

应用统计 与数据科学

Applied Statistics and Data Science



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2025 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



编委会名单

主 编



王国长 (Guochang Wang), 暨南大学 (Jinan University),
邮箱: wanggc023@amss.ac.cn
研究兴趣: 函数型数据分析、时间序列、充分性降维、统计与机器学习
functional data analysis, time series, sufficiency dimension reduction, statistics and machine learning

执行副主编



张兴发 (Xingfa Zhang), 广州大学 (Guangzhou University),
邮箱: xingfazhang@gzhu.edu.cn
研究兴趣: 金融统计、环境统计、机器学习
financial statistics, environmental statistics, machine learning

编 委



胡志勇 (Zhiyong Hu), 广州大学 (Guangzhou University)
邮箱: zhyhu65@163.com
研究兴趣: 大数据、人工智能、财务与会计
big data, artificial intelligence, finance and accounting



雷田礼 (Tianli Lei), 深圳职业技术大学 (Shen Zhen Polytechnic University)
邮箱: ltl@szpu.edu.cn
研究兴趣: 数量经济、高职数学教育
auantitative economics, higher vocational mathematics education



舒连杰 (Lianjie Shu), 澳门大学 (University of Macau),
邮箱: ljshu@um.edu.mo
研究兴趣: 量化金融, 统计学习, 质量控制及管理
quantitative finance, statistical learning, quality control and management



王纬 (Wei Wang), 山东财经大学 (Shandong University of Finance and Economics)
邮箱: wangwei_0115@sdufe.edu.cn
研究兴趣: 统计机器学习、应用统计、计量经济
statistical machine learning, applied statistics, econometrics



杨凯 (Kai Yang), 长春工业大学 (Changchun University of Technology)
邮箱: yangkai@ccut.edu.cn
研究兴趣: 时间序列分析、高维数据分析、贝叶斯分析
time series analysis, high-dimensional data analysis, bayesian analysis



周彦 (Yan Zhou), 深圳大学 (Shenzhen University)
邮箱: zhouy1016@163.com
研究兴趣: 生物统计, 数据科学
Biostatistics, data science



李永明 (Yongming Li), 上饶师范学院 (Shangrao Normal University)
邮箱: lym1019@163.com
研究兴趣: 非参数统计, 金融统计, 极限理论与统计大样本性质, 小波方法
nonparametric statistics, financial statistics, limit theory and statistical large sample theory, wavelet method



刘照德 (Zhao de Liu), 广东财经大学 (Guangdong University of Finance & Economics)
邮箱: lzhaode@163.com
研究兴趣: 经济统计、多元统计、计量分析
economic statistics, multivariate statistics, econometric analysis



王小刚 (Xiaogang Wang), 北方民族大学 (North Minzu University)
邮箱: wongone@163.com
研究兴趣: 经济与社会统计
economic and social statistics



严晓东 (Xiaodong Yan), 西安交通大学 (Xi'an Jiaotong University)
邮箱: yanxiaodong@xjtu.edu.cn
研究兴趣: 统计机器学习、智能体统计学
statistical machine learning, agent statistics



朱柯 (Ke Zhu), 香港大学 (The University of Hong Kong)
邮箱: mazhuke@hku.hk
研究兴趣: 统计建模、金融时间序列分析、计量经济、金融大数据
statistical modeling, financial time series analysis, econometrics, financial big data

目录CONTENTS

应用统计与数据科学

Applied Statistics and Data Science

第1卷 第10期 2025年12月刊

主办单位: ART AND DESIGN PRESS INC

(United States)

承办单位: 广州统计师事务所

指导单位: 广东省现场统计学会、广州市统计学会

主 编: 王国长

执行副主编: 张兴发

编 委: 胡志勇、李永明、雷田礼、刘照德、
舒连杰、王小刚、王 纬、严晓东、
杨 凯、朱 柯、周 彦

地 址: 119 S Atlantic Blvd, Suite 300D Monterey
Park, CA 91754

网 址: <https://www.artdesignp.com>

本刊说明:

凡向本刊所投稿件, 全体作者需签署论文著作权
转让声明书和论文发表承诺书, 声明、承诺及相关事
项如下:

- 作者将论文的复制权、发行权、网络传播权、翻
译权、汇编权、信息网络传播权、改编权等著作
权在世界范围内免费转让给本刊。
- 论文不侵犯他人著作权和其他权利, 否则作者将
承担由此产生的全部责任, 并赔偿由此给出版单
位造成的全部损失。
- 论文署名作者享有该作品的完全著作权, 署名作
者的身份真实。
- 论文未曾以任何形式公开发表过。
- 作者所投本刊稿件, 本刊编辑部拥有修改权。

经济与金融统计 | ECONOMIC AND FINANCIAL STATISTICS

- 001 加快构建房地产发展新模式的内生逻辑与实现路径 郭峰, 陈其荣, 罗艺
The Intrinsic Logic and Realization Path of Accelerating the Construction of a New
Model for Real Estate Development Guo Feng, Chen Qirong, Luo Yi
- 006 数字技术驱动下广东省城乡收入差距的动态演进
与政策启示 黄丹宇, 黄泓杰, 毛瀚廷, 王晔
Dynamic Evolution and Policy Implications of the Urban-Rural Income Disparity in
Guangdong Province Driven by Digital Technology Huang Danyu, Huang Hongjie,
Mao Hanting, Wang Ye
- 014 数字技术对制造业高端化转型影响研究 蒙晨希, 吕倩怡, 陈喜强, 欧阳勤
Research on the Influence of Digital Technology on the Transformation of High-end
Manufacturing Meng Chenxi, Lv Qianyi, Chen Xiqliang, Ouyang Qin
- 020 老龄少子化、工业机器人对经济增长的影响研究 刘娟, 晏发发, 李晓华
Research on the Impacting of Aging Population and Low Fertility and
Industrial Robots on Economic Growth Liu Juan, Yan Fafa, Li Xiaohua

管理统计 | MANAGEMENT STATISTICS

- 030 建筑企业在数智经济背景下财务数智化转型的研究 高旭
Research on Financial Digital and Intelligent Transformation of Construction
Enterprises in the Context of Digital Economy Gao Xu
- 033 业财融合驱动下的营运资金管理效能提升路径探析 齐俊钰
Exploration on the Path to Improve the Efficiency of Working Capital Management
Driven by the Integration of Business and Finance Qi Junyu
- 037 国有企业复杂会计事项处理规范与财务报告质量提升路径探析 陈玲
Analysis of the Handling Norms for Complex Accounting Issues in State-Owned
Enterprises and the Paths to Enhance Financial Reporting Quality Chen Ling
- 042 业财融合视角下中小企业财务数字化转型咨询方法论与应用 潘秋环
Consulting Methodology and Application of Financial Digital Transformation
of Small and Medium-Sized Enterprises from the Perspective of
Industry and Finance Integration Pan Qiuhan

统计与教育教学 | STATISTICS AND EDUCATION TEACHING

- 046 统计学专业选修课教学模式探索——以生存分析课程为例 陈旭, 周杰明
Exploration of Teaching Models for Elective Courses in Statistics
—A Case Study of Survival Analysis Courses Chen Xu, Zhou Jieming
- 050 医学院校硕士研究生胜任力量表研制
及信度效度评价 于海兵, 冯颖恩, 黄文龙, 曾莹, 黄艳芳,
吴烁佳, 黄馨仪, 胡跃华, 金花
Study on the Reliability and Validity of the Competency Scale for
Master's Degree Students
in Medical College Yu Haibing, Feng Yingen, Huang Wenlong, Zeng Ying, Huang Yanfang,
Wu Shuojia, Huang Xinyi, Hu Yuehua, Jin Hua

数据科学技术、方法与应用 | DATA SCIENCE TECHNOLOGY, METHODS AND APPLICATIONS

- 057 基于注意力机制的 CEEMDAN-CNN-LSTM
股指价格预测 詹志滨, 张振华
Attention-based CEEMDAN-CNN-LSTM Model for Stock-Index
Price Forecasting Zhan Zhibin, Zhang Zhenhua

062	基于生成对抗 – 元迁移协同的锂离子电池剩余使用寿命动态预测 Dynamic Prediction of Lithium-Ion Battery Remaining Useful Life Based on Generative Adversarial-Meta Transfer Learning Collaboration	孟昌皓, 刘奕彤, 文佳睿, 王国强 Meng Changhao, Liu Yitong, Wen Jiarui, Wang Guoqiang
072	基于 SVM–RF–ANN 集成模型的珠江流域水质预测 Water Quality Prediction in the Pearl River Basin Using an SVM-RF-ANN Ensemble Model	李伟奇, 黄炫, 朱正棋 Li Weiqi, Huang Xuan, Zhu Zhengqi

统计方法及应用 | STATISTICAL METHODS AND APPLICATIONS

076	“一带一路”稀土产业链网络演化特征及脆弱性研究 On Evolution Characteristics and Vulnerability of the Rare Earth Industry Chain Network Along the Belt and Road	赵军产, 邓涛, 万子健 Zhao Junchan, Deng Tao, Wan Zijian
082	数字经济助力数字新质生产力——基于保险调节作用的路径分析 The Digital Economy Boosts Digital New Quality Productivity—Path Analysis Based On Insurance Regulation	陈思敏 Chen Simin
092	基于画像模型的高职数学教学定点追踪策略研究 A Study of Teaching Practices in Higher Vocational Mathematics Using a Personalized Student Profiling Model	任治国 Ren Zhiguo

加快构建房地产发展新模式的内在逻辑与实现路径

郭峰¹, 陈其荣², 罗艺¹

1. 贵州大学 管理学院, 贵州 贵阳 550025

2. 贵州省社会科学院城市经济研究所, 贵州 贵阳 550002

DOI:10.61369/ASDS.2025100001

摘 要 : 党的二十届四中全会报告明确提出“推动房地产高质量发展, 加快构建房地产发展新模式”。当前, 城镇化正迈向稳定发展期, 人口结构变迁和存量建筑提质改造成为加快构建房地产发展新模式的重要依据, 深刻影响我国房地产发展新模式。本文旨在深入分析城镇化进入高质量发展阶段下推动房地产新模式构建的历史逻辑与现实逻辑, 为促进我国房地产高质量发展提出建议。具体而言, 结合我国住房制度发展特征和阶段性发展目标, 重点讨论自改革开放以来我国房地产体系建设的历程, 探索租购并举与高质量发展的历史逻辑, 并围绕当前房地产发展新模式的特征, 阐释构建房地产发展新模式在推进制度创新与政策保障中的要求、产品升级与技术创新的变化、企业转型与产业链重塑三个方面所体现出的现实逻辑。最后, 从加强优化住房供给体系, 创新土地和金融政策, 优化租购并举制度, 推动好房子建设等层面提出构建房地产发展新模式的实现路径。

关 键 词 : 房地产新模式; 高质量发展; 租购并举; 实现路径

The Intrinsic Logic and Realization Path of Accelerating the Construction of a New Model for Real Estate Development

Guo Feng¹, Chen Qirong², Luo Yi¹

1.School of Management, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025

2. Institute of Urban Economics, Guizhou Academy of Social Sciences, Guiyang, Guizhou 550002

Abstract : The report of the Fourth Plenary Session of the 20th Central Committee of the Communist Party of China clearly proposes to promote high-quality development of the real estate industry and accelerate the construction of a new model for real estate development. At present, urbanization is moving towards a stable development period, and the changes in population structure and the upgrading of existing buildings have become important basis for accelerating the construction of a new model of real estate development, profoundly affecting the new model of real estate development in China. This article aims to deeply analyze the historical and practical logic of promoting the construction of a new model of real estate under the stage of high-quality development of urbanization, and provide suggestions for promoting the high-quality development of China's real estate. Specifically, based on the development characteristics and phased development goals of China's housing system, this article focuses on discussing the process of China's real estate system construction since the reform and opening up, exploring the historical logic of combining renting and purchasing with high-quality development, and elaborating on the requirements of building a new model of real estate development in promoting institutional innovation and policy guarantees, changes in product upgrading and technological innovation, and the practical logic reflected in enterprise transformation and industrial chain reshaping around the characteristics of the current new model of real estate development. Finally, the implementation path for building a new model of real estate development is proposed from the aspects of strengthening and optimizing the housing supply system, innovating land and financial policies, optimizing the system of both renting and purchasing, and promoting good housing construction.

Keywords : new model of real estate; high quality development; simultaneous rentals and purchases of housing; implementation path

基金项目: 2025年贵州省理论创新招标课题 (GZLCZB-2025-6)。

作者简介:

郭峰, 男, 贵州大学管理学院副教授, 主要研究领域: 城市经济、城市发展战略等;

陈其荣, 女, 贵州省社会科学院城市经济研究所助理研究员, 主要研究领域: 城市经济、区域发展与管理;

罗艺, 男, 贵州大学管理学院副教授, 主要研究领域: 城市发展与管理, 城市交通规划等。

引言

高质量发展是全面建设社会主义现代化国家的首要任务。党的二十届四中全会明确指出：“推动房地产高质量发展。加快构建房地产发展新模式，优化保障性住房供给，因城施策增加改善性住房供给^①。”将加快构建房地产发展新模式作为推动房地产高质量发展的第一抓手，这意味着房地产发展将持续通过住房供给结构优化、经营方式、调控政策、监管机制等基础制度完善以支撑房地产平稳健康发展。当前，我国城镇化迈向稳定发展期，区域城市人口也进一步分化，在区域分化进一步加剧的背景下，房地产的供求关系矛盾也发生了重大变化，从“总量短缺”转为“总量基本平衡、结构性供给不足”，居民需求从“有没有”转向“好不好”^②，且改善性住房需求增加，这些深度调整暴露出的住房发展现实问题，亟需通过构建新的发展模式，促进房地产市场实现高质量发展。

相关研究指出，一方面，需要完善商品房开发、融资、销售等基础制度，并将其作为加快构建房地产新模式的有力支撑。这表明以商品房为代表的商业住宅基础制度还不完善，需优化房地产全生命周期的管理制度和商业模式，防范商品房在开发建设全过程多环节中的风险，促进房地产构建新发展模式，助力实现高质量发展。另一方面，优化保障性住房供给，满足城镇工薪群体和各类困难家庭基本住房需求。强调了保障性住房的民生属性定位，明确了保障房的主要群体范围，并将住房的保障性作为民生的主要导向，这延续了党中央提出坚持“房住不炒”的基本原则。同时，保障房供给推行的以购代建、房票安置等供给侧改革，是平衡住房增量和存量的重要突破点，关键在于结合人口结构的变化，特别是城镇工薪群体和各类困难家庭的住房需求变化，通过“以需定量、以需化量、以需扩量”方式持续增强新保障对象的住房保障能力。除此之外，还要注重因城施策增加改善性住房供给。住房供给从过去侧重关注增量到当前统筹增量与存量并重的转变，映射出房地产发展新模式将兼顾满足刚性需求和改善性需求为重点的结构变化，围绕改善性住房供给品质提升导向，实行差异化、适配性的增量供给策略，是促进品质住房供给和市场需求实现精准对接的关键点，也是加快构建房地产发展新模式的重要途径。

早在2021年中央经济工作会议中便提出探索房地产发展新模式。“十四五”以来，我国房地产市场供求关系发生重大变化，面临重大风险挑战，在推进住房领域的重点改革中逐步探索形成一条优化和完善供应体系、转变运营方式、完善调控机制、强化安全监管等多维度的健康发展路径。然而，近年来国内固定资产投资下滑、消费疲软、预期下降，住房保障被赋予了新的时代内涵。一是面对错综复杂且艰巨繁重的国内改革环境，房地产发展新模式需要表现出解决住房发展主要矛盾的韧性；二是在新发展阶段中“以人为本”的新型城镇化发展要求下，房地产发展新模式需要在保障居民刚性住房需求和改善性住房需求的框架下，进一步理清房地产“人房地钱”要素联动机制的深层内涵，明晰市场与保障、销售与租赁、增量与存量的三大平衡目标的住房供应体系，立足新发展模式的内在逻辑，探索有效的实现路径，对推动我国房地产高质量发展具有重要意义。

一、坚持因时制宜供给改革与房地产发展新模式的历史逻辑

因地制宜、因时制宜改革是我们党领导推进重点领域改革，实现平稳健康发展的基础条件，也是探索高质量发展的重要原则。回顾我国住房供给体系的演变历程，因时制宜改革贯穿房地产事业发展的整个历史进程，也成为百姓最为关切的民生问题。我国住房兼具民生属性和经济属性，习近平总书记也多次指出“住房问题既是民生问题也是发展问题，关系千家万户切身利益，关系人民安居乐业，关系经济社会发展全局，关系社会和谐稳定”^③。随着我国城镇化进程的发展，城镇住房供应体系的理论逻辑也从过去“市场化效率导向和福利化保障导向”向“市场多元化导向和政府基本保障导向”的融合转变，统筹“追求效率”与“保障可持续性”的平衡，且在不同发展时期，住房供应体系的特征和影响也具有明显差异。我国住房制度在供给体系、供给制度、供给结构、供给模式上经历了系统性的变革，为明确房地产发展模式的演变历程、供给主体、保障范围、供给比例的历史坐标，以及准确把握房地产发展过程中的矛盾关系，形成“市场+保障”双轮齐驱的房地产新模式提供了坚实且重要的基础支撑。

（一）单位住房福利制度时期：1949–1978年

新中国成立之初，我国住房体系紧密依附于国家政治与经济体系，住房建设与物业管理主要由地方政府和单位承担，作为单位组织生活保障功能的重要体现^④。在1949–1957年期间，我国仍处于新民主主义社会发展阶段，住房的商品属性得以延续^⑤。在这一时期，公房建设成为城市基本建设的重点领域，国家投入大量资源进行住房建设，然而由于城镇人口增长迅速，人均居住面积并未得到显著提升。

1958年，我国进入私有住房社会主义改造阶段，“一大二公”思想深刻影响住房建设与住房分配制度，住房私有被否定，单位住房福利制度逐渐形成。这一阶段，单位住房福利制度虽在一定程度上保障了职工的基本居住需求，但也暴露出诸多弊端，如投资渠道单一、建设速度缓慢、住房供给严重不足等问题。

这一时期的住房被赋予保障民生的基本属性，意味着地方政府和国有企业要统筹协调地方经济发展与住房保障之间的矛盾，完全通过计划分配、低租金使用等方式保障城镇居民的住房需求。该时期房地产发展模式主要依靠地方政府和国有企业按计划推进，但现实矛盾为后续房地产发展模式的改革提供了方向和支持依据，极大地促进了城市经济发展、城市面貌改善、城镇住房

保障以及房地产业的发展，奠定了房地产作为国民经济的支柱产业的核心地位，通过地方政府和国有企业发展房地产业，切实有效推动了城镇集聚人口、土地价值增值、住房保障和房地产金融的快速发展。

（二）住房商品化萌芽期：1979–1997年

这一历史时期，我国房地产发展模式开始探索住房商品化，住房供给主体开始转向以“地方政府、职工所在单位和房地产开发企业”为核心的多元供给格局。1979年起我国住房制度改革拉开帷幕，进入长达20年的住房商品化萌芽期。1986年党中央、国务院在批复《全国基本建设工作会议汇报提纲》时，首次明确提出“准许私人建房、私人买房，准许私人拥有自己的住宅”的住房商品化原则，为住房制度改革奠定了理论基础。1993年国务院第三次房改工作会议进一步提出“以出售公房为重点，售、租、建并举”方针，大力推进公有住房自有化进程，为住房商品市场的发展创造了有利条件^[4]。以住房产品供给为核心，借助制度改革和社会主义市场经济的合力进一步发展房地产，稳步推进我国住房商品市场化发展，初步构建了房地产发展模式的框架，成为该时期的核心内容。

