土(SSC)材料。近年来,国内外学者对海水海砂混凝土 的性能进行了广泛研究,主要集中在材料力学性能、耐久性,以及与其他材料的结合应用等方面。Xiao 等<sup>[1]</sup>综述了使用海砂和海水在混凝土结构中的研究现状。Guo等<sup>[2]</sup>采用统计分析方法研究了由海砂和 海水制成的生态友好型混凝土的力学性能。已有研究表明,海水海砂混凝土的力学性能与普通混凝土 相近。然而,海水和海砂中的氯离子等腐蚀性物质对钢材的腐蚀作用限制了其在土木工程结构中的直 接应用。

目前,研究人员提出将具有良好耐腐蚀性能的纤维增强塑料(FRP)、不锈钢材料与 SSC 结合,尤其 是将 SSC 填入 FRP 管或不锈钢管,从而形成 FRP 管混凝土或不锈钢管混凝土组合结构。Li 等<sup>[3]</sup> 对 FRP 方管海水海砂混凝土组合构件的轴压性能和弯曲性能进行试验研究,发现 FRP 方管的使用可显 著提升试件的极限承载力。文献[4-5]研究了冷弯奥氏体不锈钢圆管填充 SSC 的力学行为和设计方 法。文献[6-8]则专注于 SSC 填充不锈钢管短柱的试验研究。为了有效防止氯离子对钢材的腐蚀,同 时利用 SSC 的优势,文献[9-10]提出双金属复合管混凝土(CFBT)构件,并通过试验研究 CFBT 短柱的 轴压性能,证实双金属复合管内外钢管能够共同受力变形,发挥良好的组合作用。结合压塑成型、紧密 结合的不锈钢(内)-碳素钢(外)双金属复合管与 SSC,形成双金属复合管海水海砂混凝土(SSCFBT)构 件<sup>[11]</sup>,可在发挥钢-混凝土组合结构构件良好力学性能的同时,实现对 SSC 材料的合理应用。该类结构 可适用于沿海建筑结构及海洋工程领域,如跨海大桥等。

在实际工程中,结构构件常处于局部受压状态。Yang 等<sup>[12-13]</sup>研究薄壁钢管混凝土在轴向局部受压 作用下的受力性能。Hou 等<sup>[14]</sup>采用试验和有限元分析相结合的方法,深入研究钢管混凝土在局部受力 作用下的力学性能。目前,关于 SSCFBT 构件在局压荷载作用下的力学性能研究仍较为少见。Miao 等<sup>[15]</sup>对 SSCFBT 短柱在轴向局部受压下的性能开展试验研究,对其破坏形态和承载力进行初步探索。 本文在前期试验研究<sup>[15]</sup>基础上,采用非线性有限元分析技术,进一步探索 SSCFBT 短柱在局部受压作 用下的受力机理,并开展系统参数分析,探索不同参数对构件局部受压承载力(简称局压承载力)的影响 规律(不考虑结构的耐久性对承载力的影响),提出适用于 SSCFBT 短柱的局压承载力简化计算公式。

# 1 有限元建模

# 1.1 模型的建立

SSCFBT 局压短柱,如图 1 所示。图 1 中: $t_{ss}$ 为 不锈钢钢管壁厚; $t_{cs}$ 为碳素钢管壁厚;D为短柱外 径。采用 ABAQUS 有限元分析程序对 SSCFBT 短 柱进行建模,与实际试验<sup>[15]</sup>中的试件保持一致,短柱 外径分别为 108、133、159 mm,其对应高度 h 分别为 324、399、477 mm。建模过程中,核心混凝土、局部 承压垫块、端板均采用 ABAQUS 有限元分析程序提 供的 8 节点线性 6 面体缩减积分实体单元(C3D8R)



https://hdxb.hqu.edu.cn/

进行模拟;不锈钢管和碳素钢管采用4节点缩减积分壳单元(S4R)进行模拟,并在壳单元厚度方向采用 9 个积分点的 Simpson 积分。

# 1.2 材料本构关系

1)核心混凝土。采用 ABAQUS 有限元分析程序提供的混凝土塑性损伤(CDP)模型模拟核心混凝土的力学行为。该模型基于各向同性塑性变形,适用于压缩和拉伸条件下的连续性分析,并已在单向加载试验中展示出良好的模拟效果<sup>[16]</sup>。采用 Han 等<sup>[17]</sup>提出的应力-应变关系模型模拟核心混凝土的受压行为。此外,采用开裂应力(σ<sub>10</sub>)与断裂能(G<sub>F</sub>)之间的关系描述核心混凝土在断裂过程中吸收的能量,基于破坏能量准则来表征核心混凝土的受拉软化行为<sup>[18]</sup>。核心混凝土强度取 50 MPa。

2) 碳素钢。在模拟碳素钢的行为时,采用 Han 等<sup>[17]</sup>提出的二次塑性流动应力-应变模型,该模型 可准确描述钢材的塑性变形特性。碳素钢屈服强度取 325.5 MPa,极限强度取 479 MPa,弹性模量取 280.6 MPa。

3)不锈钢。采用 Ramberg 等<sup>[19]</sup>提出的不锈钢本构关系模型,该模型描述不锈钢的应力-应变曲线 为一条平滑曲线,并将 σ<sub>0.2</sub>定义为屈服点。不锈钢屈服强度取 462.7 MPa,极限强度取 709.4 MPa,弹性 模量取 191.0 MPa。

# 1.3 界面接触模拟

在有限元分析中,接触界面上的切向和法向行为直接影响模型的收敛性和模拟精度<sup>[20]</sup>。文中模型的上、下端板与核心混凝土,以及局压垫块与上端板之间的法向接触设置为"硬接触"类型,允许接触界面压力自由传递,且在无压应力时允许分离。对于不锈钢管与核心混凝土,以及不锈钢管与碳素钢管之间的接触,法向同样采用"硬接触",切向则采用库伦摩擦模型,从而模拟接触面的弹性滑移。其中,碳素钢管与不锈钢管之间的摩擦系数设定为 0.8<sup>[21]</sup>,核心混凝土与不锈钢管之间的摩擦系数设定为 0.6<sup>[22]</sup>。鉴于钢管与端板通过焊接固定,故模型中将两者之间的接触定义为"Tie"类型。

# 1.4 边界条件与加载方案

对有限元模型施加相应的边界条件和加载方案,如图 2 所示。图 2 中:U 为位移;U1、U2、U3 分别 为 X 轴、Y 轴、Z 轴方向上的位移,即试验位移;UR1、UR2、UR3 分别为 X 轴、Y 轴、Z 轴方向上的转角。 模型的底部端板被设定为完全固定;模型的顶端(即局压垫块的上表面)仅允许沿 Z 轴方向的平移运 动,并对其他方向的位移和转动进行了约束。在 Z 轴方向上,通过位移控制的方式进行加载,以提高模 型的收敛性。

# 1.5 网格的划分

在有限元模型的网格划分过程中,采用为边布种的方式处理核心混凝土、碳素钢管层和不锈钢管层 之间的接触面,以提高接触面的贴合度和模拟的收敛性。网格划分示意图,如图3所示。



# 2 有限元结果分析

2.1 有限元模型的验证

2.1.1 破坏模式对比分析 有限元模型共构建 18 个 SSCFBT 局压短柱(试件编号规则以 SSCFBT-

159-6-1/3 为例,159 表示钢管外直径(mm),6 表示上端板厚度(mm),1/3 表示局压垫块面积与核心混 凝土截面面积的比值,即局压面积比)。典型试件的形态对比,如图 4 所示。

由图 4 可知:模拟得到的试件破坏模式与试验结果基本一致;试件上端出现明显的鼓曲现象;在局 压垫块的作用下,钢管混凝土在试件高度的 3/4 处达到最大变形;端板在局压作用下出现明显的翘曲。





(a) 带端板试件(SSCFBT-159-6-1/3)



# 图 4 典型试件的形态对比 Fig. 4 Comparison of typical specimen forms

2.1.2 荷载-位移关系对比 局压短柱荷载-位移(N-Δ)曲线对比,如图 5 所示。图 5 中:位移取模型加载点处位移,方向为 Z 轴负方向;相同钢管外径和相同上端板厚度的试件绘制于同一图中。

由图 5 可知:模拟曲线与试验曲线基本吻合,且模拟曲线的初始刚度普遍偏大,一方面是因为实际 试验过程中有一定虚位移存在,从而影响试验曲线初始斜率,另一方面是因为有限元模拟无法准确考虑 钢管残余应力,以及混凝土发生裂缝开展产生缝隙影响,从而提高了模拟曲线初始刚度和强化段承载 力。此外,由于模拟中未能复现端板发生冲切破坏,故荷载-位移曲线缺少试验中因端板被击穿而导致 的承载力下降阶段。对于未设置上端板的试件,模拟曲线与试验曲线的变化趋势基本一致。

试件局压极限承载力模拟值与试验值的对比,如表1所示。表1中:t<sub>a</sub>为上端板厚度;β为局压面积 比;N<sub>ul,FEA</sub>为试件局压极限承载力的模拟值;N<sub>ul,e</sub>为试件局压极限承载力的试验值。由表1可知:局压 极限承载力的模拟值与试验值较为相近,平均误差为5.83%,标准差为0.070。

综上可知,有限元建模方法合理,结果具有较强的参考性。



https://hdxb.hqu.edu.cn/



Fig. 5 Comparison of load-displacement curves of local compressive stub columns

表1 试件局压极限承载力模拟值与试验值的对比

Tab. 1 Comparison of simulation values and experimental values of

ultimate local compressive load-carrying capacity of specimens

试件编号	$t_{\rm cs}/{ m mm}$	$t_{\rm ss}/{ m mm}$	$t_{\rm a}/{ m mm}$	β	$N_{ m ul,FEA}/ m kN$	$N_{ m ul,e}/ m kN$	$N_{ m ul,FEA}/N_{ m ul,e}$
SSCFBT-159-6-1/4	5.0	0.5	0	3/4	1 684	1 666	1.011
SSCFBT-159-3-1/4	5.0	0.5	3	3/4	1 538	1 528	1.006
SSCFBT-159-0-1/4	5.0	0.5	6	3/4	1 396	1 455	0.959
SSCFBT-159-6-1/3	5.0	0.5	0	1/2	1 882	1 830	1.029
SSCFBT-159-3-1/3	5.0	0.5	3	1/2	1 801	1 735	1.038
SSCFBT-159-0-1/3	5.0	0.5	6	1/2	1 660	1 697	0.978
SSCFBT-133-6-1/3	6.0	0.8	0	1/2	1 432	1 498	0.956
SSCFBT-133-3-1/3	6.0	0.8	3	1/2	1 259	1 371	0.918
SSCFBT-133-0-1/3	6.0	0.8	6	1/2	1 133	1 241	0.913
SSCFBT-133-6-1/2	6.0	0.8	0	1/3	1 613	1 521	1.060
SSCFBT-133-3-1/2	6.0	0.8	3	1/3	1 497	1 483	1.009
SSCFBT-133-0-1/2	6.0	0.8	6	1/3	1 259	1 428	0.882
SSCFBT-108-6-1/2	6.5	0.5	0	1/3	1 197	1 092	1.097
SSCFBT-108-3-1/2	6.5	0.5	3	1/3	1 116	1 076	1.037
SSCFBT-108-0-1/2	6.5	0.5	6	1/3	889	1 017	0.873
SSCFBT-108-6-3/4	6.5	0.5	0	1/4	1 213	1 127	1.076
SSCFBT-108-3-3/4	6.5	0.5	3	1/4	1 179	1 099	1.073
SSCFBT-108-0-3/4	6.5	0.5	6	1/4	981	1 061	0.924

2.1.3 荷载-应变关系对比 局压短柱荷载-应变(N-ε)曲线对比,如图 6 所示。图 6 中:ε<sub>1</sub> 为纵向应 变;ε<sub>t</sub> 为环向应变;e1、e2 分别表示外层和内层的试验值;FEA1、FEA2 分别表示外层和内层的模拟值; 由于试验过程中应变片损坏,图 6(a)的应变数据 ε<sub>1,e1</sub>缺失。

由图 6 可知:模拟曲线与试验曲线的发展趋势基本一致,在加载初期,试件处于弹性阶段,荷载-应 变曲线呈线性上升;进入弹塑性阶段后,荷载的增长速度减缓,应变增长的速度加快;以试件 SSCFBT-



(a) SSCFBT-159-0-1/4(中部)

(b) SSCFBT-159-0-1/4(3/4 高度处)

(c) SSCFBT-159-0-1/4(顶部)

159-0-1/4 为例,外层碳素钢管与内层不锈钢的应变变化规律基本相同,表明两种材料在变形上具有协同作用,共同约束核心混凝土以维持试件的承载变形能力。





# 2.2 内力分布特征分析

选取试件 SSCFBT-159-0-1/3 和 SSCFBT-159-6-1/3 的有限元模拟结果,通过截面切割提取自由体的内力分量,绘制各部件的内力-位移(*F*-Δ)曲线,结果如图 7 所示。选取试件变形最显著部位的截面进行内力分析,揭示试件在局部受压状态下的内力分配情况。



图 7 典型试作

图 7 典型试件各部件的内力-位移曲线

Fig. 7 Internal force-displacement curves of each component of typical specimens

由图 7 可知:无论试件是否设置上端板,承载力的主要来源均为核心混凝土,其次为碳素钢管,不锈钢管的贡献相对较小,这是因为核心混凝土在双金属复合管的有效约束下呈现出较高的承载力,同时不锈钢管与碳素钢管的壁厚比值较小(*t*<sub>ss</sub>/*t*<sub>cs</sub> = 1/10),使不锈钢的承载力贡献相对较低,与材料本身强度无关。有限元分析结果进一步验证了在局压荷载作用下,由碳素钢和不锈钢组成的双金属复合管直接承受外荷载,并对核心混凝土起到有效约束作用,从而确保构件具有良好的承载能力。此外,图 7(b)中的上端板也分担了部分试件内力。

# 2.3 应力云图分析

选取试件 SSCFBT-159-0-1/3 为分析对象,对其各部件的应力分布进行提取与分析。试件 SSCF-BT-159-0-1/3 的应力分布,如图 8 所示。

1) 碳素钢管。由图 8(a)可知:加载初期,钢管顶部首先受到核心混凝土的挤压作用而发生形变;随着局压垫块对混凝土的持续挤压,试件在高度约 3/4 处的区域出现了应力集中,并伴随明显的鼓曲现象;此后,应力沿试件向下传递,并逐渐减小。

2)不锈钢管。由图 8(b)可知:不锈钢管的应力变化规律与碳素钢管相似,变形最初在钢管顶部发生,随后应力最大区域逐渐转移至试件 3/4 高度处;由于不锈钢管壁较薄且直接受到核心混凝土的挤压,其应力值整体上高于碳素钢管。

3)核心混凝土。由8(c)可知:由于双金属复合管的约束作用,核心混凝土在局压垫块作用区域周 边展现出较大的应力分布,而其他区域的应力相对较小;整体而言,核心混凝土在高度约3/4处的区域





# 3 承载力计算方法

# 3.1 参数分析

3.1.1 参数的选取 将节1.1的模型尺寸等比例放大,保持试件的高宽比和径厚比不变,依此设置基准参数:短柱外径 D=400 mm;试件高度 h=1200 mm;高宽比 h/D=3.0;不锈钢管壁厚  $t_{ss}=3 \text{ mm}$ ;碳素钢管壁厚  $t_{cs}=6 \text{ mm}$ ;不锈钢管与复合钢管壁厚比值  $\rho=t_{ss}/t_{total}=1/3$ ;截面含钢率  $\alpha=A_s/A_c=0.964$ ,  $A_s$ 为钢管横截面面积, $A_c$  混凝土横截面面积;不锈钢屈服强度  $\sigma_{0.2}=300 \text{ MPa}$ ;碳素钢屈服强度  $f_y=345 \text{ MPa}$ ;不锈钢弹性模量  $E_s=190 \text{ GPa}$ ;碳素钢弹性模量  $E_c=202 \text{ GPa}$ ;不锈钢硬化指数 n=5.4;混凝 土强度  $f_{cu}=50 \text{ MPa}$ 。

考察的参数包括局压面积比( $\beta = A_L/A_c$ ,  $A_L$ 为局压垫块面积, 取值范围为 1/6、1/3、1/2、2/3、5/6、 1)、端板厚度(取值范围为 0、3、6、9、12、15、18 mm)、混凝土强度(取值范围为 30、40、50、60、70、80、90 MPa)、碳素钢屈服强度(取值范围为 235、345、390、460、590 MPa)、不锈钢屈服强度(取值范围为 200、 300、400、500、600 MPa)、截面含钢率(取值范围为 0.047、0.096、0.150、0.200、0.249), 以及不锈钢管与 复合钢管壁厚比值(取值范围为 0、1/6、1/3、1/2、2/3、5/6、1)。逐一改变上述参数, 分析单一变量变化 对试件受力性能的影响, 并绘制相应的荷载-位移曲线, 以探究试件局压承载力的变化规律。

3.1.2 局压面积比的影响 在局压受力构件中,局压面积比是影响试件局压极限承载力(N<sub>ul</sub>)的关键因素。局压面积比对试件受力性能的影响,如图 9 所示。





Fig. 9 Influence of local pressure area ratio on the stress performance of specimens

由图 9(a)可知:随着局压面积比的增大,试件的初始刚度得到增强,荷载-位移曲线也随之上升,趋近于全截面受压状态。

由图 9(b)可知:当局压面积比分别为 1/6、1/3、1/2、2/3、5/6、1 时,对应的局压极限承载力分别为 8 226、9 316、9 899、10 100、10 248、10 311 kN,而相应的提升率则分别为 13.25%、20.34%、22.78%、

24.58%和25.35%。

综上可知,随着局压面积比的增加,试件的局压极限承载力也随之增大,但增幅逐渐减小,尤其在局 压面积比接近全截面受压(β=1)时,承载力的提升效果有限。

3.1.3 端板厚度的影响 端板厚度对试件受力性能的影响,如图 10 所示。

由图 10(a)可知:随着端板厚度的增加,试件的刚度略有提高,荷载-位移曲线的峰值也略有提升。

由图 10(b)可知:当端板的厚度分别为 0、3、6、9、12、15、18 mm 时,对应的局压极限承载力分别为 9 526、9 603、9 681、9 765、9 804、9 833、9 873 kN,而相应的提升率则分别为 0.82%、1.63%、2.51%、 2.92%、3.22%、3.64%。

综上可知,改变端板厚度对提升局压极限承载力的效果并不显著。



图 10 端板厚度对试件受力性能的影响

Fig. 10 Influence of end plate thickness on the stress performance of specimens

3.1.4 不锈钢管与复合钢管壁厚比值的影响 不锈钢管与复合钢管壁厚比值对试件受力性能的影响, 如图 11 所示。

由图 11(a)可知:随着不锈钢管与复合钢管壁厚比值的增加,SSCFBT 试件的局压承载能力逐渐增强,荷载-位移曲线呈现上升趋势,这是因为相较于碳素钢,不锈钢的强度更高,延性更好;当不锈钢管与 复合钢管壁厚比值增加后,双金属复合管对混凝土具有更强的约束效应,使试件后期强化阶段有所上 升,试件整体延性提高。

由图 11(b)可知:当不锈钢管与复合钢管壁厚比值分别为 0、1/6、1/3、1/2、2/3、5/6、1 时,对应的局 压极限承载力分别为 9 153、9 200、9 289、9 371、9 408、9 552、9 664 kN,相应的提升率则分别为 0.51%、 1.49%、2.38%、2.79%、4.36%、5.58%。



图 11 不锈钢管与复合钢管壁厚比值对试件受力性能的影响

Fig. 11 Iinfluence of wall thickness ratio of stainless steel pipes to

composite steel pipes on mechanical properties of specimens

3.1.5 截面含钢率的影响 通过改变复合钢管的厚度,进而改变构件的截面含钢率。截面含钢率对试 件受力性能的影响,如图 12 所示。

由图 12(a)可知:提升截面含钢率能显著提高构件的整体承载力和刚度,承载力后期上升能力也得 到显著提升,试件承载力下降段的下降幅度有所减缓。

由图 12(b)可知:当截面含钢率由 0.047 增加至 0.096、0.150、0.200、0.249 时,相应的 Nu分别为 7 035、9 871、11 796、13 490、14 980 kN,相应的提升率分别为 40.31%、67.68%、91.76%、112.94%。

综上可知,当截面含钢率提高时,试件的局压极限承载力和延性都得到显著提高,这是因为双金属 复合管厚度的增加提高了约束效应系数,使双金属复合管对核心混凝土的约束效应显著增强,试件的承 载能力随之提升。



(a) 荷载-位移曲线

图 12 截面含钢率对试件受力性能的影响

Fig. 12 Influence of cross-sectional steel content on mechanical properties of specimens

3.1.6 碳素钢屈服强度的影响 碳素钢屈服强度对试件受力性能的影响,如图 13 所示。

由图 13 可知:随着碳素钢屈服强度的增加,试件的局压极限承载力随之增加;当碳素钢屈服强度从 235 MPa 提升至 345、390、460、590 MPa 时,对应的局压极限承载力分别为 8 422、9 751、10 300、10 866 和 12 314 kN,相应的提升率分别为 15.78%、22.30%、29.02%、46.21%,因为提高碳素钢屈服强度不 仅增加了钢管的直接承载力,同时也增强钢管的约束效应,使核心混凝土的承载变形能力得到提升。



(a) 荷载-位移曲线

(b) 局压极限承载力

图 13 碳素钢屈服强度对试件受力性能的影响

Fig. 13 Influence of carbon steel yield strength on mechanical properties of specimens

3.1.7 不锈钢屈服强度的影响 不锈钢屈服强度对试件受力性能的影响,如图 14 所示。

由图 14 可知:随着不锈钢屈服强度的增加,试件的局压极限承载力也得到提高,不锈钢材屈服强度 从 200 MPa 分别提升至 300、400、500、600 MPa 时,构件的局压极限承载力分别为 9 075、9 685、10 317、 10 828、11 345 kN,相应的提升率分别为 6.72%、13.69%、19.32%、25.01%。

3.1.8 混凝土强度的影响 前文分析结果表明,在局压荷载作用下 SSCFBT 短柱中的混凝土是其承 载力的主要来源。混凝土强度对试件受力性能的影响,如图 15 所示。

由图 15(a)可知:随着混凝土强度等级的提高,试件的承载力得到显著提升。

由图 15(b)可知:当混凝土强度从 30 MPa 提高至 40、50、60、70、80、90 MPa 时,对应的局压极限承 载力分别为 8 257、9 027、9 715、10 271、11 306、11 683、12 466 kN,而相应的提升率则分别为 9.33%、 17.66%、24.39%、36.93%、41.49%、50.97%。值得一提的是,当混凝土强度达到 90 MPa时,试件的 承载力有快速下降的趋势,这是试件的约束效应系数过大导致的。

# 3.2 简化的计算公式

传统钢管混凝土构件在局压荷载作用下的极限承载力计算公式通常是在全截面局压承载力的基础







(a)荷载-位移曲线

(b) 局压极限承载力

图 15 混凝土强度对试件受力性能的影响

Fig. 15 Influence of concrete strength on mechanical properties of specimens

上乘以局压承载力影响系数<sup>[23]</sup>,以此为参考,提出 SSCFBT 短柱的局压极限承载力计算值(N<sub>ul,c</sub>)为

 $N_{\rm ul,c} = a N_{\rm u}$  .

式(1)中:N<sub>u</sub>为全截面受压构件的极限承载力,MPa;a为局压承载力影响系数。

参数分析结果表明,在现有全截面轴压承载力计算公式的基础上,局压承载力影响系数与局压面积 比、端板厚度及不锈钢管与复合钢管壁厚比值相关。

利用线性拟合方法,提出局压承载力影响系数 a 的计算公式,即

 $a=1.128 \ 4a_{1}a_{2}a_{3}+231.93, \qquad (2)$   $a_{1}=0.638 \ 8-0.392 \ 3\beta^{2}+0.662\beta, \qquad (3)$   $a_{2}=0.848 \ 1-0.001 \ 7t_{a}, \qquad (4)$   $a_{3}=0.859 \ 1+0.047 \ 6\rho_{a} \qquad (5)$ 

式(2)~(5)中: $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 分别表示与 $\beta$ 、 $t_a$ 、 $\rho$ 相关的系数。

通过上述公式,可以得到 SSCFBT 局压短柱 极限承载力的计算值,并与有限元分析模型的模 拟值进行对比,结果如图 16 所示。

计算过程中,式(1)中的 N<sub>u</sub>采用文献[10]中 关于双金属复合管混凝土轴压短柱的承载力计算 公式。局压极限承载力的对比分析,如表 2 所示。

由表 2 可知: N<sub>ul,FEA</sub> / N<sub>ul,c</sub>的平均值为 0.998,





标准差为 0.007,平均值接近 1,说明简化公式的计算结果与有限元分析结果高度吻合,而较小的标准差则进一步证明了计算结果的稳定性和一致性。因此,该简化公式可以作为一种有效的工具,用于工程实践中对 SSCFBT 局压短柱极限承载力的快速预测。

### https://hdxb.hqu.edu.cn/

(1)

### 表 2 局压极限承载力的对比分析

m 1 a	a :	1	1.	1 1			
Tab. 2	Comparative	analysis of	ultimate	local c	ompressive	load-carrying	capacity

试件参数	$N_{ m ul, FEA}/ m kN$	$N_{ m ul,c}/ m kN$	$N_{ m ul,FEA}/N_{ m ul,c}$
$\beta = 1/6$	8 345	8 226	1.015
$\beta = 1/3$	9 199	9 316	0.988
$\beta = 1/2$	9 812	9 899	0.991
$\beta = 2/3$	10 187	10 100	1.009
$\beta = 5/6$	10 321	10 248	1.007
$\beta = 1$	10 217	10 311	0.991
$t_{\rm a} = 0   {\rm mm}$	9 587	9 526	1.006
$t_{\rm a} = 3  {\rm mm}$	9 644	9 603	1.004
$t_{\rm a} = 6  {\rm mm}$	9 700	9 681	1.002
$t_{\rm a} = 9  {\rm mm}$	9 756	9 765	0.999
$t_{\rm a} = 12  \mathrm{mm}$	9 812	9 804	1.001
$t_{\rm a} = 15  \mathrm{mm}$	9 869	9 833	1.004
$t_{\rm a} = 18  {\rm mm}$	9 925	9 873	1.005
$\rho = 0$	9 103	9 153	0.990
$\rho = 1/6$	9 184	9 200	0.998
$\rho = 1/3$	9 266	9 289	0.998
$\rho = 1/2$	9 348	9 371	0.998
$\rho = 2/3$	9 430	9 408	1.002
ho=5/6	9 512	9 552	0.996
$\rho = 1$	9 594	9 664	0.993

# 4 结论

建立 SSCFBT 短柱在局压荷载作用下的精细化有限元分析模型,利用该模型进行了受力机理和影响参数分析。在研究的参数范围内,可得以下 4 个结论。

1) 建立的有限元分析模型可以较准确地模拟 SSCFBT 局压短柱在不同荷载作用下的破坏形态和 受力性能,进而为其设计提供理论依据。

2)无论试件是否设置上端板,SSCFBT局压短柱的承载力主要来源于核心混凝土,核心混凝土的 强度和变形特性对结构的整体承载力起到决定性作用。

3) 局压面积比和端板厚度是影响 SSCFBT 局压短柱承载力和变形能力的关键因素。合理设计局 压面积比和端板厚度至关重要,以达到最佳的承载能力和变形控制效果。

4) 提出的 SSCFBT 局压短柱极限承载力简化计算公式具有较高的预测精度,该公式能够较为准确 地预测短柱在实际工况下的极限承载力,具有较好的工程应用价值。

# 参考文献:

- [1] XIAO Jianzhuang, QIANG Chengbing, NANNI A, et al. Use of sea-sand and seawater in concrete construction: Current status and future opportunities[J]. Construction and Building Materials, 2017, 155:1101-1111. DOI: 10.1016/j. conbuildmat. 2017. 08. 130.
- [2] GUO Menghuan, HU Biao, XING Feng, et al. Characterization of the mechanical properties of eco-friendly concrete made with untreated sea sand and seawater based on statistical analysis [J]. Construction and Building Materials. 2020, 234:117339. DOI:10.1016/j. conbuildmat. 2019.117339.
- [3] LI Y L,ZHAO X L,SINGH R K R. Mechanical properties of seawater and sea sand concrete-filled FRP tubes in artificial seawater[J]. Construction and Building Materials, 2018, 191:977-993. DOI:10.1016/j. conbuildmat. 2018.10. 059.
- [4] HE An, ZHAO Ou. Experimental and numerical investigations of concrete-filled stainless steel tube stub columns under axial partial compression[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 158: 405-416. DOI:10.1016/j.jc-

sr. 2019.04.002.

- [5] CAI Yancheng, KWAN A K H. Behaviour and design of cold-formed austenitic stainless steel circular tubes infilled with seawater sea-sand concrete[J]. Engineering Structures, 2021, 241: 112435. DOI: 10. 1016/j. engstruct. 2021. 112435.
- [6] LIAO Feiyu, HOU Chao, ZHANG Weijie, et al. Experimental investigation on sea sand concrete-filled stainless steel tubular stub columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 155:46-61. DOI: 10.1016/j. jcsr. 2018. 12. 009.
- [7] HOU Chao, HAN Linhai, ZHAO Xiaoling. Concrete-filled circular steel tubes subjected to local bearing force: Experiments[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 83, 90-104. DOI: 10.1016/j.jcsr. 2013. 01.008.
- [8] LI Y L,ZHAO X L,SINGH R K R,et al. Experimental study on seawater and sea sand concrete filled GFRP and stainless steel tubular stub columns[J]. Thin-Walled Structures, 2016, 106: 390-406. DOI: 10. 1016/j. tws. 2016. 05. 014.
- [9] YE Yong, HAN Linhai, SHEEHAN T, *et al.* Concrete-filled bimetallic tubes under axial compression: Experimental investigation[J]. Thin-Walled Structures, 2016, 108: 321-332. DOI:10.1016/j. tws. 2016.09.004.
- [10] YE Yong, HAN Linhai, GUO Zixiong. Concrete-filled bimetallic tubes (CFBT) under axial compression: Analytical behaviour[J]. Thin-Walled Structures, 2017, 119:839-850. DOI:10.1016/j. tws. 2017.08.007.
- [11] 叶勇,汤钜荣,陈业伟,等.双金属复合管海水海砂混凝土短柱的轴压性能与承载力分析[J].华侨大学学报(自然 科学版),2024,45(2):210-218. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202312016.
- [12] YANG Youfu, HAN Linhai. Concrete filled steel tube (CFST) columns subjected to concentrically partial compression[J]. Thin-Walled Structures, 2012, 50(1):147-156. DOI:10.1016/j. tws. 2011.09.007.
- [13] YANG Youfu, HAN Linhai. Behaviour of concrete filled steel tubular (CFST) stub columns under eccentric partial compression[J]. Thin-Walled Structures, 2011, 49(2): 379-395. DOI: 10.1016/j. tws. 2010. 09. 024.
- [14] HOU Chao, HAN Linhai, ZHAO Xiaoling. Concrete-filled circular steel tubes subjected to local bearing force: Finite element analysis[J]. Thin-Walled Structures, 2014, 77:109-119. DOI:10.1016/j.tws. 2013.12.006.
- [15] MIAO Wei, YE Yong, LEI Ronghuang, et al. Performance of seawater sea sand concrete-filled bimetallic tube (SS-CFBT) stub columns under axial partial compression [J]. Structures, 2024, 60; 105812. DOI: 10. 1016/j. istruc. 2023. 105812.
- [16] HIBBITT S K. ABAQUS/standard user subroutines reference manual[M]. Providence:[s. n. ],1998.
- [17] HAN Linhai, YAO Guohuang, TAO Zhong. Performance of concrete-filled thin-walled steel tubes under pure torsion[J]. Thin-Walled Structures, 2007, 45(1):24-36. DOI:10.1016/j. tws. 2007.01.008.
- [18] LI Wei, HAN Linhai, CHAN T M. Numerical investigation on the performance of concrete-filled double-skin steel tubular members under tension[J]. Thin-Walled Structures, 2014, 79:108-118. DOI:10.1016/j. tws. 2014. 02. 001.
- [19] RAMBERG W,OSGOOD W R. Description of stress-strain curves by three parameters[R]. Washington D C: NA-CA Technical Note,1943.
- [20] ELCHALAKANI M, PATEL V I, KARRECH A, *et al*. Finite element simulation of circular short CFDST columns under axial compression[J]. Structures, 2019, 20:607-619. DOI:10.1016/j. istruc. 2019.06.004.
- [21] CONTENTS T O F, PRACTICES D, FITS T F O R, *et al*. Machinery's handbook 28th editio[M]. New York: Industrial Press, 2008.
- [22] BALTAY P,GJELSVIK A. Coefficient of friction for steel on concrete at high normal stress [J]. Journal of Material in Civil Engineering, 1990, 2(1): 46-49.
- [23] 韩林海.钢管混凝土结构:理论与实践[M].4版.北京:科学出版社,2024.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202411004

# 低收缩砂岩洞渣水稳材料的 制备及性能分析



谭波1,2,林奕安1,2,张磊3,黎官福1,2,邹可轩1,2,陈平1,2

(1. 桂林理工大学 土木工程学院,广西 桂林 541004;
2. 桂林理工大学 广西绿色建材与建筑工业化重点实验室,广西 桂林 541004;
3. 中交路桥南方工程有限公司,北京 101100)

**摘要:** 针对砂岩洞渣水稳材料强度偏低、收缩量大的问题,通过逐级填充法结合 *i* 法设计级配和掺入粉煤灰 来制备低收缩水稳材料,并通过开展力学试验、干缩试验和干湿循环收缩试验研究其性能规律。试验结果表 明:当粗、细集料质量比为 65:35 时,混合料具有较强的力学性能;掺入粉煤灰的混合料早期强度偏低,后期 强度会提高,龄期 60 d 时,其力学性能明显优于试件 S1 的混合料,最佳粉煤灰掺量(质量分数)为 9%,掺量为 9%的粉煤灰比未掺粉煤灰混合料的干缩应变降低了 41%,干缩系数降低了 48%;试件在经历干湿循环后,当 次干湿循环的收缩应变都大于 0次干湿循环时的收缩应变,掺入粉煤灰可以降低干湿循环作用的影响。 关键词: 级配设计;水稳材料;粉煤灰;力学性能;收缩性能 中图分类号: U 414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2025)02-0168-08

# Preparation and Performance Analysis of Low-Shrinkage Sandstone Cave Slag Water-Stabilized Materials

TAN Bo<sup>1,2</sup>, LIN Yian<sup>1,2</sup>, ZHANG Lei<sup>3</sup>, LI Guanfu<sup>1,2</sup>, ZOU Kexuan<sup>1,2</sup>, CHEN Ping<sup>1,2</sup>

School of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;
 Guangxi Key Laboratory of Green Building Materials and Construction Industrialization,

Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;

3. Road and Bridge South Engineering Limited Company, Beijing 101100, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of lower strength and high shrinkage of sandstone cave slag waterstabilized materials, the low-shrinkage water-stabilized materials were prepared by step-by-step filling method, combining with the *i*-method designing gradation and mixing fly ash, and the performance were investigated by mechanical tests, dry-shrinkage tests, and dry-wet cycle shrinkage tests. The results of the experiment show that, when the mass ratio of coarse aggregates to fine aggregates is 65 : 35, the mixture has stronger mechanical performance. The early strength of the mixture mixed with fly ash is lower, the late strength increases. The mixture performance is significantly better than those of the piece S1 at age 60 d, the optimal mixing amount of fly ash (mass fraction) is 9%. Comparing to mixture with no fly ash, 9% fly ash decreases the dry

**收稿日期:** 2024-11-08

通信作者: 谭波(1977-),男,教授,博士,主要从事路基路面工程及新型建筑材料的研究。E-mail:bbsz2004@163. com。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(52062009)

shrinkage strain by 41%, and the dry shrinkage coefficient by 48%. After dry-wet cycle, the shrinkage strain of second dry-wet cycle is greater than the shrinkage strain without dry-wet cycle, and the mixing fly ash reduces the dry-wet cycle effects.