住房商品化萌芽期也是我国社会主义市场经济起步的探索阶段，房地产发展模式也进入改革探索期，先后探索了推进住宅商品化改革、加快住宅建设和组织私人建房、试行出售住宅、成立城市综合开发公司、推进住宅商品化、采取全价出售、补贴出售或议价出售、退出“三改四建”等举措，稳步推进住房制度改革。该时期的住房市场化探索切实转变了居民的住房理念，形成了公有住房、经济适用住房、普通商品房、高档住宅等多类型的住房产品，为我国市场化住房供给体系做了诸多有益尝试。

（三）住房商品化全面启动及后续发展阶段：1998年至今

1998年国务院发布《关于进一步深化城镇住房制度改革加快住房建设的通知》，标志着住房实物分配制度正式终结，住房分配货币化和住房市场化改革时代的启幕^[5]。随着国家一系列政策的出台，商品房社区应运而生，城市社会组织形式发生深刻变革，城市居住区从职住一体逐渐向职住分离转变，形成了独立的工作空间和商务繁华空间^[6]，现代城市型空间结构得以初步构建。自我我国住房商品化改革实施以来，经历了高速扩张阶段、调整与分化阶段、深度调整阶段，有关住房土地使用、商品房供应及比例、住房价格规定、住房供应结构、固定资产投资项目资金比例、住房金融等相关政策更加规范，在保障房地产市场平稳健康发展中提供了坚实的基础保障。

伴随着住房商品化的快速发展，房地产市场在满足居民住房需求方面发挥了重要作用，但同时也出现了保障性住房建设滞后等问题，城镇弱势群体住房困难问题日益突出。2007年，国务院出台《关于解决城市低收入家庭住房困难的若干意见》，将保障性住房建设提升到与商品房并重的地位，住房市场体系与住房保障体系两条供给主线开始整合共进^[7]。2016年，中央经济工作会议提出“房住不炒”定位，进一步明确住房建设重点应放在增加保障性住房供给^[4]，特别强调大力发展租赁住房。2017年，党的十九大报告明确提出加快建立多主体供给、多渠道保

障、租购并举的住房制度。2020年，国家推出针对新市民和青年人的保障性租赁住房新制度，住房体系治理向更加包容的方向发展。2025年，党的二十届四中全会提出推动房地产高质量发展，并纳入“加大保障和改善民生力度扎实推进全体人民共同富裕”的版块中，更加突出了住房从过去侧重经济属性转变为民生保障的属性定位，并明确了未来住房将以更优质、更宜居、更绿色、更韧性、更智慧的方向为导向，以满足人民群众的多层次住房需求为目标，实现“住有所居”向“住有宜居”“住有优居”转型，旨在加快构建房地产发展的可持续新模式。我国住房制度改革主要阶段及特征如表1所示：

表1：我国住房制度改革主要阶段及特征			
时期	政策重点	主要特征	成效与问题
1949–1978	福利分房制度	完全计划分配、低租金使用	住房严重短缺、居住条件差
1978–1998	试点售房提租	公房出售、租金改革	缓解政府压力但仍供不应求
1998–2016	市场化改革	住房分配货币化、市场形成	住房总量提升但房价上涨过快
2016年至今	房住不炒与新模式	建立双轨制、抑制投机	市场分化、品质提升阶段

二、“房住不炒”定位下房地产发展新模式的特征及现实逻辑

（一）“房住不炒”定位下房地产发展新模式的特征

第一，平稳健康可持续性。房地产新发展模式下市场不再片面追求高速增长和大规模扩张，而是将长期平稳健康发展作为首要目标。通过稳定房价，使其保持在合理区间，避免大幅波动；合理控制房地产开发投资增速，使其与经济社会发展水平相适应；加强供需关系调节，保持住房供需动态平衡等一系列措施，有效避免市场出现大起大落的情况，实现房地产市场与宏观经济的协调可持续发展。

第二，民生保障优先性。新模式将民生保障置于首位，始终以解决居民住房问题为出发点和落脚点，尤其关注新市民、青年人、低收入群体等住房困难群体的居住需求。通过加大保障性住房建设投入，优化住房保障体系，合理调整住房供应结构，确保住房资源更加公平、合理地分配。

第三，发展方式创新性。在开发建设环节，积极引入绿色建筑、智能建筑等先进理念和技术，提高住房品质与居住舒适度，打造符合现代生活需求的高品质住宅产品；在运营管理环节，加强物业服务创新，拓展多元化服务领域；在融资方面，积极探索多元化融资渠道，降低对传统债务融资的过度依赖。

第四，市场与保障协同性。新模式强调市场机制与住房保障体系协同发挥作用。市场机制在满足多层次、多样化住房需求方面具有不可替代的基础性作用。而住房保障体系则为中低收入群体、住房困难群体提供兜底保障，确保其基本居住权利得到保障。两者相互补充、相互促进，共同构建起完整、高效的住房供应体系，实现住房资源的有效配置，满足不同层次居民的住房需求。

（二）“房住不炒”定位下房地产发展新模式的现实逻辑

1. 制度创新与政策保障是构建新模式的核心支撑。

从需求端来看，制度创新以“因城施策调减限制性措施”为核心逻辑，旨在通过差异化政策工具激活住房需求，实现市场稳定运行。如部分重点城市通过优化限购政策、重点城市降低落户门槛等制度调整，打破需求释放的行政约束，畅通人口城镇化与住房需求的匹配通道。同时，创新住房“以旧换新”的商品交换模式、优化公积金等住房金融政策、降低房贷利率与交易税费下调等政策组合，降低居民住房消费成本，既保障刚性住房需求的有效满足，又推动改善性住房需求的有序释放，形成需求端与市场运行的良性互动。

在供给端改革层面，制度创新围绕“优化增量、盘活存量”的主线展开，通过供给结构调整缓解市场供需矛盾，提升住房供给的适配性与功能性。在增量供给上，精准调控土地供应规模与结构，依据城市人口流动趋势、住房需求总量的动态调整住宅用地供应，避免供需失衡；在盘活存量上，通过制度创新推动闲置住房、低效商业地产等存量资源转化为保障性租赁住房或人才住房，同时优化城市功能性用地布局，促进产业园区与住宅社区融合发展，实现产城协同，提升住房供给的综合效益。

金融财税创新是房地产发展新模式的重要支撑，其核心在于通过金融工具创新与财税政策优化，激活存量市场，降低房地产市场对传统开发融资的依赖。如金融领域大力发展房地产投资信托基金（REITs），通过资产证券化方式盘活存量住房、商业地产等资产，为市场提供长期稳定的投资渠道，同时缓解房地产的资金压力，推动企业从开发销售向持有运营转型；在财税领域通过差异化税收政策引导住房资源合理配置，对保障性住房建设与运营给予税收优惠，探索逐步对持有的多套房征收累进房产税，抑制投机性住房需求，促进房地产市场健康发展。

2. 产品升级与技术创新是构建新发展模式的关键路径。

产品升级与技术创新是驱动房地产从“增量扩张”转向“质量提升”的关键路径，通过构建契合高质量发展需求的居住供给体系，推动房地产市场实现功能价值与生态价值的协同提升。从安全升级维度看，新一代住宅通过技术集成构成全域智能防控体系，如引入AI智能预警系统，依托多维度监测设备与算法模型，对社区消防隐患、房屋结构安全、公共区域异常行为等进行实时感知与动态预警，产品创新实现了从“被动防御”到“主动防控”的转型，将安全管理的响应逻辑从“事故处置”前置为“风险预判”，显著提升居住空间的安全保障能力，这一转变体现了技术创新对住宅安全功能的深度重构。

在舒适体验优化上，产品升级完成了从“空间满足”到“场景适配”的跨越，需要从硬件维度拓展居住空间的物理舒适度，从设计理念上打破传统住宅的封闭空间，从场景化营造上设计适合家庭社交、休闲康养等多元生活需求，实现通过住房产品创新提升居住品质的进阶赋能。

绿色低碳发展导向是技术创新推动房地产从“粗放建造”走向“生态共生”的必然路径。2025年政府工作报告首次提出“发展第四代建筑”，明确了建筑与自然和谐共生的发展目标，在实

践中通过大幅降低建筑施工的能耗与污染，推行超低能耗建筑标准等，实现建筑全生命周期的低碳运维，为居民提供生态友好的居住环境，构建房地产与生态环境协调发展的新范式。

此外，智慧人居建设也实现了从“硬件堆砌”到“场景赋能”的突破，借助全屋智能系统与社区智慧平台的联动，实现家具设备联动控制、社区服务精准推送、邻里社交高效衔接等功能融入日常生活场景，提升居住的便捷性与体验感，也是房地产发展新模式从技术展示向价值创造转型的重要途径。

3. 企业转型与产业链重塑是构建新发展模式的重要保障。

企业转型与产业链重塑是顺应我国住房供给体系结构性变革的趋势，通过重构企业核心职能与产业链价值分配逻辑，推动行业从“重开发、轻运营”的传统模式，向“重服务、强协同”的高质量发展模式转型，为房地产市场可持续发展注入新动能。

企业转型的核心方向是实现从传统开发商向综合运营服务商的跨越，构建“地产+多元业态”的运营体系。如纯住宅突破“开发-销售”的短期盈利模式，转向覆盖居住全生命周期的服务运营；商业地产摆脱传统零售物业的单一出租模式，顺应新消费趋势转型，通过精准业态组合与场景营造提升物业价值；物业管理整合安防、保洁、维修及增值服务等构建集复合型管理体系，实现从基础物业服务向“智慧社区运营”的升级；养老地产转向全周期运营模式，通过长期护理、健康管理等服务实现资产保值增值与可持续盈利，这一系列转型标志着房企从“资产建造者”向“价值运营商”的本质转变。

同时，还应制定差异化竞争策略，房地产开发企业以“价值重构”为核心，通过多元路径打破同质化竞争格局。一方面，依托地域文化、历史文脉等打造差异化产品，使产品超越物理空间属性，成为承载文化记忆与生活方式的载体，提升产品附加值与市场辨识度。另一方面，注重对老旧小区、低效工业区等存量资产的改造升级，既消化存量房产、优化城市空间结构，又通过功能重塑满足居民对高品质居住与公共服务的需求等双赢，实现“存量盘活”与“城市功能提升”的双重目标，为行业开辟新的增长空间。

此外，房地产开发企业还应聚焦核心能力建设，推动产业链从“全链条覆盖”向“专业化分工”重构。面对行业利润空间收窄与市场需求多元化的调整，部分企业摒弃“全价值链布局”，通过业务剥离与资源整合，聚焦产业链中具备竞争优势的核心环节，以专业化的聚焦能力逐步引领产业链发展，这不仅降低了企业运营成本、提升资源配置效率，更推动产业链形成“专业化分工、协同化合作”的新生态，企业在优势互补的生态圈中共同提升产业链整体竞争力，为房地产发展新模式提供坚实的产业基础。

三、加快构建房地产发展新模式的实现路径

自我国住房制度改革市场化改革以来，房地产发展也在供给体系、土地制度、金融政策、租购制度和品质住房等方面探索形成了一条具有中国特色的房地产发展新模式，在适应不同发展阶段

中不断提升发展模式的适配性。未来，面对高质量发展和存量提质改造并存、改善性住房需求持续释放的时代背景，房地产发展新模式仍需要按照政府保基本、市场满足多样化需求的原则，深化供给结构、经营方式、调控政策、监管机制等改革^[8]，助力房地产市场实现健康平稳和高质量发展。

（一）优化住房供应体系，构建多层次差异化的供给格局。

住房供应体系优化是房地产发展新模式的基础支撑，需以“保障刚需、满足改善、抑制投机”为核心，构建多层次、差异化的住房供给格局。一是强化保障性住房供给力度，通过“政府主导+社会参与”模式扩大保障性租赁住房、公有产权住房规模，明确保障房建设占住宅用地供应比例不低于30%，并建立与居民收入水平挂钩的保障房准入退出动态机制，确保保障房资源精准分配。二是优化商品住房供给结构，根据不同城市能级与人口结构调整产品类型，加强人口净流入的核心城市的中小户型刚需房供应容量，三四线城市侧重消化存量住房并适度发展改善型住房，同时通过规划管控限制大户型、高总价房源占比，避免资源浪费。三是推动存量住房盘活利用，出台“存量住房改造为保障房”的税收减免、容积率奖励等政策，引导房企将闲置商业地产、烂尾楼转化为租赁住房或人才公寓，形成“增量补充+存量盘活”的双规供给体系，缓解住房供需矛盾。

（二）创新土地与金融政策，统筹市场活力与风险防控。

土地和金融政策创新是房地产发展新模式的核心驱动力，需通过制度改革平衡市场活力与风险防控。在土地政策方面，一是建立“人地挂钩”的土地供应机制，以城市常住人口增量为核心指标动态调整住宅用地供应规模，人口净流入城市适度增加用地供应，人口流出城市严格控制新增用地，避免土地资源错配。二是创新土地出让模式，推行“限房价、限地价、竞品质”的出让方式，将绿色建筑标准、智慧社区建设要求纳入土地出让条件，倒逼房企提升产品质量，同时探索土地出让金分期缴纳、弹性年限出让等政策，降低房企拿地成本。

在金融政策方面，一是构建“分层次、差异化”的房地产金融支持体系，对刚需住房贷款实行优惠利率，对改善型住房贷款适度放宽额度，对投机性住房贷款严格管控。二是拓宽房企融资渠道，大力发展房地产投资信托基金（REITs），支持房企通过

资产证券化盘活存量资产，同时引导银行、保险等金融机构加大对绿色建筑、智慧地产项目的信贷支持，限制对高负债房企的融资投放，防范金融风险。

（三）深化租购并举制度，逐步实现租购权利均等化。

租购并举制度深化是房地产发展新模式的关键突破口，需以“租购权利均等化”为核心，消除租赁住房与购买住房在公共服务权益上的差异^[4]。一是完善租赁市场法律法规，落实《住房租赁条例》中租赁双方的明确权利义务，规范租金定价机制，建立租金涨幅年度不超过5%的管控机制，同时推行住房租赁合同网签备案制度，同步备案信息与公共服务权益的挂钩机制。二是推动租购公共服务均等化，明确承租人在子女教育、医疗保障、户籍落户等方面享有与购房者同等权益，以租赁合同备案作为子女入学的重要依据，打破“业主绑定公共服务”的传统格局。三是培育专业化租赁市场主体，通过财政补贴、税收优惠引导房企从“开发销售”转向“开发持有运营”，鼓励住房租赁企业规模化、品牌化发展，支持国有企业参与租赁市场建设并承担保租房供应主体责任，提升租赁市场服务质量与稳定性。

（四）坚持品质提升、绿色智慧的导向，推进好房子建设。

好房子建设是房地产发展新模式的价值体现，需以“居住品质提升、绿色低碳发展、智慧场景赋能”为导向，推动住房从“有住房”向“住好房”转变。一是完善“好房子”建设标准体系，尽可能量化住宅建设标准的细化评价指标，如住宅层高、绿色建筑达标率、智慧家居覆盖率等，并建立“好房子”评价认证机制，推行评价结果与项目预售许可、信贷支持挂钩。二是强化绿色低碳技术应用，全面推行新建住宅采用装配式建筑技术，推广超低能耗建筑、近零能耗建筑，推广光伏建筑一体化、雨水回收系统、海绵社区建设等技术降低建筑全生命周期能耗，同时将建筑碳排放量纳入房企绿色开发的考核指标，推动行业向“双碳”目标转型。三是深化智慧人居场景建设，以《智慧家庭标准体系》为指引，推动全屋智能联动智慧社区形成一体化管理平台，大力推进新建社区配备智能安防、智能物业、智慧医疗等系统，实现家居设备联动控制、社区服务精准推送，提升居民居住体验，实现住房功能从“物理空间”向“智慧生活平台”的升级。

参考文献

- [1] 中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议. https://www.gov.cn/zhengce/202510/content_7046050.htm
- [2] 胡明志. 房地产业发展新模式的主要内涵与实现路径[J]. 房地产世界, 2025, (13): 13-15.
- [3] 习近平. 加快推进住房保障和供应体系建设. 习近平谈治国理政（第一卷）[M]. 北京：外文出版社, 2014.
- [4] 李国庆, 钟庭军. 中国住房制度的历史演进与社会效应[J]. 社会学研究, 2022, 37 (04): 1-22+226.
- [5] 李斌. 中国住房改革制度的分割性[J]. 社会学研究, 2002, (02): 80-88.
- [6] 贾康, 刘军民. 我国住房改革与住房保障问题研究[J]. 财政研究, 2007, (07): 8-23.
- [7] 王冬. 新双轨制：中国房地产改革的探讨[J]. 现代经济探讨, 2011, (10): 5-8.
- [8] 纪伟昕. 健全保障和改善民生制度体系的重点[J]. 劳动经济研究, 2024, 12(05): 3-8.

数字技术驱动下广东省城乡收入差距的动态演进 与政策启示

黄丹宇, 黄泓杰, 毛瀚廷*, 王晔
广东工业大学 经济学院, 广东 广州 510520
DOI:10.61369/ASDS.2025100002

摘要：以广东省为例研究分析数字技术驱动下对广东省不同地区居民收入差距的影响。构建数字经济体系，从数字经济规模、居民人均可支配收入等角度分析广东省居民收入水平状况，并对广东省各城市数字经济现状进行剖析。在理论分析基础上，用熵值法推算数字经济指数。在地区方面采用2013–2023广东20个城市的相关数据，构建双固定效应模型进行基准回归，得出结论数字经济有利于缩小收入分配差距。又探讨了产业结构在数字经济对城乡收入差距的作用，得出结论第三产业占比越高即产业结构值越大，作用越强。最后进行了稳健性检验和异质性分析，对相关政策和研究提供了参考。

关键词：广东省；数字经济；城乡收入差异

Dynamic Evolution and Policy Implications of the Urban-Rural Income Disparity in Guangdong Province Driven by Digital Technology

Huang Danyu, Huang Hongjie, Mao Hanting*, Wang Ye
School of Economics, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510520

Abstract： Taking Guangdong Province as a case study, this research analyzes the impact of digital technology on regional income disparities among residents within the province. A framework for the digital economy is constructed to assess the income levels of residents in Guangdong, incorporating metrics such as the scale of the digital economy and per capita disposable income. The current state of the digital economy across various cities in Guangdong is also examined. Following a theoretical analysis, the entropy method is applied to calculate a digital economy index. Utilizing panel data from 20 cities in Guangdong between 2013 and 2023, a two-way fixed effects model is established for baseline regression. The results demonstrate that the digital economy contributes to reducing income inequality. Furthermore, the role of industrial structure in mediating the relationship between the digital economy and urban-rural income disparity is investigated. The findings indicate that a higher share of the tertiary sector—reflected by a larger industrial structure value—strengthens this mitigating effect. Finally, robustness checks and heterogeneity analysis are conducted, offering insights for policy formulation and future research.

Keywords： Guangdong Province; digital economy; register income gap

引言

近年来，数字化浪潮推动数字经济强势崛起，其全球影响力日益凸显，成为经济下行中的重要支撑。中国高度重视数字经济的潜力，将其视为推动传统产业转型升级、增强国力的关键，持续加大科研投入，深化数字技术与实体经济融合，以驱动经济增长。

基金项目：2025年度中国服务贸易协会研究课题（CATIS-PR-250119）；广东工业大学2025年度校级本科教学工程项目；广东省课程思政改革2024年示范示范课堂项目（广东省教育厅粤教高函〔2024〕27号）；2024年度暨南大学侨文化研究院、江门市“百千万工程”指挥部、中共江门市委统战部“侨文化研究专项”（JNQW2024004）；教育部产学合作协同育人项目2024年成都杰科力科技有限公司项目；广东工业大学2024年度实验教学与管理改革研究专项项目；2023年广东省文化和旅游厅广东省2022–2023年度公共文化和旅游公共服务体系制度设计研究课题；中国大学生创新创业训练计划项目：“百千万工程”背景下数字经济对农业高质量发展的影响探究（2025118450790）；中国大学生创新创业训练计划项目：广州市消费者对新能源汽车购买意愿的调查及其影响因素分析（2025118450797）。

作者简介：

黄丹宇，博士，广东工业大学经济学院讲师，研究方向：服务经济、文化经济；

黄泓杰，广东工业大学经济学院本科生，研究方向：数字经济、区域经济；

王晔，广东工业大学经济学院本科生，研究方向：数字经济。

通讯作者：毛瀚廷，广东工业大学经济学院本科生，研究方向：数字经济、企业经济。

数字经济在农村地区同样取得显著进展。农民通过互联网和直播平台销售农产品以改善收入，网上问诊、数字金融等服务则提升了农村生活水平。可见，数字经济不仅促进产业升级，也在城乡融合发展中发挥关键作用，为国民经济注入新动能。

为缩小差距、实现共同富裕，党的十九大明确了我国经济从高速增长向高质量发展的转变。国家统计局数据显示，2023年数字经济核心产业对 GDP 增长的贡献率达 10.3%。然而，区域间、城乡间发展的均衡性与充分性仍有待提升。

2024 年数据显示，中国城乡人均收入比为 2.35 倍，比值虽较 2023 年的 2.39 倍有所下降，但绝对差距仍在扩大。亟需更多政策支持以缩小城乡收入差距，实现全面协调可持续发展和居民均衡增长，这既是人民期盼，也是共同富裕的必由之路。

对此，“十四五”以来国家密集出台了多项数字经济规划及民生改善方案。广东省作为我国经济大省与人口大省，其 2024 年数字经济规模达 6.9 万亿元，连续 8 年全国第一，占 GDP 比重 49.7%，已成为高质量发展的核心引擎。但省内区域差异显著，珠三角优势突出，粤北粤西等地在收入与经济水平上差距较大。研究数字技术驱动下广东城乡居民收入的变化，对缩小区域鸿沟具有重要现实意义。

一、文献综述

（一）数字经济的研究

1. 数字经济的内涵

国外最早提出并研究数字经济的美国学者 Don Tapscott 在其写的书 *The Digital Economy: Promise and Peril in the Age of Networked Intelligence* 书中详细描述了数字经济的各方面情况^[1]。该书在业内引起了巨大反响，其核心观点是数字经济具有网络化和智能化特点，信息技术可以作为新的生产要素，Beomsoo Kim 在 Don Tapscott 的基础上发展了数字经济这一概念，把数字经济定义为不同于农业，工业经济，而是一种新型高效的经济形态，本质是产品和服务用数字化、信息化的形式通过互联网来进行交易^[2]。国内学者何皋吟认为数字经济是由于知识的不断积累和网络数字经济发展出的必然结果和表现形式^[3]。李长江在他的研究里认为在第三次革命之后的最应当用数字经济来表达社会经济模式，其本质特征是通过数字技术方式进行生产^[4]。2019 年中央经济工作会议强调数字经济的发展并作出指导，数字经济的发展水平是国家综合国力的重要体现，其获得发展可以大幅度提升效率降成本。刘金河认为网络通信技术是组成数字经济最为关键的生产要素，所以数字传媒业和信息技术产业是数字经济产业的基础^[5]。

2. 数字经济的测度研究

中国对数字经济的研究主要涉及数字经济发展条件、数字和产业的结合程度以及数字经济对我国经济带来的变化。刘军等人从数字交易等维度选取 14 项指标比如移动支付渗透率、跨境电子商务交易额等数据，采用熵值法赋权合成省级数字经济发展指数^[6]。赵亚辉和周博以数字基础、数字环境、数字应用还有数字创新四个指标构建数字经济发展水平测度体系，用熵权 TOPSIS 法计算各指标权重，基于此对我国数字经济发展水平进行多个方面的研究分析，认为近些年来我国数字经济发展水平一直稳步提高，但从全国范围来看，数字经济发展尚处于初级阶段^[7]。焦帅涛和孙秋碧的方法和赵亚辉等人类似，从数字基础、数字应用、数字创新和数字变革四个角度对数字经济发展进行测度得出中国数字经济发展具有空间集聚性、时空差异性等特点^[8]。

（二）收入差距的相关研究

李婷和李实认为城乡之间割裂的经济发展模式致使农村发展长期落后于城市发展，农村社会保障和公共服务一直落后于城市，农村居民的收入长期滞后于城镇居民收入增长并提出建议^[9]。

张延群和万海远则按照时间顺序建立计量经济模型对城乡收入差距进行分析，结果表明农业工业和第三产业的劳动生产率的比值，农村人口务农的比重以及农村进城务工人员 and 城镇居民的工资差距，会在较长时间内影响我国的城乡收入差距^[10]。

谭阳欣认为我国收入差距的成因是市场经济的盲目性、投机性和城乡居民的就业福利待遇存在差距，并与政策的偏向性密切相关。城乡分割的发展模式导致了农村发展长期落后于城市发展，农村社会保障和公共服务长期落后于城市，农民收入增长长期滞后于城镇居民收入增长^[11]。

任达认为随着我国老年人口人数逐渐增多、新生儿逐渐减少将会促使城乡居民收入差距扩大，此外人力资本投资差距也会长期影响我国城乡收入差距^[12]。

杜鑫认为由于薪水收入有较大差距导致我国城乡收入差距较大，而城乡之间受教育水平和技术熟练度等人力差异还有城镇居民的就业人口数量是导致城乡居民薪水性收入差距较大的问题所在，并且发现通过提高对城乡居民的转移支付能力，可以抑制城乡居民转移性收入差距的进一步扩大^[13]。

（三）数字经济对收入差距的影响

目前，部分学者研究数字经济对收入差距的结论各不相同。

徐文豪认为数字基础设施建设会使得城乡收入差距进一步扩大，这种现象集中出现在我国中西内陆城市和一些经济不太发达的中小城市，但在一些较低水平地区的城乡能有效缓解收入差距^[14]。

祝志勇和刘畅畅对 2013—2020 年省级面板数据进行了实证检验，数字基础设施能够缩小城乡收入差距，数字基础设施对城乡收入差距存在门槛效应，在越过门槛值以后，数字基础设施对于城乡收入差距会有更显著的影响^[15]。

唐晓灵和陈洪金用静态与动态面板分析检验移动互联网接率和移动互联网流量对城乡收入差距的影响，得出结论移动互联网有助于缩小城乡间的收入差距^[16]。

李蕊等人在数字经济对收入差距的影响作用机制中把农户人力资本投资作为调节变量，通过实证分析证明了人力资源作为调节变量在数字经济对城乡收入差距的影响中具有积极作用^[17]。

洪俊杰等人认为数字经济尤其是对劳动生产率和人力资本的影响导致整体上扩大了收入分配差距^[18]。

王洋通过运用遗传算法组合赋权法测算数字经济发展指数，建立计量经济模型分析数字经济发展对城乡收入水平的效应机制，结论表明数字经济发展水平对城乡收入差距的影响呈现先缩小后扩大的非线性 U 型^[19]。

二、研究假设和现状分析

（一）研究假设

作为数字时代的新经济形态，数字经济加速技术发展、提升资源配置效率和产品附加值，为缩小收入差距提供了生产力基础。其规模的持续扩大为我国经济高质量发展注入了长远动能，并催生了数字金融等新兴业态。同时，数字经济依托互联网打破地域限制和时空壁垒，促进城乡、区域间的资源共享与协同协作。此外，借助大数据优化要素流通与匹配效率，数字经济能将高质量发展红利转化为教育、医疗、就业等领域的实际投入，构建覆盖城乡的发展保障体系。这有助于各阶层民众改善生活、弥合发展鸿沟、化解社会矛盾、夯实社会稳定基础，最终凝聚社会合力，推动构建包容开放、共生共荣的社会新范式。基于此，提出假设：

假设一：数字经济发展对城乡收入差距具有缩减作用。

数字科技的迭代催生了人工智能、云计算等新兴产业，成为经济增长新引擎。2024 年，我国数字经济规模达 45.5 万亿元，占 GDP 的 39.8%；其中数字产业总值 8.35 万亿元，占国民经济 7.3%，人工智能产业规模同比增长 20%。同时，数字经济催生了数据分析师等高能岗位及网约车司机、外卖员、带货主播等灵活就业机会。2024 年数据显示，其直接带动就业超 2.3 亿人，其中 35% 为农村转移劳动力，有助于提高农村居民收入。数字经济对产业的影响存在异质性：对传统行业，其推动转型并有限提升效率；对技术性产业，则凭借人工智能等优势大幅提升生产效率和居民收入，效果更为显著。高新技术产业的发展依赖数字技术支撑，反哺数字经济，两者形成良性循环，共同提升经济效率并推动产业结构升级，进而助力缩小城乡收入差距。此外，数字经济加速城乡信息交流与数据要素合理分配，进一步影响收入差距。基于此，提出假设：

假设二：在数字经济对城乡收入差距的影响中，产业结构对其起到调节作用。

鉴于广东省各城市的经济状况、产业结构、地方政策等因素各不相同，导致数字经济对收入差距的影响有着诸多差异。资源禀赋丰富的区域可能更容易利用数字经济带来的创新机会，而资源匮乏的区域则可能面临更大的挑战。以高科技产业为主的区域可能更容易从数字经济中受益，而传统产业为主的区域则可能需要更多的转型时间。此外，政策支持力度大的区域可能更容易有

健全的数字基础设施，从而更好地利用数字经济带来的经济收入。基于此，提出假设：

假设三：数字经济对广东省不同地区的收入差距的影响具有一定程度的差异性。

（二）数字经济和收入差距现状

1. 广东数字经济发展现状

广东省数字经济规模发展迅速。据中国信通院数据，2022 年其数字经济产业体量突破 6 万亿元，占 GDP 比重由 2021 年的 47.5% 提升至 49.7%，连续数年位居全国省城首位。同时，全省数字化核心产业企业数量达 75.35 万家，亦居全国第一，彰显了其在核心产业领域的活跃度与竞争力。广州、深圳等珠三角城市群数字经济发展势头强劲。然而，粤东西北部分区域在 5G 网络覆盖和数字经济应用方面仍有待加强。为此，广东省持续推进基础设施与产业配套建设，促进数字产业化与产业数字化融合。此外，人工智能、大数据等信息技术的融合应用不断深化，尤其在制造业领域，通过推动龙头企业开放应用场景，联合工业软件企业协同技术攻关，从而加速数字化转型。总体而言，广东省数字经济发展全国领先，但面临区域不均衡挑战，正通过政策支持、基建投入和技术创新推动其进一步深化。

2. 广东城乡收入差距现状

近年来，随着广东省经济高质量发展战略的推进，国民生活水平有着明显的提升，相应的收入增速也非常可观。但是现阶段城乡二元结构问题仍然没有得到很好地解决。通过对广东省统计年鉴中的数据进行研究，可以得出城市和乡村居民的人均可支配收入均呈现上升趋势，城镇居民的收入从 2013 年 29,537.3 元增至 2022 年 56,905.3 元，累计增长 92.6%，年均增速 7.5%，广东省自 2016 年起实施“数字乡村”试点工程，通过农村电商、智慧农业等举措赋能增收。2022 年，全省农产品网络零售额突破 1,200 亿元，带动 200 万农民人均增收 3,800 元。截至 2020 年底，全省 161.5 万相对贫困人口全部摘掉贫困的帽子。农村居民收入从 11,067.8 元增至 23,597.8 元，累计增长 113.2%，年均增速 8.7%。城镇居民的人均可支配收入比乡村居民收入增长速度更高，意味着城乡居民收入差距有增大的趋势：城乡比从 2013 年 2.67 降至 2022 年 2.41，累计下降 9.7%，年均降幅 1.1%。广东省 2013–2023 年城镇居民和农村居民人均可支配收入如表 1 所示。2022 年广东省城镇居民人均可支配收入和农村居民人均可支配收入分别为 56905.3 元和 23597.8 元，比 2013 年分别增长了 28.97% 和 39.36%，可得到的结论农村居民人均可支配收入的增长速率要高于城镇居民。另外，表 1 可反映出广东省城乡居民收入差距在近 10 年是逐渐减小的。

表 1：2013–2022 年广东省城乡居民人均可支配收入对比

	城镇居民人均可支配收入	农村居民	城镇农村比
2013	29537.3	11067.8	2.67
2014	32148.1	12245.6	2.63
2015	34757.2	13360.4	2.60
2016	37684.3	14512.2	2.60

2017	40975.1	15779.7	2.60
2018	44341	17167.7	2.58
2019	48117.6	18818.4	2.56
2020	50257	20143.4	2.49
2021	54853.6	22306	2.46
2022	56905.3	23597.8	2.41

三、数字经济对收入影响的研究

（一）数字经济指标的构建

如今，较少学者研究数字经济具体测度问题，仅有的一些文献是从省级维度开始测度，然而以城市为中心的相关研究并没太多的学者进行研究。目前学术界对于如何测度数字经济普遍会使用主层次分析法（AHP）、主成分分析法（PCA）和熵值法，本文仿照梁上坤等人^[20]和黄群慧^[21]将互联网作核心来进行测度，以互联网和数字金融两个方面来进行测度数字经济。收集了广东省20个市的2013年至2022年的相关指标数据，用熵权法去计算相关指数。为测出核心解释变量数字经济指数，从数字金融普惠互联网发展角度展开计算。通过计算机服务和软件行业从业人员占比得出计算机服务和软件行业在城镇就业结构中的地位和重要性。指标将计算机服务和软件业的从业人员数除以城镇单位从业人员总数，再乘以100得到百分比。该指标越高，说明该地区计算机和软件行业越发达，对就业的贡献越大。人均电信业务总量是衡量电信行业服务水平和发展程度的重要指标，它通过将电信业务总量除以该地区的人口数得到，反映了平均每个人享受的电信业务量。该指标可以体现电信服务的普及程度和居民对电信服务的需求强度，同时也与当地的经济发展水平和居民生活水平密切相关。百人中移动电话用户数指标是移动电话普及率的体现，用于衡量一个地区移动通信的普及程度。其计算方法是将移动电话用户数除以该地区的常住人口数，再乘以100得到每百人中的移动电话用户数。它反映了该地区移动通信基础设施建设和居民对移动通信的使用情况。通过熵值法测度出数字经济指数，具体被解释变量如表2所示。

表2：数字经济指数衡量指标及权重

一级指标	二级指标	衡量指标	权重
数字金融普惠	数字普惠金融	数字普惠金融指数	0.084
	互联网接入数	每百人接入互联网人数	0.167
互联网发展	相关从业人员情况	计算机等从业人员与城镇单位人员占比	0.302
	相关产出情况	人均电信业务总量	0.341
	移动电话普及率	百人中移动电话用户数	0.106

根据表3中测度的数字经济指数来看，广东省各市的数字经济指数基本上呈现出稳步上升的趋势，但各城市之间又存在较大的差距，珠三角地区如广州、东莞、珠海凭借雄厚的产业基础、完善的基础设施及政策红利，数字经济指数长期领先，2022年东莞以0.753的指数位居全省首位，广州（0.703）和珠海（0.534）紧随其后，形成以电子信息制造、人工智能和跨境数据为特色

的核心增长极，而粤东、粤西、粤北的云浮（0.057）、茂名（0.027）、河源（0.081）等地因数字基建滞后、传统产业依赖度高及人才外流等问题，指数长期垫底，东莞与云浮的差距高达13.2倍。从时间趋势上来说，疫情加剧了广东省数字经济的发展差距，珠三角城市群通过远程办公设备出口、数字服务业扩张等实现数字经济的增长，东莞2020–2022年指数提升23.4%，广州三年增长21.2%；而非珠三角城市因传统外贸受阻、数字化抗风险能力弱，潮州、汕尾等地停滞在0.1左右，区域差距进一步扩大。数字基础设施如东莞每万人5G基站数达珠三角均值2倍，核心产业集聚广州，数字服务业占比超30%，而茂名云浮等城市的数字经济指数相对较低，表明这些地区的数字经济发展水平相对滞后。受限于地理位置、经济基础和技术投入，非珠三角城市在互联网普及率、数字产业人才储备和基础设施覆盖等方面存在明显短板，亟需通过政策倾斜和跨区域协作弥补发展差距。珠三角城市的数字经济指数明显高于广东省内其他地区，广东省内数字经济在经济发达和欠发达地区有较大的差异。这是由于珠三角地区雄厚的经济实力和完善的经济基础设施、密集的创新资源和完善的产业群，以及大量的科研机构与高校的聚集以及政策扶持。尽管广东省数字经济整体发展态势良好，但城乡二元结构问题依旧没有得到有效的解决。仍旧需要推动城乡协同发展，尤其在非珠三角地区需加强基础设施建设、优化数字资源配置，以缩小收入差距，实现共同富裕。

表3：广东省各城市数字经济指数

地区	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
广州	0.521	0.519	0.525	0.498	0.510	0.581	0.699	0.703
中山	0.561	0.392	0.321	0.318	0.318	0.401	0.449	0.457
东莞	0.701	0.611	0.539	0.498	0.456	0.610	0.732	0.753
云浮	0.159	0.165	0.095	0.093	0.106	0.100	0.047	0.057
佛山	0.385	0.315	0.257	0.258	0.250	0.309	0.349	0.371
惠州	0.231	0.214	0.172	0.173	0.184	0.244	0.264	0.293
揭阳	0.080	0.071	0.078	0.125	0.163	0.150	0.090	0.071
梅州	0.079	0.075	0.063	0.100	0.104	0.116	0.083	0.091
汕头	0.142	0.126	0.108	0.102	0.121	0.123	0.133	0.137
汕尾	0.084	0.073	0.086	0.071	0.076	0.068	0.080	0.080
江门	0.226	0.270	0.148	0.141	0.137	0.173	0.178	0.196
河源	0.061	0.075	0.052	0.053	0.047	0.067	0.083	0.081
清远	0.082	0.081	0.063	0.061	0.055	0.069	0.075	0.086
湛江	0.108	0.128	0.064	0.050	0.051	0.059	0.068	0.074
潮州	0.133	0.120	0.069	0.102	0.115	0.138	0.144	0.159
珠海	0.691	0.695	0.681	0.595	0.697	0.713	0.545	0.534
肇庆	0.263	0.218	0.199	0.244	0.161	0.071	0.081	0.114
茂名	0.064	0.027	0.018	0.023	0.035	0.029	0.025	0.027
阳江	0.112	0.090	0.074	0.088	0.084	0.104	0.116	0.132
韶关	0.109	0.099	0.062	0.064	0.062	0.078	0.084	0.092

（二）变量选取

1. 被解释变量

许多学者选择使用居住在城镇和乡村居民的能够自由支配的收入比值和泰尔指数作为被解释变量，本文选择用城乡之间的比

值来度量我国区域收入差距，并在之后的分析中更换为泰尔指数去做稳健性检验。

2. 核心解释变量

选择数字经济指数来衡量数字经济发展水平。

3. 调节变量

参考冀福俊的做法将产业结构用来检验被解释变量对城乡居民经济差异的影响^[22]，但是由于数据可得性，本文以第三产业和第二产业二者增加值的比值来度量产业结构的高级程度。