Keywords: gradation design; water-stabilized material; fly ash; mechanical performance; shrinkage perform-

随着高速公路的快速发展,石材短缺的矛盾日益突出,隧道洞渣的有效利用是解决石材短缺的途径 之一。然而,砂岩洞渣偏酸性,制备的水稳材料强度低且收缩量大,易造成早期开裂。经济合理地制备 砂岩洞渣和改善其力学性能、收缩性能是高速公路建设中亟待解决的技术难题之一。

针对砂岩洞渣制备水稳材料的文献相对较少,沈正伟等<sup>[1]</sup>采用联产生产工艺对石英砂岩洞渣进行 加工,并成功将其应用到宜长高速公路的基层和底基层中。杨虎陈等<sup>[2]</sup>研究发现,适当增加水泥剂量和 延长养护龄期等方式可以使砂岩水稳材料获得同等的承载力。涂圣武等<sup>[3]</sup>按围岩等级将砂岩洞渣分类 进行加工生产路基填料、混凝土和水稳集料。隧道洞渣的多数文献是研究集料的生产工艺或与其他材 料混合利用<sup>[48]</sup>,而针对洞渣材料级配设计的方向较少。刘树堂等<sup>[9]</sup>通过建立矿料间隙率的物理模型, 以混合料的密度或间隙率作为判断骨架密实性的简便指标。张丰焰等<sup>[10]</sup>利用响应曲面法建立模型来 确定各原料的最佳取值范围。冯德成等<sup>[11]</sup>根据体积法,以混合料的空隙率作为指标来控制密实度。文 献[12-14]通过粒子干涉理论与最大密度曲线理论结合,设计的混合料为骨架密实型结构,力学性能优 于规范推荐的级配。

此外,一些学者通过掺入其他材料来改善水稳材料的收缩性能。郭寅川等<sup>115</sup>发现掺入玻璃纤维能 增强碎石混合料的韧性,显著提高其抵抗开裂的能力。胡勇勇等<sup>116</sup>研究胶粉纤维复合改善水泥稳定碎 石的收缩性能和力学性能,发现掺入胶粉纤维复合改性可以减小干缩应变,并且能保持足够的强度。乔 建刚等<sup>117</sup>将高吸水树脂(SAP)掺入水稳材料中,SAP的掺入能大幅抑制混合料的收缩应变。徐鸥明 等<sup>118</sup>通过掺入粉煤灰与粒化高炉矿渣,可以很好改善水泥稳定碎石的收缩性能。关于制备水稳材料的 性能研究有很多学者进行了探讨,但利用砂岩洞渣制备水稳材料的研究较少,并且在施工现场上发现, 水稳层除早期发生开裂之外,在未覆盖养护的情况下,中长期也会产生开裂,对于这现象的发生缺乏合 理解释。基于此,本文对低收缩砂岩洞渣水稳材料的制备及性能进行研究。

# 1 试验原材料

# 1.1 集料

集料选用那平高速公路三分部隧道开挖出来的砂岩洞渣材料,经生产加工的4档工程粒径分别为: 31.50~19.00、19.00~9.50、9.50~4.75、4.75~0 mm,以4.75 mm的筛孔区分,细集料的粒径小于等 于4.75 mm,粗集料的粒径大于4.75 mm。砂岩洞渣集料性能指标,如表1所示。表1中:D、 $\rho_a$ 、 $\rho_b$ 、 $\eta$ 、  $w_e$ 、 $w_a$ 、 $\alpha$ 、 $I_p$ 和 $S_E$ 分别为集料粒径、表观密度、毛体积密度、吸水率、针片状质量分数、软石质量分数、压 碎值、塑性指数及砂当量。由表1可知:粗集料的密度较高,针片状质量分数、软石质量分数较低,是一 种良好的级配碎石集料;细集料的砂当量较弱,其他测定的数据均满足技术指标。

$D/\mathrm{mm}$	$ ho_{ m a}/{ m g}$ • cm $^{-3}$	$ ho_{ m b}/{ m g}$ • cm $^{-3}$	$\eta/\%$	$w_{ m e}/\%$	$w_{\rm a}/ \frac{0}{10}$	$\alpha/\frac{0}{0}$	$I_{ m p}$	$S_{ m E}/\%$
31.50~19.00	2.719	2.682	0.40	5.2	0.6	8.3	—	_
19.00~9.50	2.724	2.718	0.59	13.9	1.6	12.6	—	_
9.50~4.75	2.717	2.645	1.01	16.1	1.9	—	—	_
4.75~0	2.729	2.703	1.98	—	—	—	4.4	56

表1 砂岩洞渣集料性能指标

Tab. 1 Performance indexes of sandstone cave slag aggregate

# 1.2 水泥

试验所用水泥为广西省白色市登高(集团)田东水泥有限公司生产的 P•C42.5 型水泥。水泥主要 性能指标,如表2所示。表2中:t、f<sub>c</sub>、f<sub>s</sub>、R<sub>45 µm</sub>和 w<sub>p</sub>分别为水泥凝结时间、抗压强度、抗折强度、细度 及标准稠度用水量。 水泥主要性能指标

2025 年

			Tab. 2	Main p	erformanc	e indexes (	of cement	
会粉	t/1	min	$f_{\rm c}/l$	MPa	$f_{\rm s}/1$	MPa	$\mathbf{p}$ / 0/	za / 0/
<b>多</b> 奴	初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d	$\mathbf{K}_{45\ \mu\mathrm{m}}$ / $\neq$ 0	$\omega_{\rm p}$ / / 0
指标要求	$\geqslant 45$	≪600	≥15.0	≥42.5	≥3.5	≥6.5	≪30%	≪30
检测结果	355	445	34.2	47.7	5.4	7.8	12.3	26

表 2

# 1.3 粉煤灰

粉煤灰采用一级粉煤灰,其细度为13%,烧失量为3.1%,比表面积为415 m<sup>2</sup> • kg<sup>-1</sup>,密度为2.55 g•cm<sup>-3</sup>,堆积密度为1.12g•cm<sup>-3</sup>,满足规范要求。粉煤灰的主要化学成分质量分数如下:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>为 23.000%;SiO2 为 43.000%;Fe2O3 为 2.500%;SO3 为 0.800%;CaO 为 5.600%;MgO 为 0.950%;氯 离子为0.015%;铁为0.850%;游离氯化钙为0.800%。

#### 低收缩水稳材料的制备 2

# 2.1 级配设计

逐级填充法是将粗集料以一定的比例进行两级填充,以填充为基础,嵌挤为原则。将工程实际用的 粗集料划分成 3 档粗集料:D1(粒径为 19.00~31.50 mm),D2(粒径为 9.50~19.00 mm)和 D3(4.75~ 9.50 mm)。i(通过率递减系数)法是通过无侧限抗压强度试验与加州承载比(CBR)试验确定最佳 i,从 而设计出细集料级配。将粗、细集料级配进行合成,拟定粗集料质量分数从55%递增,每次增加5%,设 计5组混合料级配,通过力学性能试验确定较优的骨架密实型级配。

1) 粗集料设计。以一定质量的 D1 为参照,根据内掺法,D2 的的填充用量按 5%D1 的质量逐次递 增,进行 [ 级填充;在 [ 级填充试验的结果上,将确定的 D1 与 D2 质量比作为参照,D3 的填充用量按 5%的 m(D1): m(D2)的质量逐次递增,进行 [[级填充。逐级填充振实试验,如图1所示。图1中:ρ, 为振实密度。



图 1 逐级填充振实试验



由图 1 可知:随着 D2 填充用量的增加,混合料的振实密度先增大后减小,m(D1):m(D2)为 60: 40 时, I 级振实密度最佳;随着 D3 填充用量的增加, m(D1): m(D2)分别为 65: 35, 60: 40, 55: 45 曲 线的振实密度呈先增大后减小的趋势,以 m(D1):m(D2)=60:40 为参照进行 Ⅱ级填充,振实密度优 于相邻比例的振实密度,即3档粗集料的质量比为60:40:30时,混合料的振实密度最大,粗集料间的 嵌挤作用最好。通过振实试验结果,筛孔粒径为 31.50,19.00,9.50,4.75 mm 的通过率分别为 100%, 46%,23%,0.

2) 细集料设计。细集料在混合料中起到填充空隙的作用,从而影响水泥稳定碎石试件成型后的强 度和收缩性能。采用 i 法对细集料进行级配设计, i 为 0.58~0.68(按 0.02 为间隔), i 的计算公式为

$$P_{K} = P_{0} \times i^{k}, \qquad (1)$$

$$K = 3 \quad 32 \times \ln \frac{D}{2} \qquad (2)$$

$$K=3.32 \times \lg \frac{D}{d} \,. \tag{2}$$

式(1)~(2)中: $P_{\kappa}$ 为筛孔的通过率,K为系数; $P_0$ 为最大粒径的通过率;k为级数;d为粒径;D为最大的粒径。

*i*法计算细集料通过率,如表3所示。表3中:*l*为塞孔粒径。

表 3 *i* 法计算细集料通过率

Tab. 3 Calculation of fine aggregate passage rate by *i* method

;				$P_{\scriptscriptstyle K}$ / $\%$			
1	<i>l</i> =4.75 mm	<i>l</i> =2.36 mm	<i>l</i> =1.18 mm	l = 0.60  mm	<i>l</i> =0.30 mm	<i>l</i> =0.15 mm	<i>l</i> =0.08 mm
0.58	100	57.7	33.5	19.7	11.4	6.6	3.8
0.60	100	59.7	35.9	21.8	13.1	7.8	4.7
0.62	100	61.7	38.3	24.0	14.9	9.2	5.7
0.64	100	63.8	40.8	26.4	16.9	10.8	6.9
0.66	100	65.8	43.4	29.0	19.1	12.6	8.3
0.68	100	67.8	46.1	31.6	21.5	14.6	9.9

为更好地成型,水泥的掺量(质量分数)为5%,在不同*i*级配的最大干密度和最佳含水率(水的质量 分数)下,进行7d无侧限抗压强度和CBR试验结果,如图2,3所示。图3中: $R_{c}$ 为无侧限抗压强度;  $\eta_{CB}$ 为加州承载比。



Fig. 2 7-day unconfined compressive strength of cement



由图 2 可知:无侧限抗压强度随着 *i* 递增先增大后减小,当 *i* 为 0.64 时,该细集料级配的抗压强度 最高;*i* 大于 0.64 时,其强度呈现下降趋势,说明 *i* 为 0.64 对应的细集料级配具有较好的粘结力,与粗 集料混合后,可以形成最优的骨架密实型结构。

由图 3 可知: $\eta_{CB}$ 随着 *i* 的递增先增大后减小,当 *i* 为 0.64 时, $\eta_{CB}$ 出现峰值;*i* 继续增大时, $\eta_{CB}$ 呈下降 趋势,说明 *i* 为 0.64 对应的细集料级配有较强的抵抗荷载变形能力,其与粗集料混合形成的结构具有 较强的稳定性。因此,细集料级配取 *i* 为 0.64 时所对应的级配。细集料的筛孔粒径为 4.75、2.36、 1.18、0.60、0.30、0.15、0.08 mm 的通过率分别为 100.0%、63.8%、40.8%、26.4%、16.9%、10.8% 和 6.9%。

3)粗、细集料级配设计合成。根据粗、细集料设计的结果,对粗、细集料的级配进行合成,拟定混合料中的粗集料质量从 55%开始递增,每次增加 5%,设计 5 组混合料级配。合成级配,如表 4 所示。

表 4

				1 ab. 4 Sy	infinetic gra	dation of h	liixture				
6					τ	$v_{\rm m}/\gamma_0$					
级配	l =	l =	l =	l =	l =	l =	l =	l =	l =	l =	
	31.50 mm	19.00 mm	9.50 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.60 mm	0.30 mm	0.15 mm	0.08 mm	
А	100	70.3	57.7	45.0	28.7	18.4	11.9	7.6	4.9	3.1	
В	100	67.6	53.8	40.0	25.5	16.3	10.6	6.8	4.3	2.8	
С	100	64.9	50.0	35.0	22.3	14.3	9.2	5.9	3.8	2.4	
D	100	62.2	46.1	30.0	19.1	12.2	7.9	5.1	3.2	2.1	
F	100	59 5	42 3	25 0	16 0	10.2	6 6	4 2	27	17	

# Γab. 4 Synthetic gradation of mixture

混合料的合成级配

表 4 中:A、B、C、D、E 为 5 组级配,级配分别为 55:45,60:40,65:35,70:30,75:25;w<sub>m</sub> 为混合 料通过筛孔的质量分数。

在水泥掺量为4%下,测定水稳材料的7d无侧限抗压强度和7d劈裂强度(R<sub>i</sub>),力学试验结果如 图4所示。由图4可知:根据逐级填充法结合*i*法设计级配,5组级配的强度呈先增大后减小的趋势,级 配C的水稳材料间的嵌挤效果最佳,细集料能充分填充骨架结构的空隙,组成最优的骨架密实型结构。 根据强度试验结果和试件成型密实的情况,最终确定级配C为掺入粉煤灰的水稳材料的级配。



图 4 水泥掺量为 4%的水稳材料力学试验

Fig. 4 Mechanical test of water stable material with 4% cement content

# 2.2 粉煤灰掺量的设计

粉煤灰掺量分别取 0%、3%、6%、9%、12%、15%、18%,水泥掺量为 4%,对 7组试件(水稳材料)进 行丙法击实试验。试件的最大干密度和最佳含水率,如表 5 所示。表 5 中:w(CD)、w(FAD)、ρ<sub>d</sub>、w<sub>b</sub> 分 别为水泥掺量,粉煤灰掺量、最大干密度和最佳含水率;S1~S7为不同试件。

试件	$w(CD)/\frac{0}{0}$	$w(FAD)/\frac{0}{0}$	$ ho_{ m d}/$	$w_{ m b}/\sqrt[9]{0}$
S1	4	0	2.370	5.1
S2	4	3	2.361	5.3
S3	4	6	2.329	5.7
S4	4	9	2.307	6.1
<b>S</b> 5	4	12	2.265	6.9
S6	4	15	2.237	7.5
S7	4	18	2.202	8.2

	表 5	试件的量	最大干密度	和最佳含力	と 率		
Tab. 5	Maximum dry	density a	and optimu	m moisture	content	of	specimen

# 2.3 粉煤灰最佳掺量的确定

1) 无侧限抗压强度。水稳材料在4%水泥掺量下,不同养护龄期的无侧限抗压强度变化,如图5所示。由图5可知:养护龄期为3d时,试件S6,S7的抗压强度是试件S1的71%和60%,说明粉煤灰掺量越多,早期的无侧限抗压强度会越小;随着养护龄期的增加,有无粉煤灰掺入的水稳材料,其抗压强度的差距越来越小;当养护龄期为60d时,抗压强度呈现先增大后减小的趋势,试件S4的抗压强度达到峰值,其抗压强度是试件S1的106%。

2) 劈裂强度。间接抗拉强度又称劈裂强度,能够侧面反映水泥稳定碎石混合料的抵抗开裂破坏能力,水稳材料在水泥掺量为4%下,不同养护龄期的劈裂强度变化,如图6所示。

由图 6 可得:早期的劈裂强度随着粉煤灰掺量的增加而减小;养护龄期 3 d 时,试件 S4 的劈裂强度 是试件 S1 的 68%,14 d 龄期时,试件 S4 的劈裂强度是试件 S1 的 82%,当养护龄期为 60 d 时,劈裂强 度随着粉煤灰掺量的增加呈现先增大后减小的趋势,试件 S4 的劈裂强度为峰值,其劈裂强度是试件 S1 的 114%,后期掺有粉煤灰水稳材料的劈裂强度提升较为明显。

3)最佳掺量的确定及原因。粉煤灰在水稳材料中起到两个方面的作用:一是填充;二是火山灰反应<sup>[19-20]</sup>。掺入的粉煤灰由于粒径较细会填充到水泥颗粒之间的空隙中,同时粉煤灰表面具有一定的活性,能够吸附水泥颗粒表面的离子和水分子,这一定程度上阻碍水泥与水的接触,从而延缓水泥的水化



速度。水化产物中的氢氧化钙等碱性物质能激发粉煤灰的活性,逐渐发生火山灰反应,不过这一反应速 度相对缓慢。龄期越长,火山灰反应越充分,但因为水泥剂量有限,当粉煤灰超过一定质量分数时,多余 的粉煤灰只起到填充作用。所以,早期的强度主要是依靠水泥的水化反应,后期时粉煤灰的活性发挥作 用,产生更多地凝胶填充混合料间的空隙,水稳材料的强度也随之提高,最佳粉煤灰掺量为9%。

# 3 收缩性能试验

# 3.1 干缩试验

7 d标准养护完成后,将梁式体试件表面的自由水擦净,放在底部放置有玻璃棒的收缩仪上,试件 两侧固定玻璃片,千分表通过收缩仪两侧连接与玻璃片接触并固定。每隔 24 h 测一次试件的收缩量、 失水量,7 d 后,每隔 48 h 测一次,观测周期 29 d,试验结束后,根据试件的收缩量和失水量计算其干缩 应变和干缩系数。不同粉煤灰掺量下水泥稳定洞渣碎石的干燥收缩规律,如图 7 所示。图 7 中:δ;为干 缩量;w;为失水率;ε;为干缩应变;α;为干缩系数。





由图 7 可知:水稳材料的累计干缩量和累计干缩应变随着时间的增加而增大,7 d 前增长速率是最快的,其中,试件 S4 的累计干缩量和累计干缩应变较低,试件 S5 累计干缩量、累计干缩应变明显大于试件 S1 的水稳材料;粉煤灰掺入的量越多,水稳材料的累计失水率越大。根据击实试验结果可以看出:粉煤灰掺量越多,水稳材料的最佳含水率越高,且早期的水分蒸发大部分来自于混合料内部的自由水,所以含水率高的试件,失水率也会相应偏大;相比试件 S1 的水稳材料,掺有粉煤灰的总干缩系数会更低。

由此可知,通过掺入粉煤灰可以改善水稳材料的干燥收缩影响,同时也存在着一个最优掺量,从干 缩量、干缩应变及干缩系数来看,粉煤灰掺量为6%~9%的效果最好,当掺量为9%时,抵抗干缩能力最 佳。早期时,粉煤灰在水稳材料中只起到填充作用,其有利于提高水稳材料的密实性,减小骨架结构的 孔隙率,同时还减缓了水化反应的时间,使毛细水迁移的速率变慢;当粉煤灰掺入的量过多时,粉煤灰的 比表面积较大,吸附水较多,后期的水分蒸发较强,因此,水稳材料的干缩相对增大<sup>[21]</sup>。

# 3.2 干湿循环收缩试验

在施工过程中,7 d内没有发现裂缝扩产,但是 14~20 d 时突然 出现开裂的现象,因此,水稳材料在经历干湿循环时,可能会出现较 大的收缩导致开裂,所以室内采用干湿循环收缩试验进行模拟来探 索规律。

试验方法如下:1)将脱模出的试件放置水中浸泡 24 h;2)擦拭 浸泡试件表面的自由水,将试件置于温度为 90 ℃的烘箱内,烘干 12 h;3)将烘干的试件放置在收缩仪上,测量其试件 2,6,12,24 h 的收 缩量,最后计算累计收缩应变,这一过程结束为 1 次干湿循环试验。 干湿循环试验结果,如图 8 所示。图 8 中:n 为循环次数。

都大于 0 次时的收缩应变,说明干湿循环的经历是水稳材料长期暴







露于表面,出现开裂的重要原因之一;随着循环次数增加,收缩应变的增长幅度会降低或趋于平缓。干湿循环 0 次时,相比于未掺入粉煤灰的水稳材料,掺入粉煤灰的累计收缩应变降低了 46.2%,第 5 次时降低了 35.3%,说明粉煤灰可以降低干湿循环作用的影响,提高水稳材料在中后期抵抗收缩的能力。

5次循环时间需要13d,对比13d干缩试验结果的累计干缩应变,可以看出水稳材料早期未进行养 护且经历干湿循环时,收缩应变会急剧增大,早期的强度还较低,收缩应变突然增大,这就有可能导致水 稳材料产生开裂。实际现场施工完成后,应及时对水稳层进行养护覆盖,达到规定时间后,及时铺上层, 减少干湿循环对水稳层的影响。

# 4 结论

1)采用逐级填充法设计3档粗集料的掺配比例,当3档集料的比例为60:40:30时,混合料的振 实密度最大,粗集料间的嵌挤作用最好;采用*i*法理论设计细集料级配,通过无侧限抗压强度和 CBR 试 验确定最佳*i*为0.64。最后,通过逐级填充法结合i法设计5组级配,当粗、细集料比例为65:35时, 其无侧限抗压强度和劈裂强度较高。

2)水稳材料随着粉煤灰掺量越多,早期的抗压强度和劈裂强度越小。当龄期达到 60 d 时,掺入粉煤灰水稳材料的力学性能明显优于未掺入粉煤灰的水稳材料,同时也存在最佳粉煤灰掺量为 9%,水泥的水化产物中的氢氧化钙等碱性物质能激发粉煤灰的活性,使粉煤灰发生火山灰反应,生成更多的凝胶有效提高水稳材料后期的强度。

3) 在水稳材料中掺入粉煤灰,可以改善其混合料整体的密实性,减缓毛细水迁移的速度,提高内部 早期的粘结力,有效降低干缩量和干缩应变,水泥掺量为9%时抵抗干燥收缩的效果最佳。

4)试件在经历干湿循环后,每次干湿循环的收缩应变都大于0次时的收缩应变,说明早期强度还没提高时水稳材料又经历了干湿循环,内部会急剧收缩,这就解释了工地上施工完成后未及时养护覆盖,中后期出现开裂的原因。掺入粉煤灰可以降低干湿循环作用的影响,提高水稳材料在中后期抵抗收缩的能力。

# 参考文献:

- [1] 沈正伟,涂圣武.石英砂岩隧道洞渣在路面基层中的应用[J].现代交通技术,2022,19(4):7-11,16.DOI:10.3969/j. issn. 1672-9889.2022.04.002.
- [2] 杨虎陈,晏永. 洞渣硬质砂岩水泥稳定碎石力学性能研究[J]. 散装水泥, 2022(5):183-185. DOI:10. 3969/j. issn. 1007-3922. 2022. 05. 062.
- [3] 涂圣武,沈正伟. 宜兴至长兴高速公路江苏段隧道洞渣综合利用研究[J]. 江苏建筑,2022(增刊1):86-91. DOI:10. 3969/j. issn. 1005-6270. 2022. z1. 021.
- XIE Zhiwei, LÜ Xilin, ZHANG Yan, et al. Study on mechanical property and breakage behavior of tunnel slag containing weak rocks as road construction material [J]. Construction and Building Materials, 2024, 411:134164. DOI: 10.1016/J. conbuildmat. 2023. 134164.
- [5] 李增庆.山区高速隧道洞渣在路面结构层中应用探析[J].交通建设与管理,2023(5):116-119.
- [6] JING Chao, SHI Wenhua, WANG Ning, et al. Laboratory investigation of solid wastes combined with tunnel slag in cement stabilized base of asphalt pavement[J]. Construction and Building Materials, 2023, 392:131807. DOI: 10. 1016/J. conbuildmat. 2023. 131807.
- [7] 张华永. 岳武高速公路酸性洞渣分类及加工技术研究[J]. 交通节能与环保,2019,15(1):102-105. DOI:10.3969/j. issn. 1673-6478.2019.01.027.
- [8] SHANG Xiaodong, LIU Zhiqiang, ZHENG Jianhao, et al. Study on comprehensive utilization and management of tunnel slag in expressway[J]. E3S Web of Conferences, 2020, 145:02033. DOI:10.1051/e3sconf/202014502033.
- [9] 刘树堂,刘时俊,刘天林,等. 骨架密实型水泥稳定碎石级配设计方法[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2020,41 (5):582-588. DOI:10.11830/ISSN. 1000-5013. 201912039.
- [10] 张丰焰,邸文锦,张硕文,等.基于响应曲面法水泥稳定碎石混合料配合比设计研究[J].武汉理工大学学报(交通 科学与工程版),2023,47(6):1125-1130.DOI:10.3963/j.issn.2095-3844.2023.06.027.
- [11] 冯德成,于飞,巩春伟.基于体积法的水泥稳定级配碎石配合比设计方法[J].公路交通科技,2012,29(10):22-27, 32. DOI:10.3969/j.issn.1002-0268.2012.10.005.
- [12] 彭波,尹光凯,李海宁,等. 骨架密实型水泥稳定碎石级配设计与分形评价[J]. 中外公路,2016,36(3):284-288. DOI:10.14048/j. issn. 1671-2579. 2016.03.062.
- [13] 杨宝帅,关博文,孙增智,等.水泥稳定再生粗集料级配设计方法研究[J].长江科学院院报,2021,38(2):131-136. DOI:10.11988/ckyyb.20191386.
- [14] 谭波,唐琛皓,陈平,等.骨架密实型稳定碎石制备及性能研究[J]. 武汉理工大学学报,2023,45(2):20-26. DOI: 10.3963/j.issn.1671-4431.2023.02.004.
- [15] 郭寅川,刘逸伟,申爱琴,等.玻璃纤维水泥稳定碎石收缩及柔化抗裂性能研究[J].郑州大学学报(工学版),2023,44(5):114-120. DOI:10.13705/j.issn.1671-6833.2023.02.016.
- [16] 胡勇勇,陶正文,周志刚,等.胶粉纤维复合改性水泥稳定碎石路用性能研究[J].公路,2024,69(4):36-42.
- [17] 乔建刚,张雪,徐阳,等.水性环氧树脂对废旧材料水稳基层性能影响[J]. 热固性树脂,2023,38(4):34-39. DOI: 10.13650/j. cnki. rgxsz. 2023.04.007.
- [18] 徐鸥明,王士珩,白敏,等.粉煤灰与粒化高炉矿渣对水泥稳定碎石强度和收缩特性影响研究[J].广西大学学报 (自然科学版),2019,44(2):509-515. DOI:10.13624/j. cnki. issn. 1001-7445. 2019. 0509.
- [19] 徐鸥明,韩森,孙薇.水泥粉煤灰稳定碎石强度增长特性[J].广西大学学报(自然科学版),2009,34(4):474-478. DOI:10.3969/j.issn.1001-7445.2009.04.008.
- [20] 崔昌洪,张俊.水泥粉煤灰稳定碎石力学特性研究[J].中外公路,2012,32(2):238-241. DOI:10.3969/j.issn.1671-2579.2012.02.058.
- [21] 张阳,王傲鹏,张靖霖,等.水泥稳定碎石材料干燥收缩研究综述[J].吉林大学学报(工学版),2023,53(2):297-311. DOI:10.13229/j. cnki.jdxbgxb20220175.

(责任编辑:陈志贤 英文审校:方德平)

DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 202410008



# 基于迁移学习和卷积神经网络的 桥梁图像美学评价

叶添照,赵少杰,云季彪

(湘潭大学 土木工程学院,湖南 湘潭 411105)

**摘要:** 为了在桥梁方案设计中实现桥梁美学智能评价,提出一种基于迁移学习和卷积神经网络的桥梁图像 美学自动评价方法。首先,通过冻结部分卷积层和修改丢弃率优化 VGG16 网络模型;其次,利用迁移学习将 已知数据集 AVA 模型运用到桥梁图像评价上,最终可自动输出对应桥梁美学评分值。结果表明:与人工主 观评分相比,文中方法的平均吻合度达到 90.2%,该智能评价方法具有较好的准确性和工程实用性。 关键词: 桥梁美学;卷积神经网络;迁移学习;美学评价 中图分类号: TU 026 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2025)02-0176-07

# Aesthetic Evaluation of Bridge Images Based on Transfer Learning and Convolutional Neural Networks

YE Tianzhao, ZHAO Shaojie, YUN Jibiao

(School of Civil Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

**Abstract:** In order to realize intelligent evaluation of bridge schemes in bridge design, an automatic aesthetic evaluation method for bridge images based on transfer learning and convolutional neural networks is proposed. First, the VGG16 network model is optimized by freezing part of convolution layers and modifying the dropout rate. Second, the known data set AVA model is applied to bridge images evaluation by transfer learning, which can automaticlly output the corresponding aesthetic scores. The results show that compared with the manual subjective evaluation, the average coincidence degree of the proposed method is 90.2%, indicating that the intelligent evaluation method has good accuracy and engineering practicability.

Keywords: bridge aesthetics; convolutional neural networks; transfer learning; aesthetic evaluation

随着人工智能技术的日益发展,基于计算机视觉对大量图片进行美学评价变得可能。传统基于人 的主观美学评价存在因人而异的缺点,因此,采用计算机视觉技术,摒弃人的主观性,基于图像特征的客 观美学质量的评价方法值得深入研究。

目前,基于计算美学方法提取的图像美学特征对图像进行美学分类取得了一些进展。王伟凝等<sup>[1]</sup> 提出并行深度卷积神经网络的图像美感分类方法,从多个角度对图片进行特征的自动提取和学习,从而 得到更加完整的美感表述。蚁静缄<sup>[2]</sup>通过提取低层视觉特征和高层美学特征,基于机器学习建立图像 美感评估分类模型。Sun 等<sup>[3]</sup>提出一套视觉复杂度算子对图像的美学质量进行分类。Zhang 等<sup>[4]</sup>通过 多模态递归注意力卷积神经网络(MRACNN)自动提取图像的审美特征,审美质量分类明显优于统一

**收稿日期:** 2024-10-21

通信作者: 赵少杰(1982-),男,副教授,博士,主要从事桥梁工程安全可靠性的研究。E-mail.shaojiez@qq.com。

审美预测任务。文献[5-7]通过精细设计的网络结构,从颜色、布局、多模态综合等角度考虑多种特征因 素,以精准地衡量图像的美学价值。目前,利用神经网络对图片进行分类已取得不错的效果,卷积神经 网络(CNN)是各种神经网络中最强大的学习结构之一,但鲜少用于桥梁图片的美学评价。梁艳等<sup>[8]</sup>提 出桥梁美学应与实用、安全、经济等要素统一考虑。由于图片的复杂性和主观性,局部特征很难全面地 表达出图片的要素。李素梅等<sup>[9]</sup>基于卷积神经网络模型对不同舒适度等级的立体图像进行等级分类。 王伟凝等[10]利用三分法则对图像进行美化。王欣等[11]提出多尺度特征提取网络的图像美学可观量化 评分方法,利用多尺度特征单元对图片进行深层次挖掘,完成更准确的美学评估。Daichi 等<sup>112</sup>构建一 个用于美学评价的基于深度学习的卷积神经网络模型,以高精度实现美学评估。Luo 等<sup>113</sup>提出一系列 构图模板,如矩形分割法、黄金分割法则和当地文化的形态学特征等。Wong 等<sup>[14]</sup>利用视觉注意力机制 模型提取了显著区域特征,同时也考虑显著区域和背景之间的联系,得出有区域特征的评价结果更贴合 人们的审美评价。Datta 等[15] 建立了一个较为完善的美学自动评分网站 ACQUINE,实时在线对图片 进行打分。Hou 等<sup>[16]</sup>提出基于图像内容的嵌入微调卷积神经网络方法评价图像美学质量,可很好地解 决数据规模小的问题。

综上,目前美学评价还很少有关注桥梁美学方面的专用模型。现有评价模型由更加广泛的图片组 成,所涵盖的特征不能很好地适用于桥梁美学评价。因此,本文结合 VGG16 网络模型,采用迁移学习 将学习过的模型运用到桥梁美学评价领域;采用基于特征的迁移,将源域和目标域的数据特征变换到统 一特征空间中,再进行桥梁分类识别和美学评价,从而实现从泛化模型到专用模型的转变。

#### 数据集的构建 1

深度学习算法依赖于数据样本的全面性和完整性,需要构建适当的桥梁美学图像库,为迁移学习提 供合适的训练样本及验证样本,进而通过完成特征学习,实现对桥梁图像的美学评估。

# 1.1 数据集

数据集包括通用数据集和实桥数据集,其中,通用数据集为 Aesthetic Visual Analysis(AVA),用 于迁移学习模型的训练;实桥数据集为自定义数据集,用于迁移学习卷积神经网络模型的训练和验证。 1.1.1 AVA 数据集 AVA 数据集包含超过 25 万幅社交图片,每幅图片采集了来自 200 个不同职业、 不同年龄的用户评分,评分范围为1~10分,以确保评分的客观性和广泛性。

1.1.2 实桥数据集 实桥数据集包括拱桥、梁桥、斜拉桥和悬索桥4类。为了使数据集样本充足,对桥 梁图片进行裁剪、旋转、平移及灰度处理等操作得到新数据集(图1),以此产生更多的图片用于后续的 特征提取和训练学习。新数据集包含了 12 862 张图片,其中,拱桥有 3 237 张,梁桥有 2 625 张,斜拉桥 有3500张, 悬索桥有3500张。



(a) 原图



(e) 灰度处理



(b) 旋转-20°

1186

(f) 高斯滤镜



(c) 旋转 45°



(d) 旋转 90°



(g) 灰度拉伸



(h) 缩放

https://hdxb.hqu.edu.cn/

新数据集 Fig. 1 New dataset

图 1

# 2 基于卷积神经网络的图像美学评估

基于卷积神经网络的图像美学量化方法的步骤如下:1)数据收集和图像预处理;2)卷积神经网络 模型搭建;3)模型训练;4)模型评估与优化;5)应用模型进行图像美学量化评分。

# 2.1 卷积神经网络

卷积神经网络作为一种深度学习模型,在图像分类识别上具有显著优势:1)输入图像和网络的拓扑结构能高度契合;2)能很好地获取特征图的全局结构信息<sup>[17]</sup>;3)特征提取和模式分类紧密相连,网络通过多层卷积和池化操作自动学习到有用的特征;4)权重共享可以减少网络的训练参数,降低模型复杂度,在处理大规模图像数据时具有高效性能。

因此,选取 VGG16 卷积神经网络结构,初始步骤将 224×224×3 通道图像输入卷积层。该层利用 大小为 3×3 的卷积核进行特征提取,卷积步骤的步长设定为 1,卷积层采用"same"填充,以保证特征图 的尺寸与输入相同。在卷积过程之后,数据通过 ReLU 激活函数进行非线性处理,随着网络层数的增 加,数据分布可能会趋向于饱和极限区域,导致梯度消失。为了解决这一问题,对输入数据进行归一化 处理,使其符合均值为 0、方差为 1 的正态分布标准。最后,进入池化层,使用 2×2 的池化核进行特征 提取,减少特征图的尺寸,同时保留了关键特征信息。经过 4 轮以上的卷积和池化操作后,图像的特征 信息得到逐步的提取和精简,桥梁特征信息即可进入全连接层,将特征图的高、宽和通道数转换为一个 4 096 维的向量。这个过程将二维的特征图扁平化为一维,并通过全连接层进行线性和非线性变换,最 终输出分类结果。

# 2.2 迁移学习

迁移学习的主要原理是利用源域中已有的大量标注数据,显著减少在新任务上对模型训练所需时

间。这种方法在很大程度上增强了模型的稳定性和鲁棒 性。其核心目标是将模型在源数据集上积累的先验知识, 即模型的权重,转嫁至新的任务或数据集上,以提高学习效 率。迁移学习原理,如图2所示。迁移学习通常保持模型 的卷积层结构不变,已经训练好的权重和参数能够有效地 迁移到新的模型结构中。因此,设计适用于新任务冻结部 分卷积层的网络模型,为了提高识别准确率,修改丢弃率, 其余网络层结构保持不变,并使用新数据集对模型进行训 练。实验中将所有层都进行了训练,以保证网络结构的真 实性。

# 2.3 丢弃层

加入丢弃层(dropout),使全连接层节点随机失活,减 少模型过拟合现象的出现。具体公式为



 $\boldsymbol{r}^{(l)} \simeq \text{Bernoulli}(p), \qquad \tilde{y}^{(l)} = \boldsymbol{r}^{(l)} y^{(l)}, \qquad z^{(l+1)} = \omega^{(l+1)} \tilde{y}^{(l)} + b^{(l+1)}, \qquad y^{(l+1)} = f(z^{(l+1)}).$ (1) 式(1)中:Bernoulli 函数是以概率 p 随机生成一个 0、1 的向量;  $\tilde{y}^{(l)}$ 表示第 l 层随机失活的特征;  $y^{(l)}, y^{(l+1)}$ 分别表示第 l 层和第 l + 1 层特征;  $w^{(l+1)}, b^{(l+1)}$ 分别表示第 l + 1 层的权重参数和偏置项;  $z^{(l+1)}$ 表示将特征经过激活函数。

# 2.4 基于迁移学习的 VGG16 网络模型优化

设计优化的基于迁移学习的 VGG16 网络模型,如图 3 所示,总共有 12 层。该网络冻结了 VGG16 模型中第 4 组卷积层的最后 1 层(28×28×512)和第 5 组卷积层(14×14×512),由 9 个卷积层、3 个全 连接层和 2 个丢弃层构成。为了适应特定的分类任务,将模型的修改分类设定为 4。卷积层被分成 4 组,卷积层的卷积核都为 3×3,步长为 1;池化层的卷积核都为 2×2,步长为 2。数据第 1 组经过 2 层 64 个卷积核的卷积层捕捉局部特征,尺寸变为 224×224×64,通道数变为 64,并进行池化处理;第 2 组经 过 2 层 128 个卷积核的卷积操作后,尺寸变为 112×112×128,通道数变为 128,通过池化层;第 3 组经 过 3 层 256 个卷积核的卷积操作,尺寸变为 56×56×256,通道数变为 256,再池化;第 4 组经过 3 层 512



个卷积核的卷积操作,尺寸变为 28×28×512,通道数变为 512,再进行池化;最后,经过 2 次全连接和丢 弃层,再经过一次全连接。



Fig. 3 VGG16 network model based on transfer learning

# 3 实验结果与及分析

测试环境为 Windows 10, GPU 为 NVIDIA GeForce RTX 2060 SUPER,运用 tensorflow 2.5, python 3.9 进行深度学习。批处理大小设置为 128,使用 SGD 优化器,动量参数为 0.9,初始学习率为 0.01,每 100 轮训练将学习率下调至原来的 1/10。

3.1 模型验证分析

桥梁分类主要关注准确率( $\eta_a$ )和损失值(L)这两个评估指标,为确保每种桥型的识别准确率,修改 dropout 层的丢弃率,分别设置为0、0.2、0.4、0.5。不同丢弃率的VGG16网络模型实验结果,如图4所 示。图4中:n为整个数据集在神经网络中训练过的次数。





Fig. 4 Experimental results of VGG16 network model with different dropout rates

由图 4(a)可知:模型的准确率和损失在训练集和验证集之间波动幅度较大,训练过程中存在过拟 合现象,说明模型在训练数据上表现良好,但在验证数据上表现不佳。由图 4(b)~(d)可知:加入 dropout层后,模型准确率和损失值的训练集和验证集曲线更加一致,同时减少收敛所需的迭代次数,识 别结果准确率有明显提升;随着丢弃率的增加,准确率和损失值曲线更加接近;当丢弃率为0.2时,训练 集与验证集的准确率误差为0.069,训练集与验证集的损失值误差为0.170;当丢弃率为0.4时,训练集 与验证集的准确率误差为0.090,训练集与验证集的损失值误差为0.150;当丢弃率为0.5时,准确率和 损失值曲线几乎重合,说明丢弃率为0.5的VGG16网络模型具有更佳的收敛和拟合效果。

利用已有的预训练模型知识迁移到新的任务上,冻结部分卷积层能很好地保留预训练模型已学习 到的有用特征。因此,VGG16网络模型冻结卷积层第4组最后1层、第5组卷积层和全部冻结卷积层。

冻结部分卷积层,结果如图 5(a)所示。由图 5(a)可知:模型在迭代 40 次左右趋于稳定,表明未出 现过拟合和梯度消失等问题,网络结构相对比较稳定。冻结全部卷积层,结果如图 5(b)所示。由图 5 (b)可知:模型在训练次数达到 20 次时趋于稳定,收敛于 100 %和 83 %,表明训练集和验证集相差较大; 损失值曲线在训练次数达到 20 次时,开始收敛,最终趋于 0,但验证集的损失值开始逐渐增大到 100 %, 分析可知该过程出现梯度消失现象,参数无法更新,模型不可用。此外,冻结部分卷积层可以简化模型 结构,预期效果较好。





按照8:2划分训练集和验证集,其中,10 290 张为训练集图片,其余为验证集图片。数据集在使用 迁移学习的VGG16 网络模型上的热力图,如图 6 所示。在所建立的数据集中,拱桥识别准确率最高, 可以达到 98%;梁桥的识别准确率最低,只有 86%;斜拉桥和悬索桥的识别准确率分别为 94%和 96%。 由于拱桥具有独特的拱形结构和实腹式、空腹式等多种构造形式,其拱轴线形状和不同构造形式在图像 上呈现出特征多样性。相较于梁桥相对单一的直线梁结构,这些丰富多样的曲线形态和不同构造使得 模型能更好地捕捉到区别于梁桥的关键特征,从而使拱桥的识别准确率高于梁桥。由此可见,该数据集 有很好的分辨性,且该网络模型也表现出很好的适应性,具有较好的使用性。

文中算法在实桥数据集上的准确率及损失值曲线,如图7所示。由图7可知:使用迁移学习的模型



https://hdxb.hqu.edu.cn/

在学习的初步阶段准确率很高,且保持较高上升趋势,但是验证集的准确率和损失值存在较大的振荡, 原因是网络模型开始迭代时初始参数随机分布,不同的随机参数会使神经元对输入数据的响应差异较 大;由于分类较少,模型在第 30 轮训练后接近收敛,并在后续训练中维持了较高的稳定性,最终准确率 达到 94.7%。由此可知,使用迁移学习的网络模型在实验中具有良好表现。

# 3.2 桥梁图像美学评估

根据以上模型验证分析结果,对 AVA 数据集进行实验。选取 AVA 数据集中评分 1~10 分各分段 图像共 4 000 幅,其中,80%作为训练集,20%作为测试集。网络结构模型及参数,如图 3 所示。

基于 AVA 数据集得出实验模型,输入数据集任意桥梁图片。图像美学量化评分结果,如图 8 所示。图 8 中:每幅图片下方的数据为文中方法的结果,括号内数据为人工评分得到的均分;直方图是对 应选取 100 人作为调查对象得到的概率密度质量函数图,横坐标为人工评分,纵坐标为对应的概率密 度,求均值便得到了人工评分值。由图 8 可知:自动评价结果与人工评分值基本吻合,平均吻合度达到 90.2%,说明使用迁移学习的桥梁图片美学量化方法是准确和可行的。



图 8 图像美学量化评分结果

Fig. 8 Quantitative scoring results for image aesthetics

经迁移学习评价桥梁图片的量化方法得到的评分值接近人工评分值,评价精度较好,大部分评分值 略高于人工评分值,分析原因主要有以下2点:1)使用迁移学习训练的源数据集包含较多种类,含有的 桥梁图片的评分训练较分散,导致结果准确性降低;2)人工评分因选取的对象专业性不统一,导致分数 评价差异较大。因此,后续可进一步优化源数据集,提高人工评分的准确性,从而提高训练网络的评价 准确性。

# 4 结束语

提出一种基于迁移学习和卷积神经网络的桥梁图像美学评估方法,可用于改善桥梁美学评估因数据量少导致的评估不准确的问题。所用卷积神经网络经过迁移学习优化改善后,采用 AVA 数据集作为源域,冻结部分卷积层和修改丢弃率,输出桥梁图像的客观量化值,从而达到对桥梁图片的评分。实

验结果表明,所提方法能较准确地对桥梁图片进行美学评估。由于数据集的数量限制,所得结果与人工 评分值还存在一定的差距,后续工作可进一步提高算法精度,并不断完善数据集。

# 参考文献:

- [1] 王伟凝,王励,赵明权,等. 基于并行深度卷积神经网络的图像美感分类[J]. 自动化学报,2016,42(6):904-914. DOI:10.16383/j. aas. 2016. c150718.
- [2] 蚁静缄.可计算的图像美学分类与评价系统研究[D].广州:华南理工大学,2013.
- [3] SUN Litian, YAMASAKI T, AIZAWA K. Photo aesthetic quality estimation using visual complexity features[J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 77(5):5189-5213. DOI:10.1007/s11042-017-4424-4.
- [4] ZHANG Xiaodan, GAO Xinbo, LU Wen, et al. Beyond vision: A multimodal recurrent attention convolutional neural network for unified image aesthetic prediction tasks[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2020, 23:611-623. DOI: 10.1109/TMM. 2020. 2985526.
- [5] SHE Dongyu, LAI Yukun, YI Gaoxiong, et al. Hierarchical layout-aware graph convolutional network for unified aesthetics assessment[C]//Computer Vision and Pattern Recognition. Nashville: IEEE Press, 2021:8471-8480. DOI: 10.1109/CVPR46437.2021.00837.
- [6] MARTIN-RODRIGUEZ F,GARCIA-MOJON R,FERNANDEZ-BARCIELA M. Detection of AI-created images using pixel-wise feature extraction and convolutional neural networks[J]. Sensors, 2023, 23(22):9037. DOI:10.3390/ s23229037.
- [7] HE Shuai, XIAO Yi, MING Anlong, et al. Prompt-guided image color aesthetics assessment: Models, datasets and benchmarks[J]. Information Fusion, 2025, 114:102706. DOI: 10.1016/j. inffus. 2024. 102706.
- [8] 梁艳,何畏,唐茂林.桥梁美学 2020 年度研究进展[J].土木与环境工程学报(中英文),2021,43(增刊 1):234-241. DOI:10.11835/j.issn.2096-6717.2021.226.
- [9] 李素梅,常永莉,段志成.基于卷积神经网络的立体图像舒适度客观评价[J].光学学报,2018,38(6):138-144.DOI: 10.3788/AOS201838.0610003.
- [10] 王伟凝,刘剑聪,徐向民,等. 基于构图规则的图像美学优化[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2015,43(5):51-58. DOI:10.3969/j.issn.1000-565X.2015.05.009.
- [11] 王欣,穆绍硕,陈华锋.基于多尺度特征提取网络的图像美学量化评分方法[J].浙江大学学报(理学版),2021,48 (1):69-73. DOI:10.3785/j.issn.1008-9497.2021.01.010.
- [12] DAICHI S, HIRONORI T, AKIHIRO K. Study on relationship between composition and prediction of photo aesthetics using CNN[J]. Cogent Engineering, 2022, 9(1):2107472. DOI:10.1080/23311916.2022.2107472.
- [13] LUO Xiaoyu, WU Yue, CHEN Airong, et al. Form finding and aesthetic design for pylons of cable-supported bridges[J]. Structural Engineering International, 2021, 31(6): 468-476. DOI:10.1080/10168664.2020.1870056.
- [14] WONG LAIKUAN, LOW K. Saliency-enhanced image aesthetics class prediction[C] // IEEE International Conference on Image Processing. Cairo: IEEE Press, 2009:993-996. DOI:10.1109/ICIP.2009.5413825.
- [15] DATTA R, JOSHI D, LI Jia, et al. Studying aesthetics in photographic images using a computational approach
   [C]//9th European Conference on Computer Vision. Graz: Springer-Verlag, 2006:288-301. DOI: 10.1007/1174407
   8\_23.
- [16] HOU Le, YU Chenping, SAMARAS D. Squared earth mover's distance-based loss for training deep neural networks[EB/OL]. (2016-11-17)[2024-10-10]. https://arxiv.org/abs/1611.05916.
- [17] 牛顿,林宁,林振超,等.多特征融合的焊缝图像多标签分类算法[J].华侨大学学报(自然科学版),2024,45(4): 514-523. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202403033.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:陈婧)

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202409001

# 基于 GM(1,1) 模型与 GIS 的城市 充电设施布局优化



# 南棋梦,叶青,李悦

(华侨大学 土木工程学院,福建 厦门 361021)

摘要: 为解决城市充电基础设施分布不均衡、利用不充分问题,采用 GM(1,1)模型及 Arc GIS 空间网络分析功能,对现有充电基础设施布局展开优化。首先,通过灰色预测模型分析未来电动汽车增长情况,以厦门市为例,选取 2016-2023 年电动汽车保有量数据,经预测至 2030 年将达到 45 万辆,以此作为充电总需求计算依据,届时公共充电桩总数需达到 64 490 个。其次,基于城市交通路网、兴趣点(POI)分布、充电基础设施及公共停车场场点等数据展开核密度分析及缓冲区分析进行初次选址,建立最小化设施点模型完成二次选址。最后,利用 Voronoi 图对模型选址结果进行检验,并通过位置分配模型完成容量分配。结果表明:至 2030 年,厦门市需在 16 处公共停车场处新建充电站,充电站整体扩容比例达到 72.89%,在全市 3 000 m 充电服务半径范围内覆盖率为 99.08%,1 500 m 范围内为 95.41%,基本满足电动汽车用户未来出行的充电需求。 关键词: 电动汽车;保有量预测;充电设施;Arc GIS;选址定容

**中图分类号:** U 491.8; F 224.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2025)02-0183-09

# Optimisation of Urban Charging Facilities Layout Based on GM(1,1) Model and GIS

NAN Qimeng, YE Qing, LI Yue

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of unbalanced distribution and insufficient utilisation of urban charging infrastructure, GM(1,1) model and the spatial network analysis function of Arc GIS are used to optimise the layout of the existing charging infrastructure. The grey prediction model is used to analyse the future growth of electric vehicles, taking Xiamen City as an example, according to the data of electric vehicle ownership from 2016-2023, 450 000 electric vehicles will be predicted by 2030, which is the basis for calculating the total charging demand, and the total number of public charging piles demanded by that time is 64 490. Based on data such as urban transport network, point of interest (POI) distribution, charging infrastructure, and public car park locations, kernel density analysis and buffer zone analysis are conducted for initial site selection, and a minimum facility point model is established to complete secondary site selection. The model site selection results are checked using Voronoi diagrams, and the capacity allocation is completed by the location allocation model. The results show that by 2030, Xiamen City needs to build new charging stations at 16 public car parks, and the overall expansion ratio of charging stations reaches 72, 89%, the coverage rate is 99, 08%

**收稿日期:** 2024-09-01

通信作者: 叶青(1968-),女,教授,博士,主要从事建筑经济与工程项目管理、节能建筑的研究。E-mail:yeqing@hqu.edu.cn。

基金项目: 福建省创新战略研究项目(2023R0040)

within 3 000 m charging service radius, and 95.41% within 1 500 m radius, which basically meets the charging needs of electric vehicle users for future travel.

Keywords: electric vehicles; ownership forecasts; charging facilities; Arc GIS; siting and capacity

当前,我国以"碳达峰碳中和"目标为牵引推动绿色转型,交通运输行业作为碳排放的主要领域之一,也是受气候变化影响最显著的行业之一<sup>[1]</sup>。发展新能源汽车成为解决交通运输行业能源消耗大、污染排放多的重要举措,为我国应对气候变化、推动绿色发展提供支撑。在新能源汽车快速增长的趋势下,国内电动汽车发展步入全面拓展期,充电基础设施逐步成为重要的交通能源融合类基础设施。

电动汽车保有量预测的研究主要采用灰色理论模型和 Bass 扩散模型。Zhao 等<sup>[2]</sup>结合灰色预测模型生成历史数据和短期预测数据,采用遗传算法对 Bass 模型的创新系数、模仿系数等进行训练,应用于2023-2040年的中长期所有权预测。Dong 等<sup>[3]</sup>针对上海市近年电动汽车保有量较少的问题,提出一种改进的灰色模型(GM)-马尔可夫预测方法,对电动汽车保有量进行预测。Ding 等<sup>[4]</sup>提出一种新的自适应优化灰色模型,利用动态加权序列及 Simpson 公式重构背景值改正,从而提高灰色模型的适应性和预测精度。

在电动汽车的全面发展中,地理信息系统(GIS)为城市基础设施规划整合各类重要数据,并综合展 开可视化的空间分析,有效支持电动汽车成长的不同阶段,为城市基础设施布局提供强大支撑<sup>[5]</sup>。Suhandri 等<sup>[6]</sup>针对从 Ayer Hitam 到 Batu Pahat,在 柔佛州(Johor)主要道路上应用 Arc GIS 对公共设施 定位分析,开展加油站(PPS)规划。吴鹏<sup>[7]</sup>在兴趣点(POI)数据的基础上,提出了一种基于加权 K-Means 聚类算法的电动汽车充电桩选址规划模型。韩韶光等<sup>[8]</sup>为解决电动汽车充电站选址布局不合理 问题,采用 Arc GIS 网络分析法优化原有充电站站点。Kemala 等<sup>[9]</sup>指出为加强电动汽车的普及应规划 配套基础设施,预测电动汽车的增长对帮助行业及政府的战略决策具有重要意义。Gao 等<sup>[10]</sup>研究表明 电动汽车的数量、分布与充电设施之间的紧密对称性对充电设施的布局提出了更高的要求。因此,本文 以福建省厦门市为例,探讨充电设施布局,分析电动汽车保有量不断提升下充电基础设施的总体规划。

# 1 厦门市电动汽车增长预测

# 1.1 数据来源

国内新能源汽车市场主要由纯电动汽车(BEV)、插电式混合动力汽车(HEV)及燃料电池电动汽车 (FCEV)3类构成,其中,燃料电池汽车占比很小。基于新能源汽车保有量更能反映市场整体规模,对电 动汽车的分析采用厦门市新能源汽车保有量展开。2016-2023年厦门市新能源汽车保有量,如表1所 示。数据来自厦门市统计局、厦门市工业和信息化局、厦门市车辆管理所等发布的有关报道。

表 1 2016-2023 年厦门市新能源汽车保有量

指标	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年
保有量/万辆	0.931 3	2.300 0	3.900 0	4.400 0	5.129 2	7.218 8	11.430 0	16.388 7

Tab. 1 Number of new energy vehicles in Xiamen City from 2016-2023

# 1.2 GM(1,1)模型分析

1.2.1 数据检验 建模前输入原始数列,判断是否适用于 GM(1,1)模型。

定义覆盖区间为

$$\theta = (e^{-\frac{2}{k+1}}, e^{-\frac{2}{k+2}})_{\circ}$$
(1)

定义比值为

$$\lambda(n) = x(n-1)/x(n) \,. \tag{2}$$

式(2)中:n=2、3、…、k,若满足对任意n,有 $\lambda(n) \in \theta, k=2$ 、3、4、…、k,则认为原始数列可以作为GM(1, 1)模型而被灰度预测。

若原始数列级别检验不通过,则需要添加常数项 c,通过平移变换使其落入区间内,即有

$$y^{(0)}(k) = x^{(0)}(k) + c, \quad k = 1, 2, \cdots, n_{\circ}$$
 (3)

级别检验未通过,得到 c 的结果为 15.068 7。

设新的原始数列为

$$y^{(0)} = (y^{(0)}(1), y^{(0)}(2), \cdots, y^{(0)}(n)), \qquad y^{(0)}(i) \ge 0, \qquad i = 1, 2, \cdots, n.$$
(4)  
$$= 1, 2, \cdots, n.$$
(4)

对新的原始数列进行累加,得到它的一次累加数列,即

$$y^{(1)} = (y^{(1)}(1), y^{(1)}(2), \cdots, y^{(1)}(n)),$$
(5)

$$y^{1}(k) = \sum_{i=1}^{k} y^{(0)}(k), \qquad k = 1, 2, \cdots, n$$
 (6)

令 z<sup>(1)</sup>为 y<sup>(1)</sup>的紧邻均值(MEAN)生成序列,即

$$z^{(1)} = (z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), \cdots, z^{(1)}(n)),$$
(7)

$$z^{(1)}(k) = \alpha y^{(1)}(k) + (1-\alpha) y^{(1)}(k-1), \qquad k = 2, 3, \cdots, n_{\circ}$$
(8)

取 α=0.5,生成的数列为均值生成数(等权邻值生成数)。

定义 y<sup>(1)</sup>的灰导数为

$$d(k) = y^{(0)}(k) = y^{(1)}(k) - y^{(1)}(k-1).$$
(9)

结合邻值生成序列,定义 GM(1,1)灰微分方程模型为

$$d(k) + az^{(1)}(k) = b \not\equiv y^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b_{\circ}$$
(10)

式(10)中:a为发展系数;b为灰作用量;z<sup>(1)</sup>(k)为白化背景值。

将 k=2、3、…、n 代入式(10)中可得

$$y^{(0)}(2) + az^{(1)}(2) = b,$$
  

$$y^{(0)}(3) + az^{(1)}(3) = b,$$
  

$$\vdots$$
  

$$y^{(0)}(n) + az^{(1)}(n) = b_{\circ}$$
(11)

将式(11)转变为矩阵形式,设

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} \mathbf{y}^{(0)}(2) \\ \mathbf{y}^{(0)}(3) \\ \vdots \\ \mathbf{y}^{(0)}(n) \end{pmatrix}, \qquad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} -\mathbf{z}^{(1)}(2) & 1 \\ -\mathbf{z}^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\mathbf{z}^{(1)}(n) & 1 \end{pmatrix}, \qquad \mathbf{u} = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}.$$
(12)

式(12)中:Y为数据向量;B为数据矩阵;u为参数向量。

此时,GM(1,1)模型转化为

$$Y = Bu_{\circ} \tag{13}$$

通过最小二乘法可得参数估计值为

$$\hat{\boldsymbol{u}} = \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{a}} \\ \hat{\boldsymbol{b}} \end{bmatrix} = (\boldsymbol{B}'\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{B}'\boldsymbol{Y}_{\circ}$$
(14)

对于 GM(1,1)灰微分方程,如果将  $y^{(0)}(k)$ 的离散时刻  $k=2,3,\dots,n$  视为连续变量 t, 则  $y^{(1)}$ 为连续 变量间 t 的函数  $y^{(1)}(t)$ ,于是灰导数  $y^{(0)}(k)$ 对应于导数  $\frac{dy^{(1)}(t)}{dt}, z^{(1)}(k)$ 对应于  $y^{(1)}(t)$ 。GM(1,1)灰微 分方程相对应的白微分方程为

$$\frac{\mathrm{d}y^{(1)}(t)}{\mathrm{d}t} + ay^{(1)}(t) = b_{\circ}$$
(15)

假设其初始值  $y^{(1)}(t=1) = y^{(0)}(1)$ ,则其通解为

$$y^{(1)}(t) = \left(y^{(0)}(1) - \frac{b}{a}\right) e^{-a(t-1)} + \frac{b}{a}.$$
(16)

于是,预测值可表达为

$$\hat{y}^{(1)}(k+1) = \left(y^{(0)}(1) - \frac{b}{a}\right) e^{-ak} + \frac{b}{a}, \qquad k = 1, 2, \cdots, n_{\circ}$$
(17)

累减得还原后的预测值为

$$\hat{y}^{(0)}(k+1) = \hat{y}^{(1)}(k+1) - y^{(1)}(k), \qquad k = 1, 2, \cdots, n_{\circ}$$
(18)

减去常数项 c,得到原始数列的预测值为

$$\hat{x}^{(0)}(k) = \hat{y}^{(0)}(k) - c, \qquad k = 1, 2, \cdots, n_{\circ}$$
(19)

1.2.3 模型检验 采用后验差检验和小误差概率方法检验模型的准确性及精确度。

1) 后验差检验法。模型的残差表达式为

$$\varepsilon(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k) \,. \tag{20}$$

原始数列的均方差表达式为

$$\overline{X}^{(0)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} X^{(0)}(i), \qquad (21)$$

$$S_{12}^{2} = \sum_{i=1}^{n} (X^{(0)} - \overline{X}^{(0)})^{2}, \qquad (22)$$

$$S_{12} = \sqrt{\frac{S_{12}^2}{n-1}} \,. \tag{23}$$

残差数列的均方差表达式为

$$\epsilon^{(0)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \epsilon^{(0)}(i) , \qquad (24)$$

$$S_{22}^{2} = \sum_{i=1}^{n} (\varepsilon^{(0)} - \overline{\varepsilon}^{(0)})^{2} , \qquad (25)$$

$$S_{22} = \sqrt{\frac{S_{22}^2}{n-1}} \,. \tag{26}$$

后验差比值为

$$C = \frac{S_{22}}{S_{12}}.$$
 (27)

2) 小概率误差检验法。小误差概率为

$$P = P\{|\varepsilon(k) - \overline{\varepsilon}| < 0.674 \ 5S_{12}\}, \qquad (28)$$

模型拟合结果后,后验差比值 C 为 0.068 7,小误差概率 P 为 1.0,对照表 2<sup>[11]</sup>可知,模型精度等级 为 1 级,精度较高。

表 2 灰色模型 GM(1,1)精度等级

Tab. 2	Accuracy	level	of	grev	model	GM(1)	.1)	)
1 0.0. 2	riccuracy	ICVCI	O1	grey	mouci	OTAL	, I /	

模型精度等级	С	Р
1级(好)	<i>C</i> ≪0.35	<i>P</i> ≥0.95
2级(合格)	0.35 <i><c< i=""><b>≤</b>0.50</c<></i>	0.80≪ <i>P</i> <0.95
3级(勉强合格)	0.50 <i><c< i="">≪0.65</c<></i>	0.70 <i>≤P&lt;</i> 0.80
4级(不合格)	<i>C</i> >0.65	<i>P</i> <0.70

# 1.3 预测结果分析

GM(1,1)灰色预测模型分析随时间的拉长,精度降低,因此,选取 2024-2030 年的数据进行预测, 拟合结果,如表 3 所示。

表 3 2024-2030 年厦门市新能源汽车保有量预测

Tab. 3	Forecast o	of new energy	vehicle own	nership in	Xiamen	City from	2024-2030
--------	------------	---------------	-------------	------------	--------	-----------	-----------

指标	2024 年	2025 年	2026 年	2027 年	2028 年	2029 年	2030 年
保有量/万辆	17.642 5	21.143 9	25.020 2	29.311 4	34.062 0	39.321 0	45.143 0

综合新能源汽车保有量预测发展趋势可知,厦门市电动汽车发展有较大增长空间。一方面,随着 《"电动厦门"展规划(2023-2025年)》(厦府办〔2023〕63号)等文件的发布,厦门市政府正在不断完善 充电基础设施体系,多方面优化电动汽车发展环境,为新能源汽车产业发展持续提供政策利好。另一方 面,省级新能源政府监管和便民信息服务平台加快建设,"以桩促车"配套服务建设得如火如荼,为广大
新能源电动汽车用户提供便捷的充电服务环境,极大提高了新能源电动汽车用户的满意度。

### 2 厦门市充电设施布局分析

### 2.1 厦门市概况与数据源

2.1.1 厦门市概况 厦门市位于中国东南沿海,福建省南部,闽南金三角中部,与漳州市、泉州市相连, 地处北纬 24°23′-24°54′、东经 117°53′-118°26′。厦门市辖区包括厦门岛内(含鼓浪屿)的思明区、湖 里区,岛外西部的海沧区、集美区,岛外北部的同安区及东部的翔安区<sup>[12]</sup>。截至 2023 年末,厦门市常住 人口 532.70 万人,常住人口城镇化率 90.81%<sup>[13]</sup>。各类经济指标表现良好,地区生产总值、全社会用电 量、机动车保有量等均稳步增加。

2.1.2 基础地理信息数据 依托国家地理信息公共服务平台 天地图(https://www.tianditu.gov.cn/),申请获取国家 1: 1000000基础地理信息数据库 G50(2021公众版),导入 Arc GIS 整理得到厦门市区概况,如图 1 所示。

2.1.3 电动汽车用户的出行兴趣点 分析中考虑兴趣点分布 较多的区域为出行目的地集合。设定区域中兴趣点的数量多少 体现电动汽车用户出行的充电需求大小,若数量多,则该区域对 充电需求较高,应优先设立充电站。

基于高德开放平台(https://lbs.amap.com/)利用 Python Fig.1 Overview of Alamen City 多边形查询,爬取厦门市 POI 数据作为电动汽车用户的出行兴趣点,以高德 POI 分类与编码文件为分 类标准,相关兴趣点类包括餐饮服务、风景名胜等 15 个大类。高德地图采用 GCJ-02 坐标,研究转换为 WGS-84 坐标系,并对数据展开清洗处理,主要去除重复数据、无效数据及漳、泉两地的边缘数据,得到 厦门市 POI 兴趣点 xlsx 格式坐标数据 223 602 条。

2.2 核密度分析

对电动汽车用户出行兴趣点采用核密度分析。结合分析 的服务范围,环境处理和栅格分析的掩膜选取厦门市行政区 域,以1000m作为阙值,采用几何间隔分类,优化类范围,保 证核密度图像分析质量。POI核密度分析图,如图2所示。

分析图 2 可知:POI 兴趣点总体分布表现出发展核心高密 度集聚,其他片区沿主要发展方向发散布置的特征<sup>[14]</sup>,其中, 高密度斑主要集中在思明区、湖里区,随着与厦门岛的距离拉 大,集聚程度逐步降低。各区 POI 数量和集聚差异大,空间分

布发散性较强。思明、湖里两区合计 135.82 万人,占全市户籍人口的 45.0%<sup>[13]</sup>,人口数量大,生活集 聚,故 POI 兴趣点数量较多;海沧区作为厦门岛外第一个新兴城区,开发建设时点最早、城区成熟度最 高,POI 沿主要交通道路分散布置;集美区发展基础夯实,分布相对均匀;同安区是岛外商业基础较为薄 弱的板块之一,POI 分布主要位于同安老城区,辐射范围较局限,在环东海域新城片区滨海居住带呈现 带状分布;翔安区发展基础较为薄弱,POI 分布围绕汇景购物广场与闽篮城市广场一北一南双中心格局 分散。整体来看,岛外四区大都分布于南部,这也与北部的生态屏障相适应。

基于核密度分析结果,将不同密度区域划分为不同量级的充电需求区域。红色及深橙色区域为一级区域,考虑该区域有旺盛的充电需求;浅橙色区域为二级区域,充电需求程度较大;黄色区域为三级区域,充电需求一般。针对不同需求程度的区域分别设定充电服务半径。

### 2.3 缓冲区分析

根据厦门市 POI 数据分类统计整理充电站、换电站、专用充电站三类数据,具体包括站点名称、经 纬度、站点运营信息、充电容量等属性。

现有充电设施分布情况,如图 3 所示,在此基础上分别建立 900、1 500、2 500、3 000 m 缓冲区,明确 覆盖范围,从而建立合适的服务半径,如图 4 所示。基于缓冲区分析结果,对一级区域设定充电站服务



图 1 厦门市区概况 Fig. 1 Overview of Xiamen City





半径为 900 m,二级区域服务半径为 1 500 m,三级区域服务半径为 3 000 m,分级覆盖全市所有充电需求。

对现有充电设施的优化基于厦门市公共停车场建设情况 新建充电站,一定程度上避免部分区域由于盲目建站带来的资 源浪费。经过筛查可知,目前共有4830个公共停车场,分布情 况与 POI 核密度图近似。

在未覆盖到的需求区域中最多需在 18 处公共停车场增设 充电站,候选站点,如表 4 所示,最大化覆盖所有充电需求。

完成充电站的初次选址,对候选充电站建立后的情况分级 进行缓冲区分析复核。据目前厦门市充电设施发展情况,城市 核心区公共充电服务半径已达 900 m,对最大化覆盖范围下建 设情况展开1500、3000 m缓冲分析,复核通过。



• 0..5.10 km

(c) 服务半径 2 500 m



图 3 现有充电设施分布 Fig. 3 Distribution of existing charging facilities



(b) 服务半径 1 500 m



(d) 服务半径 3 000 m



Fig. 4	Multi-ring	buffer	analysis	of	existing	charging	facilities
		+	1 使出	는 슈타	· 上		

	衣	4	医匙珀片	2
Tal	<b>4</b>		Candidate	eitoe

	1 40.	, + Canalate site	0		
编号	名称	经度/(°)	纬度/(°)	所属区	类别
1	市政芸景实小公共停车场	117.980 1	24.538 3	海沧区	公共停车场
2	旺角新天地地面停车场	118.079 0	24.631 9	集美区	公共停车场
3	艾芗土休闲农庄地面停车场	117.980 6	24.628 2	集美区	公共停车场
4	厦门同安影视城停车场	118.156 0	24.744 0	同安区	公共停车场
5	大新停车场	118.205 4	24.738 8	同安区	公共停车场
6	银丰温泉停车场	118.127 1	24.779 8	同安区	公共停车场
7	地面停车场	117.938 9	24.849 7	同安区	公共停车场
8	闽盛交通停车场	118.153 4	24.765 8	同安区	公共停车场
9	北辰山景区北山岩门停车场	118.236 3	24.789 7	同安区	公共停车场
10	八怪谷停车点	118.151 3	24.858 5	同安区	公共停车场
11	丽田园景区停车点	118.070 7	24.778 7	同安区	公共停车场
12	厦门翔安天红钓场地面停车场	118.220 7	24.603 5	翔安区	公共停车场
13	双沪站停车场	118.271 0	24.572 2	翔安区	公共停车场
14	大宅生态停车场	118.274 5	24.613 1	翔安区	公共停车场

续表

	Со	ntinue table			
编号	名称	经度/(°)	纬度/(°)	所属区	类别
15	中航锂电(厦门)科技有限公司地下停车场	118.303 3	24.670 9	翔安区	公共停车场
16	厦门莲花医院莲河总院停车场	118.341 5	24.584 4	翔安区	公共停车场
17	地面停车场	118.262 3	24.760 9	翔安区	公共停车场
18	海屿原营销中心地面停车场	118.199 6	24.566 0	翔安区	公共停车场

### 2.4 位置分配及容量分析

2.4.1 最小化设施点模型 总体满足全部充电需求后,遵循资源分配及经济性原则,使充电站数量最小化。在充电站的不同服务半径内,让尽可能多的兴趣点被分配到充电站的服务范围内,同时保证覆盖出行兴趣点的充电站建设数量最小化。在 Arc GIS 中对充电站进行细化分类,分类标准,如表 5 所示。 表 5 充电站建设候选点分类标准

Tab. 5 Classification criteria of candidate sites for charging station construction

字段	类型	图例	参考准则
0	候选		充电桩数量<4的充电站;有充电需求的公共停车场
1	必选	*	考虑高速服务区、环岛路的充电设施为必要需求
2	竞争(不选)	$\bowtie$	运营不佳、已暂停营业、不对外开放的充、换电站;公交场站
3	已选	<b>5</b>	充电桩数量≥4的充电站,正常运营的充电站

依托厦门市路网数据分析搭建交通路网。构建基于1500,3000 m 服务半径下充电站的最小化设施点模型,如图5所示。





(a) 服务半径 1 500 m

(b) 服务半径 3 000 m

图 5 不同阻抗最小化设施点模型

Fig. 5 Different impedance minimization facility point models

不同阻抗最小化模型选址结果,如表6所示。由模型分析表6可知,厦门市内至少需要表6要求位 置处建设充电站才能满足所有充电需求,从而优化候选站。

Tab. 6	Site selection	results for	different	impedance	minimisation	models
--------	----------------	-------------	-----------	-----------	--------------	--------

指标	现有充电设施建设情况	服务半径1500m充电设施建设	服务半径 3 000 m 充电设施建设
候选充电站数量/个	62	454	544
必选充电站数量/个	21	21	21
不选充电站数量/个	95	95	95
已选充电站数量/个	566	192	102
有效充电站数量/个	587	213	123
覆盖率/%	—	95.41	99.08

以必选类、已选类站点作为基础,在不同阻抗最小设施点模型中选取对应区域站点作为候选。可知 一级区域 900 m 范围内已完全覆盖,不需要新建站点;二级区域若要满足充电服务半径在1 500 m 范围 内,仍需在2处位置新建充电站;三级区域若要满足充电服务半径在3 000 m 范围内,仍需在14 处位置 新建充电站。组合选址情况,如图6 所示。最后,对选址结果进行缓冲区分析,几乎满足全部充电需求, 二次复核结果通过。 2.4.2 容量分配 借助电动汽车保有量预测值估计充电总需 求,查询历年车桩比变化情况,2020年厦门市新能源汽车与公 共充电桩比为1.0:11.8,到2021年车桩比达到1.0:10.5,而 到2023年车桩比约为1:15,电动汽车的推广速度逐渐加快。 2030年厦门市整体车桩比力求达到2:1,按照目前1个公桩约 等于3个私桩的比例进行测算,考虑电动汽车的增长速度及公 共充电桩的建设程度,推断至2030年厦门市公共充电桩的车桩 比约为7:1,公共充电桩总数需达到64 490个。



综合核密度分析、缓冲区分析及位置分配模型的结果分配 具体容量。对于候选充电站,根据最小化设施模型中的网络分



析数据将各充电站分配的充电需求数目进行统计分析。对现有充电设施建立最大化覆盖范围模型进行 分析,确定各站点分配到的权重。

两类模型中有部分站点重复分析,对此分配的优先级别为3000m最小化设施模型>1500m最大 化覆盖范围模型>1500m最小化设施模型。原因是以1500m为阻抗,最大化覆盖范围模型考虑到2 个及以上已有充电站相距较近时,对充电需求的分配更偏向于实际,最小化设施模型则更偏向于经济, 忽略此类站点的存在;以覆盖范围为考虑因素,阻抗越大,意味着有更多的需求点被选入。在此基础上, 仍有部分兴趣点在超过一个模型中被重复计算,对此平均分配误差到各站点。

结合充电站总体规模及充电站点权重完成容量分配,结果如表7所示。由表7可知:厦门市不同区域的充电设施扩容比例均在60%以上。其中,各区域有10%~30%的充电站容量变化不大,设计适度超前;主要在充电桩数量过少的候选站及换电站处需新增充电桩来更好满足周边充电需求,兼顾充换电模式的充电设施将持续增加。

	1					
世田	容量分配比例/%					
近国 ——	扩容	不变或略微减少	新建			
厦门市	72.89	19.64	7.47			
思明区	66.09	29.57	4.35			
湖里区	73.97	19.18	6.85			
集美区	81.74	13.91	4.35			
翔安区	67.82	18.39	13.79			
海沧区	84.62	9.62	5.77			
同安区	67.33	21.78	10.89			

### 表 7 充电站容量分配

Tab. 7 Capacity allocation of charging stations

# 2.5 Voronoi 图检验

通过 Voronoi 图 对模型输出结果进一步验证,检验 Voronoi 图中各充电站覆盖的充电需求点是否与模型输出结果 相同,从而验证结果的可行性<sup>[15]</sup>。在预设站点选址基础上,生 成的 Voronoi 图,如图 7 所示。图 7 中大多数需求点符合要 求,充分表明模型输出结果的可行性。



# 3 结论

从整体规划角度出发,运用灰色预测方法及 Arc GIS 建模分析对充电站选址、定容进行优化,构建厦门市电动汽车保有

图 7 Voronoi 图 Fig. 7 Voronoi diagram

量预测模型和充电站布局模型,并对模型输出结果进行有效性检验。主要有以下3点结论。

1)利用 GM(1,1)模型对厦门市电动汽车未来 6 年保有量进行预测,结果显示,2024-2030 年厦门 市电动汽车发展仍保持增长势头,至 2030 年全市电动汽车保有量将突破 45 万辆,并将该数据作为充电

190

总需求的计算依据,按车桩比7:1的需求进行分配,届时公共充电桩总数需达到64490个。

2)结合核密度分析、缓冲区分析、位置分配模型可知,需在16处公共停车场附近新建充换电站,分级满足厦门市电动汽车用户出行的充电需求。

3)综合选址与容量分析结果,厦门市充电设施扩容将成为未来几年的必然趋势;厦门市有约 20% 的充电设施设计适度超前,符合未来需求;兼顾充换电模式的充电设施将持续增加。

由于时间等诸多因素限制,未充分考虑针充电桩与换电站的比例及建造成本,未来还可以从以下两 方面展开深入的研究。

1) 建立的 GM(1,1)训练集与测试集验证模型的预测图像显示,2022 年、2023 年的实际值明显高 于预测值,预测精度不够高。未来可结合政策波动、技术发展、市场影响等因素,基于微博平台挖掘关键 词判断当前形势是否有利于电动汽车发展的情感分析,从而提高预测精度。

2) Arc GIS 空间分析部分爬取了实时 POI 数据分析复杂的现实情况,对充电需求分布趋势作出判断。分析时由于交通路网数据只覆盖主要道路,各级道路数据不够全面,选用了任意两点间的通勤距离都可以在略长于直线距离范围内到达的欧式距离,这与实际行驶道路有差异。

### 参考文献:

- [1] 宋媛媛,姚恩建,徐洪磊,等.交通运输领域应对气候变化策略及路径[J].清华大学学报(自然科学版),2023,63
   (11):1707-1718. DOI:10.16511/j. cnki. qhdxxb. 2023. 26.021.
- [2] ZHAO Xiaxiao, JIANG Weijia, LIU Xiangyu, et al. Medium- and long-term electric vehicle ownership forecasting for urban residents[J]. World Electric Vehicle Journal, 2024, 15(5):212. DOI: 10.3390/wevj15050212.
- [3] DONG Ran, SUN Lijiang. Short-term forecast of EV ownership in Shanghai based on metabolic GM(1,1)-Markov model[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2351(1):012031. DOI:10.1088/1742-6596/2351/1/012031.
- [4] DING Song, LI Ruojin. Forecasting the sales and stock of electric vehicles using a novel self-adaptive optimized grey model[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2021, 100: 104148. DOI: 10. 1016/j. engappai. 2020. 104148.
- [5] 夏佼,段然,杨颖.基于城市规划的地理信息系统探讨[J].信息系统工程,2024(1):4-7.DOI:10.3969/j.issn.1001-2362.2024.01.003.
- [6] SUHANDRI H F, NOZLAN N F. Analysis of public facility (Petrol Pump Station) localization by using Geographic Information System (GIS). Case study: Ayer Hitam-Batu Pahat, Johor[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2023, 1205(1):012071. DOI:10.1088/1755-1315/1205/1/012071.
- [7] 吴鹏.基于 POI 数据的电动汽车充电站选址规划[C] // 2022 世界交通运输大会论文集.重庆:重庆交通大学, 2022:159-165.DOI:10.26914/c.cnkihy.2022.019782.
- [8] 韩韶光,邹常丰,何永明,等.电动汽车充电站选址优化:以哈尔滨市为例[J].交通科技与经济,2023,25(1):42-49. DOI:10.19348/j. cnki.issn1008-5696.2023.01.006.
- [9] KEMALA B K L, SURJANDARI I, PUSPITA A N G. Forecasting methods for the electric vehicle ownership: A literature review[J]. Procedia Computer Science, 2024, 234:87-95. DOI:10.1016/j. procs. 2024. 02.155.
- [10] GAO Hui, YANG Lutong, ZHANG Anyue, et al. Analysis of urban electric vehicle trip rule statistics and ownership prediction[J]. Symmetry, 2021, 13(11): 2052. DOI: 10.3390/sym13112052.
- [11] 李梦迪,李娇,薛月光,等. 基于灰色-马尔科夫模型评估石雀滩海洋牧场岩礁鱼类碳储量[J]. 渔业科学进展, 2024,45(1):14-22. DOI:10.19663/j.issn2095-9869.20220718001.
- [12] 厦门市人民政府.厦门市电动汽车充电设施专项规划(2016-2020)[R].厦门:厦门市人民政府,2016.
- [13] 厦门市统计局. 厦门市 2023 年国民经济和社会发展统计公报[R]. 厦门: 厦门市统计局, 2023.
- [14] 沈飞,尚正永.基于 POI 数据的小学空间分布特征及可达性分析:以苏州市区为例[J].苏州科技大学学报(自然 科学版),2023,40(3):54-61. DOI:10.12084/j.issn.2096-3289.2023.03.007.
- [15] 侯慧,唐俊一,王逸凡,等.城区电动汽车充电站布局规划研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(14):181-187. DOI:10.19783/j.cnki.pspc.226008.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202407002



刘晓芳,杨燕妮,周婧,何欣翼,杨思声

(华侨大学 建筑学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为探究乡村振兴背景下传统村落建筑保用的有效模式,以福建省厦门市集美区的城内村为案例,研究 建筑租养的运行及保护发展实践。结果表明:传统村落建筑租养模式的关键在于使用权与责任的明晰转移, 公私合作形式在其中发挥了关键作用;专业赋能提供坚实保障,灵活的保护方式使其具有广泛适用性;高效的 项目整合与协同推动该模式持续运行。

关键词: 传统村落;建筑租养;建筑保用;集美区城内村;乡村振兴
 中图分类号: TU 982
 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2025)02-0192-09

# Traditional Village Buildings Rent-and-Maintenance Model Under Background of Rural Revitalization

LIU Xiaofang, YANG Yanni, ZHOU Jing, HE Xinyi, YANG Sisheng

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

**Abstract:** To explore effective models of the village building protection and utilization of traditional villages under the background of rural revitalization, taking Chengnei Village in Jimei District, Xiamen City, Fujian Province as a case, the operation and protection development practice of buildings rent-and-maintenance are studied. The results show that the key of the traditional village building rent-and-maintenance model is the clear transfer of usage rights and responsibilities, and public-private partnership plays key role in it. Professional empowerment provides solid guarantee, and flexible protection methods own wide applicability. Efficient project integration and collaboration promote the continuous operation of this model.