4. 控制变量

首先是经济发展水平。林毅夫表示，经济发展水平会影响到居民收入分配，那么城乡居民收入差距也一定会受到影响^[23]。如果当地经济较为发达，那么农业和乡村建设领域会有更多的资金投入，不但有助于促进农业生产效率的提升，而且可以缩小城乡居民收入差距。另外，经济发展水平程度高，意味着其有更多的就业机会，农村居民的劳动收入也会随之提高，使得城乡居民收入差距进一步缩小。本文在对经济发展水平衡量与判断的过程中，选择的是人均 GDP 指标，记为 GDP。

其次是政府干预程度，指的是政府通过使用职能，面对市场通货膨胀或紧缩、市场竞争是否完全等现象颁发诸如加大投资转移支付等调整政策，通过加强市场监管等方式对国民市场做出干预。干预的强度可以通过政府的财政支出和当地生产总值的比值来进行判断，恰当的调整干预如兴建 5G 基站，可缩小城乡数字化差距，从而间接缩小城乡收入的差距。

第三是城市经济密度。高经济密度城市比如深圳，有华为、腾讯等大企业可以吸引企业形成数字产业集群，吸引高新技术人才，提高收入水平，也可能造成虹吸效应导致其他地区人才减少进而加大城乡收入差距。

第四是金融发展程度。我们以总 GDP 中居民在信托公司等金融机构办理存贷款业务的金额所占比例作为它的反映指标，较高的金融发展程度可以促进投资增长并增强资金跨区域流动的的效率，从而影响收入水平和数字经济的融资环境。

最后是人力资源水平。人力资本水平通常是以当地的全日制在读大学生人数与当地总人口比重来衡量。在数字经济快速发展背景下，高教育水平和数字技能的群体更容易获得数字经济中的高技能岗位和高收入机会，而受教育程度较低群体可能被边缘化，导致人力资本分布的不均衡，通常城市的人力资本水平会远高于农村，这会拉大城乡居民的收入差距。

四、数字经济对收入差距的实证分析

(一) 模型构建

$$gap_{it} = \beta_0 + \beta_1 digital_{it} + \gamma controls_{it} + \lambda_t + v_i + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中 gap_{it} 为 i 市的第 t 年的城乡收入比值； $digital_{it}$ 为 i 市第 t 年的数字经济发展水平；向量 $controls_{it}$ 包含了一些额外加入的变量用来排除其他潜在混杂因素的干扰，例如政府对市场的干预、当地经济发展的程度、金融发展水平、和城镇化水平。 λ_t 的含义是 i

地级市无法测度的固定效应， v_i 的含义是 i 地级市在时间维度上的固定效应； ε_{it} 表示一些难以量化、数据不可得或者是和研究内容并不直接相关的变量； β_0 为解释变量等于 0 时的基准值， β_1 为核心变量的系数。

加入调节变量后：

$$gap_{it} = \beta_0 + \beta_1 digital_{it} + \beta_2 IS_{it} + \beta_3 (digital_{it} \times IS_{it}) + \gamma controls_{it} + \lambda_t + v_i + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

IS_{it} 表示产业结构优化程度， β_2 是变量产业结构的系数，代表产业结构对 gap 的直接影响， $(digital_{it} \times IS_{it})$ 作为核心变量和调节变量的交互项， β_3 是交互项的系数，用来衡量的数字经济对收入差距的调节效应，其余变量和模型一相同。

(二) 多重共线性

多重共线性检验结果如表 4 所示，从表中可知 VIF 系数 4.70<10，可得出各变量无多重共线性。

表 4：多重共线性检验

GAP	VIF	1/VIF
HCL	6.72	0.148765
DE	6.29	0.159034
EDL	4.93	0.202911
UED	4.85	0.206030
FIN	4.36	0.229200
Gov	3.46	0.288863
IS	2.26	0.442157
Mean VIF	4.70	

(三) 描述性分析

在表 5 可以看到城乡收入差距（GAP）、城市经济密度（UED）、数字经济指数（DE）、经济发展水平（EDL）、政府干预程度（GOV）、人力资本水平（HCL）和金融发展程度（FIN）的统计特征，城乡收入差距的均值为 1.82，标准差为 0.22，数据分布较为集中，范围在 1.46 至 2.67。城市经济密度的均值为 8.14，标准差为 1.31，数据分布较为集中，范围在 6.07 至 10.73。数字经济指数的均值为 0.22，标准差为 0.20，数据分布较为分散，范围在 0.02 至 0.75。经济发展水平的均值为 10.85，标准差为 0.54，数据分布较为集中，范围在 9.83 至 12.08。政府干预程度的均值为 0.17，标准差为 0.07，数据分布较为集中，范围在 0.07 至 0.40。人力资本水平的观测值数量为 198，均值为 0.02，标准差为 0.03，数据分布较为分散，范围在 0.001 至 0.14。金融发展程度的均值为 2.40，标准差为 0.85，数据分布较为分散，范围在 1.02 至 5.33。这些统计信息为分析城乡收入差距、城市经济密度以及其他经济变量之间的关系提供了基础。

表 5：各变量描述性分析

Variable	Obs	Mean	Std. dev.	Min	Max
GAP	200	1.819629	0.2154957	1.455463	2.670688
DE	200	0.2151223	0.1957865	0.182868	0.7531036
EDL	200	10.84739	0.5362878	9.831078	12.07558
GOV	200	0.1707318	0.0726427	0.06967	0.400947
HCL	198	0.0224883	0.0341829	0.001006	0.143891
FIN	200	2.40237	0.8503466	1.020341	5.32732
UED	200	8.140746	1.309137	6.074436	10.72612

本文采用 Hausman 检验去确定何种效应模型更为合适。根据 Hausman 检验的结果，如果 P 值在 0.1 之上的话，则表明随机效应模型更为合适。反之，如果 P 值在 0.1 之下，选择固定效应模型进行分析将会是更优的选项。从表 6 的结果可以看出，检验得出的 P 值为 0，因此，在此研究里选择固定效应模型进行回归分析。

表 6: Hausman 检验

检验	Chi2(7)	prob>chi
Hausman 检验	75.24	0.000

(四) 基准回归

回归结果如表 7 所示，第一列仅用解释变量和被解释变量来进行简单的固定效应回归，第二列则是加入了经济发展水平、政府干预程度、金融发展水平、人力资本、城市经济密度这五个控制变量，以深入分析二者之间的关系。

在不加控制变量时显著负向系数为 -0.314，在 5% 的水平上显著为负，意味着在数字经济发展水平变大 1 个单位的情况下，广东省便会缩小 0.314 个单位的城乡居民收入差距，由此可以看出数字经济高速发展，不光可以推动数字经济相关产业的发展，并且还有助于增强城市与乡村之间的资金、技术、知识的流通效率。在数字化信息化高速发展的今天，互联网媒介、人工智能电子设备发挥了重要作用，给城乡之间创立了一个媒介，做到了城乡信息的高质量交流和共享，给农民带来了许多便捷式服务，在一定水平上降低了农民收集信息的时间和精力。此外发展数字经济，让农村吸引更多的城市资本向着农村流动。有了数字化信息化技术的帮助，农村居民信用力能够非常直接的呈现在投资者面前，农村所必备的投资价值，可以用数字化的形式展现给所有的投资者，这对于缩小城乡居民融资之间的差距有着非常重大的意义。总的来说，数字经济的发展可以清理掉城乡发展之间的许多障碍，推动了城乡之间的交融，进而缩小城乡之间得到收入差距。

表 7: 基准回归分析

	(1)	(2)
	GAP	GAP
DE	-0.314** (-3.33)	-0.441** (-3.37)
EDL		-0.0504 (-0.60)
GOV		-0.366 (-0.74)
HCL		2.985* (2.15)
FIN		0.102* (2.12)
UED		0.249* (2.54)
City	Yes	yes
Year	Yes	Yes
_cons	2.203*** (59.33)	0.598 (0.44)
N	200	198
r2	0.796	0.828
adj_r2		
F	31.82	51.89

t statistics in parentheses * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

(五) 稳健性检验

在稳健性检验的过程中，经过全方位考虑后最终决定运用替换被解释变量的方法和增加控制变量的做法。在评估收入差距期间，使用增添新的变量和泰尔指数代换掉原来的被解释变量的方法做检验，检验结果可见表 8。

从表 8 可以看到，数字经济发展水平对城乡居民收入差距的影响系数、显著性与前文的一致性较强，可以推断出该模型的结果是比较稳健的。

表 8: 稳健性检验

	(1)	(2)	(3)
	gpa	泰尔指数	gpa
DE	-0.441*** (-3.37)	-0.025*** (-3.08)	-0.440*** (-3.34)
EDL	-0.050 (-0.60)	-0.015** (-2.16)	-0.056 (-0.70)
GOV	-0.366 (-0.74)	-0.047 (-1.45)	-0.363 (-0.73)
HCL	2.985** (2.15)	0.292*** (3.65)	2.994** (2.15)
FIN	0.102** (2.12)	0.006 (1.45)	0.101** (2.10)
UED	0.249** (2.54)	0.030*** (3.89)	0.250** (2.52)
UR			0.050 (0.55)
Year	Yes	Yes	Yes
City	Yes	Yes	Yes
N	198	198	198
R ²	0.828	0.819	0.828

t statistics in parentheses * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

(六) 调节效应

本文进一步探讨调节变量在数字经济驱动过程中的调节效应，参考冀福俊等人的做法将产业结构作为调节变量在基准回归模型中加入交乘项进行调节效应检验。从表 9 中可以看出产业结构对数字经济与城乡收入差距关系的调节作用方向为负向，且交互项在 5% 的水平上显著，交互项系数为 -0.162，这意味着第三产业占比越高，即产业结构值越大，数字经济对不同地区收入分配差距的积极作用即缩小收入差距的作用就越强。产业结构与城乡居民收入差距的回归系数为 0.2094，且 $P < 0.01$ ，说明广东省第三次产业比重变大 1 个单位，就会有 0.002 的单位的两者差距变小。

表9：调节效应分析

	(1)	(2)
	Gap	Gap
DE	-0.441*** (-3.37)	-1.787*** (-3.47)
EDL	-0.050 (-0.60)	0.068 (0.82)
GOV	-0.366 (-0.74)	-0.486 (-0.92)
HCM	2.985** (2.15)	3.515** (2.73)
FIN	0.102** (2.12)	0.072 (1.44)
HED	0.249** (2.54)	0.111 (1.19)
DE_IS		0.006*** (3.18)
IS		-0.002*** (-3.12)
UR		0.110 (1.68)
Year	Yes	Yes
City	Yes	Yes
N	198	198
R ²	0.828	0.839

t statistics in parentheses * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

(七) 异质性检验

为了进一步研究数字经济对广东省城乡居民收入差距影响，本部分将广东省划分为以广州为首的珠三角城市群和广东省东部、西部、北部四个经济相对发展较弱的地区来做异质性分析，从表10发现不同地区之间有明显的差异，在珠三角地区数字经济对居民收入差距具有显著的作用，在非珠三角地区均不显著，因为在珠三角地区经济发达，有大量的人才和资金等资源汇聚，促进了数字经济的发展并提高了相关人员的收入。另一方面，广东其它地区由于经济相对落后，产业结构比较单一，人才流失严重，农村地区难以获得数字经济发展所需资源。

表10：异质性分析

	(珠三角)	(粤东)	(粤西)	(粤北)
	GAP	GAP	GAP	GAP
DE	-0.382 (-1.99)	0.0255 -0.34	0.113 -0.46	-0.378 (-1.05)
EDL	-0.0816 (-0.33)	0.00211 -0.02	-0.175 (-0.93)	0.0765 -0.35

GOV	-0.956 (-1.00)	0.641 -1.11	0.43 -0.67	0.688 -1.04
HCL	0.278 -0.18	7.204* -2.2	-4.126 (-1.75)	-4.382 (-0.56)
FIN	-0.00215 (-0.03)	0.00722 -0.07	-0.341** (-3.99)	0.275* -2.55
HED	-0.105 (-0.40)	0.496** -3.78	0.235 -1.06	0.879 -1.79
City	Yes	Yes	Yes	Yes
Year	Yes	Yes	Yes	Yes
N	80	39	29	50
r ²	0.94	0.978	0.996	0.95
adj_r ²				
F	9.166	128.4	280.9	40.72

t statistics in parentheses * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

五、结论及建议

(一) 研究结论

发展数字经济，可以打破城乡间的信息鸿沟，促进城乡一体化协调发展。本文运用理论与实证分析相结合的方式，重点阐述了数字技术驱动下对广东省城乡居民收入差距的作用与影响，主要结论如下：

第一，广东省数字经济发展水平和城乡居民收入整体都是呈上升趋势，但是地区间数字经济发展水平和城乡居民可支配收入仍存在比较大的差距。

第二，通过计算各个经济指标得出数字经济指数。由指数可知，广东省整体发展相对较为成熟，基础设施建设已经较为完善，但是还存在较大的地区差异，因此应当重视基础薄弱的城市的扶持。

第三，通过构建双固定效应模型的方式，以广东省2013年至2022年的面板数据为基础开展了实证检验。实证分析结果表明数字经济的发展水平对城乡居民收入差距的影响呈现很强的负向显著作用，也就是说，加大数字经济的发展有利于缩小城乡居民收入差距，这验证了假设一。但是由于城乡教育资源分配失衡，珠三角城市经济密度高于其他地区导致高技能群体集中于城市，农村劳动力因数字技能匮乏难以共享技术红利，人力资本水平相差较大造成的虹吸效应会减弱数字经济并缩小其对城乡收入差距的影响。

第四，产业结构升级的调节效应显著，第三产业占比越高，数字经济缩小收入差距的效果就更好，这意味着第三产业如服务业与数字技术的融合可以创造出更多的就业岗位来提高居民收入缩小区域收入差距，调节变量和核心变量的交互项显著为正，意味着产业的不断优化在数字经济对收入差距的影响中具有正向调节作用。数字经济发展水平越高和产业结构优化度越高的地区带来的收入就越多，珠三角城乡融合发展较为成熟，但是粤东、粤西等地因传统产业作为主导产业并且数字基础设施不完善导致产业结构在数字经济对收入差距的调节作用没能有效发挥出来，也使得城乡地区差距过大，这也验证了假设二。

第五,通过采用异质性检验得出数字经济在广州、佛山等经济发达的城市中对于收入差距的影响高于非珠三角地区,这也验证了假设三。

(二) 政策建议

通过以上结论,本文提出以下针对性方案:

第一,应加强对乡村居民,特别是待业人群的数字经济宣传与技能培训。例如,利用抖音等平台普及数字经济和数字普惠金融知识,既提升农民对网络风险的防范意识,也赋能其通过直播带货等方式销售特色农产品以增加收入。同时,可依托农村独特资源,在社交媒体宣传地域文化,吸引游客体验乡村服务,助力缩小收入差距。

第二,地方政府需着力于农村地区尤其是粤东西北的5G等数字基础设施建设,为承接珠三角数据加工等劳动密集型产业转

移、推动本地产业数字化智能化转型创造条件。投资发展数字经济应坚持因地制宜、科学规划,确保资源高效配置。鉴于基建投资规模大,政府需强化对欠发达地区的主导作用,同时探索多元化投融资机制吸引社会资本参与。此外,应研发推广适用农村的电子信息化设备,提升农业生产效率。

第三,需优先规划建设农村道路、桥梁等交通网络,改善物流条件。完善的交通设施不仅能降低农产品流通与工业品下乡的成本,更能吸引数字经济项目落地,创造农村就业创业机会,并为城乡要素流动、服务均等化提供基础支撑,促进城乡融合。

第四,政府应鼓励城市科技企业将数据标注、客服外包等环节向农村转移,直接增加当地就业与收入。同时,可建立城乡产业协作园区,由城市提供技术、标准与市场,农村负责生产加工,形成一体化产业链,深化城乡协同发展。

参考文献

- [1]TAPSCOTT D. The Digital Economy: Promise and Peril in the Age of Networked Intelligence [M]. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [2]Kim B ,Barua A ,Whinston B A .Virtual field experiments for a digital economy: a new research methodology for exploring an information economy[J].Decision Support Systems,2002,32(3):215-231.DOI:10.1016/S0167-9236(01)00094-X.
- [3]何鼎吟.数字经济与信息经济、网络经济和知识经济的内涵比较[J].时代金融,2011,(29):47.
- [4]李长江.关于数字经济内涵的初步探讨[J].电子政务,2017,(09):84-92.DOI:10.16582/j.cnki.dzzw.2017.09.009.
- [5]崔保国,刘金河.论数字经济的定义与测算——兼论数字经济与数字传媒的关系[J].现代传播(中国传媒大学学报),2020,42(04):120-127.
- [6]刘军,杨渊望,张三峰.中国数字经济测度与驱动因素研究[J].上海经济研究,2020,(06):81-96.DOI:10.19626/j.cnki.cn31-1163/f.2020.06.008.
- [7]赵亚辉,周博.中国数字经济发展水平的多维度测度与研究[J].国际金融,2023,(12):28-38.DOI:10.16474/j.cnki.1673-8489.2023.12.005.
- [8]焦帅涛,孙秋碧.中国数字经济发展的测度及分析[J].福州大学学报(哲学社会科学版),2021,35(06):18-25.
- [9]李婷,李实.中国收入分配改革:难题、挑战与出路[J].经济社会体制比较,2013,(05):32-43.
- [10]张延群,万海远.我国城乡居民收入差距的决定因素和趋势预测[J].数量经济技术经济研究,2019,36(03):59-75.DOI:10.13653/j.cnki.jqte.2019.03.004.
- [11]谭阳欣.我国收入分配差距的现状、成因及对策[J].中国国际财经(中英文),2017,(11):169-170.DOI:10.19516/j.cnki.10-1438/f.2017.11.136.
- [12]任达.中国人口年龄结构对城乡居民收入差距的影响研究[D].辽宁大学,2022.DOI:10.27209/d.cnki.glniu.2022.002073.
- [13]杜鑫.中国的城乡居民收入差距:演变、成因及未来趋势[J].学术界,2023,(02):160-173.
- [14]徐文篆.数字基础设施建设对城乡收入差距影响研究——基于“宽带中国”战略的准自然实验[J].内蒙古农业大学学报(社会科学版),2023,25(05):58-68.DOI:10.16853/j.issn.1009-4458.2023.05.009.
- [15]祝志勇,刘畅畅.数字基础设施对城乡收入差距的影响及其门槛效应[J].华南农业大学学报(社会科学版),2022,21(05):126-140.
- [16]唐晓灵,陈洪金.移动互联网的普及缩小城乡收入差距的实证研究[J].城市观察,2022,(01):145-158+164.
- [17]李蕊,吴淑琪.数字经济发展能缩小城乡收入差距吗?——基于中国省级面板数据的实证研究[J].新金融,2023,(11):47-55.
- [18]洪俊杰,李研,杨曦.数字经济与收入差距:数字经济核心产业的视角[J].经济研究,2024,59(05):116-131.
- [19]王洋.数字经济发展对城乡收入差距的影响研究——基于空间杜宾模型的实证分析[J].现代商业,2025,(03):8-12.DOI:10.14097/j.cnki.5392/2025.03.004.
- [20]赵涛,张智,梁上坤.数字经济、创业活跃度与高质量发展——来自中国城市的经验证据[J].管理世界,2020,36(10):65-76.DOI:10.19744/j.cnki.11-1235/f.2020.0154.
- [21]黄群慧,余泳泽,张松林.互联网发展与制造业生产率提升:内在机制与中国经验[J].中国工业经济,2019,(08):5-23.DOI:10.19581/j.cnki.ciejournal.2019.08.001.
- [22]冀福俊.数字经济对城乡收入差距的影响——基于产业结构高级化的调节效应分析[J].经济问题,2023,(02):35-41.DOI:10.16011/j.cnki.jjw.2023.02.002.
- [23]陈斌开,林毅夫.发展战略、城市化与中国城乡收入差距[J].中国社会科学,2013,(04):81-102+20.