**Keywords:** buildings rent-and-maintenance; traditional village; building protection and utilization; Chengnei Village in Jimei District; rural revitalization

在我国现阶段乡村振兴背景下,许多传统村落在保护有价值的物质及非物质文化遗产的同时,存在 人口流失、产业动力不足、基础设施滞后等问题<sup>[1-2]</sup>,据调查,我国4批传统村落中大约有2/3的村落存 在此类问题<sup>[3]</sup>。资金和机制是传统村落保护发展的重要瓶颈<sup>[4]</sup>,古建保护工作繁琐、技术性强,需要大 量的资金用于修缮维护,传统村落虽受到政策资金扶持,但远无法满足实际需求<sup>[5]</sup>。传统建筑"保"与 "用"是横亘在传统村落保护和发展之间的一大难题<sup>[6]</sup>。因此,探索有效的建筑保用模式,建立可持续的 实施机制是推动传统村落有机保护更新的重要途径<sup>[7]</sup>。

在传统村落建筑保护利用的现有研究中,理论和方法的研究成果较丰富。王路[8]以德国村落更新

**收稿日期:** 2024-07-02

通信作者: 刘晓芳(1980-),女,副教授,博士,主要从事城乡功能与形态、城市空间安全与健康的研究。E-mail: lxf2008@hqu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(42201200);国家社会科学基金一般资助项目(20BMZ046)

规划为案例,结合我国传统村落发展现状,提出乡村建筑未来的发展方向;杨大禹<sup>[9]</sup>从挖掘传统建筑文 化基因入手,探索适合新时代发展的民居建筑新形式;王欢<sup>[5]</sup>认为资金困境是制约传统村落古建保护发 展的重要阻碍,提出古建筑分类保护、风貌控制、功能提升等优化策略;张艳玲等<sup>[10]</sup>通过梳理 1949 年以 来关于乡村建设的系列政策,提出传统建筑的保护路径,但已有成果缺少对传统村落建筑保用的运营方 式、流程、成效的实践研究。

2020年,福建省住房和城乡建设厅与中国城市规划设计研究院开发了传统村落建筑海峡租养平台,推广传统村落建筑租养模式<sup>[11]</sup>。该模式通过租赁和养护的形式,引导社会力量参与传统建筑的保护及活化利用,希望通过保护文化遗产的同时,激活村落产业,吸引人口回流,为村落带来经济和社会效益。本文以传统村落建筑租养模式的典型村落——福建省厦门市集美城内村为案例,提出乡村振兴背景下传统村落建筑租养模式。

### 1 传统村落建筑租养概念及国内外实践进展

### 1.1 城内村建筑租养的概念

传统村落建筑租养是一种创新的文化遗产保护策略,以合理保护更新为出发点,将闲置失修的传统 建筑向公众开放,鼓励自然人承租<sup>[12]</sup>。租养人承担起修缮、保护和改造的责任,经过改造,这些建筑以 住宅、商业空间或文化、教育基地等功能融入现代社会。通过租养,使用权明晰转移,政府、非营利组织、 私人及企业均可参与,共同推动传统村落文化遗产保护和乡村振兴<sup>[13]</sup>。

### 1.2 传统村落建筑租养的国内外实践进展

建筑租养作为一种创新理念,在国内外传统村落的应用尚不普遍。然而,已有一些项目积极尝试和 探索,为这一创新模式的应用提供了宝贵的参考借鉴。国内外实践案例表明,传统建筑租养在平衡保护 与利用、促进社会参与、激发创新和增强公众意识方面有较好效果。

1.2.1 传统村落建筑租养的国内实践进展 广东省开平县碉楼的公众认养计划,如图1所示。



图 1 广东省开平县碉楼的公众认养计划

Fig. 1 Public adoption programme of Diaolou in Kaiping County, Guangdong Province

2011年,广东省开平县启动 32 座碉楼的公众认养计划,经过认养,社会力量获得开平碉楼使用权 并参与修缮工作<sup>[14]</sup>。开平碉楼的社会认养不仅通过首创的"产权不变、政府代管"模式开辟了保护"碉 楼"这一文化遗产的先例,也为当地旅游业的发展带来了新的活力<sup>[15]</sup>。浙江省金华市也鼓励民间认养, 确保文物国有产权的同时,赋予认养人使用权,政府提供资金和社会荣誉支持。

浙江省松阳县"拯救老屋行动",如图2所示。



图 2 浙江省松阳县"拯救老屋行动"

Fig. 2 "Save old houses action" in Songyang County, Zhejiang Province

2016年,浙江省松阳县发起"拯救老屋行动",村民在政府与基金会助力下成为认养人,修缮老屋并 引入多元产业,助力乡村发展<sup>[14]</sup>。随着实施"拯救老屋行动"县市的增多,松阳模式得到良好的推广,并 且各地尝试导入更多元的主体,社会人士和资金有效介入了古建筑的保护,从而探索出适用于当地的古 建保护新路径,这些模式通过产权代管及使用权授权的方式,吸引社会力量参与修复和活化古建筑,不 仅保证了文化遗产的长期保存,还带动了当地旅游业和农村经济的发展。对于古建租养模式而言,这些 案例提供了宝贵的经验:引入社会资本,赋予使用权限和分阶段修缮的方式,有效提升传统村落古建筑 的保护与利用,进一步促进社区的可持续发展与文化传承。

1.2.2 传统村落建筑租养的国外实践进展 国外古建租养的实践运作流程,如图 3 所示。

英国信托组织运作经营模式
遗产普查与登记 → 信托所权转移 → 资金筹措
修缮维护 → 公众参与与社区合作 → 活化利用 → 监督管理
德国一欧元古堡项目
筛选评估古堡 → 公开招募购房者 → 资格审核申请
合约签署出售 → 修改与保护监督 → 后期运营利用
意大利"领养人"制度管理
筛选与公布需要修缮 分类评估并 维护的博物馆和古迹 公示寻找养者 → 及府对申请 人资格审查
鉴定协议 → 修订维护历史 文化工作 运营使用 → 监督评估

图 3 国外古建租养的实践运作流程

Fig. 3 Practical operation process of foreign ancient buildings rent-and-maintenance

国外在建筑租养方面也有积极实践,英国通过信托组织运作,建立了完善的经营模式,以捐赠和募 集的资金维护和激活文化遗产,确保了古老庄园的保存与活化,该实践强调公众参与和社区合作的重要 性,为世界传统建筑的保护与利用提供了新的视角。德国政府通过"一欧元卖古堡"项目,鼓励社会力量 参与文化遗产管理,由购买者负责古迹的维修和日常维护。意大利则采用"领养人"制度,将博物馆、古 迹等交由私人资本管理,但政府保留所有权和监督权<sup>[13]</sup>。

国外的运作流程重视社会力量的广泛参与及社区合作。欧洲国家通常强调长效机制的建立,确保

租赁者在获得使用权后能够持续投入修缮和维护,实现古建保护与利用的可持续发展。

## 2 城内村建筑租养实践

### 2.1 城内村建筑租养概况

厦门市集美区城内村概况图,如图4所示。



图 4 厦门市集美区城内村概况图

Fig. 4 Overview map of Chengnei Village in Jimei District, Xiamen City

城内村位于厦门市集美区,地处城市边缘,为福建省第一批省级传统村落,兼具优良的生态自然环境与厚重的传统文化,自古为闽台两岸亲情互通的圣地<sup>[16]</sup>。城内村中心遗存较完整的闽南古厝 38 幢,仍有人居住的有 10 幢,但长年受风雨侵蚀,建筑内部多处槽朽、受损,外墙装饰也有剥蚀。2020 年,传统村落建筑海峡租养平台开发建设后,城内村的部分古厝纳入了该平台。租养人租赁村内的特色古厝,本着"轻租重修、以用为养"的原则,进行适度修缮及内部改造,在延续传统风貌的基础上植入现代功能。目前,村内租养建筑数量相对较多,收益和发展态势较好,实践模式相对成熟。

### 2.2 城内村建筑租养的发展历程

根据建筑租养的主导人群及运行特点,可将城内村建筑租养的发展历程(图 5)划分为3个阶段。



图 5 厦门市集美区城内村建筑租养的发展历程

Fig. 5 Development process of buildings rent-and-maintenance in Chengnei Village in Jimei District, Xiamen City

1)社区企业整租改造。2012年3月,福建省一些协会参与到城内村的规划建设中,通过联合村集体,成立经营性的民间社团组织,采取整租改造模式,保护了城内村废弃、破损严重的古厝,避免村民随意出租。对于产权不明或长期无人居住的旧屋,公司统一租下整改。在保持文化遗产真实性的基础上,通过功能置换,将古厝改造为文化展示、手工艺作坊等功能,质量一般的建筑转型为商店、咖啡馆等,服务于旅游发展<sup>[17]</sup>。

2)台湾青年群体融入。2019年起,台湾青年双创基地人员带领多支团队入驻城内村,参与乡村振兴建设。团队在租养古厝过程中融入台湾社区营造经验,根据保存情况和实际需要对古建进行修缮更新,不仅促进了两岸交流合作,也为乡村振兴注入了新的活力。

3) 租养古厝投入运营。目前,城内村已开展古厝租养运营6座,包括乡建乡创基地、餐厅、两岸乡

村振兴合作基地接待中心、电影院、茶室及文化研学馆等。这些古厝的运营状况良好,收益稳定,发展模式趋于成熟。

# 2.3 城内村建筑租养的运行流程

厦门市集美区城内村建筑租养的运行流程包括5个环节(图6)。



图 6 厦门市集美区城内村建筑租养运行流程

Fig. 6 Operational process of buildings rent-and-maintenance in Chengnei Village in Jimei District, Xiamen City
1) 拟定计划。由村委会主导,对村落内传统建筑的数量、历史、结构、文化价值进行详尽普查,对质量加以评定,以便拟定分批修复和保护计划,包括资金预算、施工方案、功能定位等。

2) 合约缔结。村委会参与租赁管理过程,并与村经济合作社或村级企业等签署正式承诺文件,确 立其作为租赁方的主要责任方,承担在租赁管理中的法定义务。

在合约中需要具体确定租赁期限、租金、维修责任等条款,并明确双方的权利和义务,包括使用权、 收益分配、违约责任等。在该环节中,城内村的村民表示,租赁方在租金、使用权等方面存在分歧,通过 第3方评估机构确定合理的租金为解决途经之一。

3)使用权授权。村委会与村民进行深入沟通,评估他们对潜在租赁建筑与附带庭院的出租意向。 随后,由经济合作社或村级企业等与村民签订授权协议,明确使用权授权的范围和期限,确保使用权授 权符合法律法规要求,同意代表其进行租赁。

4)信息整合与评估。村委会对村落及租养建筑信息进行整合登记,上传租养平台。租赁者综合评估村落特色、地理位置、建筑价值等因素,选择租养建筑,预约现场踏勘。若租赁者决定租赁,则进而与村经济合作社(或政府认可的其他法人实体)签署正式协议。

5)修复运营与功能提升。租赁者根据协议支付租金,并依据修缮手册进行建筑修复。修缮手册由 平台提供,其中,规定了建筑修缮的强制性原则和引导性原则(图 7)<sup>[18]</sup>。在租赁协议有效期内,租赁者 拥有房屋使用权,并享有房屋运营收益。



图 7 传统村落建筑海峡租养平台的建筑修缮说明

Fig. 7 Renovation of traditional villages buildings on Haixia rent-and-maintenanc platform

### 2.4 建筑租养模式下城内村的保护发展实践

2.4.1 传统建筑的保护与更新 城内村建筑租养人赓续当地的建筑风格与设计理念,对传统建筑进行 修复保养,并对内部功能进行更新活化,发展餐饮服务、文化展览、综合服务等多类型业态,较好地保护 了传统村落的风貌特色,传承历史文脉。城内村租养古厝保护更新分析,如图8所示。



图 8 厦门市集美区城内村租养古厝保护更新分析

Fig. 8 Analysis on protection and renewal of rent-and-maintenance

ancient houses in Chengnei Village in Jimei District, Xiamen City

传统建筑保护和更新方面,首先,在保护传统的建筑结构、材料和装饰,保持传统建筑独特韵味的基础上,对建筑结构进行加固和维护,保证安全性和稳定性。城内村主要采用闽南传统建筑材料和工艺,运用传统的砖、石、土、木等材料对墙体、大木、屋面等进行结构更新和维修,在不落屋架的情况下,对破损的立柱、梁枋、檩条实施更换。同时运用传统的墩接、打牮等特殊工法技艺,红砖补墙、红瓦铺顶、燕尾飞檐,还原传统风貌特色。再者,在古厝内部更新时,采用更新设施和设备的措施,包括水电系统、卫生设施等,提升建筑的舒适性和便利性。

2.4.2 业态活化及文化传承 在建筑保护修缮的基础上,对建筑功能业态进行适应性更新,包括文化、 餐饮、购物、休闲等。其中,租养人作为核心利益主体,选择租养古厝的业态以及空间形式、运营方式等。 非核心利益相关者,分别是作为管理主体的政府及村委会、作为产权主体的古厝原房屋主人,分别为租 养古厝的保护及改造提供政策支持、房源支持,推动古厝租养持续运行。

另一方面,通过租金收入,村落获得经济支持,并用于各类社区活动与项目,从而拓宽了乡村服务业 的范畴。城内村租养人协同高校定期举办市集与民俗活动,结合自媒体推广,吸引大量游客,为村落注 入活力的同时,提升了村民的生活水平。

在传统手艺保护方面,城内村通过建筑租养吸引具有相关技能的人移居村落,定期开展传统手艺活 动,如工艺品制作、传统技艺展示等,促进地域特色工艺文化的赓续发展。在乡风习俗保护方面,协同社 区参与和共同管理,促进传统习俗的传承,如在村内广场设立"月老办事处",丰富民俗文化交流空间。 城内村业态运营状况,如表1所示。

	Tab. 1       Business operation status of Chengnei Village in Jimei District, Xiamen City						
业态种类	编号	古厝名称	运营主体	运营定位			
	A1	两岸大学生乡建乡创 基地	台青创业基地	客户以台湾创业青年、两岸高校青年人群为 主,集接待、会客教育研学、文创展览功能为 一体			
文化业态	A2	闽台香文化馆	教育研学公司、研学及 台湾知名文旅人	客户以青少年研学团队为主,最多可供50人 左右开展百年闽南古厝、赏古法篆香,体验 手作勾香和制作天然香等文化研学类活动			
	A3	霞城电影院	台湾商人	客户以闽台电影文化爱好者为主,提供老电 影物件展览			
餐饮业态	B1	野行餐厅	餐厅主理人	客户以周边公司的白领人群为主,最多可供 30人左右的多人聚餐,形式新颖多样			
购物业态	C1	两岸 乡村 振 兴 合 作 接 待中心	台青创业基地	客户以台湾创业青年、两岸高校青年人群为 主,集接待、销售、文创展览功能为一体			
休闲业态	D1	厝・家茶空间	台湾商人	客户以茶文化爱好者、古玩鉴赏爱好者为 主,可供20人以上饮茶、古玩展示等			

表1 厦门市集美区城内村业态运营状况

2.4.3 村落人居环境整治,如图9所示。 推进人居环境整治



图 9 村落人居环境整治

Fig. 9 Improvement of village living environment

在村庄规划的制定过程中,租养人与村委会深入考量各类租养建筑的特定需求及其空间特性,增设 文化展示空间和绿化景观等。同时,通过古建筑保护、修缮及适应性改造等措施,在保持传统街巷格局、 延续村落风貌及历史氛围的基础上,促进街巷格局及周边环境的更新与优化,有效改善了村落的整体人 居环境,增强了村庄的吸引力和发展潜力。

# 3 传统村落建筑租养模式的经验启示

### 3.1 传统村落建筑租养模式的运行逻辑

传统村落建筑租养模式的运行逻辑,如图 10 所示。

首先,村民和村集体作为资产所有者,将建筑租赁 给具备专业能力和资源的第3方运营商。这一过程中, 使用权与责任明晰转移,并具有可持续性。第3方运营 商在承接管理责任后,依据要求和标准对建筑进行修缮 以传承其价值。完成修缮后,运营商引入相关产业和文 化活动,将传统建筑与现代功能相结合。

公私合作形式在其中发挥了关键作用,政府、非营



图 10 传统村落建筑租养模式的运行逻辑 Fig. 10 Operation logic of traditional village

buildings rent-and-maintenance model

利组织、私人或企业共同参与,发挥各方优势,提高效率和质量。这一系列流程与策略形成了良性的闭 环系统,促进了资产的持续增值与乡村的可持续发展。

### 3.2 专业赋能与多元灵活

传统村落建筑租养模式为热衷古建筑保护与更新的社会人士提供了广阔的参与途径。引入具备专 业经验和专业能力的租养人,借助这些人才的专业知识和创新思维,为传统建筑的合理保用提供坚实的 专业保障。而且该模式不再局限于传统的保护方式,而是鼓励承租人根据建筑特点和市场需求,进行适 应性功能更新。针对不同地区的村落特色和经济发展水平,可以灵活调整租养期限、费用标准和保护要 求等,使得该模式具有广泛的适应性。

### 3.3 高效的项目整合与协同

传统村落建筑租养模式既发挥了承租方全流程设计、改造和运营的专业优势,又具有对资产的控制 权和可持续发展的保障,并依托建筑租养平台,有效连接了租养人、村委会和传统建筑的产权所有者,实 现了传统村落建筑的保护与传承。

在这个模式中,平台使租养人更高效地承担起"EPC+O"(engineering-procurement-construction, operation)模式的职责,租养人不仅需要进行传统建筑的设计和改造(类似于 EPC 中的设计、采购、施工),还要全程负责后期的运营管理(O),通过文化活动、特色经营等多元化方式,激发传统建筑的活力。

此外,租养模式还借鉴了"TOT"(transfer-operate-transfer)模式。村委会将传统建筑的使用权转 让给更具专业能力的租养人,并在合同期内明确其运营和维护的责任。租养人通过经营回收投入成本, 合同期满后,建筑将交还给相关主体。平台在这一过程中发挥着桥梁作用,使得产权所有者、村委会与 租养人之间的权责清晰、合作顺畅。

### 3.4 乡村振兴背景下传统村落建筑租养模式提升策略

1)优化租养建筑选址。以租养人与运营人为主导的选址使租养建筑的点位分布与业态功能可能 缺乏宏观统筹。建议从能够最大限度发挥租养建筑自身优势,以及更好保护租养建筑的角度出发,综合 建筑价值、建筑功能置换可行性、区位条件、道路可达性、外部空间环境等,建立建筑适租性评价体系,优 化租养建筑选址。

2)优化租养建筑空间布局。优化租养建筑功能设置,合理布局,提高空间利用效率。同时,增强租养建筑功能空间的灵活性,根据需求进行动态调整,如结合季节或节日需要转换使用功能,满足不同类型的活动和租赁需求;并可分阶段进行改造和提升,根据实际需求和资金情况逐步实施。

3) 提升租养建筑运营管理。加强业态导入和文化赋能,附加产业链服务,吸引更多消费者并增强 黏性<sup>[19]</sup>。此外,租养建筑由租养人自行维护,若缺乏监管,可能由于压缩成本等原因造成维护不到位。 可引入村集体等监管主体,在明确其承担监督责任的同时,分配其部分收益,以促进建筑的持续有效修 缮和维护<sup>[20-21]</sup>。

### 4 结束语

在现阶段乡村振兴背景下,探索有效的传统建筑保用模式是推动传统村落有机保护更新的重要途

径。传统村落建筑租养模式以其创新的方式,为传统建筑保护探索出一条"以修代租,以用为养"的新路 径。该模式有效促进了传统村落物质空间及非物质文化的保护和传承,并通过培育乡村新产业促进经 济发展,为传统村落注入新的活力,具有较好的推广性和适用性。同时,该模式在实践中也暴露出一些 不足之处,将来可通过优化租养建筑选址、空间布局及运营管理等策略予以提升,促进传统村落建筑的 可持续保护和科学利用,推动乡村振兴。

### 参考文献:

- [1] 郐艳丽.我国传统村落保护制度的反思与创新[J].现代城市研究,2016(1):2-9. DOI:10.3969/j.issn.1009-6000. 2016.01.001.
- [2] 杨瑾,鄢金明,杨红.内生发展理念下传统村落保护与振兴路径探究[J].城乡规划,2022(2):39-50.DOI:10.12049/ j.urp.202202005.
- [3] 郝之颖.我国传统村落状况总体评价及几点思考:基于数据库的判识分析[J].中国名城,2017(12):4-13.
- [4] 管斌君,杨家祺.韧性视角下传统村落内历史建筑活化利用策略:以高桥镇新庄村为例[J].建筑与文化,2020(5): 130-131.
- [5] 王欢.美丽乡村建设背景下云南传统村落古建筑保护与功能提升研究:以云南华宁县海镜村为例[J].中国建材科技,2020,29(4):123-125.
- [6] 张萍,杨申茂,杜璞.论传统村落与历史建筑的保护利用[J].建筑经济,2021,42(5):159-160.
- [7] 夏青,罗彦,张兵.乡村建设为农民而建:传统村落保护的治理路径研究 [J].规划师,2021,37(10):26-33. DOI:10. 3969/j.issn.1006-0022.2021.10.004.
- [8] 王路.农村建筑传统村落的保护与更新:德国村落更新规划的启示[J].建筑学报,1999(11):16-21.
- [9] 杨大禹.传统民居及其建筑文化基因的传承[J].南方建筑,2011(6):7-11.DOI:10.3969/j.issn.1000-0232.2011. 06.002.
- [10] 张艳玲,毕程程.乡村振兴背景下传统村落建筑文化遗产的保护策略[J].美与时代(城市版),2023(3):22-24.
- [11] 福建省人大环资委,福建省人大常委会环城工委.关于我省历史文化名城名镇名村和传统村落保护工作情况的调研报告[J].福建省人民代表大会常务委员会公报,2023(5):60-64.
- [12] 巫新洁,吴黄华.临沧市传统村落集中连片保护利用的规划思考[J].居舍,2023(29):150-153,161.
- [13] 吴永发,张玲,汤晔峥.历史建筑保护的领养机制与社会力量参与途径研究[J].中国名城,2020(1):27-31.DOI: 10.19924/j.cnki.1674-4144.2020.01.004.
- [14] 常曦雯,施沁怡.苏州地区文物建筑认领认养实践研究[J].建筑与文化,2023(12):220-222. DOI:10.19875/j. cnki.jzywh.2023.12.071.
- [15] 蒋婷,张朝枝.侨乡建筑文化遗产流散产权三维关系的形成与特征:以开平碉楼为例[J].南京社会科学,2021(2): 166-172. DOI:10.15937/j. cnki. issn1001-8263. 2021. 02. 020.
- [16] 党煜婷,吴莞姝.信仰文化对近郊村落公共空间构成与演变的影响:以厦门城内村为例[J].中外建筑,2023(3): 85-90. DOI:10.19940/j. cnki. 1008-0422.2023.03.014.
- [17] 张智强."社区营造"模式下的农村社区更新研究:以厦门市集美区城内村为例[D].厦门:厦门大学,2013.
- [18] 传统村落海峡认养平台.认养指南[EB/OL].(2024-10-18)[2024-10-18].https://fj.zxctcl.com/index.php? m= default.guide&.id=1.
- [19] 福建省人民代表大会常务委员会.福建省人民代表大会常务委员会关于传承中华优秀传统文化,加强古厝古建 筑保护利用工作情况报告的审议意见[J].福建省人民代表大会常务委员会公报,2023(6):182-183.
- [20] 张国超.意大利建筑遗产认养的经验与启示[J].理论月刊,2020(1):110-118. DOI:10.14180/j.cnki.1004-0544. 2020.01.012.
- [21] 张国超.中国建筑遗产认养制度研究[J].南方文物,2018(4):267-272.

### (责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202409021

# 全景动态网络标志物的汽轮发电机 定子绕组热故障预警



# 曾思嘉,方瑞明,彭长青,庄杰农,尚荣艳

(华侨大学信息科学与工程学院,福建厦门 361021)

摘要: 将汽轮发电机组的集散控制系统(DCS)的定子各槽出水口水温监测点映射为复杂网络中的节点,从 而能够基于汽轮发电机 DCS 监测数据对定子绕组的热状态进行观测。根据 DCS 监测数据的时序特性,引入 全景动态网络标志物(L-DNM)法计算网络中各节点的特异性皮尔逊相关系数,以构建不同采样时刻的特异 性差分网络。量化网络中各节点的动态变化以进行故障预警,进而筛选出温度异常升高的关键节点,根据这 些关键节点构建动态网络标志物(DNM)以识别故障位置。结果表明:文中方法能够实现对早期故障的预警 和异常槽口位置的定位。

关键词: 汽轮发电机;定子绕组;热故障;全景动态网络标志物;故障检测;故障定位
 中图分类号: TM 311
 文献标志码: A
 文章编号: 1000-5013(2025)02-0201-08

# Early Warning of Thermal Fault in Turbine Generator Stator Winding of Landscape Dynamic Network Marker

ZENG Sijia, FANG Ruiming, PENG Changqing, ZHUANG Jienong, SHANG Rongyan

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

**Abstract:** The outlet water temperature monitoring points for each stator slot in the steam turbine generator group distributed control system (DCS) are mapped to nodes in a complex network, the thermal state of the stator windings can be observed based on the steam turbine generator DCS monitoring data. Based on the time series characteristics of the DCS monitoring data, the landscape dynamic network marker (L-DNM) method is introduced to calculate the specific Pearson correlation coefficients of each node in the network to construct specific differential networks at different sampling times. The dynamic changes of each node in the network are quantified for the purpose of fault prediction. Subsequently, critical nodes with abnormal increasing temperature are identified to construct a dynamical network marker (DNM) for fault location identification. The results show that the proposed method can achieve early warning of faults and localization of abnormal slot positions.

**Keywords**: steam turbine generator; stator winding; thermal fault; landscape dynamic network marker; fault detection; fault localization

**收稿日期**: 2024-09-02

通信作者: 方瑞明(1972-),男,教授,博士,主要从事电气设备在线监测与故障诊断的研究。E-mail:fangrm@hqu. edu. cn。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(52477048);福建省高校产学合作项目(2024H6009);福建省厦门市自然科 学基金资助项目(3502Z202373952);福建省厦门市产学研项目(2023CXY0201) 水内冷系统异常造成的定子绕组热故障是大型汽轮发电机组的主要故障之一,为确保机组安全稳定工作,对定子绕组热故障预警的研究具有重要意义<sup>[1]</sup>。由于无须安装额外的数据采集设备,基于发电机组的集散控制系统(DCS)数据的汽轮机组状态异常的检测方法具有显著的成本优势。近年来,基于DCS数据的汽轮机组的故障预警方法在发电机定子绕组热故障诊断领域应用较为广泛<sup>[24]</sup>。Pietrzak等<sup>[5]</sup>使用双谱分析结合卷积神经网络对定子绕组故障进行检测与分类,通过适当调整训练参数提高卷积神经网络模型的准确性并减少训练时间。Yang等<sup>[6]</sup>提出了一种将滑动窗口法和自编码器-长短期记忆网络(SAE-LSTM)结合的预警方法,通过动态调整预警阈值改善预警精度和及时性。但上述方法往往忽略了汽轮发电机定子绕组热故障与DCS数据多状态信息之间的耦合性。此外,汽轮机组定子绕组热故障的故障的故障标签数据也较为稀缺,难以满足基于人工智能的故障诊断方法对训练数据的需求。

为了解决这一问题,近年来将动态网络标志物(DNM)理论应用于复杂系统的状态临界转化<sup>[7]</sup>, DNM 能够描述带有噪声干扰的复杂多变量非线性系统在临界点附近动态特征,量化复杂系统状态临 界转变可能性<sup>[8•9]</sup>,对于及时检测类似于汽轮机组定子绕组热故障这种类型的问题具有很好的借鉴意 义。金亮<sup>[10]</sup>将 DNM 理论引入到汽轮发电机定子绕组热故障诊断之中,取得了较好的效果,为基于 DCS 数据驱动的汽轮机组热故障预警提供了一种新的思路,但该方法在确定动态网络关键节点时仍需 借助于聚类算法,计算量较大,影响了预警的实时性。基于此,本文对全景动态网络标志物的汽轮发电 机定子绕组热故障预警进行研究。

### 1 全景动态网络标志物方法

### 1.1 动态网络标志物

DNM 是一种基于临界慢化(CSD)和分叉理论(BT)提出的,用于检测复杂系统在发生临界转变之前的早期预警信号的方法。对于多变量复杂非线性系统,当其接近临界状态时,由于集体动力学效应,系统中至少存在一组主导性变量,这些变量之间具有高度相关性,被称为系统的关键状态变量<sup>[11-12]</sup>。当系统逐渐逼近临界状态时,系统的关键状态变量之间的相关性会显著增加,而其余状态变量之间的相关 性则会减弱。

关键状态变量要满足以下3个条件[13]。

1)关键状态变量中每个变量的标准差 (σ)显著增加。

2) 关键状态变量中每对变量的相关性(P<sub>in</sub>)增加。

3) 关键状态变量与其余状态变量的相关性(Pout)降低。

依据上述条件,对 DNM 进行量化设定,即

$$I = \sigma \cdot \frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{out}} + \varepsilon}$$
(1)

式(1)中: I为 DNM 的量化值; ε为避免分母为 0的小正常数。

在识别系统状态转变过程中,DNM 通过最大的 I 或大幅增加的 I 检测系统状态转变的预警信号。 DNM 在复杂系统的早期预警研究中展现出了显著的优势,传统的数据驱动方法依赖特定的模型框架, 导致其在应用范围上受到限制,难以在多样性和复杂性较高的系统中推广。同时,传统的数据驱动方法 有效性往往也依赖大量高质量的训练样本,而获取足够的训练样本在实际应用中面临诸多困难,样本不 足的问题可能会导致模型的泛化能力下降,难以满足故障诊断的需求。此外,传统数据驱动方法缺乏对 系统动态特性的考虑,难以捕捉到系统在临界状态下的突变行为,而 DNM 基于网络拓扑结构和动态变 化规律,不依赖于特定的模型,能够从时间序列数据中提取系统在临界转变前的关键特征,具有较强的 普适性<sup>[14]</sup>。同时,DNM 能够通过识别关键状态变量间的集体动力学效应,减少对大量训练样本的依 赖,提升对系统故障早期预警的准确性和可靠性<sup>[15-16]</sup>。

### 1.2 全景动态网络标志物

在使用 DNM 确定系统的关键状态变量的过程中,DNM 通常依赖于聚类算法或其他启发式程序进 行筛选。这些方法尽管能够识别出系统的关键状态变量,但往往需要大量的计算资源和时间。因此,在 实时性要求较高的场景中应用时,DNM 实用性会受到较大的影响,而全景动态网络标志物(L-DNM)可 通过构建特异性差分网络,快速、高效、实时筛选关键状态变量,无需提前确定,大大降低计算成本的同时,又提高了时效性。

L-DNM 算法有如下 2 个步骤。

1) 特异性差分网络的构建。选取 n 组的 k 个参考样本(Sample[i,j], $i=1,\dots,n;j=1,\dots,k$ ),构建 n 组参考样本数据的特异性差分网络(SDN)。为了获得每个 SDN 中的 L-DNM 模块,需要赋予网络中 每个节点一个局部得分。

首先,使用节点 x 及其一阶邻域内所有的节点(SDN 中与节点 x 有边相连的节点构成节点 x 的一 阶邻域)的差分表达偏差(D<sub>SDE</sub>)。

其次,计算节点 x 及其一阶邻域内所有的节点的平均特异性皮尔森相关系数(C<sub>in</sub>),以及节点 x 的 一阶邻域的节点和二阶邻域的节点之间的平均特异性皮尔森相关系数(C<sub>out</sub>)。

2) 计算特异性差分网络中每个节点的局部得分,并绘制三维景观图。基于 SDN 的节点 *x* 局部 DNM 得分(*S*(*x*))为

$$S(x) = D_{\text{SDE}} \cdot \frac{C_{\text{in}}}{C_{\text{out}}} \,^{\circ} \tag{2}$$

同理,对于 SDN 中的每个节点都可以得到相应的 S(x),将 S(x)放入坐标轴中,得到一个 x 轴为参 考样本编号、y 轴为参考样本组的组号,z 轴为S 的三维景观图。将三维景观图中各个网络中各节点的 得分情况作为检测即将到来的临界状态的特定标识符,某一个或几个节点其 S(x)的快速上升标志着临 界状态的出现。

L-DNM 算法示意图,如图1所示。



图 1 L-DNM 算法示意图 Fig. 1 Sketch diagram of L-DNM algorithm

# 2 基于 L-DNM 故障预警方法

作为发电机定子结构的重要组成部分,汽轮发电机的定子绕组是常见故障的主要部分。发电机定 子绕组故障按故障类型包含了电气故障、机械故障和冷却系统故障。其中,电气故障造成的绝缘损坏及 冷却系统水内冷出现异常都会造成发电机定子绕组热故障。据不完全统计,近年来,全国含有的 100 MW 及以上发电机中,定子绕组热故障的次数占发电机故障的 60%以上。为此,使用 L-DNM 对汽轮 发电机定子绕组热故障进行及时预警。

根据节 1.2 中介绍的方法即可利用发电机自身 DCS 系统中对于发电机定子绕组各槽出水口的温度监测节点,建立可反映发电机定子绕组温升变化情况的复杂网络。通过量化网络中各个节点的动态 变化对故障进行预警,并筛选出温度异常升高的关键节点,构建基于关键节点的动态网络标志物对故障 位置进行辨识。

基于 L-DNM 的汽轮发电机定子绕组热故障预警具体有如下 8 个步骤。

1)选取连续的 k 个采样时刻的实时 DCS 监测数据,将其中第 i+1~n+i 个采样时刻的监测数据 作为参考变量组,其中,n 表示参考变量组中所包含的采样时刻的总数。

2) 初始状态令 *i*=0,*i* 作为后续检测流程完成的标志,计算参考变量组内各个变量间的 *C<sub>n</sub>*,再加入 第 *n*+*i*+1 个采样时刻的监测数据,计算新变量组内各个变量间的 *C<sub>n+1</sub>*,将 *C<sub>n+1</sub>减去 <i>C<sub>n</sub>* 得到 *SC<sub>n</sub>*,即

$$C_{n}(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_{i+1} - \overline{x})(y_{i+1} - \overline{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_{i} - \overline{x})^{2} \sum_{i=1}^{n} (y_{i} - \overline{y})^{2}}},$$

$$SC_{n}(x,y) = C_{n+1}(x,y) - C_{n}(x,y),$$
(3)

式(3),(4)中: $x_{i+1}$ 和 $y_{i+1}$ 为参考样本组中 x和 $y;\overline{x}$ 和 $\overline{y}$ 分别为x和y在参考样本组中的均值。

3)使用置信度检验法对每一个 SC 进行检验,保留置信度水平高于 0.95 的 SC(两个变量存在边), 有边相连的样本构成即为某个样本的一阶邻域,与一阶领域内的样本有边相连的样本的为二阶邻域,建 立该采样时刻下的 SDN。

4)根据相关公式计算该采样时刻下的 SDN 的各个节点的 D<sub>SDE</sub>、C<sub>in</sub>、C<sub>out</sub>,进而得到各个节点在对 应采样时刻下的 S,即

$$D_{\text{SDE}} = \frac{1}{1+n_x} \left( \frac{\sigma_x}{\mu_x} + \sum_{y \in N_x} \frac{\sigma_y}{\mu_y} \right), \tag{5}$$

$$C_{\rm in} = \frac{1}{n_x} \sum_{y \in N_x} | s C_n(x, y) |, \qquad (6)$$

$$C_{\rm out} = \frac{1}{n_x m_x} \sum_{x' \in N_x, y' \in M_x} |sC_n(x', y')|_{\circ}$$
(7)

式(5)~(7)中: $N_x$ 为特异性差分网络中与节点 x 有边相连的节点构成的一阶邻域; $n_x$ 为一阶邻域中节 点的个数; $\sigma_x$ 为节点 x 的标准差; $\mu_x$ 为节点 x 的平均值; $\sigma_y$ 为节点 x 的一阶领域中的节点 y 的标准差;  $\mu_y$ 为节点 y 的平均值; $M_x$ 为特异性差分网络中与节点 x 的一阶邻域中节点有边相连的节点构成的二 阶邻域; $m_x$ 表示二阶邻域中节点的个数;x'为一阶邻域中的节点 x';y'为一阶邻域中的节点 y'。

5) 判断 *n*+*i*+1 是否等于 *k*,若不满足,令 *i*=*i*+1,返回步骤 2),继续得到不同采样时刻下的 SDN 内各节点的 S;若满足,则进入步骤 6);

6) 计算各采样时刻内各变量的 S 的标准差,即

$$\sigma_{S_{i+1}} = \sqrt{\frac{\sum \left[S_i(j) - \mu_{S_i}\right]^2}{L}} \quad . \tag{8}$$

式(8)中: $\sigma_{S_{i+1}}$ 为除去参考变量组的第 1~n+1 个采样时刻后,剩余的第 i 个采样时刻的各节点的 S 的标准差;L 为第i 个采样时刻的特异性差分网络中的节点个数; $S_i(j)$ 为k 个采样时刻中除去变量组的第 1~n+1 个采样时刻后,剩余的第i 个采样时刻的第j 个节点的 S,j=1、2、3、…、L; $\mu_{S_i}$ 为除去作为参考变量组的第 1~n+1 个采样时刻后,剩余第i 个采样时刻的各节点的 S 的平均值。

7) 以两个相邻采样时刻构成一个采样时间组,在该组中计算两个相邻采样时刻的  $\sigma_{s_{i+1}}$  的偏差 a, 其中, $a = \frac{|\sigma_{s_{i+1}} - \sigma_{s_i}|}{\sigma_{s_i}}$ 。

8) 若 a ≤ 0.05,表明各槽 S 处于相对平稳的状态,判断发电机处于正常运行状态;若 a>0.05,表明 某一个或多个槽的 S 突然上升,说明出水口温度出现了异常变化,发电机到达临界状态,此时生成预警 信号,确定三维景观图中 S 发生突然上升的槽口为检修的关键节点,结合检修结果确定局部得分发生 突然上升的槽口是否为所述故障位置。

### 3 实例分析

为了验证提出的方法能够实现对定子绕组热故障的早期预警和异常槽口位置的定位,案例采用某发电机 3 号机组 DCS 采集的 2020 年度监测数据进行验证,型号为 QFSN-1000-2-27,冷却方式为水氢

氢,即定子绕组水内冷。DCS每10 min进行一次采样。

### 3.1 正常运行情况分析

Fig. 2

对汽轮发电机处于正常运行状态时的 DCS 历史监测数据进行分析,选取 2020 年 7 月 18 日-7 月 22 日的定子冷却出水口温度数据进行测试,任意选取一个时刻,分别向前、后截取 29,20 个采样时刻数据。正常样本各采样时刻的 σs 和各采样时间组的偏差 a,如图 2 所示。



(a) 各采样时刻的 os

(b) 各采样时间组的偏差 a

### 图 2 正常样本各采样时刻的 os 和各采样时间组的偏差 a

 $\sigma_{\rm S}$  at each sampling time and deviation *a* at each sampling time group of normal sample

由图 2 可知:正常样本中各采样时间组的 *a* 均小于 0.05,而且各采样时刻的 σ<sub>s</sub> 差异较小。正常样 本三维景观图,如图 3 所示。



图 3 正常样本三维景观图

Fig. 3 Three-dimensional landscape map of normal sample

由图 3 可知:在正常情况下,42 个定子冷却出水口温度的 S 均处于 2.5×10<sup>-3</sup>~7.0×10<sup>-3</sup>的范围 内,没有出现某一个或几个定子槽出水口温度的 S 明显高于其他定子槽出水口温度,说明无异常情况, 符合检修记录。

### 3.2 故障情况分析

采用汽轮发电机处于故障状态时的 DCS 历史监测数据进行分析,选取 11 月 10 日-14 日的定子冷 却出水口温度数据进行测试,根据系统报警时刻,分别向前、后截取 29、20 个采样时刻数据,故障样本各 采样时刻的 σ<sub>s</sub> 和各采样时间组的偏差 *a*,如图 4 所示。

由图 4 可知:*a* 大于 0.05 的采样时间组是第 9 组,采样时刻 90、100 内的 σ<sub>s</sub> 差异较大,采样时刻 100 内某一个或多个槽的 S 突然上升。

故障样本三维景观图,如图5所示。单槽故障样本不同采样时刻各槽口的S,如图6所示。

由图 6 可知:S 可以分为 3 类,第 1 类为正常状态,42 个槽口的 S 基本稳定在 5×10<sup>-3</sup>~25×10<sup>-3</sup> 的范围内;第 2 类为临界状态,5、10、18 号定子槽出水口温度的 S 变化为所有数值中最高位,且远大于 其他 41 个槽口;第 3 类为故障状态,42 个槽口的 S 基本稳定在 2×10<sup>-3</sup>~3×10<sup>-3</sup> 的范围内;各槽口的



图 4 故障样本各采样时刻的 os 和和各采样时间组的偏差 a

Fig. 4  $\sigma_S$  at each sampling time and deviation *a* at each sampling time group of fault sample



图 5 故障样本三维景观图

Fig. 5 Three-dimensional landscape diagram of fault sample

S 在第 10 个采样时刻发生突变,一直持续到第 32 个采 样时刻,42 个槽口的 S 重新恢复稳定;图 6(b)发出的预 警信号比图 6(d)提前了 210 min。

正常样本下,L-DNM 检测结果为正常,DNM 检测 结果为未见异常,检修结果为未见异常;故障样本下, L-DNM检测结果为故障,在采样时刻9发出预警,DNM 检测结果为在采样时刻20发出预警,检修结果为在5、 10、18号槽口出现异常。因此,在故障样本中,L-DNM 比传统DNM 提前发出预警,同时,传统DNM 的有效性 往往取决于输入特征量的筛选的准备,而 L-DNM 可事



<sup>(</sup>b) 由正常状态转变到临界状态





<sup>2025</sup> 年





(d) 正常状态

(e)临界状态转变到故障状态

图 6 单槽故障样本不同采样时刻各槽口的 S Fig. 6 S at each slot outlet of fault sample at different sampling time

先对 DNM 成员进行选择,无需使用以往研究中的常用的聚类算法或者其他启发式程序。

以上实例分析结果表明,以两个相邻采样时刻构成一个采样时间组,计算两个相邻采样时刻的标准 差 a,当发电机从正常状态进入临界状态时,该采样时间组内 a 与对应采样时间点的故障定子绕组槽口 温度 S 会发生变化。当 a ≪0.05,各槽口的 S 处于相对平稳的状态,判断发电机处于正常运行状态;若 a>0.05,某一个或多个槽口的 S 突然上升,说明某一个或多个槽口的出水口温度出现了异常变化,发 电机到达临界状态,发生变化的槽口即为关键变量,而发生变化的采样时刻表示发电机在该时间由正常 状态转化为临界状态,此时发出预警信号;由临界状态转换至故障状态后,各槽口的 S 重新回到相对平 稳的状态。建立的基于 L-DNM 的汽轮发电机定子绕组热故障预警模型能够在故障出现前发出预警信 号,对运行状态变化的临界进行定时定点的检测,验证了其具有一定的工程实用价值。

# 4 结论

鉴于目前汽轮发电机定子绕组热故障诊断存在的风险和挑战,提出一种基于机组定子各槽出水口 DCS 监测水温时序数据的定子绕组热故障预警方法,只需使用各槽口水温监测数据构建特异性差分网 络,无需建立特定模型。通过评估各个采样时刻的特异性差分网络中各节点的偏差和相关性,计算各节 点的局部得分,根据各节点的局部得分的动态变化进行故障预警,并根据绘制的三维景观图进一步确定 故障位置。

1) 基于动态网络标志物理论,仅使用少量数据构建特异性差分网络就可以在汽轮发电机定子绕组 热故障发生之前及时识别出临界点。

2) 采用三维景观图中各个节点的 S 可视化地筛选 DNM 成员,计算成本低、时效性较好。

3) 文中方法属于一种免模型预警方法,仅需采用机组自身 DCS 数据即可实现缺陷临界状态的提 前预测。然而,文中方法仅验证了在连续的时序监测数据中具有良好的预警效果,当数据由于某些原因 出现缺失而导致不连续时,文中方法是否同样能够准确地对故障进行预警是今后需要继续研究的工作。

# 参考文献:

- [1] 赵洪森,戈宝军,陶大军,等.大型核电汽轮发电机定子内部短路故障时局部电磁力分布研究[J].电工技术学报, 2018,33(7):1497-1507. DOI:10.19595/j. cnki.1000-6753. tces. 170163.
- [2] 孙磊.大型发电机组定子水路堵塞故障分析[J].中国高新技术企业,2016(22):55-57.DOI:10.13535/j.cnki.11-4406/n.2016.22.027.
- [3] FANG Ruiming, LIU Zilin, PENG Changqing, et al. Fault diagnosis of inter-turn short circuit in turbogenerator rotor windings based on vibration-current signal fusion[J]. Energy Reports, 2023, 9:316-323. DOI:10.1016/j.egyr. 2023. 03.019.
- [4] LI Xingshuo, LIU Jinfu, BAI Mingliang, et al. An LSTM based method for stage performance degradation early warning with consideration of time-series information[J]. Energy, 2021, 226:120398. DOI: 10.1016/j. energy. 2021. 120398.

- [5] PIETRZAK P, WOLKIEWICZ M, ORLOWSKA-KOWALSKA T. PMSM stator winding fault detection and classification based on bispectrum analysis and convolutional neural network[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 70(5);5192-5202. DOI: 10.1109/TIE. 2022. 3189076.
- [6] YANG Yulei, ZHANG Shuming, SU Kaisen, et al. Early warning of stator winding overheating fault of water-cooled turbogenerator based on SAE-LSTM and sliding window method[J]. Energy Reports, 2023, 9: 199-207. DOI: 10. 1016/j. egyr. 2023. 02. 076.
- [7] CHEN Luonan, LIU Rui, LIU Zhiping, et al. Detecting early-warning signals for sudden deterioration of complex diseases by dynamical network biomarkers[J]. Scientific Reports, 2012, 2(1): 342. DOI: 10.1038/srep00342.
- [8] FANG Ruiming, WU Minling, SHANG Rongyan, et al. Identifying early defects of wind turbine based on SCADA data and dynamical network marker[J]. Renewable Energy, 2020, 154: 625-635. DOI: 10. 1016/j. renene. 2020. 03. 036.
- [9] 张燕,方瑞明.基于油中溶解气体动态网络标志物模型的变压器缺陷预警与辨识[J].电工技术学报,2020,35(9): 2032-2041. DOI:10.19595/j. cnki. 1000-6753. tces. 190295.
- [10] 金亮. 基于 DCS 的发电机定子绕组热故障诊断研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2021.
- [11] ORMAN G K, TÜRE N, BALCISOY S, et al. Finding proper time intervals for dynamic network extraction[J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2021, 2021 (3): 033414. DOI 10. 1088/1742-5468/abed45.
- [12] MATSUMORI T, SAKAI H, AIHARA K. Early-warning signals using dynamical network markers selected by covariance[J]. Physical Review E, 2019, 100(5):052303. DOI:10.1103/PhysRevE. 100.052303.
- [13] CHEN Pei, CHEN E, CHEN Luonan, et al. Detecting early-warning signals of influenza outbreak based on dynamic network marker[J]. Journal of Cellular and Molecular Medicine, 2019, 23(1): 395-404. DOI:10.1111/jcmm. 13943.
- [14] KAMAL M A S,OKU M, HAYAKAWA T, et al. Early detection of a traffic flow breakdown in the freeway based on dynamical network markers[J]. International Journal of Intelligent Transportation Systems Research, 2020, 18: 422-435. DOI:10.1007/s13177-019-00199-1.
- [15] YANG Kun, XIE Jialiu, XIE Rong, et al. Real-time forecast of influenza outbreak using dynamic network marker based on minimum spanning tree[J]. BioMed Research International, 2020, 2020(1):7351398. DOI:10.1155/2020/ 7351398.
- [16] HUANG Xiaoqi, HAN Chongyin, ZHONG Jiayuan, et al. Low expression of the dynamic network markers FOS/ JUN in pre-deteriorated epithelial cells is associated with the progression of colorectal adenoma to carcinoma[J]. Journal of Translational Medicine, 2023, 21(1): 45. DOI: 10. 1186/s12967-023-03890-5.

(责任编辑:陈志贤 英文审校:吴跃勤)

DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 202409017



# 软硬件协同设计的异构 CNN 加速器

谢志豪1,2,李国刚1,2

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院,福建 厦门 361021;2. 华侨大学 厦门市专用集成电路与功率半导体系统重点实验室,福建 厦门 361021)

摘要: 为解决卷积神经网络(CNN)高效部署的挑战,提出一种基于软硬件协同设计的异构 CNN 加速器,并 在 YOLOv4-tiny 模型上进行验证。搭建基于高级精简指令集机器(ARM)处理器与现场可编程门阵列(FG-PA)的异构系统。通过高层次综合(HLS)将可并行执行的计算单元映射为 FPGA 端寄存器传输级(RTL)知 识产权(IP);ARM 处理器控制系统的协同工作与 IP 核的调度,最终实现前向推理加速。结果表明;该异构 CNN 加速器的工作频率为 130 MHz,功耗为 2.809 W,推理速度达到 511 ms,吞吐率为 13.40 GOPS;相较于 桌面端图形处理单元(GPU)、中央处理单元(CPU)及主流嵌入式 AI 加速平台,该设计在推理速度与功耗之 间取得了良好平衡,同时关键性能指标均有显著提升;所设计异构 CNN 加速器在边缘计算场景中表现出优 异性能,能够满足实际部署需求。

关键词: 现场可编程门阵列(FGPA);硬件加速;软硬件协同设计;高层次综合 中图分类号: TP 391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2025)02-0209-08

# Heterogeneous CNN Accelerator Based on Hardware-Software Co-Design

XIE Zhihao<sup>1,2</sup>, LI Guogang<sup>1,2</sup>

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

2. Xiamen Key Laboratory of ASIC and Power Semiconductor System, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** To address the challenges associated with the efficient deployment of convolutional neural network (CNN), a heterogeneous CNN accelerator based on a hardware-software co-design is proposed and validated on the YOLOv4-tiny model. The heterogeneous system is built with an advanced reduced instruction set machine (ARM) processors and a field programmable gate array (FPGA). Through high-level synthesis (HLS), the computational units that can be executed in parallel are mapped to a register transfer level (RTL) intellectual property (IP) on FPGA. The ARM processors manage the collaborative operations of the system and the scheduling of the IP core, ultimately achieving acceleration of forward inference. The results show that the heterogeneous CNN accelerator operates at a frequency of 130 MHz, with a power consumption of 2.809 W and an inference speed of ms, achieving a throughput of 13.40 GOPS. Compared to desktop graphics processing unit (GPU), central processing unit (CPU) and mainstream embedded AI acceleration platforms, the proposed design achieves a favorable balance between inference speed and power consumption, while significantly improving key performance indicators. The designed heterogeneous CNN accelerator demonstrates excellent performance in edge computing scenarios and meets the requirements for practical deployment.

**收稿日期:** 2024-09-25

通信作者: 李国刚(1973-),男,副教授,博士,主要从事电路系统和神经网络的研究。E-mail;lgg@hqu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61370007);福建省高校产学合作项目(2023H6013)

**Keywords:** field programmable gate array (FPGA); hardware acceleration; hardware-software co-design; high-level synthesis

卷积神经网络(CNN)在特征提取、特征整合等方面的优异性能为目标检测等计算机视觉任务注入 了强大动能。近年来,基于 CNN 的目标检测算法已在工业检测、人脸识别、自动驾驶等边缘端场景表 现出广泛的应用潜力。随着算法应用场景的拓宽和硬件技术的发展,在高性能、低功耗、灵活及通用的 边缘端平台部署 CNN 目标检测算法已成为新的研究热点<sup>[1]</sup>。然而,在实际部署过程中仍然存在瓶颈。

一方面,CNN 模型的计算复杂度和参数量不断膨胀,对硬件平台提出了更高的要求。主流的 CNN 加速平台包括图形处理单元(GPU)和中央处理单元(CPU)为代表的通用性芯片、以专用集成电路 (ASIC)为代表的全定制化芯片和以现场可编程门阵列(FPGA)为代表的半定制化芯片等。

GPU 具备高强度的并行计算性能,尤其适合处理 CNN 中的计算密集型任务。然而,巨大的功耗 开销限制了 GPU 在边缘端的应用<sup>[2]</sup>。虽然 CPU 在计算效率等方面不如 GPU,但其擅长处理复杂的逻 辑控制等控制密集型任务<sup>[3]</sup>。而高级精简指令集机器(ARM)处理器作为嵌入式 CPU 平台,表现出功 耗低、面积小、便携性强及控制流指令精简等优点<sup>[4]</sup>,在边缘端的应用中具有优势。ASIC 是针对特定 应用定制化的集成电路,拥有卓越的计算效能。然而,ASIC一旦制造完成,内部的电路结构将无法进 行更改⑸,导致设计缺乏灵活性。FPGA 利用可配置的逻辑资源实现半定制化的功能⑸,具有可重构和 低功耗等特点。虽然 FPGA 加速算法的整体效果不及 ASIC 芯片,但在一些对于开发周期有较高要求 的应用场景中,研发人员往往倾向于采用 FPGA 对算法进行迭代设计和验证。此外,FPGA 片上的数 字信号处理器(DSP)能够以高效的流水线(Pipeline)方式执行 CNN 中的乘法和加法等运算操作。综上 所述,ARM和 FPGA 在功耗、并行性、可重构性及通用性等方面具有显著优势,吸引了国内外学者的广 泛关注。高树静等<sup>[7]</sup>将优化后的 Adaboost 算法部署到硬件平台,利用 ARM 处理器实现人脸检测任 务。嵇达龙等<sup>[8]</sup>采用 ZYNQ 平台搭建行人检测系统, FPGA 端的检测速度是 ARM 端的 45 倍。Lu 等<sup>[9]</sup>在 FPGA 上实现了稀疏 CNN 加速器,采用数据复用策略降低片内和片外的访存压力。Bai 等<sup>[10]</sup> 对深度可分离卷积进行改进,使其在不同规模的 FPGA 上具有更好的伸缩性。Ma 等<sup>[5]</sup>采用循环展开 和循环分块策略设计了基于单指令多数据(SIMD)架构的 CNN 加速器。然而,上述研究单独采用 ARM 处理器或 FPGA 实现 CNN 加速器,并未结合二者处理 CNN 中控制密集型任务和计算密集型任 务的独特优势。

另一方面,开发工具的不完善也在一定程度上导致了算法迭代与硬件实现之间的不平衡。尽管基于寄存器传输级(RTL)的 FPGA 建模在细粒度上的把控更加到位,但存在设计复杂、效率低等缺点,因而不利于硬件加速器的快速实现。在这种背景之下,高层次综合(HLS)应运而生。HLS 是一种将高级语言综合成硬件描述语言(HDL),进而生成 RTL 级网表的技术栈。Millón 等<sup>[11]</sup>分别采用 HDL 和HLS 设计了 Sobel 滤波器,以评估二者在图像处理算法方面的性能差异,结果表明,HDL 设计在资源占用和推理延时方面具有一定的优势,然而其开发周期约为 HLS 设计的 3.17 倍。由此可见,HLS 能够实现 CNN 算法的高级快速原型设计。

针对 CNN 目标检测算法在边缘端场景的应用需求,本文采用软硬件协同设计的方法构建基于 ARM+FPGA 的异构 CNN 加速器。

# 1 相关理论

### 1.1 YOLOv4-tiny 模型

当前 CNN 目标检测算法主要分为两类:一类是以 R-CNN<sup>[12]</sup>、Fast R-CNN<sup>[13]</sup>和 Faster R-CNN<sup>[14]</sup> 为代表的两阶段目标检测算法,这类算法计算流程复杂,但检测精度高;另一类是以 YOLO<sup>[15]</sup>系列为代 表的一阶段目标检测算法,此类算法在精确度方面做出了一定的妥协,以此换取更精简的工作流程和更 快的检测速度。综合考虑模型自身的性能与网络复杂度及硬件平台的算力和存储资源,选择采用 YOLOv4-tiny 算法验证所设计的异构 CNN 加速器。

YOLOv4-tiny 模型结构,如图1所示。骨干网络 CSPDark53-tiny 由3个 Conv\_BN\_LeakyRelu 模

块和 3 个 Resblock body 模块堆叠而成。其中, Conv\_BN\_LeakyRelu 模块包含二维卷积(Conv2d)、批 归一化层(BN)和 LeakyRelu 激活函数; Resblock body 模块则由 4 个 Conv\_BN\_LeakyRelu 模块、1 个 Maxpool 模块和 2 个 Concat 模块构成。在 Resblock body 模块中, 输入 Cin 经过 Conv\_BN\_LeakyRelul 后分成两支, 一支为 route1, 另一支经过 Conv\_BN\_LeakyRelu2 得到 route2; route2 与其经过 Conv\_ BN\_LeakyRelu3 的输出进行通道拼接(Concat1)后作为 Conv\_BN\_LeakyRelu4 的输入, 并得到 feat; feat 与 route1 经过通道拼接(Concat2)后传入 Maxpool, 得到最终输出。





Cout/2

图 1 YOLOv4-tiny 模型结构

Fig. 1 YOLOv4-tiny model structure

特征金字塔网络(FPN)由 2 个 Conv\_BN\_LeakyRelu 模块、1 个 Upsample 模块和 1 个 Concat 模块 构成。CSPDarknet53-tiny 的最后一层有效特征 feat2 经过 2 个 Conv\_BN\_LeakyRelu 模块后输入 Upsample 进行上采样,输出结果再与前一层有效特征即 Resblock body3 的池化前特征 feat1 进行 Concat

操作。检测头(YOLO Head)由 Conv\_BN\_LeakyRelu 模块和 Conv2d 构成。YOLOv4-tiny 模型含有 2 个 YOLO Head,分 别输出 Cout1 和 Cout2,其维度分别为(13,13,class)和(26, 26,class),其中,class 表示数据集的类别数。

### 1.2 高层次综合开发

HLS 将高层次算法映射到 RTL 级网表的过程包括调度 阶段、初始绑定阶段和目标绑定阶段,如图 2 所示。调度阶段 将乘法运算和加法运算安排在 2 个时钟周期内完成,初始绑 定阶段则将这些运算绑定到乘法器和加法器。FPGA 片上的 DSP48E1 单元本质上是具有专用硬件乘法器的 CPU,能够在



图 2 HLS 调度和绑定

Fig. 2 Scheduling and binding of HLS

1个时钟周期内完成乘法和加法运算。因此,在目标绑定阶段由 DSP48E1 单元执行相应的运算操作。

# 2 异构 CNN 加速器软硬件协同设计

### 2.1 顶层设计

异构系统的顶层设计架构,如图 3 所示。ARM 处理器是异构系统的中央控制单元,通过协调和控制接口映射、数据交互、内存管理及任务调度等核心功能,确保系统各部分的协同运行。FPGA 端加速 IP 核集成了标准卷积、逐点卷积、最大池化及上采样等通用计算单元。加速 IP 作为协处理器,由 ARM 处理器挂载与驱动。

1) 接口映射。ARM 处理器和 FPGA 之间通过高级可拓展接口(AXI)进行高效通信。AXI 可分

为高性能的 AXI HP 及通用的 AXI GP。其中, AXI HP 主要用于传输高速数据流, 而 AXI GP 主要负责传 递控制流指令。

2)数据交互。输入特征图、权重、偏置和输出特征 图对应的数据流传输端口分别绑定到 AXI\_ IFM、AXI\_ Wt、AXI\_Bias 及 AXI\_OFM。而前向推理阶段所需的 算子超参数(计算核参数 k 等)及加速 IP 核的配置状态 等,则通过 AXI GP 传输。

3) 内存管理。异构系统采用"加载-计算-写回"的 三级计算通信机制,从而优化数据传输路径,并补偿传 输延时。ARM处理器将外部存储(SD卡)存放的数据 流加载到主存(DDR)中,并通过数据缓存(Dcache)存 储。这些数据流通过 AXI HP 到达 FPGA 片上缓存区





(\*\_buff),进而以多维数组的形式参与计算任务。输出特征图同样经过 Dcache-DDR 环路写回 SD 卡。

4)任务调度。YOLOv4-tiny 模型包含不同类型的计算单元。因而,ARM 处理器通过传送计算核参数 k,驱动标准卷积(k=3)、逐点卷积(k=1)、最大池化(k=2)或上采样单元(k=0),并执行加速计算。最终,通过多次调用加速 IP 核实现前向推理加速。

### 2.2 FPGA 端卷积单元设计

2.2.1 卷积并行计算 卷积单元的乘累加计算占据了 CNN 前向推理过程中 90%以上的计算量<sup>[16]</sup>。因此,重点讨论卷积单元的设计方案。假设输入特征图的维度为  $N_{if} \times N_{ix} \times N_{iy}$ ,卷积核的维度为  $N_{of} \times N_{if} \times N_{kx} \times N_{ky}$ ,卷积步长为  $s_x \times s_y$ ,则输出特征图的维度为  $N_{of} \times N_{ax} \times N_{oy}$ ,且存在如下关系:

$$N_{ix} = (N_{ax} - 1) \times s_x + N_{kx} , \qquad (1)$$

$$N_{iy} = (N_{oy} - 1) \times s_y + N_{ky} \,. \tag{2}$$

HLS设计采用多重 for 循环表示卷积计算,如图 4 所示。CNN 中存在 4 种并行计算架构,即卷积 核内并行、输入通道级并行、输出通道级并行及卷积窗口并行。图 4 中:第 5~6 行、第 4 行及第 1 行代 码分别对应前 3 种并行计算架构。第 1、4、5、6 行代码分别遍历卷积核的输出通道、输入通道、宽度和高 度,数据块尺度为 $n_o \times n_i \times k_x \times k_y$ ;而第 1~3 行代码则遍历输出特征图的各维度,数据块尺度为 $n_o \times x \times y_o$  因此,该伪代码的每次循环迭代读取输入特征图上  $n_i \times [(x-1) \times s_x + k_x] \times [(y-1) \times s_y + k_y]$ 个像素,以及卷积核中  $n_o \times n_i \times k_x \times k_y$  个权重值,并执行乘累加运算。

多维数组通常被映射为 BRAM 结构,进而构成 FPGA 片上的缓存区。为适应 BRAM 的容量限制,对数据进行分块处理(输入通道分块为 T<sub>if</sub>、输出通道分块为 T<sub>of</sub>、输出特征图数据块的高度为 T<sub>oy</sub>、宽度为 T<sub>ax</sub>,分别对应 n<sub>i</sub>、n<sub>o</sub>、y 及 x 的批处理强度)。同时,通过高层次指令 HLS Array Partition 对多 维数组的指定维度进行切分,从而数据块的局部并行处理。

Algorithm 1 Convolutional Operation using for loops
1: for $(n_o = 0; n_o < N_{of}; n_o + +)$ do
2: for $(y = 0; y < N_{oy}; y + +)$ do
3: <b>for</b> $(x = 0; x < N_{ox}; x + +)$ <b>do</b>
4: <b>for</b> $(n_i = 0; n_i < N_{if}; n_i + +)$ <b>do</b>
5: <b>for</b> $(k_y = 0; k_y < N_{ky}; k_y + +)$ <b>do</b>
6: <b>for</b> $(k_x = 0; k_x < N_{kx}; k_x + +)$ <b>do</b>
7: $Pixel_{ofm}(n_o; x; y) + = Pixel_{ifm}\{n_i; (x-1) \times s_x + k_x; (y-1) \times s_y + k_y\} \times$
$Weight(n_o; n_i; k_x; k_y)$
8: end for
9: end for
10: end for
11: $Pixel_{ofm}(n_o; x; y) += bias(n_o)$
12: end for
13: end for
14: end for

### 图 4 多重 for 循环表示卷积计算

Fig. 4 Representation of convolutional computation using multiple for-loops

2.2.2 卷积单元硬件结构 卷积单元计算架构,如图 5 所示。采用循环分块策略分批次加载尺度为

 $T_{if} \times T_{ix} \times T_{iy}$ 的输入特征图分块及尺度为 $T_{of} \times T_{i,f} \times N_{kx} \times N_{ky}$ 的卷积核分块。输入特征图在内存中存储的基地址(baseaddr)为 $c \times N_{ix} \times N_{iy}$ +row $\times N_{iy}$ +col,其中,c、row和 col分别表示输入特征图的通道索引,像素的行索引与列索引。通过设定行偏移量(rowoffset)为 $T_{iy} \times N_{iy}$ ,得到行缓存区的偏移地址为 in+baseaddr+rowoffset+ $T_{ix}$ ,其中,in为指向输入缓存区(ifm\_buff)的指针。在电路设计中,使用先入先出(FIFO)及寄存器(Regs)将来自ARM 端的数据流推入FPGA片上缓存区。随后,依次对输入缓存区和权重缓存区(wt\_buff)中的数据进行乘累加运算,计算结果进一步送入 LeakyRelu 激活函数单元,从而完成非线性映射。然后,对该部分的输出叠加偏置(bias)。最终生成的输出特征图被写回到输出缓存区(ofm\_buff)。



图 5 卷积单元计算架构



### 2.3 ARM 端控制调度设计

ARM 端控制调度程序流程图,如图 6 所示。



图 6 ARM 端控制调度程序流程图

Fig. 6 Program flow chart of controlling and scheduling on ARM

1)初始化 SD 卡读写函数。首先,读取浮点数格式的输入数据。接着,对输入数据进行缩放处理, 并将其存放到目标数组中。在此过程中,将浮点数转换为定点数,从而进一步降低 FPGA 的计算负载。

2) 搭建前向传播网络。Conv\_BN\_LeakyRelu 模块是 YOLOv4-tiny 模型的基础组成单元。因此, 定义 Conv\_BN\_LeakyRelu 函数,并初始化前向推理子函数及加载参数子函数。通过堆叠 Conv\_BN\_ LeakyRelu 模块,进而构建前向传播网络。此外,CBL 模块的作用体现在两方面:一方面,初始化数据寄 存器,从而获取内存数据的基地址、偏移地址及加速 IP 核的配置状态等;另一方面,映射 AXI,以实现 ARM 处理器与 FPGA 双端的计算通信。通过在前向推理子函数中多次调用 CBL 模块,生成中间计算 结果,从而驱动上层计算任务。

3)执行前向推理。顺序执行前向推理网络,根据 k 值挂载对应的计算单元,从而实现前向推理加速。在写回阶段,首先,将输出特征图反量化为浮点数格式,以便后续进行解码工作。接着,通过输出特征图与 16 进制数 0xfffffe0 的按位与操作,确保数据对齐。最后,通过 Xil\_DcacheFlushRange 函数和

Xil\_DcacheInvalidateRange 函数将数据从 Dcache 刷新到 DDR 中,并流回 SD 卡。此过程实现了 ARM 处理器与主存之间数据传输的一致性。

#### 实验结果与分析 3

### 3.1 实验环境

使用 ZYNQ 7020 异构计算平台,主控芯片为 Xilinx XC7Z020clg400-2。采用 6 核心 12 线程 Intel i5-12490F CPU 和 Nvidia RTX 3060(12 GB)GPU。使用 Dashcam<sup>[17]</sup>数据集,其中包括训练集 16 200 张、验证集1800张、测试集2000张。

### 3.2 资源评估

异构加速器的资源消耗情况,如表1所示。表1中:DSP 主要用于构建卷积单元中的乘法器和加法 器,使用率为96.82%;BRAM 主要用于构建缓存区,使用率为70.36%;FIFO 主要用于缓存数据,使用 率为 46.53%。

表1 异构加速器的资源消耗情况

Tab. 1Resource consumption of heterogeneous accelerator							
逻辑资源	资源总量	资源使用量	资源使用率/%	逻辑资源	资源总量	资源使用量	资源使用率/%
LUT	53 200	37 815.00	71.08	LUTRAM	$17 \ 400$	6 984.00	40.14
FIFO	106 400	49 511.00	46.53	BRAM	140	98.50	70.36
DSP	220	213 00	96 82	BUFG	32	1 00	3 13

### 3.3 对比实验

不同硬件平台上 CNN 加速器的性能对比,如表 2 所示。首先,通过与桌面端 GPU(RTX 3060)和 CPU(Intel I5-12490F)的对比可以看出,异构 CNN 加速器的推理速度约是 Intel I5-12490F CPU 的 28 倍。尽管异构 CNN 加速器在推理速度方面不及 RTX 3060,但功耗仅为其 7.2%。另外,桌面端平台在 体积及便携性等方面均难以满足边缘端的应用需求。其次,将异构 CNN 加速器与同样基于 ARM 处理 器的嵌入式 AI 加速平台进行对比。文献[18]分析了在 ASUS Tinker Edge R 与 Google Coral 上部署 超轻量级 MobileNet-v2 的性能指标。尽管 ASUS Tinker Edge R 与 Google Coral 在推理速度方面略 优于异构 CNN 加速器,但这种优势源于其定制化的 AI 芯片(NPU/TPU)。此外, ASUS Tinker Edge R与Google Coral 配备了主频更高的 ARM 处理器及更高端的主存。类似地,文献[19]在嵌入式端 GPU(Nvidia Jetson nano)上部署 YOLOv3-tiny 模型,其推理速度的相对优势同样源自高度优化的多 核 GPU。由此可见,上述 AI 加速平台执行 CNN 算法时所取得的性能表现依赖于内部高端硬件的支 持。然而,这不可避免地带来了更高的功耗开销。

表 2 不同硬件平台 CNN 加速器性能对比

设计来源	硬件平台	加速引擎	主频/GHz	DDR 配置	模型	推理速度/ms	功耗/W
文献[18]	ASUS Tinker Edge R	ARM Cortex A72+NPU	1.400	4 GB LPDDR4/ 2 GB LPDDR3	MobileNet-v2	153.00	7.500~7.800
文献[18]	Google Coral	ARM Cortex A53+TPU	1.500	1 GB LPDDR4 @1 600 MHz	MobileNet-v2	277.00	_
文献[19]	Nvidia Jetson nano	ARM Cortex A57+GPU	1.430	4 GB LPDDR4 @1 600 MHz	YOLOv3-tiny	125.00	10.200
文中	RTX 3060	GPU	1.780	12 GB GDDR6 @12 000 MHz	YOLOv4-tiny	3.06	39.000
文中	Intel I5-12490F	CPU	3.000	32 GB DDR4 @4 800 MHz	YOLOv4-tiny	14 255.70	—
文中	ZYNQ 7020	ARM Cortex- A9+FPGA	0.766	1 GB DDR3 @533 MHz	YOLOv4-tiny	511.00	2.809

Tab. 2 Performance comparison of CNN accelerators on different hardware platforms

综上所述,异构 CNN 加速器并不依赖于高规格的硬件引擎,而是通过 HLS 将算法映射、绑定到 FPGA 端有限且通用的 DSP 单元上,从而加速并行计算。此外,异构 CNN 加速器利用 ARM 处理器出 色的控制调度性能构建了功能完善、协同工作的异构计算系统,从而在固有硬件配置存在局限性的条件 下实现了功耗与性能的良好权衡。

异构 CNN 加速器与其他文献的对比,如表 3 所示。表 3 中:所列工作均基于 ARM+FPGA 异构 架构;吞吐率为模型的计算量与在硬件平台上推理速度的比值,反映了硬件加速器的算力;能效比为吞 吐率与功耗的比值,反映了硬件平台的计算效率;DSP 效率为吞吐率与消耗 DSP 数量的比值,反映了加 速器的优化程度。由表 3 可知:相较于文献[20]~[24],异构 CNN 加速器在推理速度、能效比、吞吐率 及 DSP 效率等方面均取得了显著的提升;与文献[23]相比,异构 CNN 加速器的推理速度提高约 3427%;与文献[21]、[24]相比,异构 CNN 加速器的能效比分别提高了约 440%、48%;与文献[20]、[21]、[22]相比,异构 CNN 加速器的吞吐率分别提高约 47%、483%、130%;与文献[22]相比,异构 CNN 加速器的吞吐率分别提高约 50%

设计来源	硬件平台	模型	工作频率/ MHz	量化方式	功耗/W	推理速 度/ms	吞吐率/ GOPS	能效比/ GOPS• W <sup>-1</sup>	DSP 效率/ GOPS・ DSP <sup>-1</sup>
文献[20]	ZYNQ 7020	YOLOv3-tiny	100	fixed-16	2.141	613	9.12	4.260	_
文献[21]	ZYNQ 7020	YOLOv5s	150	dynamic fixed	2.600	1 300	2.30	0.884	_
文献[22]	ZC702	YOLOv5s	100	fp32	2.508	—	5.83	2.320	0.029 6
文献[23]	Zedboard	YOLOv4-tiny	100	dynamic-16	2.384	18 025	_	—	—
文献[24]	ZYNQ 7020	YOLOv4-tiny	_	fixed-16	2.860	376	9.24	3.230	_
文中	ZYNQ 7020	YOLOv4-tiny	130	fixed-16	2.809	511	13.40	4.770	0.063 0

表 3 异构 CNN 加速器性能对比 Tab. 3 Performance comparison of heterogeneous CNN accelerators

# 4 结束语

基于软硬件协同设计的方法,实现了异构 CNN 加速器,并在轻量级模型 YOLOv4-tiny 上进行验证。实验结果表明,所设计异构 CNN 加速器在功耗与性能方面取得了良好的平衡,在边缘计算场景中具有重要的研究意义与应用价值。

### 参考文献:

- [1] 李全. 面向 ARM 嵌入式平台的卷积神经网络前向加速研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [2] 陈朋,陈庆清,王海霞,等.基于改进动态配置的 FPGA 卷积神经网络加速器的优化方法[J].高技术通讯,2020,30 (3):240-247. DOI:10.3772/j.issn.1002-0470.2020.03.004.
- [3] NIKOLIC G S, DIMITRIJEVIC B R, NIKOLIC T R, et al. A survey of three types of processing units: CPU, GPU and TPU[C] // 57th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies. Ohrid: IEEE Press, 2022:1-6. DOI: 10.1109/ICEST55168. 2022. 9828625.
- [4] 王江波. 基于 ZYNQ 嵌入式平台的 CNN 图像识别加速器研究与实现[D]. 沈阳:中国科学院大学(中国科学院沈 阳计算技术研究所),2022.
- [5] MA Yufei, CAO Yu, VRUDHULA S, et al. Optimizing loop operation and dataflow in FPGA acceleration of deep convolutional neural networks[C] // Proceedings of the 2017 ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays. New York: Association for Computing Machinery, 2017: 45-54. DOI: 10. 1145/3020078. 3021736.
- [6] 帅禄玮,张柳欣,叶蕾,等. 基于低误差并行计算加速的 OFDR 实时处理技术[J]. 中国激光,2024,51(14):233-242. DOI:10.3788/CJL231526.
- [7] 高树静,王程龙,董廷坤. 基于 ZYNQ 的优化 Adaboost 人脸检测[J]. 计算机工程与应用,2020,56(6):201-206. DOI:10.3778/j.issn.1002-8331.1812-0228.
- [8] 嵇达龙,张尤赛,王亚军.基于 ZYNQ 的行人检测系统的设计与实现[J].计算机工程与设计,2020,41(1):238-245. DOI:10.16208/j.issn1000-7024.2020.01.039.
- [9] LU Liqiang, XIE Jiaming, HUANG Ruirui, et al. An efficient hardware accelerator for sparse convolutional neural networks on FPGAs[C] // 27th Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines. San Diego: IEEE Press, 2019:17-25. DOI:10.1109/FCCM. 2019.00013.