数字技术对制造业高端化转型影响研究

蒙晨希, 吕倩怡, 陈喜强, 欧阳勤*

广东白云学院 应用经济学院, 广东 广州 510450

DOI:10.61369/ASDS.2025100003

摘 要 : 本文基于2013–2023年中国省级面板数据, 通过建立双向固定效应模型, 实证检验数字技术对制造业高端化的影响机制。研究结果表明, 数字技术整体上显著促进了制造业高端化; 其推动效应在东部和中部地区尤为突出, 而在西部地区则不显著, 这反映了区域间数字鸿沟与产业基础差异的潜在影响。机制分析显示, 绿色发展是数字技术推动制造业高端化的有效但非核心的中介路径。本文进一步通过内生性检验和稳健性检验验证了结论的可靠性。

关 键 词 : 数字化转型; 制造业高端化; 机制检验; 区域异质性

Research on the Influence of Digital Technology on the Transformation of High-end Manufacturing

Meng Chenxi, Lv Qianyi, Chen Xiqiang, Ouyang Qin*

School of Applied Economics, Guangdong Baiyun University, Guangzhou, Guangdong 510450

Abstract : Based on provincial panel data of China from 2013 to 2023, this paper establishes a two-way fixed effects model to empirically examine the impact mechanism of digital technology on the high-end transformation of manufacturing industry. The research results show that digital technology significantly promotes the high-end transformation of manufacturing industry overall; its driving effect is particularly prominent in eastern and central regions, while it is not significant in western regions, reflecting the potential influence of regional digital divide and differences in industrial foundations. Mechanism analysis reveals that green development serves as an effective but non-core mediating path through which digital technology drives the high-end transformation of manufacturing industry. The paper further confirms the reliability of the conclusions via endogeneity tests and robustness tests.

Keywords : digital transformation; high-end manufacturing; mechanism testing; regional heterogeneity

引言

在全球价值链重构与科技革命交汇的背景下, 我国制造业正处于由“规模扩张”向“质效提升”转变的关键阶段。2024年修订的《产业结构调整指导目录》^[1]明确提出推动制造业高端化、智能化、绿色化发展, 但制造业仍面临“大而不强”的挑战, 高端装备领域对外依存度较高, 关键核心技术自主可控能力亟待提升。

数字技术的快速发展为制造业转型提供了新路径。数字经济规模持续扩大, 工业互联网、5G 工厂等数字技术正深刻重塑制造业生产模式。然而, 数字经济发展不均衡问题突出, 既存在“数字鸿沟”, 又面临“卡脖子”风险, 制约了制造业整体竞争力提升。

制造业高端化是一个涵盖智能化升级与产业形态高级化的多维过程, 具体体现为智能制造、绿色制造和服务型制造的协同共进。这一转型进程在区域层面呈现出明显差异, 东部沿海地区已然形成了高端制造产业集群, 而中西部地区数字化转型相对迟缓, 这充分凸显出区域发展的不平衡性。

目前, 现有研究大多聚焦于国家层面的技术赋能效应, 却缺乏从省级尺度深入剖析数字技术对制造业高端化影响的区域差异机制。基于此, 本文以全国31个省份数据为样本, 系统探究数字技术对制造业高端化转型的影响效应及作用机制, 重点聚焦总体影响、作用机制和区域异质性这三个维度进行探讨, 旨在为构建现代产业体系提供决策参考依据。

基金项目: 广东省大学生创新训练项目《数字技术赋能传统制造业转型升级路径研究》(项目编号: S202510822012); 广东省2025年度社科规划项目“国家数字化战略赋能传统制造业数字化转型和高端化发展的协同机制研究”(编号 GD25CYJ02); 广东白云学院2024年度校级本科教学质量项目《数字经济特色专业》(编号 BYZY202404)。

作者简介:

蒙晨希, 男, 广东肇庆人, 广东白云学院应用经济学院数字经济专业本科生, 研究方向: 数字经济;

吕倩怡, 女, 广东佛山人, 广东白云学院应用经济学院数字经济专业本科生, 研究方向: 数字经济。

陈喜强, 男, 广西灵山人, 广东白云学院应用经济学院教授, 博士, 研究方向: 数字经济、产业经济、公共经济。

通讯作者: 欧阳勤, 女, 江西彭泽人, 广东白云学院应用经济学院副教授, 研究方向: 数字经济、产业经济。

一、已有文献梳理与研究假设

（一）已有文献简要梳理

现有研究主要从三个层面剖析数字技术对制造业高端化的影响机制。在驱动路径层面，学者们普遍认为数字技术通过优化资源配置与创新价值创造驱动转型。谭雅妃等（2024）^[3]指出，数字化转型通过“创新”与“效率”双通道发挥作用；贾利军与陈恒焱（2022）^[4]强调，数字资本品与行业知识的深度融合是关键。在转型模式层面，杨红（2024）^[4]指出，高端化转型需数字人才、专利及工业互联网平台等要素的系统协同。在空间效应层面，研究表明数字技术的影响存在显著区域差异，王瑞荣与李志彬（2024）^[5]指出，先发地区效益更为显著，而徐冬梅等（2022）^[6]则证实了西部地区的“后发优势”。

（二）理论分析与研究假设

基于技术-组织-环境（TOE）框架与资源基础观，本文构建数字技术影响制造业高端化的理论机制，并提出相应研究假设。

首先，数字技术可通过直接路径驱动制造业高端化转型。基于技术创新理论，数字技术借助物联网、人工智能等工具优化要素配置、重塑生产函数，达成生产过程的精准管控与智能调度。与此同时，数字平台能够促进产业链协同创新，降低制度性交易成本，加速知识技术的扩散，尤其在高端装备制造领域，可显著提升产品的复杂度与附加值。

其次，绿色发展可能在数字技术与制造业高端化之间发挥中介作用。依据绿色创新理论，数字技术借助能源管理系统、数字孪生等工具，为环境治理赋能，助力企业实现能耗监控与减排优化，进而提升资源循环效率。绿色转型不仅可满足日益严苛的环境规制要求，还能通过塑造绿色品牌形象，开拓国际高端市场，进而间接推动产业向价值链高端迈进。

最后，考虑到我国区域间数字经济基础、产业结构和制度环境的显著差异，数字技术对制造业高端化的推动效果可能呈现区域异质性。区域创新系统理论显示，东部地区依托完善的数字基础设施与创新生态系统，技术效益得以充分彰显；而中西部地区受数字鸿沟与产业基础限制，技术红利的释放相对受限，这种差异凸显了区域产业政策差异化设计的必要性。

基于上述理论分析，本文提出以下研究假设：

假设 H1：数字技术对制造业高端化转型具有显著正向影响。

假设 H2：数字技术通过促进绿色发展间接推动制造业高端化。

假设 H3：数字技术对制造业高端化的促进效果存在区域异质性。

二、研究设计与数据来源

（一）模型设定与理论依据

1. 基准回归模型选择依据

本文选取双向固定效应模型作为基准模型，主要基于以下理

论考量：（1）个体异质性控制：鉴于各省份在资源禀赋、产业基础和政策环境等方面存在显著差异，个体固定效应（ μ_i ）可有效控制这些不随时间变化的个体特征，规避遗漏变量偏差。（2）时间趋势控制：宏观经济周期、技术变革以及政策冲击等时间因素可能同时作用于所有省份，时间固定效应（ λ_t ）能够捕捉这些共同的时间趋势。

为检验数字技术对制造业高端化的直接效应（H1），本研究建立了如下面板模型，并参考了相关文献进行深入分析。

$$mht_{it} = \alpha + \beta dt_{it} + \gamma X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it}$$

其中， mht_{it} 为被解释变量，表示第 i 个省份第 t 年的制造业高端化水平； dt_{it} 为核心解释变量，表示数字技术发展水平； X_{it} 为控制变量向量，包括经济规模（GDP）、人力资源储备（human）、对外开放水平（fdi）及政府支持强度（fis）； μ_i 表示个体固定效应， λ_t 表示时间固定效应； ε_{it} 为随机误差项。

2. 中介效应模型

本文运用温忠麟等（2004）^[7]提出的中介效应检验程序，为检验绿色发展（ls）的中介机制（H2），构建如下三步回归模型：

第一步：检验数字技术对制造业高端化的总效应

$$mht_{it} = \alpha_1 + \beta_1 dt_{it} + \gamma_1 X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it}$$

第二步：检验数字技术对中介变量“绿色”的影响

$$ls_{it} = \alpha_2 + \beta_2 dt_{it} + \gamma_2 X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it}$$

第三步：加入中介变量后检验数字技术的直接效应及中介效应

$$mht_{it} = \alpha_3 + \beta_3 dt_{it} + \delta ls_{it} + \gamma_3 X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it}$$

若 β_1 、 β_2 和 δ 均显著，则存在中介效应。

（二）变量定义与测度

本文的核心变量包括被解释变量制造业高端化（mht）、核心解释变量数字技术（dt），以及一组控制变量。各变量的具体测度方法及理论依据如下：

1. 被解释变量：制造业高端化（mht）

基于 Porter（1990）的国家竞争优势理论和 Lundvall（1992）的国家创新系统理论，制造业高端化的核心内涵体现在技术创新能力、价值创造能力和产业竞争力的系统性提升^[8-9]。Porter 的钻石模型强调了生产要素条件、需求条件、相关和支持性产业以及企业战略结构对竞争优势的决定性作用，而 Lundvall 的创新系统理论则突出了交互式学习、知识创造和制度环境在创新过程中的关键地位。因此，本文从研发创新与工业增长、市场盈利能力、人才与技术综合以及环保政策支持四个维度构建制造业高端化指标体系，具体如表 1 所示。

表1：制造业高端化

一级指标	二级指标	三级指标	衡量指标
制造业高端化	研发创新与工业增长	研发人力储备	规模以上工业企业 R&D 人员全时当量
		研发资金强度	规模以上工业企业 R&D 经费内部支出
		创新活动密度	规模以上工业企业新产品开发项目数
		创新成果沉淀	规模以上工业企业有效发明专利数
		工业增加值	工业增加值
	市场盈利能力	市场利润水平	规模以上工业企业利润总额 / 规模以上工业企业平均用工人数
		市场收益水平	规模以上工业企业利润总额 / 规模以上工业企业主营业务收入
		创新人才储备	工业企业 R&D 人员数 / 城镇集体单位就业人员数
	人才与技术综合	技术进步贡献	高技术产业 R&D 经费内部支出 / 城镇集体单位就业人员数
		政府环保支持	地方财政环境保护支出 / 地方一般预算支出
	环保政策支持	资源循环水平	一般工业固体废物处置量 / 一般工业固体废物产生量

2. 解释变量：数字技术（dt）

Brynjolfsson & McAfee (2014) 的研究揭示了数字技术发展的三个重要特征：指数级增长、数字化进步和组合式创新^[10]。基于技术采纳模型、数字经济学理论以及这些关于数字技术发展特征的认识，本文从基础支撑能力、产业动能水平及创新环境水平三个维度构建数字技术发展水平评价体系，具体见表2。

表2：数字技术评价指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	衡量指标
数字技术	基础支撑能力	科技财政支出	一般预算公共预算支出科学技术支出 / 地方一般公共预算支出
		宽带普及水平	互联网宽带接入用户 / 各地区年末人口数
		信息就业占比	信息传输、软件和信息技术服务业的城镇非私营单位从业人员数 / 城镇非私营单位就业人员
		高新企业数量	高新技术企业数
	产业动能水平	软业收入占比	软件和信息技术服务业软件业务收入 / GDP
		专利授权效率	国内专利授权数 / 国内专利申请数
		金融数字化度	数字普惠金融指数中的数字化程度
		研发支出强度	各地区全部企业 R&D 经费内部支出 / GDP
	创新环境水平	技术交易规模	技术市场成交额
		金融覆盖广度	数字普惠金融指数的覆盖广度

3. 控制变量

控制变量可能是影响制造业高端化的重要因素，为避免遗漏变量偏差，本文采用以下控制变量。控制变量定义及理论依据见表3。

0.08，标准差分别为1.92和1.01，表明不同省份之间制造业高端化水平存在较大差异，且整体分布较为分散。在控制变量中，各地区经济规模（GDP）差异显著，对外开放水平（fdi）和政府支持强度（fis）也呈现出较大波动，这与我国区域间经济发展不平衡的实际情况相符。人力资源储备（human）总体保持稳定，但各省之间仍存在一定差异。总体而言，各变量展现出良好的变异性，满足实证分析的基本条件。

表3：控制变量定义及理论依据

变量名称	变量符号	衡量方法	理论依据	预期方向
地区经济规模	GDP	各地区生产总值的对数形式	市场规模效应（Krugman, 1991） ^[11]	+
人力资源储备	human	高等教育在校生数占年末常住人口的比重	人力资本理论（Lucas, 1988） ^[12]	+
对外开放水平	fdi	利用外资总额占GDP的比重	技术溢出理论（Coe & Helpman, 1995） ^[13]	+
政府支持强度	fis	科学技术支出占一般公共预算支出的比重	创新政策理论（Nelson, 1993） ^[14]	+

（三）数据来源与描述性统计

本文使用2013 - 2023年中国31个省（自治区、直辖市）的面板数据进行实证分析（不含港澳台地区）。原始数据主要来源于历年《中国统计年鉴》《中国工业统计年鉴》《中国科技统计年鉴》《中国环境统计年鉴》及北京大学数字金融研究中心发布的“数字普惠金融指数”，以及最新的各省份GDP数据。针对个别缺失数据，运用线性插值法进行补齐。所有以货币计量的变量均已以2013年为基期进行平减处理，以消除价格变动的影响。

表4汇报了全部变量的描述性统计结果。由表可知，制造业高端化（mht）和数字技术（dt）的综合指数均值分别为 - 0.02和

表4：变量描述性统计

变量	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
mht	341	-0.02	0.578	-2.26	10.43
dt	341	0.08	1.277	-1.22	2.78
GDP	341	4.27	0.96	1.21	5.69
human	341	0.022	0.006	0.009	0.044
fdi	341	0.248	0.257	0.008	1.342
fis	341	0.281	0.203	0.107	1.379
ls	341	0.884	3.166	0.000	28.291

三、实证结果与分析

（一）基准回归结果

表5报告了数字技术对制造业高端化影响的基准回归结果。第(1)列显示，在不加入任何控制变量的情况下，数字技术对制造业高端化的影响系数为1.662，且在1%水平上显著。随着控制变量的逐步引入，数字技术的系数虽有所下降，但始终在1%水平上显著，支持了假设H1。

表5：双向固定效应回归结果					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	mht	mht	mht	mht	mht
dt	1.662*** (7.311)	1.572*** (6.756)	1.441*** (5.859)	1.396*** (5.649)	1.301*** (5.277)
GDP		0.490* (1.704)	0.475* (1.654)	0.362 (1.224)	1.076*** (2.782)
human			-39.195 (-1.614)	-27.139 (-1.066)	-35.895 (-1.416)
fdi				-0.986 (-1.543)	-0.961 (-1.521)
fis					3.952*** (2.819)
_cons	0.407** (2.585)	-4.339 (-1.555)	-3.543 (-1.254)	-2.408 (-0.826)	-10.211** (-2.556)
N	341	341	341	341	341
R ²	0.496	0.501	0.506	0.510	0.522
F	26.802	24.967	23.370	21.972	21.518

***p<0.01, **p<0.05, *p<0.10, 下文均以此为标准

（二）机制检验

对比分析未引入中介变量前的（1）列与引入中介变量后的（3）列结果。相较于（3）列，引入中介变量后，数字技术的回归系数均发生变化。具体而言，引入绿色发展这一中介变量后，回归系数从1.301降至1.136，表明数字技术通过提升绿色发展产

生的间接中介效应为0.165，占总效应的12.7%。这意味着数字技术对制造业高端化转型的促进作用中，有12.7%是通过提升绿色发展（ls）实现的。由此可见，绿色发展（ls）是有效但非核心的中介渠道，数字技术驱动高端化转型的核心动力仍以直接效应为主。综上所述，假说 H2 成立。

表6：中介模型回归结果			
	(1)	(2)	(3)
	Y	ls	Y
X	1.301*** (5.277)	4.120*** (6.316)	1.136*** (4.341)
ls			0.040* (1.828)
_cons	-10.211** (-2.556)	9.108 (0.862)	-10.576*** (-2.655)
N	341	341	341
R ²	0.522	0.283	0.528
F	21.518	7.781	20.542

（三）异质性分析

1. 分区域异质性检验

首先将全国划分为东部、中部和西部三大区域，并分别展开研究。通过表7可以看出：在控制了经济规模（GDP）、人力资源储备（human）、对外开放（fdi）、各地政府支持（fis）这些控

制变量的情况下，在我国东部和中部地区，数字技术对制造业高端化转型的促进作用均在1%的显著性水平上显著。然而，在西部地区，数字技术对制造业高端化转型的促进作用不显著。综上所述，假设 H3 成立。

表7：分地区回归结果			
	(1)	(2)	(3)
	mht	mht	mht
dt	2.841*** (4.637)	1.059*** (4.995)	-0.595 (-0.963)
GDP	2.135*** (2.771)	0.203 (0.445)	0.668 (0.852)
human	180.490** (2.149)	-20.869 (-0.955)	-48.599 (-1.460)
fdi	-1.010 (-0.940)	0.591 (0.469)	2.785 (1.558)

fis	13.563*** (2.805)	-2.559 (-1.106)	2.917* (1.668)
_cons	-26.452*** (-3.017)	-1.018 (-0.203)	-7.940 (-1.061)
N	121	88	132
R ²	0.691	0.905	0.424
F	14.170	41.201	5.155

2. 内生性检验

本文选择将核心解释变量数字技术（dt）滞后作为工具变量进行内生性检验，同时选择将核心解释变量（dt）分别滞后一期和滞后二期作为工具变量 dt 和工具变量 2dt，分析结果如下表所示：

从表8中我们可以看见无论是滞后一期还是滞后二期都满足 $p < 0.05$ ，在5%的显著性下表现为显著且 dt 的系数、显著性，以及与基准模型的一致性。从表8中我们能看出模型（2）和（3）都满足数字技术在1%显著性下对制造业高端化转型的促进作用，同时，Ldt 的 F 值为1422.64，L2dt 的 F 值为873.45，二者均显著大于 IV 值的10%至25%。说明模型受到内生性的干扰较小，表明模型的内生性影响较小，并不影响原有的结论，从而加强了数字技术促进制造业高端化转型结论的可靠性。

表8：基于 2sls 的内生性检验结果 1

	(1)	(2)	(3)
	双向固定效应 (基准)	2SLS (工具变量 =Ldt)	2SLS (工具变量 =L2dt)
dt	1.050**(3.49)	1.186**(3.97)	1.444**(4.62)
GDP	1.159*(2.36)	1.113*(2.46)	1.025*(2.25)
human	-52.559*(-1.67)	-47.850(-1.64)	-38.852(-1.32)
fdi	-3.231**(-2.95)	-3.207**(-3.19)	-3.163**(-3.14)
id	mhtes	mhtes	mhtes
mhtear	mhtes	mhtes	mhtes
N	341	279	279

表9：基于 2sls 的内生性检验结果 2

指标	滞后 1 期 (L1dt)	滞后 2 期 (L2dt)
(Kleibergen-Paap rk Wald F statistic) :	F=1422.64>16.38 (10% 临界值)	F=873.45>16.38 (10% 临界值)
Chi-sq (1) P-val	Prob > chi2 =0.0000	Prob > chi2=0.0000
(Kleibergen-Paap rk LM statistic)	Minimum eigenvalue=1422.64	Minimum eigenvalue=873.45
10% madtimal IV size	16.38	
15% madtimal IV size	8.96	
20% madtimal IV size	6.66	
25% madtimal IV size	5.53	