- BAI Lin,ZHAO Yiming, HUANG Xinming. A CNN accelerator on FPGA using depthwise separable convolution
   IEEE Transactions on Circuits and Systems []: Express Briefs, 2018, 65(10):1415-1419. DOI:10.1109/TC-SII. 2018. 2865896.
- [11] MILLÓN R,FRATI E,RUCCI E. A comparative study between HLS and HDL on SoC for image processing applications[EB/OL]. (2020-12-15)[2024-08-20]. https://doi.org/10.48550/arxiv.2012.08320.
- [12] GIRSHICK R, DONAHUE J, DARRELL T, et al. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation[C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Columbus: IEEE Press, 2014:580-587. DOI:10.1109/CVPR.2014.81.
- [13] GIRSHICK R. Fast R-CNN[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Santiago: IEEE Press, 2015:1440-1448. DOI:10.1109/ICCV.2015.169.
- [14] REN Shaoqing, HE Kaiming, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2016, 39(6):1137-1149. DOI:10.1109/TPAMI. 2016. 2577031.
- [15] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: Unified, real-time object detection[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Las Vegas: IEEE Press, 2016:779-788. DOI: 10.1109/CVPR.2016.91.
- [16] CONG J,XIAO Bingjun. Minimizing computation in convolutional neural networks[C]//International Conference on Artificial Neural Networks. Cham: Springer International Publishing, 2014:281-290. DOI: 10. 1007/978-3-319-11179-7\_36.
- [17] CIJOV A. Self-driving cars[EB/OL]. (2021-12-08)[2024-08-20]. https://www.kaggle.com/datasets/alincijov/ self-driving-cars.
- [18] CHOI K, SOBELMAN G E. An efficient CNN accelerator for low-cost edge systems[J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems, 2022, 21(4):1-20. DOI:10.1145/3539224.
- [19] MAZZIA V, KHALIQ A, SALVETTI F, et al. Real-time apple detection system using embedded systems with hardware accelerators: An edge AI application [J]. IEEE Access, 2020, 8: 9102-9114. DOI: 10. 1109/ACCESS. 2020. 2964608.
- [20] 戴振宇.基于 ZYNQ 的卷积神经网络加速设计与实现[D].呼和浩特:内蒙古大学,2021.
- [21] 李景阳. 基于 Zynq 的热成像人体目标识别算法研究及硬件加速[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- [22] YU Hao,LI Sizhao. A higher performance accelerator for resource-limited FPGA to deploy deeper object detection networks[C]//16th International Conference on Anti-Counterfeiting, Security, and Identification. Xiamen: IEEE Press, 2022; 1-5. DOI:10.1109/ASID56930.2022.9995953.
- [23] LI Peng, CHE Cheng. Mapping YOLOv4-tiny on FPGA-based DNN accelerator by using dynamic fixed-point method[C] // 12th International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Programming, Xi'an: IEEE Press, 2021;125-129. DOI:10.1109/PAAP54281.2021.9720468.
- [24] XU Shanyong, ZHOU Yujie, HUANG Yourui, et al. YOLOv4-tiny-based coalgangue image recognition and FPGA implementation[J]. Micromachines, 2022, 13(11): 1983. DOI: 10. 3390/mi13111983.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:陈婧)

DOI: 10, 11830/ISSN, 1000-5013, 202408061

# 多层螺旋 CT 在青少年长骨骨肉瘤



王福财1,刘卓晟1,林懿2

诊断中的临床价值

(1. 华侨大学 医学院, 福建 泉州 362021; 2. 南方医科大学 南方医院, 广东 广州 510000)

以 2021 年 5 月至 2024 年 5 月经穿刺活检或手术病理确诊的 21 例青少年长骨骨肉瘤(OS)患者为研 摘要: 究对象,应用评价多层螺旋CT(MSCT)评估肿瘤位置、肿瘤体积、骨质破坏程度、骨膜反应程度等影像学特 征,并评估 MSCT 在诊断青少年长骨 OS 的准确率。结果表明: MSCT 检查 OS 的准确率为 90.5%, OS 的影 像学特征与手术病理诊断结果比较,差异不具有统计学意义(P>0.05);MSCT可以较为准确地显示 OS 的影 像学特征,有助于术前评估肿瘤分级分期、肿瘤体积、边界及侵袭程度,为患者制定个性化手术治疗方案提供 参考价值。

关键词: 骨肉瘤;多层螺旋 CT;青少年;影像学特征 **中图分类号:** R 96 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2025)02-0217-06

# **Clinical Value of Multi-Slice Spiral CT for Long Bone Osteosarcoma Diagnosis in Adolescents**

WANG Fucai<sup>1</sup>, LIU Zhuosheng<sup>1</sup>, LIN Yi<sup>2</sup>

(1. School of Medicine, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China; 2. Nanfang Hospital, Southern Medical University, Guangzhou 510000, China)

Abstract: 21 patients with long bone osteosarcoma (OS) in adolescents diagnosed by biopsy or surgical pathology from May 2021 to May 2024 were selected as the research subjects. The multi-slice spiral CT (MSCT) was used to evaluate the imaging features of tumor location, tumor volume, bone destruction degree and periosteal reaction degree, and the accuracy rate of MSCT in diagnosing long bone OS in adolescents was evaluated. The results showed that the accuracy rate of MSCT in diagnosing OS was 90.5%. There was no statistically significant difference (P > 0.05) between the imaging features of OS and the surgical pathological diagnosis results. MSCT could display the imaging features of OS more accurately, which is helpful for preoperative evaluation of tumor grade and stage, tumor volume, boundary and invasion degree, and provides reference value for personalized surgical treatment plans for patients.

Keywords: osteosarcoma; multi-slice spiral CT; adolescent; imaging feature

骨肉瘤(OS)是最常见的原发性恶性骨肿瘤,在全球范围内,发生率约为每年每百万人 2~4 例<sup>[1-2]</sup>,

**收稿日期**: 2024-08-21

王福财(1978-),男,副教授,博士,主要从事肿瘤影像学诊断及免疫致病机制的研究。E-mail:wfc@ 通信作者: hqu. edu. cn.

基金项目: 国家自然科学基金地区项目(81860354);福建省泉州市高层次人才创新创业项目(2022C015R);华侨大 学高层次人才创新创业项目(605-50Y18058)

尤其在青少年人群中,OS诊断受肿瘤的异质性和影像学设备差别的影响较大。因此,利用具有高分辨 率、高对比度、稳定图像集成技术的影像学设备对 OS 进行早期筛查与诊断尤为重要。多层螺旋 CT (MSCT)具有高空间分辨率和优越成像能力<sup>[3]</sup>,在青少年 OS 的早期诊断中具有重要作用。MSCT 不 仅可以精确显示肿瘤的位置、体积、骨质破坏程度、骨膜反应程度,还能评估肿瘤与邻近组织的关系,对 确定肿瘤的侵袭性和制定手术方案提供了决定性的影像学信息[4-5]。

本文通过对青少年长骨 OS 患者的 MSCT 影像学表现进行分析,探讨 MSCT 检查在 OS 临床治疗 中的应用价值,并分析 MSCT 在青少年长骨 OS 中的诊断性表现,进一步验证 MSCT 在诊断青少年长 骨OS中的有效性。

#### 资料与方法 1

### 1.1 一般资料

以 2021 年 5 月至 2024 年 5 月经穿刺活检或手术病理确诊的 21 例青少年(年龄在 10~20 岁)长骨 OS 患者为研究对象,所有患者均接受 MSCT 检查。患者的基本信息,如表1所示。病例纳入和排除的 标准,如表2所示。

Tab. 1 Basic information of patients									
	性别	病例数	年龄落	平均年龄/岁					
	男	12	$14.00 \pm 2.00$		14.25				
	女	9	14.50	15.89					
	表 2 病例纳入和排除的标准								
				of cases					
项目	标准1	标准 2	标准 3	标准 4	标准 5				
纳入	符合 OS 诊断标准	单纯病种且未合 并恶性疾病	患者或家属均签 署知情同意书	发病 部 位 为 四 肢 长骨	患者影像学和病 理资料完整				
排除	未 经 穿 刺 活 检 或 手术病理诊断者	OS 并非主要症状 或合并有其他症 状	知 情 同 意 书 未 经 患者或家属签署	发病部位为四肢 长骨外其他部位	临床资料不准确 或缺失遗漏				

表1 患者的基本信息

### 1.2 研究方法

使用西门子 64 排 CT 扫描仪获取 CT 图像。具体扫描设定如下:管电压为 120 kV,曝光时间为 50 ms,扫描的层厚为 5 mm,视野为 50.0 cm×50.0 cm, 重建层厚为 1.0 mm。患者采取头先进仰卧位 (HFS)进行标准的 CT 平扫。扫描完成后,通过重建算法、噪声抑制和多平面重建技术对原始数据进行 详细处理,以提高图像质量和分辨率。随后应用最大密度投影(MIP)和体积再现(VR)技术,特别是在 观察肿瘤内钙化和新生骨结构时,能使 CT 影像表现得更加直观。最后,再通过自动和手动分割技术计 算肿瘤体积和表面积,为诊断和治疗提供量化数据支持,最终由放射科医师进行影像阅读和诊断分析。

### 1.3 观察指标

采用双盲法对 MSCT 影像进行分析和诊断,将所有 MSCT 影像去除患者身份信息并进行随机编 号,以确保评估医师无法识别患者信息或病理结果。

然后,由两位放射科诊断组医师(其中一位为主治医师或更高级别)对影像进行分析,他们不参与患 者的临床治疗过程,可保证影像评估客观性。两位医师专注于评估肿瘤的位置、体积、骨质破坏程度、骨 膜反应程度等影像学特征,并将术后病理结果作为诊断的"金标准"[6]。

最后,将两位医师的诊断结果与术后病理结果进行对比,用以评估 MSCT 在诊断青少年长骨 OS 方面的准确性。

### 1.4 统计学方法

数据均采用 SPSS 27.0 软件进行分析,使用 γ 检验评估 MSCT 诊断准确性,采用线性回归、二元 logistic 回归分析 OS 患者的影像学特征,若 P>0.05,则认为差异不具有统计学意义。

### 2 影像学检查结果与分析

### 2.1 MSCT 检查准确率

21 例青少年长骨 OS 患者经过 MSCT 检查,共检查出 19 例,诊断准确率为 90.5%,与手术病理诊断结果比较,差异不具有统计学意义(P>0.05)。其中,由于影像学表现相似、骨膜反应相似、钙化和新生骨影像特征重叠等原因,2 例误诊为尤文氏肉瘤。

### 2.2 影像学表现

21 例青少年长骨骨肉瘤患者中,肿瘤主要分布于长骨干骺端,其中,股骨 6 例,胫骨 3 例,腓骨 2 例,肱骨 5 例,尺骨 3 例,桡骨 2 例。CT 图像显示为形状不规则、混合密度、边缘模糊的肿块,反映出肿瘤的高度异质性和侵袭性,为早期区分良、恶性病变提供了重要依据。

骨皮质破坏是 OS 的显著特征,在影像学上,溶骨性(3 例)、成骨性(5 例)及混合性破坏(11 例)均有 不同程度的表现。不同类型的骨质破坏在预测肿瘤生物学行为方面具有明确的临床意义。成骨性破坏 通常提示肿瘤组织硬度较大,病变活跃,具有较高的术后复发风险,而溶骨性破坏则与肿瘤快速扩展的 特性密切相关,需要及时干预以防止进一步侵袭。

此外,骨膜反应在 15 例患者中呈现为 Codman 三角或日光射线样改变("星芒"征),这些特征在 OS 的诊断和预后评估中具有重要的指示作用。Codman 三角通常反映肿瘤向骨膜下快速扩展,而日光射线样改变则表明肿瘤已经侵犯到软组织,这些影像表现为术前精准评估肿瘤范围及制定个体化的手术 方案提供了可靠依据。影像中还可见钙化和新生骨的形成,这些高密度斑点或条状影像尤为典型,在成 骨性骨肉瘤中尤为显著,有助于鉴别其他类型的骨恶性肿瘤(如尤文氏肉瘤或骨巨细胞瘤),从而提高诊断精度。

在少数病例中,CT影像揭示了肿瘤对血管和神经的侵犯。MSCT 在评估肿瘤与重要解剖结构的 关系上表现出卓越的优势,能够高分辨率地展示肿瘤与血管、神经等关键解剖结构之间的精确空间关 联。这些影像数据不仅有助于临床医生制定更精确的手术计划,减少术中损伤风险,同时也为术后的辅 助治疗策略提供了明确的参考。例如,根据肿瘤与大血管的距离来决定术后是否需要放疗或其他干预 措施。此外,这些影像学表现还可用于术后监测和随访,帮助评估肿瘤复发的风险和进展,从而制定更 长期的治疗和管理计划。

### 2.3 病例分析

病例1信息:患者男,17岁,左肩部关节疼痛2个月。左肱骨近端OS的MSCT影像检查,如图1 所示。影像学诊断:CT平扫显示左侧肱骨近端见不规则骨质破坏和新生骨形成,不规则低密度区和新 生骨高密度区,局部骨质增生并可见Codman三角征,骨膜反应显著。

病例2信息:患者女,11岁,左膝关节疼痛1个月。左股骨远端OS的MSCT影像检查,如图2所示。影像学诊断:CT平扫显示左侧股骨远端见骨质破坏和日光射线样改变("星芒"征),显示明显的骨质破坏和新生骨形成,局部骨组织发生结构改变。



(a) 左肩部关节横轴位
 (b) 左肩部关节冠状位
 图 1 左肱骨近端 OS 的 MSCT 影像图
 Fig. 1 MSCT imaging of left proximal humerus OS



(a) 左膝关节横轴位
 (b) 左膝关节冠状位
 图 2 左股骨远端 OS 的 MSCT 影像图
 Fig. 2 MSCT imaging of left distal femur OS

# 3 青少年骨肉瘤的影像学价值

### 3.1 青少年 OS 的临床与病理

青少年 OS 是一种高度恶性的原发性骨肿瘤,主要影响长骨如股骨、胫骨等四肢长骨<sup>[6]</sup>。这种肿瘤 在早期常表现为局部疼痛和肿胀,这些症状往往被误认为运动损伤或其他良性病变,增加了早期诊断难 度。肿瘤骨的含量能够影响肿瘤质地。成骨型多质地坚硬,溶骨型质地松软或成囊性感,混合型质地多 坚韧<sup>[7]</sup>。随着病情进展及疼痛强度的增加,患者在休息时也会感受到持续疼痛,最终影响患者的正常活 动。MSCT 提供的影像学检查能够显示大量信息,包括肿瘤的位置、体积、强化特点、骨质破坏程度等, 但最终的确诊还是需要术后的病理检查进行确认<sup>[8]</sup>。病理检查是 OS 临床诊断的"金标准"<sup>[6]</sup>,其过程 包括对组织样本的详细分析,以及确定肿瘤的具体类型和恶性程度等<sup>[9]</sup>。具体判断标准包括细胞形态 学特征、坏死程度、肿瘤边界和侵袭性等。除此之外,免疫组织化学染色和分子生物学检测也能够为临 床诊断提供额外诊断信息。综合这些特征可以准确评估肿瘤类型、分级和预后。以上这些关键信息对 于制定 OS 患者个性化治疗方案都具有重要的意义。

### 3.2 OS的CT表现及诊断价值

影像学检查是临床上诊断青少年 OS 的重要方法,如 X 线、CT 检查、MRI 检查等。X 线检查中长 骨 OS 通常会显示出多种形态,主要表现为四肢长骨干骺端的骨质破坏,同时伴有成骨性、溶骨性或混 合性的骨质坏死性病灶<sup>[10]</sup>。这些病灶大小不规则且边缘分界不清,通常情况下,由于 X 线成像对软组 织分辨率低且缺乏三维信息,临床难以仅通过 X 线平片对软组织肿胀和肿块进行鉴别,即 X 线存在一 定局限性。而在 MRI 检查中,仍存在有扫描速度慢、价格昂贵、钙化和骨质区域成像模糊的问题。

相较于 X 线和 MRI 检查, MSCT 在空间、密度及软组织分辨率等方面更具有优势<sup>[11]</sup>。MSCT 能 通过多层扫描生成高分辨率的三维图像,更加清晰地展示肿瘤的侵袭范围,包括肿瘤对周围软组织、骨 髓及相邻器官的侵袭程度。这使 MSCT 能够提供更准确的肿瘤边界信息,帮助临床医生更好地评估肿 瘤的侵袭性和扩展情况。此外, MSCT 在评估大血管和神经受侵方面也表现出显著的优势,因为它可 以清楚地显示肿瘤与这些重要结构之间的关系。增强后扫描还能够提供更为准确的影像信息供临床参 考<sup>[12]</sup>,例如,肿瘤的血供情况、肿瘤内部的异质性及肿瘤与周围正常组织的界限。

更为重要的是,MSCT能够观察到长骨 OS 特有的影像学特征,如骨膜反应(Codman 三角、日光射 线样改变)、肿瘤内的钙化、新生骨形成。这些特征在临床上具有重要意义。骨膜反应的类型和程度往 往与肿瘤的侵袭性和生长速度相关联,通过观察这些特征,临床医生可以初步评估肿瘤的恶性程度。对 于肿瘤内的钙化和新生骨形成,MSCT 可以显示出高密度斑点或条状影像,这些信息不仅有助于定性 分析肿瘤的类型,还能够预测肿瘤的进展和预后。因此,MSCT 不仅能够提供诊断参考,更为临床决策 提供了重要指导依据。

这些高质量的影像数据为临床医生制定精准的诊疗方案提供了坚实的基础,极大地提高了诊断的 准确性和可靠性。研究结果表明,MSCT检查在青少年长骨 OS 的诊断结果与术后病理诊断结果比较, 差异不具有统计学意义(P>0.05),且各影像学特征(位置、体积等)对诊断准确性无显著影响。在 MSCT检查图像中,医师能够清楚观察到以上多种影像学特征,这为诊断提供了极大的帮助。因此, MSCT检查可为青少年长骨 OS 性质的确定提供可靠的依据。

### 3.3 OS 的鉴别诊断

骨肉瘤属于常见的骨原发高度恶性肿瘤,最常见的临床症状是疼痛和局部肿块,好发年龄是青少年,好发于肢体长管状骨的干骺端。当青少年患者出现,四肢长管状骨的干骺端某部位疼痛后,应当考虑该病的可能性,需要及时进行检查。因此,早期诊断、规范治疗是提高疗效的关键。骨肉瘤通常需要与以下 5 种疾病相鉴别。

1) 成骨性骨转移瘤,多见于年长患者,肿瘤边界清晰,骨质破坏较少,通常不累及骨皮质。成骨性 骨转移瘤边界清晰且骨质破坏较轻,常见于老年患者,而 OS 边界模糊,伴有显著的骨质破坏和骨膜反 应<sup>[13]</sup>,常见于相对年轻的患者。

2) 化脓性骨髓炎,表现为骨质破坏和新骨形成,骨膜反应随着病情进展而变化,早期骨破坏不明

显,晚期骨破坏明显<sup>[14]</sup>。化脓性骨髓炎早期通常伴有明显的软组织肿胀,骨质破坏和新生骨质连续出现,而 OS 的骨质破坏和新生骨质可能同时存在,且骨膜反应较显著。

3) 骨巨细胞瘤,表现为偏心性的膨胀性骨质破坏,通常没有新生骨。骨巨细胞瘤病变通常是膨胀性的,且缺乏新生骨<sup>[15]</sup>,而 OS 则常伴有新生骨和显著的侵袭性表现。

4) 骨纤维肉瘤,表现为溶骨性骨质破坏,骨质增生较少,骨膜反应不明显,破坏区无瘤骨形成。骨 纤维肉瘤破坏区通常无新生骨,且骨膜反应较轻,而OS则常伴有显著的骨膜反应和新生骨<sup>[16]</sup>。

5) 溶骨性骨转移,多见于年长患者,较少出现骨膜反应和显著的软组织肿块。溶骨性骨转移多发 于老年患者,通常缺乏明显的骨膜反应和软组织肿块,而 OS 常见于年轻患者,伴有显著的软组织肿块 和骨膜反应。

# 4 结论

多层螺旋 CT(MSCT)在青少年长骨 OS 的诊断中展现了其独特的重要性,MSCT 能够详细地呈现 长骨 OS 的主要影像学特征,具有较高的诊断准确率,能够辅助临床医生在术前对肿瘤的体积、边界及 侵袭程度进行全面且直观的评估,从而为患者制定个性化的手术治疗方案提供坚实的依据。相较于传 统的 MRI 和其他影像技术,MSCT 不仅在显示肿瘤与周围组织关系方面表现出色,在显示肿瘤内钙化 和新生骨结构时还更具有显著优势。通过应用先进的重建算法和噪声抑制技术,MSCT 能够生成高质 量图像,这极大地提升了诊断的精确性,并为术前评估及术后随访提供可靠的量化数据支持。研究结果 表明,在诊断青少年长骨 OS 方面,MSCT 表现出与术后病理诊断结果高度一致的优异性能,显著提升 了临床决策的可靠性和治疗效果。

然而,本文仍存在样本量少、研究中心少、长期随访数据不足等局限性。未来的研究应扩大样本量, 进行多中心研究,并增加长期随访数据,以全面评估 MSCT 在 OS 诊断和治疗中的应用价值。此外,结 合近年来新兴的人工智能辅助诊断技术,MSCT 在医学影像分析和精准诊断中的应用前景将会更加广 阔。人工智能技术,特别是深度学习算法,能够自动检测和分析 CT 影像中的细微病变,提高诊断的敏 感性和特异性,同时还能够通过大数据学习不断优化目标检测模型,提供个性化的治疗建议,显著提升 临床医师决策能力和患者治疗效果。因此,MSCT 作为一种高效的诊断工具,不仅在术前评估、手术规 划和术后监测中具有重要的应用价值,还为临床医生提供了可靠的信息支持,极大地改善了患者的治疗 效果和生活质量,具有较大的学术价值和临床意义。

### 参考文献:

- [1] SMELAND S, BIELACK S S, WHELAN J, et al. Survival and prognosis with osteosarcoma: Outcomes in more than 2000 patients in the EURAMOS-1 (European and American Osteosarcoma Study) cohort[J]. European Journal of Cancer, 2019, 109:36-50. DOI:10.1016/j. ejca. 2018. 11. 027.
- [2] KLEIN M J,SIEGAL G P. Osteosarcoma[J]. American Journal of Clinical Pathology, 2006, 125(4): 555-581. DOI: 10.1309/uc6kqhld9lv2kenn.
- [3] WANG Junling, LI Xia, ZHANG Zhijie, et al. Clinical research of combined application of DCEUS and dynamic contrast-enhanced MSCT in preoperative cT staging of gastric cancer[J]. Journal of Oncology, 2021(6):9868585. DOI: 10.1155/2021/9868585.
- [4] LUO Meimei, YANG Run, ZHANG Haijie, et al. Image fusion of multislice spiral CT with magnetic resonance imaging (MRI) in the diagnosis and nursing of malignant bone diseases using ANOVA[J]. Scientific Programming, 2021,2021:1-7. DOI:10.1155/2021/4751845.
- [5] HOLZER G, HOBUSCH G, HANSEN S, et al. Is there an association between bone microarchitecture and fracture in patients who were treated for high-grade osteosarcoma?: A controlled study at long-term follow-up using highresolution peripheral quantitative CT[J]. Clinical Orthopaedics and Related Research, 2021, 479 (11): 2493-2501. DOI:10.1097/CORR.00000000001842.
- [6] ZHAO Xin, WU Qirui, GONG Xiuqing, et al. Osteosarcoma: A review of current and future therapeutic approaches
   [J]. Biomedical Engineering Online, 2021, 20(1):24. DOI: 10.1186/s12938-021-00860-0.

- [7] JAFARI F, JAVDANSIRAT S, SANAIE S, et al. Osteosarcoma: A comprehensive review of management and treatment strategies[J]. Annals of Diagnostic Pathology, 2020, 49:151654. DOI:10.1016/j. anndiagpath. 2020.151654.
- [8] WU Xiang, ZHOU Shuping, ZHOU Xinhua, et al. Literature review of imaging, pathological diagnosis, and outcomes of metachronous lung and pancreatic metastasis of cecal cancer[J]. World Journal of Surgical Oncology, 2022, 20(1):341. DOI:10.1186/s12957-022-02797-7.
- [9] TESTA S, HU B D, SAADEH N L, *et al*. A retrospective comparative analysis of outcomes and prognostic factors in adult and pediatric patients with osteosarcoma[J]. Current Oncology, 2021, 28(6):5304-5417. DOI:10.3390/curron-col28060443.
- [10] SADYKOVA L R, NTEKIM A I, MUYANGWA-SEMENOVA M, et al. Epidemiology and risk factors of osteosarcoma[J]. Cancer Investigation, 2020, 38(5): 259-269. DOI: 10.1080/07357907. 2020. 1768401.
- [11] ELAGHA A,OTHMAN Y,DARWEESH R,et al. Characterization of the interatrial septum by high-field cardiac MRI: A comparison with multi-slice computed tomography[J]. The Egyptian Heart Journal,2020,72(1):81. DOI: 10.1186/s43044-020-00109-6.
- [12] ALBANO D, BENENATI M, BRUNO A, et al. Imaging side effects and complications of chemotherapy and radiation therapy: A pictorial review from head to toe[J]. Insights Imaging, 2021, 12(1):76. DOI:10.1186/s13244-021-01017-2.
- SHAO Jingjing, LIN Hongxin, DING Lei, *et al.* Deep learning for differentiation of osteolytic osteosarcoma and giant cell tumor around the knee joint on radiographs: A multicenter study[J]. Insights into Imaging, 2024, 15(1): 35. DOI:10.1186/s13244-024-01610-1.
- [14] KWON J W, HYUN S J, HAN S H, et al. Pyogenic vertebral osteomyelitis: Clinical features, diagnosis, and treatment[J]. Korean Journal of Spine, 2017, 14(2):27-34. DOI:10.14245/kjs. 2017.14.2.27.
- [15] UEDA T, MORIOKA H, NISHIDA Y, et al. Objective tumor response to denosumab in patients with giant cell tumor of bone: A multicenter phase [] trial[J]. Annals of Oncology, 2015, 26(10): 2149-2154. DOI: 10.1093/annonc/mdv307.
- TAHMASBI-ARASHLOW M, BARNTS K L, NAIR M K, et al. Radiographic manifestations of fibroblastic osteosarcoma: A diagnostic challenge[J]. Imaging Science in Dentistry, 2019, 49(3): 235-240. DOI: 10.5624/isd. 2019. 49.3.235.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 刘源岗)
DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 202410004



# 奥拉帕尼治疗铂敏感复发性卵巢癌 疗效与安全性的 Meta 分析

王华<sup>1</sup>,都绮月<sup>2,3</sup>,徐森楠<sup>2,3</sup>,王昆<sup>2</sup>,吴小枫<sup>2</sup>, 张亮亮<sup>4</sup>,邱彦<sup>2,3</sup>,杨嘉永<sup>2,5</sup>

(1. 华侨大学 华侨大学医院,福建 厦门 361021;
 2. 厦门大学附属第一医院 药学部,福建 厦门 361003;
 3. 厦门市手性药物重点实验室,福建 厦门 361100;
 4. 华侨大学 先进碳转化技术研究院,福建 厦门 361021;
 5. 厦门市药事综合管理专业质量控制中心,福建 厦门 361003)

摘要: 系统评价奥拉帕尼治疗铂敏感复发性卵巢癌(PSROC)的临床效果及安全性,通过检索公共数据库中的相关研究,收集关于奥拉帕尼与单药化疗/安慰剂治疗 PSROC 的随机临床试验。应用 RevMan 5.3 进行 Meta 分析,最终纳入 14 篇文献。结果表明:试验组患者的临床缓解率、疾病控制率、无进展生存期均显著优 于其他单药化疗药物;试验组患者的消化功能异常、骨髓抑制、神经毒性、心脏毒性及脱发等不良反应发生率 显著低于其他单药化疗药物;奥拉帕尼在治疗 PSROC 方面表现出良好的疗效及较高的安全性。 关键词: 奥拉帕尼;铂敏感复发性卵巢癌;临床效果; Meta 分析 中图分类号: R 737.31 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2025)02-0223-07

# Meta-Analysis of Efficacy and Safety of Olaparib in Treating Platinum-Sensitive Recurrent Ovarian Cancer

WANG Hua<sup>1</sup>, DU Qiyue<sup>2,3</sup>, XU Sennan<sup>2,3</sup>, WANG Kun<sup>2</sup>, WU Xiaofeng<sup>2</sup>, ZHANG Liangliang<sup>4</sup>, QIU Yan<sup>2,3</sup>, YANG Jiayong<sup>2,5</sup>

(1. Huaqiao University Hospital, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. School of Medicine, The First Affiliated Hospital of Xiamen University, Xiamen 361003, China;

3. Xiamen Key Laboratory of Chiral Drugs, Xiamen 361100, China;

4. Academy of Advanced Carbon Conversion Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

5. Xiamen Quality Control Center for Comprehensive Pharmaceutical Affairs Management Specialization, Xiamen 361003, China)

**Abstract:** The clinical efficacy and safety of Olaparib in treating platinum-sensitive recurrent ovarian cancer (PSROC) were evaluated systematically. The randomized clinical trials on Olaparib and single-agent chemo-therapy/placebo in the treatment of PSROC were collected by searching relevant studies in public databases. Ultimately, 14 articles were incorporated by Meta-analysis using RevMan 5.3. The results showed that the clinical remission rate, disease control rate, and progression-free survival of patients in the experimental group

**收稿日期:** 2024-10-12

通信作者: 杨嘉永(1973-),男,主任药师,主要从事临床药学的研究。E-mail:yjy\_158@163.com。

基金项目: 白求恩公益基金"耀动神州-药学科研能力建设基金"资助项目(Z04JKM2023E040)

were significantly better than other single-agent chemotherapy drugs. The incidence of adverse reactions such as gastrointestinal dysfunction, bone marrow suppression, neurotoxicity, cardiotoxicity, and alopecia of patients in the experimental group were significantly lower than other single-agent chemotherapy drugs. It is indicated that Olaparib shows good efficacy and higher safety in the treatment of PSROC.

Keywords: Olaparib; platinum sensitive recurrent ovarian cancer; clinical efficacy; Meta-analysis

卵巢癌的发病率列妇科恶性肿瘤的第3位,其死亡率高于宫颈癌和子宫内膜癌的总和,为妇科癌症 中死亡率最高的类型,严重威胁女性健康<sup>[1]</sup>。近年来,卵巢癌在手术、化疗和靶向药物治疗等方面均取 得了一定进展。然而,约有85%的卵巢癌患者会出现复发,迫切需要新的临床治疗策略进一步改善治 疗效果<sup>[2]</sup>。

奥拉帕尼(Olaparib)是一种口服聚腺苷二磷酸核糖聚合酶(PARP)强效抑制剂,已在临床上得到广 泛应用,并在铂类药物敏感(无进展间隔期 6~12 个月)和铂类不敏感的复发性种系乳腺癌易感基因 (gBRCA)突变卵巢癌患者中取得了良好的治疗效果<sup>[3]</sup>。然而,目前仍缺乏奥拉帕尼对铂敏感复发性卵 巢癌(PSROC)治疗方案的临床综合分析。基于此,本文通过 Meta 分析评价奥拉帕尼治疗铂敏感复发 性卵巢癌的效果及安全性。

# 1 资料与方法

### 1.1 文献检索策略

截至 2024 年 4 月 6 日,在 PubMed、Web of Science、Cochrane Library、Embase、中国知网、万方及 维普等数据库中,检索国内外公开发表的关于铂敏感复发性卵巢癌治疗的随机对照试验(RCT)的文献,使用主题词+自由词的检索策略,无地区限制。

# 1.2 纳入与排除标准

当符合以下4个标准时,文章可纳入研究:1)经过影像学检查诊断为铂敏感复发性卵巢癌,患者年 龄≥18岁;2)患者至少接受过两个疗程的铂类化疗方案;3)对照组患者接受单药化疗或安慰剂治疗, 试验组患者则接受奥拉帕尼单药治疗或联合化疗方案;4)结局指标包括总生存率(over-all survival, OS)、无进展生存期(progression-free survival,PFS)、临床缓解率(overall response rate,ORR)、疾病控 制率(disease control rate,DCR)、不良反应等项目之一。

当符合以下 6 个标准之一时,文章需排除:1)观察指标不明确或结局指标不清晰;2)研究的脱落 率/失访率超过 20%;3)患者合并其他严重内科疾病;4)仅开展其他临床数据的回顾性分析;5)缺乏 内部对照的单臂试验;6)文章中的数据资料存在前后矛盾、不完整或无法使用的情况。

#### 1.3 文献筛选与资料提取

使用纽卡斯尔-渥太华量表<sup>[4]</sup>(NOS)评估纳入研究的文献质量,NOS总分为9分,排除评分低于6分的文献。由两名研究者按照节1.1独立筛选文献,出现分歧则汇报给更高级别的研究者,通过集体讨论解决分歧。提取的资料包括第一作者、发表时间、国家、患者肿瘤类型、肿瘤分期、样本量、样本年龄、干预措施和结局指标等。

#### 1.4 偏倚风险评价

参考 Cochrane 系统评价手册(https://training.cochrane.org/zh-hans/cochrane),对纳入研究的 文献偏倚风险进行具体评价。

# 1.5 统计学分析

采用 RevMan 5.3 软件开展 Meta 分析。将比值比(odds ratio,OR)作为客观反应率和疾病控制率的效应量;将风险比(hazard ratio,HR)作为无进展生存期的效应量,并计算各个效应量的 95% 置信区间。通过 Q 检验评估研究间的异质性,并使用  $I^2$  统计量定量分析异质性的程度,显著性水平设为  $\alpha$ = 0.10。当研究间无显著异质性(P>0.10 且  $I^2$ <50%)时,采用固定效应模型进行合并;反之,则选择随机效应模型。

此外,通过 Egger's 检验、Begg's 检验和倒漏斗图评估是否存在发表偏倚。最后,对具有明确暴露

剂量定义的文献,依据文献[5-6]的方法,采用广义最小二乘(GLST)法进行剂量-反应关系分析。

将所有研究中奥拉帕尼剂量的单位归一为 mg • d<sup>-1</sup>后进行数据拟合,分别通过 petile 函数、mk-spline 函数及 GLST 法,计算回归样条、进行限制性立方样条的拟合,并评估暴露因素每增加特定剂量时效应量的变化。判断剂量-反应关系是否为线性趋势后,进一步通过 predictnl 和 gen 命令生成剂量反应拟合值、置信上下限及奥拉帕尼剂量-结局指标之间的定量关系。

# 2 研究结果与分析

# 2.1 文献检索结果与纳入文献的基本特征

经检索得到1466 篇文献,排除重复文献后,初步纳入330 篇。通过题目和摘要排除254 篇,此外, 排除诊断标准不明25 篇、数据不全20 篇、研究内容无关11 篇,以及样本重复和单臂研究等文献,最终 纳入14 篇文献进行研究<sup>[7-20]</sup>。研究共涉及3431 例患者,其中,试验组患者2409 例,对照组患者1022 例,采用口服方式给予奥拉帕尼。根据NOS评估标准,纳入的14 篇文献均为高质量研究文献。

### 2.2 纳入研究的偏倚风险评价

纳入的 14 篇文献中,文献[7-8]未采用随机序列进行分配,文献[7,9]明确未实施分配隐藏,文献 [7-10,18,20]对盲法实施方案未进行系统说明,但 14 篇文献的数据均较为完整。

# 2.3 Meta 分析结果

2.3.1 ORR 文献[8-10,13,18,20]报道了 ORR,涉及试验组患者 348 例和对照组患者 280 例。研究 间未发现统计学异质性( $I^2 = 29\%, \chi^2 = 7.06, P = 0.22$ )。因此,采用固定效应模型进行分析。结果显示,试验组患者的 ORR 显著高于对照组(OR=1.85,95%CI(1.32~2.60),Z = 3.56, P < 0.01),表明相 较于其他治疗方式,奥拉帕尼在减小肿瘤大小方面更为有效。ORR 的森林图,如图 1 所示。

	Experime	ental	Contr	ol		Odds Ratio		c	dds Ratio		
Study or Subgroup	Events	Total	Events	Total	Weight	M-H. Fixed, 95% C		М-Н.	Fixed, 95%	CI	
Colombo 2022	6	41	9	41	15.9%	0.61 [0.20, 1.90]			•		
Penson 2020	109	151	37	72	28.8%	2.45 [1.37, 4.40]					
Perez-Fidalgo 2021	5	20	9	31	10.9%	0.81 [0.23, 2.92]					
徐才慧2021	21	40	12	40	11.8%	2.58 [1.03, 6.46]				_	
权瑞泉2020	25	48	15	48	14.8%	2.39 [1.04, 5.50]				_	
路平2020	22	48	16	48	17.9%	1.69 [0.74, 3.87]			+		
Total (95% CI)		348		280	100.0%	1.85 [1.32, 2.60]			•		
Total events	188		98								
Heterogeneity: Chi <sup>2</sup> = 7	7.06, df = 5	i(P = 0.1)	22); l² = 2	9%							400
Test for overall effect:	Z = 3.56 (P	P = 0.000	04)				0.01 Fave	0.1 ours (experimen	tal] Favours	[control]	100

#### 图 1 ORR 的森林图

Fig. 1 Forest plot of ORR

2.3.2 DCR 文献[8-10,18]报道了 DCR,涉及试验组患者 156 例和对照组患者 167 例。研究间未发 现统计学异质性(*I*<sup>2</sup>=0, χ<sup>2</sup>=0.02, *P*=1.00)。因此,采用固定效应模型进行分析。结果显示,试验组 患者的 DCR 显著高于对照组(OR=2.68,95%CI(1.56~4.60),*Z*=3.57,*P*<0.01),表明相对于其他 治疗方式,奥拉帕尼在控制肿瘤进展和提高患者生活质量方面更为有效。DCR 的森林图,如图 2 所示。

	Experim	ental	Contr	ol		Odds Ratio	Odds Ratio
Study or Subgroup	Events	Total	Events	Total	Weight	M-H, Fixed, 95% C	M-H, Fixed, 95% Cl
Perez-Fidalgo 2021	18	20	24	31	11.3%	2.63 [0.49, 14.17]	
徐才慧2021	33	40	25	40	26.2%	2.83 [1.00, 7.98]	
权瑞泉2020	39	48	30	48	33.7%	2.60 [1.02, 6.60]	
路平2020	41	48	33	48	28.8%	2.66 [0.97, 7.29]	
Total (95% CI)		156		167	100.0%	2.68 [1.56, 4.60]	
Total events	131		112				
Heterogeneity: Chi <sup>2</sup> = 0	).02, df = 3	(P = 1.0	00); l <sup>2</sup> = 0	%			
Test for overall effect: 2	Z = 3.57 (P	9 = 0.000	04)				Favours [experimental] Favours [control]

图 2 DCR 的森林图 Fig. 2 Forest plot of DCR 2.3.3 PFS 文献[12-16,19-20]研究间没有发现统计学异质性(*I*<sup>2</sup>=0,χ<sup>2</sup>=3.76,*P*=0.71)。因此,采用固定效应模型进行分析。结果显示,试验组患者的 PFS 显著高于对照组(HR=0.68,95%CI(0.59~0.78),*Z*=5.40,*P*<0.01),表明相较于其他治疗方式,奥拉帕尼在延长患者有质量的生存时间方面更为有效。PFS 的森林图,如图 3 所示。</li>



图 3 PFS 的森林图

Fig. 3 Forest plot of PFS

2.3.4 不良反应发生率 不良反应包括消化功能异常、肝肾功能损伤、骨髓抑制、神经毒性、心脏毒性、 过敏反应及脱发等。奥拉帕尼与其他化疗药物的总不良反应的研究<sup>[7,11,15]</sup>涉及试验组患者 296 例和对 照组患者 202 例。研究间未发现统计学异质性(*I*<sup>2</sup>=31%,χ<sup>2</sup>=2.91,*P*=0.23)。因此,采用固定效应模 型进行分析。结果显示,相较于其他化疗药物,服用奥拉帕尼的总不良反应发生率更低(OR=0.71, 95%CI(0.30~1.62)),但组间比较的差异不具有统计学意义(*Z*=0.84,*P*=0.40)。

奥拉帕尼与其他化疗药物的总不良反应发生率的森林图,如图4所示。

	Experim	ental	Contr	ol		Odds Ratio	Odds Ratio	
Study or Subgroup	Events	Total	Events	Total	Weight	M-H. Fixed, 95% C	M-H. Fixed, 95% Cl	
Oza 2015	81	81	73	75	3.5%	5.54 [0.26, 117.38]		$\rightarrow$
Pujade-Lauraine 2017	181	196	94	99	71.0%	0.64 [0.23, 1.82]		
崔雅馨2020	16	19	27	28	25.6%	0.20 [0.02, 2.06]		
Total (95% Cl)		296		202	100.0%	0.70 [0.30, 1.62]	-	
Total events	278		194					
Heterogeneity: Chi <sup>2</sup> = 2.9	91, df = 2 (F	<b>P</b> = 0.23	); I <sup>2</sup> = 319	6				400
Test for overall effect: Z	= 0.84 (P =	0.40)					Favours [experimental] Favours [control]	100

图 4 奥拉帕尼与其他化疗药物的总不良反应发生率的森林图

Fig. 4 Forest plot of total incidence of adverse reactions between Olaparib and other chemotherapy drugs

不良反应的研究间均未显示出统计学异质性( $I^2 < 50\%$ ,P > 0.10),因此,使用固定效应模型进行分析。结果显示,服用奥拉帕尼患者的消化功能异常(OR=0.45,95%CI(0.28~0.73),Z=3.24,P < 0.01)、骨髓抑制(OR=0.47,95%CI(0.29~0.78),Z=2.96,P < 0.01)、神经毒性(OR=0.38,95%CI(0.15~0.95),Z=2.07,P < 0.01)、心脏毒性(OR=0.37,95%CI(0.14~0.93),Z=2.11,P < 0.05)及脱发(OR=0.33,95%CI(0.15~0.73),Z=2.73,P < 0.01)发生率均显著低于其他化疗药物。然而,服用奥拉帕尼患者的肝肾功能损伤(OR=0.55,95%CI(0.22~1.35),Z=1.31,P=0.19)和过敏反应(OR=0.75,95%CI(0.37~1.52),Z=0.80,P=0.42)的发生率与其他化疗药物相比,其差异均不具有统计学意义。

综上可知,奥拉帕尼在消化功能异常、骨髓抑制、神经毒性、心脏毒性及脱发等不良反应发生率方面 具有明显优势,为临床提供了一种相对更安全的治疗选择,尤其适用于对化疗副作用敏感的患者。然 而,奥拉帕尼在肝肾功能损伤和过敏反应方面并未显示出显著的优越性或劣势。这些信息为临床医生 在制定治疗方案时提供了重要的参考依据。

奥拉帕尼与安慰剂的总不良反应发生率的森林图,如图 5 所示。奥拉帕尼与安慰剂的总不良反应 发生率的研究<sup>[11,14,16]</sup>涉及试验组患者 396 例和对照组患者 238 例。研究间未发现显著异质性( $I^2 = 0$ ,  $\chi^2 = 1.72$ ,P = 0.42)。结果显示,服用奥拉帕尼的患者出现不良反应的概率比安慰剂更高(OR=1.89, 95%CI(0.88~4.04)),但组间差异不具有统计学意义(Z = 1.64,P = 0.10)。

	Experime	ental	Contr	ol		Odds Ratio	Odds Ratio
Study or Subgroup	Events	Total	Events	Total	Weight	M-H, Fixed, 95% C	CI M-H, Fixed, 95% CI
Ledermann 2014	132	136	119	129	38.0%	2.77 [0.85, 9.08]	] +
Ledermann 2016	53	64	9	10	28.3%	0.54 [0.06, 4.67]	]
Pujade-Lauraine 2017	191	196	94	99	33.7%	2.03 [0.57, 7.19]	
Total (95% CI)		396		238	100.0%	1.89 [0.88, 4.04]	• •
Total events	376		222				
Heterogeneity: Chi <sup>2</sup> = 1.7	2, df = 2 (F	P = 0.42	); I <sup>2</sup> = 0%				
Test for overall effect: Z =	= 1.64 (P =	0.10)					Favours [experimental] Favours [control]

图 5 奥拉帕尼与安慰剂的总不良反应发生率的森林图

Fig. 5 Forest plot of total incidence of adverse reactions between Olaparib and placebo 2.3.5 肿瘤标记物合并结果 采用 CA125 和 HE4 两种肿瘤标记物。结果显示,服用奥拉帕尼的患者 CA125(平均差异 MD=-14.64 U·L<sup>-1</sup>,95% CI(-18.74~-10.54), $\chi^2$  = 8.31, P<0.05)和 HE4 (MD=-42.63 pmol·L<sup>-1</sup>,95% CI(-68.70~-16.57), $\chi^2$  = 30.12, P<0.01)的水平相较于其他化疗 药物均显著下降。CA125 和 HE4 是卵巢癌的重要生物标志物,它们的水平变化可以反映疾病的发展 和治疗效果。

综上可知,相较于其他化疗药物,奥拉帕尼可能更有效地抑制了肿瘤的生长和扩散,对患者的预后 产生积极影响。血清肿瘤标志物的合并结果,如图 6 所示。



图 6 血清肿瘤标志物的合并结果

#### Fig. 6 Combined results of serum tumor markers

2.3.6 生存质量合并结果 总体不良反应的合并结果显示,与安慰剂组相比,服用奥拉帕尼的患者生 存质量未出现显著变化(MD=-0.35,95%CI(-0.86~0.15),χ<sup>2</sup>=2.08,P=0.35)。此外,关于奥拉 帕尼与化疗药物比较的相关研究数量较少,尚无法进行合并讨论。

# 2.4 发表偏倚分析

固定效应模型的 Egger's 检验表明,纳入的研究在 ORR(t = -1.98,P = 0.14)、DCR(t = -0.40, P = 0.73)、PFS(t = 0.62,P = 0.56)、总体不良反应合并结果(t = -0.05,P = 0.96)等方面不存在发表 偏倚。同时,各项研究未在消化功能(t = -1.25,P = 0.21)、骨髓抑制(t = -0.33,P = 0.74)、心脏毒性 (t = -0.20,P = 0.84))、肝肾功能损伤(t = 0.10,P = 0.92)及过敏反应(t = 0.56,P = 0.63)检测到明显 的发表偏倚。不同研究间也未检测到明显的发表偏倚(t = -1.31,P = 0.19)。

# 3 讨论

卵巢癌是最常见的妇科生殖系统肿瘤,其发病率逐年上升。由于卵巢癌临床治疗方案有限,且易出 现耐药现象,导致患者预后不良,生存期短,给患者带来巨大的疾病负担<sup>[21]</sup>。对于 PSROC 患者,采用含 铂类药物化疗后,使用多种 PARP 抑制剂进行维持治疗,可显著延长患者的中位无进展生存期<sup>[22]</sup>。奥 拉帕尼作为一种获批用于治疗复发性卵巢癌及乳腺癌易感基因(BRCA)突变的 PARP 抑制剂,已被证明在卵巢癌患者中具有显著的临床益处<sup>[23]</sup>。相关研究表明,与安慰剂相比,奥拉帕尼可将 PSROC 患者的中位总体生存期延长 12.9 个月,并降低 70%的疾病进展或死亡的风险<sup>[24]</sup>。文中研究结果显示,试验 组患者的临床缓解率、疾病控制率及无进展生存期均显著优于对照组,表明奥拉帕尼治疗在治疗 PSROC 方面具有显著的疗效。

在安全性方面,化疗过程中出现的毒副反应是影响 PSROC 患者治疗进程的重要因素<sup>[25]</sup>。文中研 究发现,接受奥拉帕尼维持治疗的试验组患者在消化功能异常、骨髓抑制、神经毒性、心脏毒性、脱发等 不良反应的发生率上显著低于其他化疗药物。然而,相较于其他化疗药物,肝肾功能损伤及过敏反应的 发生率并未显示出统计学上的显著差异。尽管呕吐、腹泻、消化不良和食欲减退等不良反应的发生率高 于对照组,但其程度较轻,且可通过调整奥拉帕尼的剂量进行有效控制。此外,在减少或停止用药并进 行对症治疗后,患者的不良反应均有所减轻,尚未发现有后遗症或致死病例的报告。上述研究表明,奥 拉帕尼的毒性相对较低,其毒副作用可逆转,相关辅助药物能够显著提高患者的耐受性。

综上所述,奥拉帕尼在治疗铂敏感复发性卵巢癌方面表现出显著的疗效和良好的有效性。此外,该 药物的不良反应发生率较低,安全性优于其他治疗药物,因此,推荐在临床实践中推广其应用。

# 参考文献:

- [1] 布里斯托,阿姆斯特朗.卵巢癌[M].吴玉梅,张为远,译.北京:人民卫生出版社,2011.
- [2] 黄肖肖,李燕华. 铂类敏感型复发性卵巢癌治疗的研究进展[J]. 安徽医药,2019,23(6):1069-1073. DOI:10.3969/j. issn. 1009-6469. 2019. 06. 003.
- [3] 孔北华,刘继红,黄鹤,等. 卵巢癌 PARP 抑制剂临床应用指南(2022 版)[J]. 肿瘤综合治疗电子杂志,2022,8(3): 64-77. DOI:10.12151/JMCM. 2022.03-07.
- [4] STANG A. Critical evaluation of the Newcastle-Ottawa scale for the assessment of the quality of nonrandomized studies in Meta-analyses[J]. European Journal of Epidemiology, 2010, 25(9):603-605. DOI: 10.1007/s10654-010-9491-z.
- [5] GREENLAND S,LONGNECKER M P. Methods for trend estimation from summarized dose-response data, with applications to Meta-analysis[J]. American Journal of Epidemiology, 1992, 135(11): 1301-1309. DOI: 10. 1093/oxfordjournals. aje. a116237.
- [6] ORSINI N,LI R, WOLK A, et al. Meta-analysis for linear and nonlinear dose-response relations: Examples, an e-valuation of approximations, and software[J]. American Journal of Epidemiology, 2012, 175(1): 66-73. DOI: 10. 1093/aje/kwr265.
- [7] 崔雅馨,刘欣.奥拉帕利在铂敏感复发性卵巢癌维持治疗中的临床价值研究[J]. 潍坊医学院学报,2020,42(2):114-117. DOI:10.16846/j.issn.1004-3101.2020.02.010.
- [8] 徐才慧,牛爱琴,郭银谋.奥拉帕尼联合紫杉醇、顺铂化疗方案治疗铂敏感复发性卵巢癌的效果[J].河南医学研究, 2021,30(25):4747-4750.DOI:10.3969/j.issn.1004-437X.2021.25.044.
- [9] 权瑞泉,张丽,匡黎,等.奥拉帕尼联合贝伐珠单抗治疗复发性铂类敏感卵巢癌患者的疗效及对血清 HE4、CA125、 CTC 水平的影响[J].国际肿瘤学杂志,2020,47(10):606-610.DOI:10.3760/cma.j.cn371439-20191116-00086.
- [10] 路平,郭玉琪.奥拉帕尼联合贝伐珠单抗在复发性铂类敏感卵巢癌患者中的疗效观察[J].中国合理用药探索, 2020,17(7):77-82. DOI:10.3969/j.issn.2096-3327.2020.7.019.
- [11] PUJADE-LAURAINE E, LEDERMANN J A, SELLE F, et al. Olaparib tablets as maintenance therapy in patients with platinum-sensitive, relapsed ovarian cancer and a BRCA1/2 mutation (SOLO2/ENGOT-Ov21): A doubleblind, randomised, placebo-controlled, phase 3 trial[J]. Lancet Oncology, 2017, 18(9):1274-1284. DOI:10.1016/ S1470-2045(17)30469-2.
- [12] POVEDA A, FLOQUET A, LEDERMANN J A, et al. Olaparib tablets as maintenance therapy in patients with platinum-sensitive relapsed ovarian cancer and a BRCA1/2 mutation (SOLO2/ENGOT-Ov21): A final analysis of a double-blind, randomised, placebo-controlled, phase 3 trial[J]. Lancet Oncology, 2021, 22(5); 620-631. DOI:10. 1016/S1470-2045(21)00073-5.
- [13] PENSON R T, VALENCIA R V, CIBULA D, et al. Olaparib versus nonplatinum chemotherapy in patients with platinum-sensitive relapsed ovarian cancer and a germline BRCA1/2 Mutation (SOLO3): A randomized phase III

trial[J]. Journal of Clinical Oncology, 2020, 38(11):1164-1174. DOI:10.1200/JCO.19.02745.

- [14] LEDERMANN J. HARTER P.GOURLEY C.et al. Olaparib maintenance therapy in patients with platinum-sensitive relapsed serous ovarian cancer: A preplanned retrospective analysis of outcomes by BRCA status in a randomised phase 2 trial[J]. Lancet Oncology, 2014, 15(8):852-861. DOI: 10.1016/S1470-2045(14)70228-1.
- [15] OZA A M,CIBULA D,BENZAQUEN A O,et al. Olaparib combined with chemotherapy for recurrent platinumsensitive ovarian cancer: A randomised phase 2 trial[J]. Lancet Oncology, 2015, 16(1): 87-97. DOI: 10. 1016/ S1470-2045(14)71135-0.
- [16] LEDERMANN J A, HARTER P, GOURLEY C, et al. Overall survival in patients with platinum-sensitive recurrent serous ovarian cancer receiving olaparib maintenance monotherapy: An updated analysis from a randomised, placebo-controlled, double-blind, phase 2 trial[J]. Lancet Oncology, 2016, 17 (11): 1579-1589. DOI: 10. 1016/S1470-2045(16)30376-X.
- [17] FRIEDLANDER M, GEBSKI V, GIBBS E, et al. Health-related quality of life and patient-centred outcomes with olaparib maintenance after chemotherapy in patients with platinum-sensitive, relapsed ovarian cancer and a BRCA1/2 mutation (SOLO2/ENGOT Ov-21): A placebo-controlled, phase 3 randomised trial[J]. Lancet Oncology, 2018, 19(8):1126-1134. DOI: 10. 1016/S1470-2045(18)30343-7.
- [18] PEREZ-FIDALGO J A, CORTÉS A, GUERRA E, et al. Olaparib in combination with pegylated liposomal doxorubicin for platinum-resistant ovarian cancer regardless of BRCA status: A GEICO phase [[ trial (ROLANDO study)[J]. European Society for Medical Oncology, 2021, 6(4):100212. DOI:10.1016/J. ESMOOP. 2021.100212.
- [19] MATULONIS U A, HARTER P, GOURLEY C, et al. Olaparib maintenance therapy in patients with platinumsensitive, relapsed serous ovarian cancer and a BRCA mutation: Overall survival adjusted for postprogressionpoly (adenosine diphosphate ribose) polymerase inhibitor therapy[J]. Cancer, 2016, 122(12): 1844-1852. DOI: 10. 1002/ cncr. 29995.
- [20] COLOMBO N, TOMAO F, PANICI P B, *et al.* Randomized phase II trial of weekly paclitaxel vs. cediranib-olaparib (continuous or intermittent schedule) in platinum-resistant high-grade epithelial ovarian cancer[J]. Gynecologic Oncology, 2022, 164(3):505-513. DOI:10.1016/J. YGYNO. 2022. 01.015.
- [21] 陈慧,周思园,孙振球.常见妇科三大恶性肿瘤的流行及疾病负担研究现状[J].中国现代医学杂志,2015,25(6): 108-112.
- [22] 朱俊,吴小华.2020年度妇科恶性肿瘤最新研究进展及展望[J].中国癌症杂志,2021,31(4):250-256.DOI:10. 19401/j.cnki.1007-3639.2021.04.002.
- [23] BOCHUM S,BERGER S,MARTENS U M. Olaparib[J]. Recent Results in Cancer Research, 2018, 211; 217-233. DOI:10.1007/978-3-319-91442-8.
- [24] POVEDA A, FLOQUET A, LEDERMANN J A, et al. Olaparib tablets as maintenance therapy in patients with platinum-sensitive relapsedovarian cancer and a BRCA1/2 mutation (SOLO2/ENGOT-Ov21): A final analysis of a double-blind, randomized, placebo-controlled, phase 3 trial[J]. Lancet Oncology, 2021, 22(5): 620-631. DOI: 10. 1016/S1470-2045(21)00073-5.
- [25] 冯征. PARP 抑制剂用于铂敏感复发卵巢癌患者维持治疗的血液学毒性概述[J]. 中国癌症杂志,2020,30(4):299-304. DOI:10.19401/j. cnki. 1007-3639. 2020. 04. 009.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 刘源岗)

DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 202404040

# 采用两阶段超效率 SBM-DEA 模型的 创新型省份创新效率评价



(华侨大学 经济与金融学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 采用两阶段超效率 SBM-DEA 模型,对 10 个主要创新型省份 2015-2022 年的创新效率进行测度,借 助 Malmquist 指数法和耦合协调度模型分析各省创新效率的动态趋势和两阶段创新效率的协调性。根据两 阶段效率特征和分布特点,探讨各类省份的效率增长路径。结果表明:广东省、江苏省和福建省的两阶段创新 效率和整体创新效率均达到 DEA 有效;多数创新型省份的商业转化阶段创新效率高于技术研发阶段创新效 率,但各创新型省份商业转化阶段的 TFP 低于技术研发阶段的 TFP;各创新型省份两阶段发展协调性总体较 差,多数省份效率提升路径偏向于技术研发效率增长。

关键词: 创新型省份;创新效率;两阶段超效率 SBM-DEA 模型; Malmquist 指数

**中图分类号:** F 124.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2025)02-0230-07

# Evaluation of Innovation Efficiency of Innovative Provinces Using Two-Stage Super-Efficiency SBM-DEA Model

# YAN Shengyan, HOU Ling

(School of Economics and Finance, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** Using a two-stage super-efficiency SBM-DEA model, the innovation efficiency of ten major innovative provinces from 2015 to 2022 is measured, the Malmquist index method and coupling coordination degree model are used to analyze the dynamic trend of innovation efficiency and the coordination of two-stage innovation efficiency in each province, and to explore the efficiency growth paths of various provinces based on twostage efficiency characteristics and distribution characteristics. The results show that Guangdong Province, Jiangsu Province and Fujian Province had achieved DEA efficiency in both two-stage innovation efficiency and overall innovation efficiency, the innovation efficiency in the commercial transformation stage of most innovative provinces was higher than that in the technology research and development stage, but the TFP in the commercial transformation stage of each innovative province was lower than that in the technology research and development stage, the overall development coordination of the two-stage of each innovative province was relatively poor, and the efficiency improvement paths of most provinces tended to focus on the increase of technology research and development efficiency.

**Keywords:** innovative province; innovation efficiency; two-stage super-efficiency SBM-DEA model; Malmquist index

基金项目: 福建省社科规划重点项目(FJ2022A012);福建省创新战略研究项目(2020R0057);华侨大学高层次人才 科研启动项目(21SKBS011)

**收稿日期:** 2024-04-18

通信作者: 严圣艳(1985-),女,副教授,博士,主要从事创新经济学的研究。E-mail:151408030@qq.com。

"科技是第一生产力,创新是第一动力"充分体现了科技创新在国家发展全局中的核心地位。为强 化国家战略科技力量,助力建设创新型国家,早在2008年,山东省、江苏省和浙江省率先提出了以建设 创新型省份推动建设创新型国家的规划,此举取得了良好效果。2013年,我国科技部首次发函批准江 苏省作为创新型试点省份的先行者。为深入实施创新驱动发展战略,确保我国2020年实现进入创新型 国家行列的目标,2016年,科技部制定了《建设创新型省份的工作指引》。截止目前,科技部批准了江苏 省、安徽省、陕西省、浙江省、湖北省、广东省、福建省、山东省、四川省、湖南省、吉林省等11个省份的建 设试点。创新型试点省份政策已经推行10a,该政策为我国科技创新做出了巨大的贡献,但由于不同地 区的发展模式、发展速度不同,各省份的创新效率存在一定差异。未来几年是创新型省份建设的决胜 期,评估主要创新型省份的创新效率,研究不同省份之间效率的差异,具有较强的理论意义与实践意义。

目前,有关创新型省份试点政策的效果评价分为两类:一类采用因果推断法检验创新型城市或省份的政策效果<sup>[1-5]</sup>;另一类采用数据包络分析(DEA)方法和回归模型对区域创新效率及其影响因素进行评价和分析<sup>[6-8]</sup>。基于此,本文采用两阶段基于超效率松弛值测算-数据包络分析(SBM-DEA)模型对创新型省份的创新效率进行评价。

# 1 数据指标

### 1.1 创新流程分解

创新行为是多主体互动、多要素流通的复杂流程,创新效率则是在综合考虑各主体产业基础、技术 水平及要素禀赋等因素上,对创新行为的投入产出比进行衡量。在全面推进创新型省份建设中,各省技 术研发和商业转化"两手抓"措施说明科技研发投入并不能直接转化为经济效益,将科技创新过程分解 为技术研发和商业转化两个子阶段能够做出更有效的创新效率评价。

首先,在技术研发阶段,各省在研发过程中将研发经费、研发人员等作为初始科研投入,得到授权专利、科技论文等科技成果作为中间产出;其次,在商业转化阶段,将技术研发阶段的中间产出作为商业转化阶段的中间投入,且由于存在科技成果流转成本而追

加技术合同交易额等追加投入,得到新产品销售额和地区生产总值等最终产出。图1为创新投入产出流程。

### 1.2 指标选取

遵循创新过程的两阶段性和指标数据的现实意义 和可操作性,共选取2个初始投入指标、2个中间产出指标、1个追加投入指标及2个最终产出指标。



Fig. 1 Innovation input-output process

1)初始投入指标,即技术研发阶段的投入指标。各省在建设创新型省份中主要通过人才培育、财政科技投入等方式支持技术研发活动,人才与资本是技术创新的主要要素,故选取研究与试验发展 (R&D)人员、经费投入作为技术创新的初始投入指标,考虑到创新型省份的规模差异性显著,将初始投入指标确定为"每万人 R&D 人员折合全时当量"和"R&D 经费内部支出占 GDP 比重"<sup>[9]</sup>。

2)中间产出指标,即技术研发阶段的产出指标和商业转化阶段的部分投入指标。技术研发阶段是新技术的孵化期,授权专利和科技论文产出被视为新技术孵化的实用型和学术型成果,需通过商业化和产业化转化为直接经济效益。因此,将中间产出指标确定为"专利授权数"和"科技论文发表数"。

3)追加投入指标,即商业转化阶段的部分投入指标。该指标体现了技术转移和科技成果转化的总体规模,能够反映中间科研产出参与商业转化阶段的规模,可作为商业转化阶段的投入指标。因此,将追加投入指标确定为"技术合同成交金额"。

4)最终产出指标,即商业转化阶段的产出指标。新产品指突破了原有技术或工艺而提高经济效益的产品,新产品销售额能够反映微观企业在研发创新中的盈利能力,以及传统产业转型升级的程度。地区生产总值能衡量各创新型省份的整体经济发展水平。因此,将最终产出指标确定为"新产品销售额"和"地区生产总值"。

#### 1.3 数据来源

在 11 个创新型省份中,吉林省获批最晚,吉林省创新效率起点低而增速快,考虑到测算结果的稳健

性,暂不将其纳为研究对象。鉴于创新产出相较于投入具有一定的滞后性,目前,大部分学者在进行创新投入产出研究时,普遍设置两年的滞后期。因此,文中在评估第 N 年创新效率时,采用第 N 年的产出指标与第 N-2 年的投入指标。

指标数据均来源于 2014-2023 年的《中国高技术产业统计年鉴》《中国科技统计年鉴》《中国社会统 计年鉴》和《中国火炬统计年鉴》。

# 2 研究方法

### 2.1 超效率 SBM-DEA 模型

规模报酬不变的 CCR 模型与 BCC 模型在进行效率评估时,不仅存在投入产出变量松弛问题,导致 效率测算结果误差较大,而且当多个决策单元都为有效时,无法对有效的决策单元效率进行区分。由于 研究对象是各创新型省份,这些省份在创新效率排行上基本处于全国领先地位,采用传统的 DEA 模型 进行效率评价会出现较多效率值为1的单元,无法体现"优中取优"的效率评价原则。超效率 SBM-DEA 模型将松弛变量纳入目标函数,能够精确地度量决策单元的投入产出效率,同时为有效决策单元 进行排序。

假定有 n 个决策单元(DMU),每个决策单元都有 m 种相同投入和 q 种相同产出, $x_{i,k}$ ( $i=1,\dots,m$ ) 为第 k 个决策单元的投入, $y_{r,k}$ ( $r=1,\dots,q$ )为第 k 个决策单元的产出。

超效率 SBM-DEA 模型的线性规划公式为

$$\min \rho = \frac{1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} \frac{s_{i}^{-}}{x_{i,k}}}{1 - \frac{1}{q} \sum_{r=1}^{q} \frac{s_{r}^{-}}{y_{r,k}}},$$
(1)  
s. t.  $\sum_{j=1, j \neq k}^{n} x_{i,j} \lambda_{j} - s_{i}^{-} \leqslant x_{i,k}, \quad \sum_{j=1, j \neq k}^{n} y_{r,j} \lambda_{j} + s_{r}^{+} \geqslant y_{r,j}, \quad \sum_{j=1, j \neq k}^{n} \lambda_{j} = 1,$ 

 $\lambda, s^-, s^+ \ge 0, \quad i = 1, 2, \cdots, m, \quad r = 1, 2, \cdots, q, \quad j = 1, 2, \cdots, n (j \neq k)$ 

式(1)中: $\rho$  为效率值,当 $\rho \ge 1$ 时,说明决策单元有效; $\lambda$  为权重; $s^-$ 与 $s^+$ 为松弛变量, $s^-$ 表示投入冗余,  $s^+$ 表示产出不足。

参考文献[10]的方法,通过超效率 SBM-DEA 模型测算技术研发阶段创新效率 E<sub>1</sub> 和商业转化阶段创新效率 E<sub>2</sub> 后,将两阶段的创新效率进行乘算,得出整体创新效率 E,这种测算方法考虑了中间投入和中间产出对整体创新效率的影响,较大程度上避免了创新过程的"黑箱"问题。

整体创新效率的测算公式为

$$E = E_1 \times E_2 \,. \tag{2}$$

这种测算方法可提高效率测算结果的稳定性,一方面,克服了两个子阶段 DEA 有效时,整体阶段 未能实现 DEA 有效的矛盾;另一方面,避免了任意一个子阶段未实现 DEA 有效,且两个子阶段运行效 果差距较大时,整体创新效率反而有效的问题。

2.2 Malmquist 模型

由于传统的 DEA 模型只能独立分析每年的 DMU 技术效率,无法识别 DMU 的跨期动态效率变化,因此,参考文献[11]的方法,采用超效率 SBM-DEA 模型测算各省静态创新效率,并引进 Malmquist 指数法测算全要素生产率指数(TFP),以了解各省的动态创新趋势。

TFP 的计算公式为

$$\text{TFP} = \frac{D_{\text{C}}^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_{\text{C}}^{t}(x^{t}, y^{t})} \times \sqrt{\frac{D_{\text{C}}^{t}(x^{t+1}, y^{t+1}) \times D_{\text{C}}^{t}(x^{t}, y^{t})}{D_{\text{C}}^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}) \times D_{\text{C}}^{t+1}(x^{t}, y^{t})}} \,.$$
(3)

式(3)中: $D_{c}^{t}(x^{t},y^{t})$ 为( $x^{t},y^{t}$ )在 t 期的距离函数; $D_{c}^{t+1}(x^{t+1},y^{t+1})$ 为( $x^{t+1},y^{t+1}$ )在 t+1 期的距离函数;  $D_{c}^{t}(x^{t+1},y^{t+1})$ 为( $x^{t+1},y^{t+1}$ )在 t 期的距离函数; $D_{c}^{t+1}(x^{t},y^{t})$ 为( $x^{t},y^{t}$ )在 t+1 期的距离函数。

当 TFP>1 时,表示 t 期到 t+1 期全要素生产率上升;当 TFP=1 时,表示 t 期到 t+1 期全要素生 产率不变;当 TFP<1 时,表示 t 期到 t+1 期全要素生产率下降。

#### 2.3 耦合协调度模型

采用耦合协调度分析创新型省份技术研发和商业转化的发展协调性<sup>[12]</sup>。由于超效率 SBM-DEA 模型有较多评价单元的 DEA 效率值大于 1,为了使耦合度和耦合协调度等各项指标数值都介于 0~1, 对两阶段创新效率(*E*<sub>1</sub>,*E*<sub>2</sub>)作无量纲标准化处理,有

$$U = \left(\frac{E_I - E_{I,\min}}{E_{I,\max} - E_{I,\min}}\right) \times 0.99 + 0.01.$$
(4)

式(4)中:U为标准化的值; $E_I$ 为子阶段创新效率; $E_{I,max}$ 为相应子阶段创新效率的最大值; $E_{I,min}$ 为相应 子阶段创新效率的最小值。

技术研发-商业转化的两个子系统的耦合协调度公式为

$$D = \sqrt{C \times T},$$

$$C = 2 \times \sqrt{\frac{U_1 \times U_2}{(U_1 + U_2)^2}}, \quad T = \alpha \times U_1 + \beta \times U_2 .$$
(5)

式(5)中:D的取值范围为[0,1],D越小,耦合协调发展水平越低,D越大,耦合协调发展水平越高;C为 技术研发与商业转化两个子阶段的耦合度;T为两阶段的综合协调指数;U<sub>1</sub>,U<sub>2</sub>为同一时间段子阶段创 新效率无量纲标准化后的值; $\alpha$ , $\beta$ 分别为两个子阶段创新效率对耦合协调度的贡献系数,取 $\alpha = \beta = 0.5$ , 认为技术研发和商业转化的创新水平对整体评价的重要程度相当。