3. 稳健性检验

拟从多个维度对研究结果进行稳健性检验，主要选取以下方法。（1）保持原模型不变使用聚类标准误。（2）增加控制变量。为进一步验证结论的可靠性，避免技术创新对结论产生干扰，补充加入控制变量创新驱动（innovation）。将技术市场成交额、工业企业有效发明专利数与 R&D 人员全时当量比重结合表示。（3）更替时间样本区间。本文参考蔡延泽的做法，更换时间样本，选

用 2017-2023 年的时间样本区间。（4）缩尾处理。我们采用缩尾处理这一稳健性检验方法。缩尾处理并非直接删除极端值，而是将首尾极端值拉回到指定的正常值范围，从而在保留全部样本信息的同时减弱异常值的影响。

根据下表 10 结果，无论是保持原模型不变使用聚类标准重新建模还是增加控制变量，又或者是更替时间样本区间和缩尾处理的控制变量，数字技术对制造业高端化转型的促进作用依然具有显著性，证明了研究结论的可靠性。

表 10：稳健性检验回归结果

	(1)	(2)	(3)	(4)
	mht	mht	mht	mht_w1
dt	1.301*** (5.277)	1.296*** (5.315)	1.095*** (2.630)	
GDP	1.076*** (2.782)	0.896** (2.312)	1.399** (1.989)	
human	-35.895 (-1.416)	-52.067** (-2.025)	-60.369 (-1.407)	
fdi	-0.961 (-1.521)	-1.403** (-2.179)	-2.593* (-1.746)	
fis	3.952*** (2.819)	4.006*** (2.891)	4.180** (2.119)	
innovation		-0.642*** (-2.819)		
_cons	-10.767*** (-2.624)	-7.988** (-1.984)		
dt_w1				1.370*** (7.060)
gdp_w1				1.135*** (3.846)
human_w1				-30.542* (-1.665)
fdi_w1				-0.306 (-0.616)
fis_w1				3.933*** (3.549)
ls_w1				1.370*** (7.060)
_cons	-12.872*** (-4.918)	-7.988** (-1.984)	-13.228* (-1.810)	-11.053*** (-3.638)
N	341	341	217	341
R ²	0.841	0.535	0.444	0.625
F	14.332	21.145	12.728	32.825

四、研究结论与政策启示

（一）研究结论

本研究基于2013–2023年中国省级面板数据，实证检验了数字技术对制造业高端化转型的影响，得出以下结论：

首先，数字技术对制造业高端化转型具有显著促进作用。基准回归结果显示，在控制相关变量后，数字技术发展水平每提升1个单位，制造业高端化水平相应提高1.301个单位。这一结果通过了一系列稳健性检验，证实了数字技术通过优化要素配置和创新生产方式，对制造业高端化具有直接驱动作用。

其次，机制检验发现数字技术通过绿色发展渠道产生间接影响，但作用相对有限。中介效应分析表明，绿色发展路径的中介效应占比为12.7%，这说明当前数字技术通过促进绿色生产对制造业高端化的间接推动作用尚未充分显现，数字技术与绿色创新的深度融合仍需进一步加强。

最后，研究揭示数字技术的影响存在显著区域异质性。分区域回归结果表明，东部地区的促进效应最为显著（系数2.841），中部地区次之（系数1.059），而西部地区则未通过显著性检验。这种梯度差异源于各地区在数字基础设施、产业基础及创新生态

方面的系统性差异，反映出数字技术效应的发挥需依托相应的区域条件。

（二）政策启示

基于研究结论，提出以下政策建议：

一是构建多维协同的政策体系。政府应建立“技术–产业–人才–制度”协同机制，在推进5G、工业互联网等数字技术普及的同时，加强复合型人才培养，完善配套政策支持，形成系统化的数字化转型支撑体系。

二是实施差异化的区域推进策略。东部地区应聚焦前沿技术突破与产业集群培育；中部地区应着力承接技术溢出，推动产业链升级；西部地区应优先补齐数字基础设施短板，围绕特色产业实现重点突破。

三是统筹数字驱动与绿色转型。现阶段应以数字技术作为主引擎，推动制造业高端化发展，同时通过构建绿色技术服务平台、创新绿色金融产品等举措，稳步提升绿色发展的协同效应。

四是建立跨区域协同发展机制。通过建设跨区域数字合作园区、实施“技术西输”等工程，促进创新要素有序流动，避免数字鸿沟进一步扩大，推动形成优势互补、高质量发展的区域产业布局。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会令（第7号）——产业结构调整指导目录（2024年本）[EB/OL].(2023-12-27)[2025-10-10].https://www.gov.cn/gongbao/2024/issue_11206/202403/content_6937897.html.
- [2] 谭雅妃，朱朝晖，李敏鑫. 数字化转型赋能制造业企业高质量发展——基于经济绩效与ESG绩效复合视角[J]. 江西财经大学学报, 2024, (04): 45–58.
- [3] 贾利军，陈恒恒. 数字技术赋能制造业高质量发展的关键突破路径[J]. 教学与研究, 2022, (09): 26–39.
- [4] 杨红，李依梦，陈银忠，等. 高端装备制造企业数字化转型驱动路径研究[J]. 科研管理, 2024, 45(1): 21–30.
- [5] 王瑞荣，李志彬. 长三角地区数字经济对高端装备制造业高质量发展的影响研究——基于有调节的中介效应分析[J]. 企业经济, 2024, 43 (03): 103–113.
- [6] 徐冬梅，伍琦，陶长琪. 数字技术如何影响制造业高质量发展[J]. 江西师范大学学报（自然科学版）, 2022, 46 (06): 585–593.
- [7] 温忠麟，张雷，侯杰泰，等. 中介效应检验程序及其应用[J]. 心理学报, 2004, (05): 614–620.
- [8] Porter, M.E. (1990). The competitive advantage of nations. New York: Free Press.
- [9] Lundvall, B.Å. (Ed.). (1992). National Systems of Innovation: Towards a Theory of Innovation and Interactive Learning, London: Pinter Publishers.
- [10] Brynjolfsson, E. and A. McAfee, 2014, The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies, New York: W.W. Norton & Company.
- [11] Krugman, Paul. 1991, “Increasing Returns and Economic Geography”, Journal of Political Economy, 99(3): 483–499.
- [12] Lucas, R.E. 1988, “On the Mechanics of Economic Development”, Journal of Monetary Economics, 22(1): 3–42.
- [13] Coe, D.T. and E. Helpman, 1995, “International R&D Spillovers”, European Economic Review, 39(5): 859–887.
- [14] Nelson, R.R. (Ed.), 1993, National Innovation Systems: A Comparative Analysis, New York: Oxford University Press.

老龄少子化、工业机器人对经济增长的影响研究

刘娟^{1*}, 晏发发¹, 李晓华²

1. 广州理工学院 经济管理学院, 广东 广州 510540

2. 中国社科院中国式现代化研究院, 北京 100006

DOI:10.61369/ASDS.2025100016

摘要： 文章探讨老龄少子化、工业机器人对经济增长的影响机制、影响程度，运用2011–2023年30个省份面板数据进行OLS模型实证分析、机制检验和调节效应分析。研究结果表明，老龄少子化将对经济增长产生负向影响，而工业机器人则会带来正向影响。具体而言，总抚养比每增加1%，将对经济增长造成1.189%的负面影响；而工业机器人的数量与应用每增加1%，则将促进经济增长0.027%。因此，从政策层面来看，“育儿补贴”政策、实施弹性延迟退休政策；加大对工业机器人研发与应用的支持，制造业数字化转型等措施，运用“技术红利”替代“人口红利”；引导经济转向制度与技术创新的高质量发展，提升经济增长。

关键词： 老龄少子化；老年抚养比；少儿抚养比；工业机器人；经济增长

Research on the Impacting of Aging Population and Low Fertility and Industrial Robots on Economic Growth

Liu Juan^{1*}, Yan Fafa¹, Li Xiaohua²

1. School of Economics and Management, Guangzhou Institute of Science and Technology, Guangzhou, Guangdong 510540

2. Institute of Chinese Modernization on China Academy of Social Sciences, Beijing 100006

Abstract： This article examines the mechanisms and extent of the impacts of an aging population and low birth rates, as well as the role of industrial robots in economic growth. It employs empirical analysis through OLS models, mechanism tests, and moderation effect analyses utilizing panel data from 30 provinces spanning from 2011 to 2023. The findings indicate that both an aging population and low birth rates exert a negative influence on economic growth, whereas industrial robots contribute positively. Specifically, for every 1% increase in the total dependency ratio, economic growth is adversely affected by approximately 1.189%. Conversely, each 1% rise in the input and application of industrial robots correlates with a promotion of economic growth by about 0.027%. From a policy perspective, it is recommended to implement measures such as “childcare subsidies,” flexible retirement policies, enhanced support for research and application of industrial robots, and initiatives aimed at promoting digital transformation within manufacturing sectors. These strategies aim to harness “technological dividends” rather than relying solely on “demographic dividends.” Ultimately, guiding the economy towards high-quality development through institutional reforms and technological innovation will serve to bolster economic growth.

Keywords： low fertility and aging population; elderly dependency rate; child-age dependency rate; industrial robots; economic growth

引言

2024年7月21日《中共中央关于进一步全面深化改革、推进中国式现代化的决定》（以下简称《决定》）稳妥有序按自愿、弹性原则推进渐进式延迟法定退休年龄改革，使延迟退休政策再次成为人们关注的焦点，《决定》是中国应对人口结构老龄少子化的积极应对之策。2024年9月《国务院关于渐进式延迟法定退休年龄的办法》使延迟退休政策尘埃落定，该政策实施将有效减缓中国老龄化、少子

作者简介：

晏发发，广州理工学院讲师，研究方向：计量经济学；

李晓华，中国社会科学院中国式现代化研究院副院长，研究员，研究方向：新兴产业、未来产业。

通讯作者：刘娟，产业经济学在读学员，广州理工学院讲师，高级经济师，研究方向：产业经济学、金融学，邮箱：gzhr1j@gzist.edu.cn。

化的发展趋势所带来的劳动人口减少问题。老龄少子化包含二层涵义：一层是老龄化即退休人员（65岁以上人口）占总人口比重增加，导致劳动力供给减少；另一层是少子化即青少年（0-14岁）人口占总人口比重下降，与低出生率紧密相关。据中国统计局统计年鉴显示2023年中国老年人口占比上升到15.38%（65岁及以上人口占总人口比重）¹，预计到2035年将超过20%²。2020年后中国将逐步进入重度老龄化社会，中国人口老龄化未来的趋势是在相当长时期内保持高位而不上升。为应对中国从老龄化社会（老龄人口7%占比）过渡到超老龄社会（老龄人口20%占比）的发展趋势，工业机器人技术发展与应用成为积极应对人口老龄化提供的有效解决方案。

1956年美国成立第一家专注工业机器人生产的企业；20世纪70年代，大型工业开始关注机器人领域，人们开始将机器人投入工厂生产中^[1]。工业机器人的应用能否缓解中国老龄少子化造成的劳动力减少？工业机器人技术的应用将对中国经济增长产生怎样的影响？影响程度和影响机制怎样？正是本文研究的问题。

一、文献综述与研究假设

针对中国人口老龄少子化的现象，现有研究方法上多使用问卷调查法、普查法（2020年第七次全国人口普查）及计量统计方

法验证其对宏观经济增长的影响。一方面从中国人口自然增长率数据来看，2016年1月1日中国全面放开二孩政策，2021年5月31日全面放开三孩政策，2010-2023年中国人口自然增长率如表1所示。

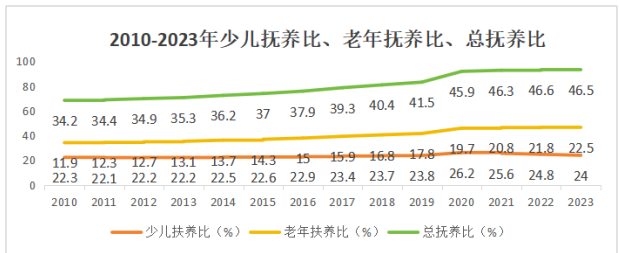
表1 2010-2023年中国人口自然增长率 单位：‰

时间（年）	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
人口自然增长率（‰）	4.79	6.13	7.43	5.9	6.71	4.93	6.53	5.58	3.78	3.32	1.45	0.34	-0.6	-1.48

资料来源：国家统计局官网，<https://data.stats.gov.cn/>。

从表1数据可以看到在二孩政策放开后2016年人口自然增长率达到6.53‰，随后人口自然增长率呈下降趋势，到2022年，人口自然增长率为-0.6‰负增长态势。翟振武（2023）^[2]认为长期的低生育率，是一种内生性人口负增长。同时认为三孩政策和生育支持政策并不能扭转人口负增长常态化这一事实，人口负增长已成为中国人口发展必然和基本的大趋势。

另一方面从少儿抚养比、老年抚养比与总抚养比数据来看。³



数据来源：国家统计局，见表2

图：2010-2023年中国少儿抚养比、老年抚养比、总抚养比

表2 2010-2023年中国少儿抚养比、老年抚养比与总抚养比

单位：%

时间（年）	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
少儿抚养比（%）	22.3	22.1	22.2	22.2	22.5	22.6	22.9	23.4	23.7	23.8	26.2	25.6	24.8	24
老年抚养比（%）	11.9	12.3	12.7	13.1	13.7	14.3	15.0	15.9	16.8	17.8	19.7	20.8	21.8	22.5
总抚养比（%）	34.2	34.4	34.9	35.3	36.2	37	37.9	39.3	40.4	41.5	45.9	46.3	46.6	46.5

资料来源：国家统计局官网，<https://data.stats.gov.cn/>

从表2和图中可以看出老年抚养比和总抚养比呈逐年上升趋势，少儿抚养比在2020年达到峰值26.2%后呈下降趋势。宋祺（2016）论证老年抚养比与经济增长呈倒U型关系，人口老龄化对经济增长存在先正后负的影响趋势，抚养负担减轻对经济增长贡献率达25.7%；少儿抚养比的作用弱于老年抚养比。

（一）老龄少子化文献综述

少子化⁴是指出生人数正在加速减少，持续的超低生育率、严

重的人口少子化和扩展的老年长寿化趋势，将使劳动力参与率减少。据中国社会科学院预测2020-2030年将年均减少790万人，2030-2050年将年均减少835万人，“人口红利”转向“人口负债”。

老龄少子化将使劳动力减少，从而对经济增长产生影响。一方面，人口老龄化将对储蓄、经济增长产生影响（刘永平，2007；李魁，2010；徐升艳，2011；陈彦斌，2014；宋祺，2016）^[6]，即人口总负担率增加，尤其是老年负担率超过子代抚养

1 联合国1956年发布《人口老龄化及其社会经济后果》中明确规定当一个国家65岁的人口占总人口的比例大于7%时，被认为人口老龄化阶段。

2 根据联合国的最新界定，当65岁及以上人口占比超过7%时称为“老龄化社会”（aging society），超过14%时称为老龄社会（aged society），超过20%时称为“超老龄社会”（super-aged society）。

3 抚养比指总人口中非劳动年龄人口数与劳动年龄人口数之比。常用抚养比指标有老年抚养比、少儿抚养比和总抚养比。

老年抚养比是指65岁及以上老年人口数与15-64岁劳动年龄人口数之比；

即老年抚养比=65岁及以上人口数/15-64岁人口数*100%；

少儿抚养比=0-14岁人口数/15-64岁人口数*100%；

总抚养比=（0-14岁人口数+65岁及以上人口数）/（15-64岁人口数）*100%；

老年人口系数=65岁及以上人口数/总人口数*100%。

4 人口出生率21‰以上超多子化；19‰-21‰严重多子化，17‰-19‰多子化，15‰-17‰正常，13‰-15‰为少子化，11‰-13‰严重少子化。

率并迅速增加的情况下，原本能够用于生产的资源将用于老年的养老金、医疗金将削弱经济增长。（蔡昉，2004，2006）推断老龄化程度的加深会降低储蓄资本的积累，从而不利于经济增长。另一方面，人口老龄化将对中国经济增速产生负面影响（黄祖辉，2014；王桂新，2017；陈杰，2020；田成诗，2020；宋佳莹，2022^[6]）。呼倩（2019）发现老龄化程度每提高1%，会导致劳动参与率下降1.2%。与此相反，刘洋（2020）认为人口老龄化会倒逼企业推动科技进步、提高生产率、增加研发投入，促进经济增长。

老龄少子化不但影响劳动参与率同时还会影响储蓄率。一方面，老龄化对居民储蓄率会产生影响（Hayashi，1986；Loayza，2000；Boersch，2000；贾非，2018；张鹏飞，2019），老龄化与储蓄率是负相关关系。而Loayza发现老龄化每增加1%，储蓄率就会减少0.57%，老龄化通过抑制储蓄率进而影响经济增长率。老龄化的影响后果体现在：一是适龄劳动力供给不足，社会保障支出增加；二是生产力下降，导致企业生产效率下降；三是社会保障压力加大，医疗保健、养老等社会保障支出随之增加，从而使政府在基础设施、教育、科技领域的资源不足；四是家庭财务状况，家庭养老压力增加，经济负担加大，家庭财务状况不稳定。另一方面，老龄化对政府储蓄率也会产生影响，使政府消费性支出与转让支出增加，（Furceri and Mourougane，2010）发现老年抚养比每上升1%，会导致政府储蓄率下降，政府总支出占GDP比重上升0.1%–0.4%。

基于上述论证，已有研究发现老龄少子化通过影响劳动力供给、技术创新和储蓄率进而对经济增长产生影响。因此，得出假设H1：

假设H1：老龄少子化对经济增长将产生负向影响，主要是影响劳动力供给和储蓄率。

（二）工业机器人文献综述

为应对老龄少子化的发展趋势，机器人分为工业机器人、服务机器人、特种机器人正成为替代劳动力减少的解决方案。2023年《“机器人+”应用行动实施方案》出台，2024年7月发布《工业机器人行业规范条件（2024版）》，运用机器人解决人口老龄少子化给经济增长带来的不利影响。尤其当前正面临人口结构及产业升级的经济转型期。

1. 工业机器人对经济增长的影响路径

工业机器人对经济增长的影响主要包括劳动、资本积累和技术创新，而工业机器人技术的应用有利于推动全要素生产率水平提高，促进科技创新。工业机器人对劳动积极的影响表现在弥补劳动力不足，缓解工资上涨带来的成本提高；对资本积累的正向影响，体现在社会劳动生产率的提高促进技术进步，促进资本积累；工业机器人技术发展能有效缓解老龄化导致的低储蓄率、低投资率问题，提高资本回报率。工业机器人对技术创新与资本积累的影响主要体现在推动技术进步和优化资本配置。在技术创新方面，工业机器人的应用促进企业技术升级和创新活动，推动生产流程的智能化，减少对低技能劳动力的依赖，创造对技能劳动

力的新需求，从而激励企业投资于新技术管理和维护。工业机器人应用提高企业的专利申请数量，尤其是发明专利。在资本积累方面，工业机器人的推广加速资本的深化和技术升级，进一步引导资本向智能制造领域聚集，实现资源高效配置。因此，工业机器人技术对经济增长的影响为正向；而老龄化少子化对经济增长的影响为负向；到底孰轻孰重？王启超（2024）^[9]从机器人安装密度、机器人存量密度与机器人渗透度发现工业机器人渗透度每增加1%，制造业就业增加0.02%。随着工业机器人技术的发展与应用，工业机器人、服务机器人、特种机器人正应用于现代化生产线、服务场景与特定场合的应用场景。

2. 工业机器人对经济增长的研究

工业机器人对经济增长的影响，Hanson(2001)构建外生增长模型发现智能机器初期产生互补效应；随着技术发展和普及，替代效应逐渐占据主导地位；从而提高生产力与生产效率。Ball—estar(2020)发现由机器人操作高于由非机器人操作的销售额在中小型制造企业。工业机器人通过提高生产率、技术创新等方式增加产出水平，促进经济增长（蔡自兴，2016；章潇萌，2022；刘洋，2023；韩永辉，2023^[12-14]）。Seyed M. Hosseini and Guy Lichtinger（2025）^[18]发现工业机器人更倾向于替代初级岗位，传统初级岗位需求减少，对综合能力与创新能力的要求提高。余玲铮（2021）^[27]发现富士康“机器换人”企业雇佣劳动力下降了30%，常规型职业人数持续下降。Acemoglu和Restrepo（2018）基于理论模型发现通过替代效应压缩劳动者工资，通过涟漪效应使其他不完全替代的劳动者工资也跟随下降，加剧工资不平等。程虹等（2018）^[11]利用CEES考察工业机器人对中国劳动力市场的整体替代效应为0.3%，而在2025年前后攀升至4.7%。而肖挺等（2025）^[26]发现工业机器人价格下降，显著促进就业增长，价格每降低1%，企业就业人数增加约0.008%，工业机器人价格下降减少了生产类岗位，但增加技术与销售类岗位。

基于上述论证，得出假设H2：

假设H2：工业机器人将对经济增长产生正向影响，主要影响技术创新、资本积累与劳动力。

二、理论基础

（一）经济增长理论

任保平（2014）^{标注5}在《经济增长理论史》将经济增长分为数量和质量增长。西方经济新增长理论中包括罗默模型知识驱动的内生增长；卢卡斯（Lucas,1988）《论经济发展的机制》提出以人力资本的外在效应为核心的增长模式，人力资本的外在效应即劳动力的平均人力资本水平具有递增收益作用，这种递增收益使人力资本成为“增长的发动机”（the Engines of Growth）。社会主义经济增长理论从马克思主义经济增长→卡莱斯基的经济增长→梅多斯的经济增长极限→米香的经济增长代价→巴罗的经济增长

⁵ 任保平等著，经济增长理论史[M]，科学出版社，2014.6.

质量→苏联卡马耶夫的经济增长质量认为推动经济增长的因素分为直接因素和间接因素；直接因素是社会全体劳动者的劳动力、生产基金、生产工艺等，而生产基金、生产工艺等的完善取决于科学技术革命；而劳动力资源、普通教育和专业教育制度、人口增长过程、科学研究等则是经济增长的间接因素。世界银行《增长的质量》（Thomas et al.,2001）认为评估增长质量的指标体系包括人类发展、收入增长和环境可持续性⁵。

经济增长与人口的研究最早可追溯到马尔萨斯1798年出版的《人口原理》中论述当人口增长不受限制时，人口以几何级数增加。1936年，凯恩斯在《就业、利息和货币通论》一书中认为失业的原因是有效需求不足，即投资依赖于人口增长率。因此，人口增长率下降会导致有效需求不足，产生失业；要摆脱萧条，实现充分就业，一定有人口的增长。汉森（A.H.Hansen）提出人口增长的减退会导致外延扩张的减退，除非实现内含扩张（通过技术进步兴建新产业，从而促进资本的需求）。刘建华（2020）^{标注6}则运用共协理论认为经济增长与科技进步、人力资本素质提高、劳动力增长、制度创新等因素有关⁶；认为经济增长在经济发展的不同阶段人口数量增长对经济增长的贡献率也不一样；并预测2020-2035年人力资本的贡献率为12%，劳动力增长对经济增长的贡献率为1%，科技进步的贡献率达到34%等。

从上述学者的研究可知经济增长离不开劳动力、资本、技术进步、制度、创新、全要素生产率等。蔡昉（2021）^[8]认为中国老龄化将对社会总需求产生不利影响，特别是总量效应、结构效应和分配效应对消费需求的抑制。

（二）技术革命与补偿理论

技术革命与补偿理论（Technological Revolutions and Compensation Theory）

技术革命与补偿理论源于古典经济学，并由后来的经济学家（Keynesian 和 Schumpeterian 学派）不断发展，用于解释技术进步、就业和经济结构之间的关系。老龄少子化使机器人成为低端劳动力的替代者，机器人技术反作用于社会。该理论认为，技术进步在短期内会摧毁某些工作岗位（技术性失业），但长期会通过一系列“补偿机制”创造出新的工作岗位，从而抵消失业的影响。老龄少子化视为触发新一轮“技术补偿”的外部压力。补偿机制通过资本替代劳动（Capital-Labor Substitution），企业和政府有极强的动力投资能“替代人力”的技术，工业机器人成为劳动力短缺的解决方案，机器人承担重复性、体力性和危险性的工作，弥补劳动力数量的不足，通过技术创新来补偿劳动力短缺，提升经济产出水平，提高生产率。

基于技术革命与补偿理论，再根据柯布－道格拉斯生产函数，如下所示：

柯布－道格拉斯生产函数

$$Q=a.K^b.L^c \quad (1)$$

其中 Q 表示产量，K 表示资本投入，L 表示劳动投入，而 a、

b 和 c 是常数。资本和劳动力的指数 b 和 c 分别表示资本和劳动力对产量的弹性，即当资本或劳动力投入变化1%时，产量变化的百分比。因此，产量 Q 与劳动力投入 L、资本投入 K 有着紧密的关系。

文章将劳动力定义：劳动力 L=L1 少子化人口（0-14 岁人口）+L2 老龄化人口（65 岁以上人口）+L3 工作人口（15-64 岁）。产量即可通过技术进步或提高投入要素的产出效率实现，也可通过增加资本投入和劳动力 L3 实现。本文中的工业机器人的生产与使用增加工作人口 L3 的数量，即 L 增加导致产量 Q 增加，即带来经济增长。在人口老龄少子化与工业机器人技术迭代发展背景下，基于经济增长理论、技术革命与补偿理论及柯布道格拉斯生产函数方程。一方面，人口老龄少子化导致适龄劳动力数量 L3 下降、技术创新活力下降、储蓄率降低，影响经济增长；另一方面，工业机器人提高生产率、促进资本积累、促进技术创新和劳动力的补偿效应推动经济高质量发展。

三、研究设计

（一）样本选取及数据来源

样本数据中工业机器人的度量方法用工业机器人各省产量度量，文章用中国30个省份（不包括西藏）2011-2023年的省级面板数据中工业机器人数量，建立工业机器人、老年抚养比、少儿抚养比、总抚养比对经济增长的影响回归模型，并按照工业机器人区域异质性分析，检验工业机器人对经济增长影响的作用机制。

（二）研究变量选择与数据来源

省级面板数据有助解决反向因果、内生性和自我选择偏差等问题，省级面板数据兼有时间序列与截面序列数据特征，为提高回归的准确性和推断的有效性，通过控制个体与时间固定效应。

数据来源

数据来源包括国家统计局的统计年鉴、各省的统计年鉴以及中经数据网等，个别缺失数据用插值法补齐。

变量选取

1. 被解释变量：经济增长（LnGDP），衡量方法分为两类：一类从经济增长数量维度，使用 GDP、GDP 增长率、人均 GDP 和劳动生产率衡量；另一类从经济增长质量维度，构建经济增长质量评估体系。本文使用 LnGDP 衡量各省经济增长；用各省人均 GDP(LnPGDP) 作为替换变量进行稳健性检验。

2. 核心解释变量：

（1）工业机器人（IR），现有研究方法采用主成分分析法构建指标^[6]，或工业机器人数量、库存量、工业智能化资本、工业智能化程度^[14]。本文采用工业机器人数量做为解释变量。

（2）少儿抚养比（CDR），抽样 0-14 岁人口 / 抽样总人口，即 L1。

6 刘建华等著，经济增长的国际比较：共协理论方法（第二版）[M]，科学出版社，2020.6

(3) 老年抚养比 (EDR), 抽样65岁以上人口 / 抽样总人口, 即 L2。

(4) 总抚养比 (TDR), 少儿抚养比 + 老年抚养比, 即 L1+L2。

3. 控制变量: 文献梳理发现学界对影响经济增长因素包括技术、劳动力、资本和全要素生产率等。文章选取劳动力参与人数 (LnLab)、储蓄率 (PerSaving)、人力资本水平 (HC)、外商直接投资额 (LnFDI)、基础设施建设 (PerRoad) 等作为控制变量。

(1) 储蓄率水平 (PerSaving), 通常储蓄率高的地区可提供更多投资资金, 有助增加科技创新等投资项目, 储蓄率水平反映好, 吸引人才、劳动力就愈有优势, 用人均公路长度衡量。

(6) 区域异质性分析 Region, 分为东部1, 中部2, 西部3。

(7) 地区工业化水平 IndustryLevel, 地区工业增加值 / 地区生产总值。

(8) Open 开放水平, 区域经营单位所在地进出口总额 / 区域 GDP。

变量定义、名称及符号如下表所示。

居民储蓄能力, 用人均储蓄衡量。

(2) 劳动力参与人数 (LnLab), 用国家统计局统计年鉴 14-65岁抽样人口, 经标准化处理后的数据, 即 L3。

(3) 外商直接投资额 (LnFDI), 会影响投资就业水平、促进经济增长, 采用各省外商直接投资额取对数衡量。

(4) 人力资本水平 (HC), 人均受教育年限反映人力资本, 测算人力资本赋予相应权重, 利用权重进行加权求和。

平均受教育年限 = $\frac{\text{文盲数} \times 1 + \text{小学学历数} \times 6 + \text{初中学历数} \times 9 + \text{高中中专学历数} \times 12 + \text{大专本科学历人数} \times 16}{6 \text{岁以上人口总数}}$

(5) 基础设施建设水平 (PerRoad), 地区基础设施建设愈

表3 变量名称、符号及含义

变量名称	符号	定义与计算	预期符号
各省经济增长	LnGDP (Y)	各省 GDP 值取对数	正向
各省人均经济增长	LnPGDP (Y1)	各省 GDP 总值 / 各省常住人口取对数	正向
工业机器人	LnIR(X2)	工业机器人数量取对数	正向
工业机器人	LnLIR (X1)	使用人工智能企业的单位数 (个) 取对数	正向
少儿抚养比	LnCDR _{it} (X3)	抽样0-14岁人口 / 抽样总人口取对数, 即 L1	负向
老年抚养比	LnEDR _{it} (X4)	抽样65岁人口 / 抽样总人口取对数, 即 L2	负向
总抚养比	LnTDR _{it} (X5)	(少儿抚养比 + 老年抚养比) 取对数, 即 L1+L2	负向
储蓄率	PerSaving(X6)	人均存款 / 人均可支配收入	正向
劳动力参与数	LnLab(X7)	14-64岁劳动力人口取对数, 即 L3	正向
人力资本水平	HC(X8)	平均受教育年限 = $\frac{\text{文盲数} \times 1 + \text{小学学历数} \times 6 + \text{初中学历数} \times 9 + \text{高中中专学历数} \times 12 + \text{大专本科学历人数} \times 16}{6 \text{岁以上人口总数}}$	正向
外商直接投资	LnFDI(X9)	外商直接投资额取对数	正向
基础设施水平	PerRoad(X10)	人均公路长度	正向
老龄化率	lnAgelv(X17)	抽样65岁以上人口 / 抽样常住人口取对数	负向
资本存量	LnCA(Y2)	本期资本存量 = 上期资本存量 * (1-10.96%) + 本期固定资产形成总额取对数, 10.96% 为折旧率	正向
区域异质性分析	Region (X11)	东部1、中部2、西部3	——
劳动生产率	LnLP (X12)	各省 GDP/ 就业人员总数取对数	正向
工业化水平	LnIndus-tryLevel(X13)	地区工业增加值 / 地区生产总值取对数	正向
技术市场	LnTechnology(X14)	技术市场成交额取对数	正向
开放水平	Open(X15)	区域经营单位所在地进出口总额 / 区域 GDP	正向

资料来源: 作者整理

文章以中国30个省份 (西藏和港澳台除外) 2011-2023 年13年省级面板数据为研究对象。对相关变量数值进行描述性统计, 如下表所示。

表4 变量描述性统计

变量名称 Variable	观测值 Obs	平均数 Mean	标准差 Std. Dev	最小值 Min	最大值 Max
y	390	9.899527	.9102604	7.222858	11.818
x2	390	.3687079	1.584822	0	11.248
x3	390	-1.87181	.2911523	-2.60369	-1.184171
x4	390	-1.508673	.290434	-2.312635	-1.010601
x5	390	-.9591424	.1998497	-1.645065	-.567396
x6	390	1.424151	1.209217	0	15.62267
x7	390	17.09186	.7256781	15.23344	18.33435
x8	390	9.421502	.8948988	7.679434	12.70088

x9	390	11.49376	1.461035	7.947679	14.82642
x10	390	1.408359	1.21379	.07	5.87
x11	390	1.9	.8317294	1	3
x12	390	4.320591	.4889549	2.27138	5.624065
x13	390	.3355618	.1563016	.1001437	3.001684
x14	390	14.30878	1.902577	8.642263	18.2625
x15	390	.3002142	.3243119	.0079136	2.306849

资料来源：stata 统计

（三）研究模型

基准回归模型如下：

$$\text{LnGDP}_{it} = \beta_0 + \beta_1 \text{IR}_{it} + \beta_2 X_{it} + \beta_i X_{it} + \gamma_t + U_i + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

LnGDP_{it} 表示各省 GDP 水平，IR_{it} 表示各省工业机器人，X_{t, i} 表示各省老年抚养比、少儿抚养比和总抚养比，X_{it} 表示各控制变量，i 为省份，t 为年份，β_i=0 ~ 5 是参数。γ_t、U_i 分别表示时间固定效应、个体固定效应，ε_{it} 表示随机干扰项，变量取对数以消除异方差现象。

豪斯曼检验结果显示 P 值小于 0.05，chi2 为 31.65 说明固定效应模型优于随机效应模型与混合模型。

多重共线性检验

首先检验多重共线性问题，单个解释变量的方差膨胀因子（VIF）最大为 5.54，模型整体的方差膨胀因子为 2.62，均明显小于 10，说明解释变量之间没有明显的多重共线性问题。

四、实证结果分析

（一）变量之间的相关性分析

实证检验结果表明，工业机器人有利于经济增长，具有正向影响。总抚养比对经济增长有明显的负向影响，控制变量中储蓄

率、劳动力参与人数、人力资本等都对经济增长有正向影响。

观察核心解释变量的显著性、符号，对核心解释变量进行回归，发现被解释变量经济增长与核心解释变量工业机器人是正相关关系，从而验证文章基准回归结论的稳健性。

通过相关性分析发现相关系数均小于 0.8 表明变量之间不存在多重共线问题。为更大程度体现机器人与经济增长的关系，对数据进一步进行精准处理，用东、中、西部三个地区验证影响程度。

表5 工业机器人东、中、西部情况

Summary for variables: LnIR					
by categories of: x11					
x11	mean （均值）	sd 标准差	p50 中位数	N 样本数	
1	2.742183	4.326458	0	156	
2	1.371029	3.177658	0	117	
3	.498671	1.866129	0	117	
Total	1.657783	3.522553	0	390	

资料来源：stata 整理

为掌握机器人在地区之间的差异性，用东、中、西部三个地区进行统计，从数值大小可以得出东部地区值高于中部，中部高于西部地区。即工业机器人数量与应用东部最高、中部次之、西部较少。

表6 基准回归：老龄少子化、机器人与经济增长

解释变量	模型（1）OLS1	模型（2）OLS	模型（3）FE	模型（4）RE	模型（5）PCSE	模型（6）GLS
LnIR(x2)		0.027*** (2.938)	-0.002 (-0.252)	0.005(0.672)	0.027*** (3.739)	0.027** (2.976)
EDR(x3)	0.503** (2.388)	0.783*** (3.413)	1.319*** (5.063)	1.153*** (5.002)	0.783*** (4.055)	0.783*** (3.458)
CDR(x4)	0.740*** (2.641)	1.160*** (3.718)	0.620* (1.820)	0.979*** (3.482)	1.160*** (4.622)	1.160*** (3.766)
TDR(X5)	-0.765 (-1.607)	-1.484*** (-2.794)	-1.189*** (-2.049)	-1.448*** (-2.994)	-1.484*** (-3.337)	-1.484** (-2.830)
LnPerSaving(x6)	0.030*** (2.865)	0.033*** (3.175)	0.016* (1.844)	0.019** (2.149)	0.033*** (3.149)	0.033*** (3.217)
Lnlab(x7)	0.721*** (29.060)	0.718*** (29.227)	1.282*** (5.015)	0.773*** (14.800)	0.718*** (34.159)	0.718*** (29.609)
HC(x8)	0.179*** (8.044)	0.176*** (7.979)	0.202*** (4.495)	0.234*** (6.912)	0.176*** (8.094)	0.176*** (8.083)
lnFDI(x9)	0.235*** (13.733)	0.224*** (12.840)	0.078*** (3.675)	0.106*** (5.303)	0.224*** (11.114)	0.224*** (13.008)
Per Road(x10)	0.049*** (3.088)	0.059*** (3.673)	0.077** (2.141)	0.100*** (3.739)	0.059*** (5.072)	0.059*** (3.721)
Constant	-5.600*** (-8.686)	-4.955*** (-7.338)	-12.691*** (-2.838)	-4.669*** (-4.136)	-4.955*** (-8.186)	-4.955*** (-7.434)
Observations	390.000	390.000	390.000	390.000	390.000	390.000
Number of province	30	30	30	30	30	30
Adjusted R-squared	0.941	0.942	0.779			
个体固定效应	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是

注：***、**、* 分别表示 1%、5% 和 10% 的显著水平，括号内为 t 值，以下同。

资料来源：stata 整理

基准回归表 6 中第 1 列表示不考虑机器人的回归结果，第 2 列表示考虑机器人的回归结果，第 3 列是固定效应，第 4

列是随机效应，第 5 列、第 6 例分别是消除异方差、自相关、截面数据三大问题后的结果，系数相同 t 值不同。从上表 6 中数据来看截距均为负值，总抚养比 x5 系数一直为负，表明老龄少子化总抚养比对经济增长带来负向影响，验证前文的假说 1。表 6 中第 3 列固定效应模型表明老年抚养比每增长 1%，会给经济增长带

来-1.189%的负增长，工业机器人除固定效应模型外均给经济增长带来正向影响。劳动力 x7 每增长1% 会带来经济增长1.282% 的增长。

稳健性检验

用人工智能企业的单位数 LnLIR 替换工业机器人（LnIR），用经济增长的人均 GDP（LnPGDP）替换 LnGDP 验证回归模型的稳健性，替换相关变量再进行基准回归。稳健性检验的回归结果如下表7所示，模型（1）基准回归。模型（2）替换变量为 LnLIR 的回归结果，模型（3）综合考虑，发现最终结果表明工业机器人促进中国的经济增长，证明该基准回归模型的稳健性。