# 3 研究结果与分析

### 3.1 静态创新效率评价

根据创新投入与产出指标体系,采用超效率 SBM-DEA 模型和 Dea-Solver Pro 5 软件进行测算。 3.1.1 技术研发阶段的创新效率 2015-2022 年创新型省份技术研发阶段的创新效率,如表 1 所示。 表 1 中: *E*<sub>1,ave</sub> 为技术研发阶段创新效率平均值。由表 1 可得以下 3 个结论。

1) 技术研发阶段创新效率的地区差距较大,2015-2022年,江苏省、广东省、福建省和四川省的创 新效率始终大于1,说明这些省份在技术研发阶段的创新活动达到 DEA 有效;安徽省、陕西省的创新效 率较低,远落于其他省份,未达到 DEA 有效。

2)从变化趋势来看,广东省、山东省的创新效率增长较稳定,湖北省、陕西省的创新效率呈波动上 升趋势,江苏省则呈波动下降趋势,说明各省总体上创新态势不稳定,未能实现创新效率连续稳定增长。

3) 从创新效率排行来看,四川省、广东省、江苏省和福建省一直稳居前列,广东省的创新效率起点 较高,呈增长趋势,且在 2017-2019 年间呈领跑态势;安徽省、陕西省的创新效率常年落后,创新效率平 均值与其他省份差距悬殊。

表 1 2015-2022年创新型省份技术研发阶段的创新效率

- m 1	- 1 - 1	T	<i></i>	• •	1	1	1 1	1			•	· · ·	015		000
Lob		nnovotion	ottionov	in toohn	OLOGU POCO	rob on	d dovo	lonmont	etado of	100000000000000000000000000000000000000	Drownooc	trom 7	015	to	2022
ran.	- 1 - I	innovation	ennenev	III LEUIII	OIO g v I E S E a	nun ang	l ueve	ionment	Slage UI	Innovativ	e provinces	110111 L	UT0	ιO.	4044
								- 1			1				

た川	<i>E</i> 1								
1110	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	$L_{1,ave}$
江苏	1.263	1.132	1.163	1.119	1.142	1.100	1.094	1.156	1.146
浙江	1.020	0.612	0.548	0.492	0.492	0.519	0.498	0.516	0.587
安徽	0.558	0.543	0.487	0.479	0.488	0.579	0.535	0.517	0.523
福建	1.000	1.048	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.064	1.014
山东	0.592	0.576	0.533	0.509	0.563	0.801	1.073	1.073	0.715
湖北	0.511	0.579	0.631	0.625	0.581	0.664	0.622	0.662	0.609
湖南	1.038	1.043	1.061	1.049	0.701	0.618	0.548	0.691	0.844
广东	1.100	1.203	1.348	1.386	1.409	1.207	1.209	1.240	1.263
四川	1.402	1.285	1.269	1.269	1.218	1.238	1.232	1.221	1.267
陕西	0.364	0.470	0.329	0.294	0.337	0.438	0.370	0.409	0.376

3.1.2 商业转化阶段的创新效率 2015-2022 年创新型省份商业转化阶段的创新效率,如表 2 所示。 表 2 中: *E*<sub>2,ave</sub> 为技术研发阶段创新效率平均值。由表 2 可得以下 3 个结论。 1)各省商业转化阶段创新效率差距悬殊,2015-2022年,福建省、广东省、湖南省、山东省和浙江 省的创新效率均大于1,其中,福建省的创新效率更是在2020年首度突破2,位居榜首;安徽省、湖北省、 陕西省和四川省未达到 DEA 有效,其中,四川省商业转化阶段的创新效率与其他省份相差甚远,四川 省在技术研发阶段的创新效率排行较前,而在商业转化阶段不尽人意。

2)从变化趋势来看,创新型省份商业转化阶段创新效率总体呈增长趋势,且增长趋势较技术研发阶段更为显著,部分省份商业转化阶段的创新效率波动较大,安徽省、湖北省和陕西省的创新效率起伏动荡,说明相较于技术研发阶段,各创新型省份商业转化阶段进程差距明显。

3)从创新效率排行来看,福建省商业转化阶段的创新效率为2.088,远超排名第2的浙江省,这说明福建省在商业转化阶段的成就和优势不愧"品牌之都"的荣誉称号;四川省常年落后于其他省,商业转化阶段的创新效率平均值倒数第1名,与倒数第2名的湖北省差距为0.369。

表 2 2015-2022 年创新型省份商业转化阶段的创新效率

Tab. 2	Innovation	efficiency in	n commercia	l transforma	ation stage o	d innovative	provinces f	rom 2015 to	2022		
ゆれ		$E_2$									
自切	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	$L_{2,ave}$		
江苏	1.039	0.703	1.003	1.018	1.043	1.202	1.175	1.219	1.050		
浙江	1.519	1.645	1.721	1.324	1.224	1.162	1.230	1.200	1.378		
安徽	0.608	0.630	0.751	1.076	1.126	1.227	1.181	1.128	0.966		
福建	1.728	1.945	1.687	1.857	1.937	2.193	2.012	3.345	2.088		
山东	1.286	1.141	1.129	1.119	1.114	1.114	1.182	1.198	1.160		
湖北	0.516	1.023	1.017	1.031	1.047	0.633	0.678	0.784	0.841		
湖南	1.418	1.313	1.452	1.374	1.218	1.273	1.191	1.145	1.298		
广东	1.248	1.355	1.377	1.332	1.400	1.201	1.234	1.087	1.279		
四川	0.360	0.344	0.338	0.380	0.464	0.403	0.421	1.063	0.472		
陕西	1.000	1.000	0.999	0.211	1.000	1.060	1.080	1.100	0.931		

3.1.3 整体创新效率 创新型省份整体创新效率平均值,如图 2 所示。图 2 中: $E_{ave}$ 为整体创新效率平均值。由图 2 可得以下 2 个结论。 25

1) 从整体创新效率基本情况来看,江苏省、福 建省、广东省和湖南省整体创新效率平均值达到 " DEA 有效,安徽省、四川省和陕西省的整体创新效" 率平均值低于 0.5,整体创新过程运行状况不佳。

2)从两阶段创新效率分布来看,在整体创新效率平均值大于1的4个省份中,江苏省、福建省和 广东省的两个创新子阶段创新效率均实现DEA有效,而湖南省在技术研发阶段创新效率却未实现 DEA有效,在整体创新效率平均值低于0.5的3个 省份中,四川省两阶段创新效率分布呈"研发高转



化低"特征,而安徽省、陕西省的两阶段创新效率均未实现 DEA 有效,可见整体创新效率能反映各省在 创新总和阶段的运行效果,但并不能完全解释两个子阶段创新发展不平衡、不协调的问题,因此,有必要 进一步分析两阶段效率差距表现。

# 3.2 动态创新效率评价和两阶段协调性分析

3.2.1 动态创新效率评价 采用 Malmquist 指数模型,测算 2015-2022 年各省份两阶段全要素生产率指数(TFP<sub>1</sub>,TFP<sub>2</sub>),并以各省两阶段创新效率平均值是否达到 DEA 有效为标准,将其划分为高研发 高转化、高研发低转化、低研发高转化、低研发低转化等 4 个类别,结果如表 3 所示。由表 3 可得以下 2 个结论。

从动态创新效率来看,创新型省份的技术研发阶段创新效率的增长速度高于商业转化阶段。多数创新型省份在技术研发阶段都实现了全要素生产率指数的增长,而在商业转化阶段,各创新型省份均

未实现全要素生产率指数的增长。

2)高研发高转化的省份有福建省、广东省和江苏省;低研发高转化的省份有浙江省、湖南省和山东省;低研发低转化的省份有安徽省、陕西省和湖北省;高研发低转化的省份只有四川省。总而言之,多数省份的商业转化能力较强,但技术研发能力不足。

表 3 创新型省份两阶段创新效率及 TFP 的对比

Tab. 3	Comparison of	two-stage inn	ovation efficiency	and TFP of	innovative	provinces
--------	---------------	---------------	--------------------	------------	------------	-----------

省份	$E_1$	$E_2$	$\mathrm{TFP}_1$	$\mathrm{TFP}_2$	类别
江苏	1.146	1.050	1.038	0.958	高研发高转化
浙江	0.587	1.378	1.042	0.890	低研发高转化
安徽	0.523	0.966	1.006	0.989	低研发低转化
福建	1.014	2.088	1.028	0.917	高研发高转化
山东	0.715	1.160	1.098	0.948	低研发高转化
湖北	0.609	0.841	0.997	0.925	低研发低转化
湖南	0.844	1.298	1.000	0.870	低研发高转化
广东	1.263	1.279	1.098	0.957	高研发高转化
四川	1.267	0.472	0.994	0.993	高研发低转化
陕西	0.376	0.931	1.020	0.937	低研发低转化

3.2.2 两阶段协调性分析 创新型省份两阶段发展协调度 (耦合协调度),如表4所示。由表4可得以下2个结论。

 1)从两阶段发展协调度来看,除四川省、陕西省的协调 度低于 0.5 外,其他省的协调度均高于 0.5,且更多集中于
 [0.5,0.8],各省协调度排行与整体创新效率排行基本一致, 其中,江苏省、广东省、福建省和湖南省的两阶段协调等级达 到良好协调及以上,四川省、陕西省两阶段出现失调问题。

2) 从分类特征来看,高研发高转化省份技术研发与商 业转化活动协调效果理想;低研发低转化省份中,湖北省、安 徽省的协调度高于 0.4,而陕西省的协调度仅为 0.232,说明 同类型省份之间也存在协调性差异;低研发高转化省份的协 调度均高于 0.5,但各省间存在较大差距;高研发低转化省 份仅有四川省,其两阶段协调状况较差。 表 4 创新型省份两阶段发展协调度 Tab. 4 Development coordination degree

4	Development	coordir	nation	degree	of
tw	o-stage of inn	ovative	provi	nces	

省份	D	所属区间	协调等级
江苏	0.749	0.70~0.79	良好协调
浙江	0.610	0.60~0.69	中级协调
安徽	0.483	0.40~0.49	濒临失调
福建	0.921	0.80~1.00	优秀协调
山东	0.639	0.60~0.69	中级协调
湖北	0.502	0.50~0.59	初级协调
湖南	0.723	0.70~0.79	良好协调
广东	0.842	0.80~1.00	优秀协调
四川	0.316	0.30~0.39	轻度失调
陕西	0.232	0.20~0.29	中度失调

在分析各省两阶段创新效率差异、协调性差异的基础上,进一步研究创新效率分布和效率提升路径。将10个创新型省份技术研发阶段与商业转化阶段的DEA创新效率平均值绘制于2×2矩阵图中,以各省两阶段创新效率平均值是否大于1为分界线,划分为四象限。

创新型省份两阶段创新效率分布,如图 3 所示。 由图 3 可得以下 3 个结论。

1) 左下区域为低研发低转化省份。各阶段创新 效率较低、发展协调性较差的省份一般采用双向协 调式效率提升路径,通过两阶段创新效率的共同增 长使其分布位置向有右上区域移动。陕西省、安徽 省和湖北省的分布位置更靠近商业转化阶段创新效 率分界线,其在双向效率提升路径中应更侧重于技 术研发阶段。

2) 左上和右下区域分别为低研发高转化和高研 发低转化省份,主要有浙江省、山东省、湖南省和四



efficiency of innovation provinces

川省。这些省份的两阶段创新效率差值较大,通常表现为一个创新子阶段存在明显短板,进而拉低了整体创新效率。对于这类省份则采取单边突破式效率提升路径,侧重于提升弱势阶段的创新效率,从而提

http://hdxb.hqu.edu.cn/

高整体创新效率和两阶段协调性。

3)右上区域为高研发高转化省份,以广东省、江苏省和福建省为代表,这些省份两阶段整体创新效率显著,发展协调性较高,但仍存在较大的阶段差异,其中,福建省在分布位置上更靠近技术研发阶段创新效率分界线,江苏省则更贴近商业转化阶段创新效率分界线,这类省份在保持优势阶段的创新效率领先地位的同时,注重提升较弱势阶段的创新效率,防止整体创新效率的衰退。

# 4 结论

1) 从静态创新效率来看,广东省、江苏省、福建省和四川省在技术研发阶段达到 DEA 有效,其他省 份未达到 DEA 有效。在商业转化阶段,福建省、浙江省的创新效率领先,而四川省排名最后。从整体 创新效率来看,广东省、江苏省、福建省和湖南省实现 DEA 有效。湖南省的整体创新效率有效归功于 商业转化阶段的创新效率。四川省未能实现整体创新效率有效源于商业转化阶段创新效率极低。

2)从动态创新效率来看,大部分创新型省份在技术研发阶段实现了创新效率的 TFP 增长,而在商业转化阶段各省均未实现创新效率的 TFP 增长。多数省份的商业转化阶段创新效率平均值高于技术研发阶段,呈高效转化特征的省份数量多于呈高效研发特征省份。由此可见,一方面,我国创新型省份的商业转化能力较强,基础研发能力较为薄弱;另一方面,表明我国创新型省份在基础研发方面正在不断取得进步,但是商业转化方面显得后劲不足。

3)从耦合程度来看,各创新型省份两阶段发展协调性总体较差,多数省份效率提升路径偏向于技术研发效率增长。陕西省、安徽省和湖北省两阶段创新效率表现均不理想,适宜采用双向协调式效率提升路径,浙江省、四川省、山东省和湖南省两阶段创新效率差距较大,适宜采取单边突破式效率提升路径,广东省、江苏省和福建省整体创新效率优异省份需注重提升较弱势阶段效率,以巩固创新优势地位。

#### 参考文献:

- [1] 曹希广,邓敏,刘乃全.通往创新之路:国家创新型城市建设能否促进中国企业创新[J].世界经济,2022,45(6): 159-184. DOI:10.19985/j. cnki. cassjwe. 2022.06.005.
- [2] 武力超. 创新型试点城市的技术创新绩效综合评估[J]. 经济体制改革, 2022(5): 43-50.
- [3] 赵城,苏婧.创新政策能否提升能源效率?:来自国家创新型城市试点的经验证据[J].产业经济研究,2024(1):1-15. DOI:10.13269/j. cnki. ier. 2024.01.008.
- [4] SEONGMIN S, WIEMER C. The impact of the innovation city project on the local economy: Evidence from Korean Innovation City Project from 2012 to 2014[J]. Journal of Asian Economics, 2024, 90:101677.
- [5] 严圣艳,朱凯. 创新型省份试点政策对我国产业升级的影响[J]. 华侨大学学报(哲学社会科学版),2023(4):71-82. DOI:10.16067/j. cnki. 35-1049/c. 20230703.001.
- [6] 王默,魏先彪,彭小宝,等. 国家创新型城市效率评价研究: 基于两阶段 DEA 模型[J]. 北京理工大学学报(社会科 学版),2018,20(6):65-74. DOI:10.15918/j.jbitss1009-3370.2018.2917.
- [7] 徐小阳,赵喜仓.创新型省份建设绩效评价及其影响因素分析[J].统计与决策,2012(24):70-73.
- [8] 陈锦其,周学武,潘家栋.浙江高水平创新型省份建设的进程评价:基于县市 TFP 与创新集聚效应的实证分析[J]. 治理研究,2020,36(5):88-95. DOI:10.15944/j. cnki. 33-1010/d. 2020. 05. 010.
- [9] 尹凡,单莹洁,苏传华,等.河北省区域创新绩效评价模型的构建[J].统计与决策,2011(14):77-79.
- [10] 程大友,冯英浚.基于两阶段关联 DEA 模型的企业效率研究: 以财产保险公司为例[J]. 预测,2008(3):55-61.
- [11] 杨力,魏奇锋.基于超效率 DEA 与 Malmquist 指数的区域研发效率评价:四大国家级城市群比较研究[J].科技进步与对策,2022,39(10):41-51.
- [12] 谭涛,李俊龙.我国高校科技成果转化与区域高技术产业发展水平测度以及耦合协调度研究[J].中国科学基金, 2023,37(4):682-691.DOI:10.16262/j.cnki.1000-8217.20230512.001.

#### (责任编辑: 钱筠 英文审校: 黄心中)

DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 202401003



# Roper-Suffridge 算子和 *ε*-星形映照

# 陈铭新,林雄,王建飞

(华侨大学 数学科学学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:**应用正定二次型构造比复单位球 B<sup>n</sup> 更广泛的区域,并在该域上利用双曲度量证明了 Roper-Suffridge 算子保凸性、保星形和保 ←星形性。该结果丰富了已有 Roper-Suffridge 算子的研究,给出了推广 Roper-Suffridge 算子的不一样思路。

关键词: 双全纯映照; Roper-Suffridge 算子; e-星形映照; 双曲度量; 正定二次型

**中图分类号:** O 174.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2025)02-0237-04

# **Roper-Suffridge Operators and ε-Starlike Mappings**

CHEN Mingxin, LIN Xiong, WANG Jianfei

(School of Mathematical Sciences, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** The positive definite quadratic form is utilized to construct a domain that is wider than the complex unit ball  $B^n$ , and preserved the convexity, starlikeness, and  $\varepsilon$ -starlikeness by Roper-Suffridge operators are proved through the application of hyperbolic metric. This result enriches the existing research on Roper-Suffridge operators and provides a different approach to extending Roper-Suffridge operators.

**Keywords**: biholomorphic mapping; Roper-Suffridge operator; ε-starlike mapping; hyperbolic metric; positive definite quadratic form

# 1 记号与概念

记  $D \subset \mathbf{C}$  为单位圆盘, $B^n = \{ \mathbf{z} = (z_1, z_2, \dots, z_n) \in \mathbf{C}^n : \sum_{k=1}^n |z_k|^2 < 1 \}$  为 n 维复线性空间  $\mathbf{C}^n$  中的 复单位球。当 n=1 时, $B^1 = D$ 。

设  $\Omega \subset \mathbb{C}^n$ ,若对于任意的  $z, w \in \Omega$  和  $t \in [0,1]$ ,均有 $(1-t)z+tw \in \Omega$ ,则称域  $\Omega$  为凸域。若  $\theta \in \Omega$ ,且 对于任意的  $z, w \in \Omega$  和  $t \in [0,1]$ ,均有 $(1-t)z \in \Omega$ ,则称域  $\Omega$  为关于原点的星形域。又设  $\varepsilon \in [0,1]$ ,若 对于任意的  $z, w \in \Omega$  和  $t \in [0,1]$ ,均有 $(1-t)z+\varepsilon tw \in \Omega$ ,则称域  $\Omega$  为  $\varepsilon$ -星形域。不难看出,1-星形域就 是凸域,0-星形域就是星形域,故  $\varepsilon$ -星形域统一处理了凸域与星形域。

设  $f: B^n \to \mathbb{C}^n$  是双全纯映照,若 f(0) = 0,  $J_f(0) = I_n$ ,则称 f 是正规化的,其中, $J_f(0)$ 是 f 在 z = 0处的 Jacobi 矩阵;  $I_n$  是 n 阶单位矩阵。记  $S(B^n)$ 为  $B^n$  上的所有正规化双全纯映照的集合。分别用  $K(B^n), S^*(B^n), E_{\epsilon}^*(B^n)$ 表示  $B^n$  上的正规化双全纯凸映照、星形映照和 ε-星形映照,即

 $K(B^n) = \{ f \in S(B^n) : f(B^n)$ 是凸域  $\},$ 

**收稿日期:** 2024-01-04

通信作者: 陈铭新(1967-),男,副教授,博士,主要从事单复变与多复变函数论的研究。E-mail:chernmx@hqu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12071161)

 $S^*(B^n) = \{ f \in S(B^n) : f(B^n) \in \mathbb{E} \mathbb{F} i \},\$ 

 $E_{\varepsilon}^{*}(B^{n}) = \{ \boldsymbol{f} \in S(B^{n}) : \boldsymbol{f}(B^{n}) \not\in \varepsilon^{-} \not\in \mathbb{R} \forall \}$ 

不难看出,当 0 $\leqslant$  $\epsilon_1$  $\leqslant$  $\epsilon_2$  $\leqslant$ 1 时,有如下关系成立:

 $K(B^n) \subset E^*_{\varepsilon_2}(B^n) \subset E^*_{\varepsilon_1}(B^n) \subset S^*(B^n)_{\circ}$ 

# 2 Roper-Suffridge 算子和主要结果

1995年,Roper等<sup>[1]</sup>引入算子

 $\boldsymbol{\Phi}_{n}(f)(\boldsymbol{z}) = \boldsymbol{F}(\boldsymbol{z}) = \left(f(\boldsymbol{z}_{1}), \sqrt{f'(\boldsymbol{z}_{1})} \boldsymbol{z}_{0}\right).$ 

其中: $f \in D$ 上的双全纯函数, $\mathbf{z} = (z_1, \mathbf{z}_0) \in B^n$ , $\mathbf{z}_0 = (z_2, z_3, \dots, z_n) \in \mathbb{C}^{n-1}$ ,幂函数取 $\sqrt{f'(0)} = 1$ 的解析 单值分支。

现称该算子为 Roper-Suffridge 算子,具有以下 3 个重要性质:

1) 若  $f \in K(D)$ ,则  $F \in K(B^n)$ ;

2) 若  $f \in S^*(D)$ ,则  $F \in S^*(B^n)$ ;

3) 若  $f \in E_{\varepsilon}^{*}(D)$ ,则  $F \in E_{\varepsilon}^{*}(B^{n})$ 。

Roper 等<sup>[1]</sup>首次证明了性质 1)。之后,Graham 等<sup>[2]</sup>简化了性质 1)的证明,并证明了性质 2)。Gong 等<sup>[3]</sup>引入了  $\epsilon$ -星形映照,推广了 Roper-Suffridge 算子,解决了 Graham 等<sup>[2]</sup>的公开问题,并给出了性质 3)的证明。王建飞等<sup>[4]</sup>给出了性质 3)的简洁证明。由于对 C<sup>n</sup> 上具体凸映照、星形映照和  $\epsilon$ -星形映照的 研究较少,而用 Roper-Suffridge 算子可构造出许多这样的映照。这引起多复变专家研究 Roper-Suffridge 算子的兴趣<sup>[5-14]</sup>。因此,本文研究 Roper-Suffridge 算子在比 B<sup>n</sup> 更广泛的域上的保凸性、保星形 和保  $\epsilon$ -星形性,所得主要结果如下。

定理1 假设A为n-1阶实对称正定矩阵。记

 $H_{\mathbf{A}}(\mathbf{z}_{0}) = (|z_{2}|, |z_{3}|, \cdots, |z_{n}|) \mathbf{A} (|z_{2}|, |z_{3}|, \cdots, |z_{n}|)^{\mathrm{T}}.$ 

若  $f \in E_{\varepsilon}^{*}(D)$ ,则

 $\Phi_n(f)(\mathbf{z}) = \mathbf{F}(\mathbf{z}) = \left( f(z_1), \sqrt{f'(z_1)} \mathbf{z}_0 \right) \in E_{\varepsilon}^* (\Omega_A).$ 

其中: $z_0 = (z_2, z_3, \dots, z_n) \in \mathbb{C}^{n-1}$ , $\Omega_A = \{(z_1, z_0) \in \mathbb{C}^n : |z_1|^2 + H_A(z_0) < 1\}$ ,幂函数取 $\sqrt{f'(0)} = 1$ 的解析 单值分支。

注1 若 $A=I_{n-1}$ ,则 $\Omega_A=B^n$ ,此时,定理1退化为性质3)。

**注 2** 当  $\varepsilon = 1$  时,定理 1 表明  $f \in K(D)$ ,则  $F \in K(\Omega_A)$ ;当  $\varepsilon = 0$  时,定理 1 表明  $f \in S^*(D)$ ,则  $F \in S^*(\Omega_A)$ 。

# 3 双曲度量的基本知识

证明定理 1,需要引入双曲度量,给出双曲度量的定义及其重要性质。 定义  $1^{[5,15]}$ 设  $\Omega \subseteq C$  单连通域, $f:D \rightarrow \Omega$  为双全纯函数且  $f(D) = \Omega$ 。那么,称

 $\lambda_{\Omega}(z) |dz| = \frac{|dw|}{(1 - |w|^2) |f'(w)|}, \quad z = f(w), \quad w \in D$ 

为  $\Omega$  上的双曲度量。不难看出, $\lambda_{\Omega}(z)$ 与 f 的选择无关。特别地, $\lambda_{D}(z)|dz| = \frac{|dz|}{1-|z|^2}$ 。

双曲度量有以下2个重要性质[15].

1) 共形不变性。设 
$$\Omega_1, \Omega_2 \cong \mathbb{C}$$
 为单连通域,  $f:\Omega_1 \rightarrow \Omega_2$  双全纯且  $f(\Omega_1) = \Omega_2, \mathbb{M}$   
 $\lambda_{\Omega_1}(z) = \lambda_{\Omega_2}(f(z)) | f'(z) |, \qquad \forall z \in \Omega_1.$ 

2) Schwarz-Pick 估计。设  $\Omega$ ⊂C 是单连通域。若  $f:D \rightarrow \Omega$  为全纯的,则

$$\lambda_{\alpha}(f(z)) | f'(z) | \leq \frac{1}{1 - |z|^2}, \qquad \forall z \in D.$$

特别地,若 $\Omega = D$ ,则|f'(z)| $\leqslant \frac{1 - |f(z)|^2}{1 - |z|^2}$ ,即为D上的 Schwarz-Pick 引理。

**引理 1**<sup>[4-5]</sup> 假设 *G* \vec{C} 为 \vec{c} = 星形域 (\vec{c} \in [0,1]),则对于任意的 z\_1, z\_2 \vec{C} 和 t \in [0,1],恒有  $\frac{1}{\lambda_c((1-t)z_1 + \varepsilon tz_2)} \ge \frac{1-t}{\lambda_c(z_1)} + \frac{\varepsilon t}{\lambda_c(z_2)}.$ 

特别地,当  $\varepsilon = 1$  时,引理 1 表示 $\frac{1}{\lambda_G(z)}$ 是 G 上的凹函数,该结果首次由 Gustafsson<sup>[16]</sup>发现。

# 4 主要结果的证明

定理1的证明:令

$$\begin{cases} u_1 = f(z_1), \\ u_0 = \sqrt{f'(z_1)} \mathbf{z}_0, \end{cases}$$

 $\pm \psi, \boldsymbol{u}_0 = (u_2, u_3, \cdots, u_n)_{\circ}$ 

于是

$$H_{A}(\boldsymbol{u}_{0}) = |f'(\boldsymbol{z}_{1})| H_{A}(\boldsymbol{z}_{0})_{\circ}$$
(1)

记G=f(D),由双曲度量的共形不变性,有

$$\lambda_G(f(z_1)) | f'(z_1) | = \frac{1}{1 - |z_1|^2}$$
(2)

由式(1),(2)可知,

$$\lambda_G(u_1) \frac{H_A(u_0)}{H_A(z_0)} = \frac{1}{1 - |z_1|^2},$$

即  $H_{A}(\boldsymbol{u}_{0})\lambda_{G}(\boldsymbol{u}_{1}) = H_{A}(\boldsymbol{z}_{0})\frac{1}{1-|\boldsymbol{z}_{1}|^{2}} < 1$ 。于是, $H_{A}(\boldsymbol{u}_{0}) - \frac{1}{\lambda_{G}(\boldsymbol{u}_{1})} < 0$ 。表明域  $F(\Omega_{A})$ 为  $\widetilde{\Omega} = F(\Omega_{A}) = \{F(\boldsymbol{z}): \boldsymbol{z} \in \Omega_{A}\} = \{(\boldsymbol{u}_{1}, \boldsymbol{u}_{0}): H_{A}(\boldsymbol{u}_{0}) - \frac{1}{\lambda_{G}(\boldsymbol{u}_{1})} < 0\}$ (3)

要证明  $\mathbf{F} \in E_{\varepsilon}^{*}(\Omega_{A})$ ,只需证明  $\Omega$  为  $\varepsilon$  星形域。即证明对于任意的 $(u_{1}, u_{0}), (v_{1}, v_{0}) \in \Omega$  和  $t \in [0, 1]$ ,均有

$$(1-t)(u_1, \boldsymbol{u}_0) + \varepsilon t(v_1, \boldsymbol{v}_0) \in \Omega$$

事实上,由引理1可得

$$-\frac{1}{\lambda_G((1-t)u_1+\varepsilon tv_1)} \leqslant -\frac{1-t}{\lambda_G(u_1)} -\frac{\varepsilon t}{\lambda_G(v_1)} \circ$$
(4)

另一方面,由于 A 是实对称正定矩阵,从而  $H_A(z_0) = (|z_2|, |z_3|, \dots, |z_n|)A(|z_2|, |z_3|, \dots, |z_n|)$  $|z_n|)^T$  为  $\mathbf{R}^{n-1}$ 上的凸函数。于是

$$H_{\mathbf{A}}((1-t)\mathbf{u}_{0} + \varepsilon t\mathbf{v}_{0}) \leqslant (1-t)H_{\mathbf{A}}(\mathbf{u}_{0}) + tH_{\mathbf{A}}(\varepsilon \mathbf{v}_{0}) \leqslant (1-t)H_{\mathbf{A}}(\mathbf{u}_{0}) + \varepsilon^{2}tH_{\mathbf{A}}(\mathbf{v}_{0}) \leqslant (1-t)H_{\mathbf{A}}(\mathbf{u}_{0}) + \varepsilon tH_{\mathbf{A}}(\mathbf{v}_{0})_{\circ}$$

$$(5)$$

由式(3)~(5)可得

$$H_{A}((1-t)u_{0} + \varepsilon tv_{0}) - \frac{1}{\lambda_{G}((1-t)u_{1} + \varepsilon tv_{1})} \leqslant (1-t)H_{A}(u_{0}) + \varepsilon tH_{A}(v_{0}) - \frac{1-t}{\lambda_{G}(u_{1})} - \frac{\varepsilon t}{\lambda_{G}(v_{1})} = (1-t)\left(H_{A}(u_{0}) - \frac{1}{\lambda_{G}(u_{1})}\right) + \varepsilon t\left(H_{A}(v_{0}) - \frac{1}{\lambda_{G}(v_{1})}\right) < 0.$$

于是有 $(1-t)(u_1, u_0) + \varepsilon t(v_1, v_0) \in F(\Omega_A)$ 。故  $F \in E_{\varepsilon}^*(\Omega_A)$ 。

# 5 主要结果的应用

为说明定理1的结果比单位球 B<sup>n</sup> 的结果更广泛,现给出 n=3 的结果。取  $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & a \\ a & 1 \end{pmatrix}, a \in \mathbf{R}$  且

|a|<1,则A是实对称正定矩阵。此时,

 $H_{\mathbf{A}}(z_2, z_3) = |z_2|^2 + 2a |z_2 z_3| + |z_3|^2$ ,

 $\Omega_{A} = \{(z_{1}, z_{2}, z_{3}) \in \mathbb{C}: |z_{1}|^{2} + |z_{2}|^{2} + |z_{3}|^{3} + 2a |z_{2}z_{3}| < 1\}.$ 

应用定理1,可得推论1。

推论1 设  $a \in \mathbf{R}$  且 |a| < 1,若  $f \in E_{\varepsilon}^{*}(D)$ ,则

 $\Phi_{3}(f)(z) = F(z) = \left(f(z_{1}), \sqrt{f'(z_{1})} z_{2}, \sqrt{f'(z_{1})} z_{3}\right) \in E_{\varepsilon}^{*}(\Omega_{A}),$ 

其中, $\Omega_A = \{(z_1, z_2, z_3) \in \mathbb{C}: |z_1|^2 + |z_2|^2 + |z_3|^3 + 2a |z_2 z_3| < 1\}$ ,幂函数取 $\sqrt{f'(0)} = 1$ 的解析单值分 支。特别地,若a = 0,则 $\Omega_A = B^3$ 。

# 参考文献:

- [1] ROPER K A, SUFFRIDGE T J. Convex mappings on the unit ball of C<sup>n</sup> [J]. Journal d'Analyse Mathématique, 1995, 65(1): 333-347. DOI:10.1007/BF02788776.
- [2] GRAHAM I,KOHR G. Univalent mappings associated with the Roper-Suffridge extension operator[J]. Journal d' Analyse Mathématique,2000,81(1):331-342. DOI:10.1007/BF02788995.
- [3] GONG Sheng, LIU Taishun. On the Roper-Suffridge extension operator [J]. Journal d'Analyse Mathématique, 2002, 88(1): 397-404. DOI:10.1007/BF02786583.
- [4] WANG Jianfei, LIU Taishun. The Roper-Suffridge extension operator and its applications to convex mappings in C<sup>2</sup>
   [J]. Transactions of the American Mathematical Society, 2018, 370(11):7743-7759. DOI:10.1090/tran/7221.
- [5] 王建飞,刘太顺,唐笑敏.双曲度量和 Roper-Suffridge 算子[J]. 中国科学(数学),2022,52(4):369-380. DOI:10. 1360/SSM-2020-0243.
- [6] GRAHAM I, HAMADA H, KOHR G, et al. Extension operators for locally univalent mappings[J]. Michigan Mathematical Journal, 2002, 50(1): 37-55. DOI: 10.1307/mmj/1022636749.
- [7] GRAHAM I, HAMADA H, KOHR G. Extension operators and subordination chains[J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 2012, 386(1):278-289. DOI:10.1016/j. jmaa. 2011.07.064.
- [8] LIU Taishun, XU Qinghua. Loewner chains associated with the generalized Roper-Suffridge extension operator[J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 2006, 322(1):107-120. DOI:10.1016/j.jmaa. 2005.08.055.
- [9] GRAHAM I, HAMADA H, KOHR G. Parametric representation of univalent mappings in several complex variables
   [J]. Canadian Journal of Mathematics, 2002, 54(2): 324-351. DOI: 10. 4153/CJM-2002-011-2.
- [10] FENG Shuxia, LIU Taishun. The generalized Roper-Suffridge extension operator[J]. Acta Mathematica Scientia (English Edition), 2008, 28(1):63-80. DOI:10.1016/S0252-9602(08)60007-7.
- [11] LIU Mingsheng, ZHU Yucan. On the extension operator in Banach spaces [J]. Advances in Mathematics, 2005, 34 (4):506-508. DOI:10.11845/sxjz. 2005. 34. 04. 0506.
- [12] 刘名生,朱玉灿.有界完全 Reinhardt 域上推广的 Roper-Suffridge 算子[J].中国科学(A辑:数学),2007,37(10): 1193-1206. DOI:10.1360/za2007-37-10-1193.
- [13] MUIR J R. A modification of the Roper-Suffridge extension operator[J]. Computational Methods and Function Theory, 2005, 5(1):237-251. DOI:10.1007/BF03321096.
- [14] HAMADA H,KOHR G. Roper-Suffridge extension operator and the lower bound for the distortion[J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 2004, 300(2):454-463. DOI: 10.1016/j. jmaa. 2004. 06.052.
- [15] BEARDON F, MINDA D. The hyperbolic metric and geometric function theory[C] // Proceedings of the International Quasiconformal Mappings and Their Applications. New Delhi: Narosa Publishing House, 2007:9-56.
- [16] GUSTAFSSON B. On the convexity of a solution of Liouville's equation[J]. Duke Mathematical Journal, 1990, 60
   (2):303-311. DOI:10.1215/S0012-7094-90-06012-0.

(责任编辑:黄晓楠 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、特区的科技信息,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短明确,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 请登录本刊唯一官方网站(https://hdxb. hqu. edu. cn)进行在线投稿,本刊不接受其他方式投稿。

# 华侨大学学报(自然科学版)编辑部

- •《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

- ·俄罗斯《文摘杂志》(AJ, VINITI) •美国《化学文摘》(CAS) ·荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus) •波兰《哥白尼索引》(IC) • "STN 国际"数据库 ·德国《数学文摘》(Zbl MATH) • 中国学术期刊综合评价数据库 • 中国科学引文数据库 • 中国科技论文统计期刊源 • 中国期刊网 •中国学术期刊(光盘版) • 万方数据库 • 中文科技期刊数据库 • 中国机械工程文摘 • 中国化学化工文摘 • 中国力学文摘 • 中国无线电电子学文摘 • 中国生物学文摘 • 中国物理文摘
  - 中国数学文摘

# 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2期(总第202期)2025年3月20日

主管单位:	福 建	省	教	育	厅
主办单位:	华	侨	大		学
	(中国	福建 泉	見州 3	62021	)
	(中国	福建 厦	〔门 3	61021	)
编辑出版:	华侨大学	学报自	然科学	版编辑	部
(电	话:05	95-22692	2545		)
电子	「信箱:jo	urnal@h	qu. edi	u. cn	
X	址:ht	tps://ho	lxb. hq	lu. edu	. cn J
主 编:	黄 仲	<u> </u>			
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	总公司	
	(北京 782	2信箱,曲	『政编	冯 1000	)11)

ISSN 1000-5013 CN 35-1079/N 中国标准连续出版物号:

国内邮发代号: 34-41 国外发行代号: NTZ 1050 国内定价: <u>10.00 元/册</u> 60.00 元/套

ISSN 1000-5013

# JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY

( NATURAL SCIENCE )

(Bimonthly, Started in 1980)

Vol. 46 No. 2 (Sum 202) Mar. 20, 2025

**Competent Authority:** The Education Department of Fujian Province **Sponsor**: Huaqiao University (Quanzhou 362021, Fujian, China) (Xiamen 361021, Fujian, China) Editor in Chief : HUANG Zhongvi Edited and Published by Editorial Department of Journal of Huaqiao University (Natural Science) Tel: 0595-22692545 E-mail: journal@hqu.edu.cn https://hdxb. hqu. edu. cn **Distributed by** China Publication Foreign **Trading Corporation** (P. O. Box 782, Beijing, 100011, China)