表7 稳健性检验

解释变量	模型（1）LnGDP	模型（2）LnPG- DP	模型（3）LnPG- DP
LnLIR（x1）		0.0126 (1.29)	0.00277 (0.49)
LnIR(x2)	0.0267** (2.94)		
CDR(x3)	0.783*** (3.41)	1.391*** (5.68)	1.260*** (5.65)
EDR(x4)	1.160*** (3.72)	1.639*** (4.92)	1.446*** (4.87)
TDR(x5)	-1.484** (-2.79)	-2.618*** (-4.62)	-2.294*** (-4.54)
PerSaving(x6)	0.0328** (3.18)	-0.0114 (-1.03)	-0.0131 (-1.19)
LnLab(x7)	0.718*** (29.23)	-0.329*** (-12.55)	-0.327*** (-12.36)
HC(x8)	0.176*** (7.98)	0.167*** (7.07)	0.168*** (7.11)
LnFDI(x9)	0.224*** (12.84)	0.217*** (11.70)	0.222*** (12.25)
Per Road(x10)	0.0590*** (3.67)	0.0532** (3.11)	0.0480** (2.85)
_cons	-4.955*** (-7.34)	14.99*** (20.80)	14.66*** (21.43)
N	390	390	390

资料来源：stata 整理

内生性检验

可采用滞后一期的工业机器人指标（L.LnIR）为核心解释变量重新进行回归，解决互为因果的内生性问题，由于当期 GDP 水平对滞后期工业机器人水平没有影响，如果滞后一期工业机器人指标 L.LnIR 仍对当期的经济增长有解释能力，说明滞后一期的核心解释变量可以代表原核心解释变量，内生性问题可能不存在。

检验结果如表8所示，模型（1）为基准回归模型，模型（2）为将核心解释变量滞后一期的回归模型。结果表明工业机器人的滞后期指标仍影响中国的经济增长，验证上述回归分析不存在内生性问题。

表8 内生性检验

解释变量	模型（1）LnGDP	模型（2）LnPGDP
lnIR(x2)	0.0126(1.29)	
L.LnIR(L.x2)		0.0194(1.87)
CDR(x3)	1.391*** (5.68)	1.421*** (5.54)
EDR(x4)	1.639*** (4.92)	1.689*** (4.97)
TDR(X5)	-2.618*** (-4.62)	-2.713*** (-4.63)
PerSaving(x6)	-0.0114 (-1.03)	-0.0173 (-1.54)

lnLab(x7)	-0.329*** (-12.55)	-0.317*** (-11.65)
HC(x8)	0.167*** (7.07)	0.168*** (6.92)
LnFDI(x9)	0.217*** (11.70)	0.207*** (10.66)
PerRoad(x10)	0.0532** (3.11)	0.0571** (3.25)
Constant	14.99*** (20.80)	14.94*** (20.23)
Observations	390	360
Number of province	30	30
Adjusted R-squared	0.9432	0.7632
个体固定效应	是	是
年份固定效应	是	是

资料来源：stata 整理

（二）机制检验

工业机器人通过影响劳动、资本和技术创新要素促进经济增长的机制分析。一方面，总抚养比 x5 即老龄少子化影响劳动、资本和技术创新导致经济增长负向影响。被解释变量劳动生产率（LP）、资本存量（CA）、技术创新（Innov）用各地区专利申请数量表示；工业机器人对劳动生产率、资本积累、技术创新的影响，工业机器人为核心解释变量。

除前文中提到的控制变量外，地区的开放水平 x15、技术市场活跃度 x14、工业化水平 x13 也会对工业机器人产生影响。

通过计量模型验证三条影响路径是否存在？影响机制分析如下：

$$\text{LnLP}_{it} = \beta_0 + \beta_1 \text{IR}_{it} + \beta_i X_{it} + \gamma_t + U_i + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

$$\text{LnCA}_{it} = \beta_0 + \beta_1 \text{IR}_{it} + \beta_i X_{it} + \gamma_t + U_i + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

$$\text{LnInnov}_{it} = \beta_0 + \beta_1 \text{IR}_{it} + \beta_i X_{it} + \gamma_t + U_i + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

如表9所示机制检验回归模型估计结果，结果表明，工业机器人提高劳动生产率，促进当地的技术创新水平，验证二条机制分析，而资本存量由于工业机器人正处高投入研发期与成长期，因此对资本存量效应并不明显。

表9 机制检验回归模型估计结果

解释变量	模型（1） LnLP 劳动生产率 (x12)	模型（2） LnCA 资本存量 (y2)	模型（3） LnInnov 技术创 新 (y3)
LnIR(x2)	0.0267* (2.94)	-0.00645 (-0.55)	0.0310 (1.51)
CDR (x3)	0.783*** (3.41)	0.612* (2.05)	3.337*** (6.45)
EDR(x4)	1.160*** (3.72)	0.382 (0.94)	3.965*** (5.64)
TDR(x5)	-1.484** (-2.79)	-0.617 (-0.89)	-6.734*** (-5.62)
PerSav- ing(x6)	0.0328** (3.18)	0.0381** (2.84)	0.0472* (2.03)
LnLab(x7)	-0.282*** (-11.46)	0.498*** (15.58)	0.569*** (10.26)
HC(x8)	0.176*** (7.98)	0.0895** (3.12)	0.180*** (3.61)
LnFDI(x9)	0.224*** (12.84)	0.174*** (7.70)	0.502*** (12.78)
Per Road(x10)	0.0590*** (3.67)	0.0877*** (4.20)	0.0909* (2.51)
Constant	6.558*** (9.71)	0.240 (0.27)	-0.709 (-0.47)
Observations	390	390	390

Number of province	30	30	30
Adjusted R-squared	0.7793	0.8635	0.8761
个体固定效应	是	是	是
年份固定效应	是	是	是

资料来源：stata 整理

从数据数值来看总抚养比对技术创新的负向影响最大，总抚养比每增长1%，会给技术创新带来-6.734%的影响。总抚养比增长会给三者带来负向影响，从程度上来看技术创新>劳动生产率>资本存量。

（三）人口规模异质性检验

老龄少子化、工业机器人对经济增长的影响实证分析

采用交乘项（LnIR*Aging）验证老龄少子化、工业机器人对经济增长带来的影响。检验工业机器人能否缓解老龄少子化对经济增长带来的影响，对模型进行稳健性检验和人口规模异质性分析。

模型构建指标选取与数据说明

引入老龄少子化，验证老龄少子化对经济增长带来的影响，交乘项工业机器人与老龄少子化纳入模型，进一步验证模型，得到调节效应回归模型公式。

表10 老龄少子化、工业机器人的调节效应回归模型估计结果

解释变量	模型（1）LnGDP	模型（2）LnGDP	模型（3）LnGDP	模型（4）LnGDP	模型（5）LnPGDP	模型（6）LnPGDP
LnIR*Aing(x16)		-0.0581 (-1.23)			-0.000853 (-0.14)	
LnAgelv(X17)			0.179** (3.17)	0.161** (2.81)		0.319*** (5.33)
LnIR(x2)		-0.0698 (-1.02)		0.0152 (1.78)		-0.00776 (-0.87)
Aging (EDRx3)	0.503* (2.39)	0.200*** (3.90)				
CDR(X4)	0.740** (2.64)					
TDR(X5)	-0.765 (-1.61)					
PerSaving(x6)	0.0297** (2.86)	0.0495*** (4.72)	0.0504*** (4.90)	0.0538*** (5.16)	0.0139 (1.26)	0.00376 (0.35)
Lnlab(x7)	0.721*** (29.06)	0.732*** (29.58)	0.726*** (29.19)	0.730*** (29.29)	-0.296*** (-10.96)	-0.299*** (-11.48)
HC (x8)	0.179*** (8.04)	0.108*** (5.43)	0.103*** (5.20)	0.0998*** (5.03)	0.121*** (5.65)	0.124*** (5.97)
LnFDI(x9)	0.235*** (13.73)	0.229*** (12.56)	0.243*** (13.55)	0.237*** (13.04)	0.269*** (14.57)	0.233*** (12.25)
PerRoad(x10)	0.0489** (3.09)	0.0480** (2.92)	0.0416* (2.53)	0.0455** (2.74)	0.0247 (1.39)	0.0343* (1.98)
Constant	-5.600*** (-8.69)	-6.024*** (-13.02)	-6.004*** (-12.35)	-6.046*** (-12.46)	11.70*** (24.63)	12.85*** (25.34)
Observations	390	390	390	390	390	390
Number of province	30	30	30	30	30	30
Adjusted R-squared	0.9409	0.9362	0.9348	0.9351	0.7428	0.760
个体固定效应	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是

资料来源：stata 整理

模型1是方程6的回归结果，模型2是方程7的回归结果，模型3和模型4是替换老龄化率LnAgelv方程6、7的回归结果；模型5和模型6是替换LnGDP为人均GDP后运行方程6、7的回归结果。从调节效应的结果来看x16交互项为负值，说明工业机器人与老龄化率为替代关系，表明随着老龄化率的增加会对工业机器人与经济增长产生影响，调节变量工业机器人技术会减弱这种负向影响。验证了前文假说H1和假说H2。

$$\text{LnGDP}_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 \text{Aging}_{i,t} + \beta_i X_{i,t} + \gamma_t + U_i + \varepsilon_{i,t} \quad (6)$$

$$\text{LnGDP}_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 \text{Aging}_{i,t} + \beta_2 \text{IR}_{i,t} + \beta_3 \text{IR} * \text{Aging}_{i,t} + \beta_i X_{i,t} + \gamma_t + U_i + \varepsilon_{i,t} \quad (7)$$

被解释变量是LnGDP_{i,t}，表示i省t年GDP对数；老龄少子化衡量常见有两种，一种是利用老年人口抚养比衡量即65岁及以上人口数与15-64岁人口数的比值即L2/L3；另一种是老龄化率，即65岁及以上人数/总人口数量，即L2/(L1+L2+L3)。使用各省老年抚养比Aging(EDRx5)衡量各省人口老龄化水平，用老龄化率(Agelv)作为替换变量检验稳健性。IR*Aging表示工业机器人和老龄化的交互项，X_{i,t}是一系列控制变量，β₀是常数项，其他符号字母同表3。

调节效应基准回归结果分析

表10模型（1）表明总抚养比每增长1%，对经济增长有-0.765%的影响。在模型（2）中，将人口老龄少子化与工业机器人同时加入模型，发现老龄少子化对经济有显著的负向影响。在模型（3）中引入老龄化率，模型（4）引入工业机器人与老龄化率，模型（5）引入老龄化率与工业机器人的交互项，且用人均GDP替换GDP，模型（6）分析工业机器人、老龄少子化对人均经济增长的调节效应。

表10 老龄少子化、工业机器人的调节效应回归模型估计结果

解释变量	模型（1）LnGDP	模型（2）LnGDP	模型（3）LnGDP	模型（4）LnGDP	模型（5）LnPGDP	模型（6）LnPGDP
LnIR*Aing(x16)		-0.0581 (-1.23)			-0.000853 (-0.14)	
LnAgelv(X17)			0.179** (3.17)	0.161** (2.81)		0.319*** (5.33)
LnIR(x2)		-0.0698 (-1.02)		0.0152 (1.78)		-0.00776 (-0.87)
Aging (EDRx3)	0.503* (2.39)	0.200*** (3.90)				
CDR(X4)	0.740** (2.64)					
TDR(X5)	-0.765 (-1.61)					
PerSaving(x6)	0.0297** (2.86)	0.0495*** (4.72)	0.0504*** (4.90)	0.0538*** (5.16)	0.0139 (1.26)	0.00376 (0.35)
Lnlab(x7)	0.721*** (29.06)	0.732*** (29.58)	0.726*** (29.19)	0.730*** (29.29)	-0.296*** (-10.96)	-0.299*** (-11.48)
HC (x8)	0.179*** (8.04)	0.108*** (5.43)	0.103*** (5.20)	0.0998*** (5.03)	0.121*** (5.65)	0.124*** (5.97)
LnFDI(x9)	0.235*** (13.73)	0.229*** (12.56)	0.243*** (13.55)	0.237*** (13.04)	0.269*** (14.57)	0.233*** (12.25)
PerRoad(x10)	0.0489** (3.09)	0.0480** (2.92)	0.0416* (2.53)	0.0455** (2.74)	0.0247 (1.39)	0.0343* (1.98)
Constant	-5.600*** (-8.69)	-6.024*** (-13.02)	-6.004*** (-12.35)	-6.046*** (-12.46)	11.70*** (24.63)	12.85*** (25.34)
Observations	390	390	390	390	390	390
Number of province	30	30	30	30	30	30
Adjusted R-squared	0.9409	0.9362	0.9348	0.9351	0.7428	0.760
个体固定效应	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是

稳健性检验

替换变量

表11模型（1）用人均GDP(LnPGDP)代替原被解释变量GDP(LnGDP)进行稳健性检验。模型（2）用人口老龄化率(LnAgelv)来替换原解释变量老年抚养比(Aging,EDR)进行稳健性检验。调节效应中，模型（3）用人均GDP(LnPGDP)代替原被解释变量GDP(LnGDP)进行稳健性检验。模型（4）用老年人口占比Agelv替换原来的解释变量。稳健性检验结果如下表所示。在

工业机器人的交互作用下，人口老龄化对经济增长的回归系数为 0.392，在1%的水平下显著，同时交互项在1%的水平下显著为负，通过检验，说明工业机器人可以有效减弱老龄少子化对于经济增长的负向影响。

表 11 稳健性检验的回归估计结果

解释变量	模型（1）lnPGDP	模型（2）lnGDP	模型（3）lnPGDP	模型（4）lnGDP
LnAgelv(x17)	0.191*** (3.55)	0.308*** (5.28)	0.257*** (4.65)	0.392*** (6.56)
IR*Aging(x16)			-0.164*** (-4.17)	-0.196*** (-4.62)
LnIR(x2)			0.221*** (4.26)	0.257*** (4.59)
PerSaving(x6)	0.0210*** (7.69)	0.00506 (1.71)	0.0230*** (8.41)	0.00787** (2.67)
Lnlab(x7)	0.712*** (29.95)	-0.298*** (-11.60)	0.707*** (29.64)	-0.313*** (-12.16)
HC(x8)	0.114*** (6.02)	0.124*** (6.04)	0.113*** (6.10)	0.124*** (6.19)
LnFDI(x9)	0.238*** (13.85)	0.230*** (12.36)	0.234*** (13.77)	0.229*** (12.52)
Per Road(x10)	0.0307 (1.93)	0.0311 (1.82)	0.0130 (0.81)	0.0161 (0.92)
Constant	-5.857*** (-12.66)	12.82*** (25.61)	-5.565*** (-12.00)	13.26*** (26.52)
Observations	390	390	390	390
Number of province	30	30	30	30
Adjusted R-squared	0.9399	0.7618	0.9425	0.7733
个体固定效应	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是

资料来源：stata 整理

内生性检验

互为因果会产生内生性问题，用滞后一期对核心解释变量进行回归。当期的 GDP 对滞后一期的老龄化率、总抚养比、工业机器人没有任何影响，因而运用老龄化率、总抚养比指标的一阶滞后期（L.Aging）以及工业机器人指标的一阶滞后期（L.IR）替代原变量再次回归。若滞后一期指标仍对当期经济增长水平有负向影响，则说明内生性问题不存在。该模型的内生性检验回归结果如下表 12 所示，结果表明老龄化率的滞后期指标（L.Agelv）以及交互项（L.LnIR*Aging）仍影响中国经济增长水平，验证在上述回归分析中不存在内生性问题。

表 12 内生性检验回归结果

解释变量	模型（1）lnGDP	模型（2）lnGDP
L.LnIR(x2)		-0.0528 (-0.58)
L.LnIR*Aging(x16)		-0.0496 (-0.82)
L.Agelv(x17)	0.151* (2.46)	0.138* (2.20)
PerSaving(x6)	0.0421*** (3.92)	0.0451*** (4.16)
Lnlab(x7)	0.729*** (27.69)	0.736*** (27.90)
HC(x8)	0.102*** (4.93)	0.0990*** (4.78)
LnFDI(x9)	0.242*** (12.79)	0.232*** (12.05)
Per Road(x10)	0.0428* (2.49)	0.0485** (2.81)
Constant	-6.081*** (-11.79)	-6.108*** (-11.88)
Observations	360	360
Number of province	30	30
Adjusted R-squared	0.9322	0.9329

资料来源：stata 整理

综上所述，根据经济增长理论与技术革命与补偿理论，30 个省份 2011 年至 2023 年面板数据通过线性回归方程验证老龄少子化的加剧通过影响劳动力供给、技术创新、资本积累、劳动生产率

等机制给经济增长带来负向冲击。为应对此问题，随着工业机器人与服务机器人的研发与应用，通过工业机器人的调节效应减缓老龄少子化对劳动力人口和技术创新对经济增长所产生的影响。

五、研究结论

据麦肯锡预测，到 2030 年，全球约 15% 劳动力（4 亿人）可能面临岗位调整。中国经济在经历四十年的改革开放高速发展，资源与要素禀赋受到自然资源的限制，在人口老龄少子化背景下，挖掘国内现有劳动潜力，提升劳动技能和优化资源配置来应对结构性矛盾；积极发展“工业机器人”并从政策上鼓励育龄妇女结婚、生育有效缓解老龄少子化带来的问题，实现中国经济从数量增长转向质量与数量的双轮驱动发展提升。从人口规模向人口素质的提升；驱动中国制造业向数智化转型、高质量发展、集约发展。因此得出结论：

（1）中国工业机器人通过内生性问题、稳健性检验、机制分析与调节效应，即工业机器人应用通过线性回归模型验证有利于经济增长。

（2）工业机器人有效削弱老龄少子化对经济增长的负向影响。工业机器人通过提高劳动生产率，削弱老龄少子化导致的劳动生产率降低的影响；弥补老龄化导致储蓄率降低；因此，工业机器人的调节效应具有明显的区域异质性，东部地区强于中部，中部强于西部。

（3）国家针对老龄少子化推出一系列措施。首先，2025 年 7 月 28 日，国家出台“育儿补贴”政策，每年可领取 3600 元补贴，直至年满 3 周岁。“育儿补贴”政策有利于构建生育友好型制度

环境。其次，“渐进式延迟法定退休年龄”政策是缓解中国劳动力数量下降趋势的有效手段。最后，工业机器人技术不断迭代升级，如人形机器人、协作机器人、具身智能体等，向制造业、服务业、特种行业等应用场景不断渗透。长期来看，建立生育警戒

线，防止资本与劳动力断崖式下降，推广工业机器人技术赋能制造业数智化转型升级，提升工作效率，成为驱动智能经济、数字经济增长的新引擎。

参考文献

[1] 清华大学经济管理学院中国保险与风险管理研究中心等. 中国居民的退休准备状况——基于《2022中国居民退休准备指数调研报告》的发现[J]. 保险理论与实践, 2023, (03): 14-39.

[2] 翟振武, 金光照. 中国人口负增长: 特征、挑战与应对[J]. 《人口研究》2023, (02): 11-20.

[3] 董克用, 王振振, 张栋. 中国人口老龄化与养老体系建设[J]. 体制改革, 2020, (05): 78-88

[4] 董克用, 孙博, 张栋. 中国养老金融发展现状、挑战与趋势研判[J]. 养老金融蓝皮书: 001-018

[5] 穆光宗. 银发中国: 从全面二孩到成功老龄化[M]. 中国民主法制出版社, 2016: 308-315,

[6] 栾浩. 老龄化背景下人工智能对经济增长的影响研究[D]. 四川大学, 2023.

[7] 李竞博, 姜全保. 人口规模、人口老龄化与经济增长[J]. 人口学刊, 2023, (258): 55-66

[8] 蔡昉. 如何加强国内大循环的内生动力[J]. 理论学刊, 2023, (02): 5-12

[9] 王启超, 张雨欣. 机器人兴起对制造业就业的影响, 辽宁大学学报(哲学社会科学版), 2024.(9): 66-79.

[10] 程虹等. 机器人在中国: 现状、未来与影响——来自中国企业—劳动力匹配调查(CEES)的经验证据[J]. 宏观质量研究, 2018 (09): 1-21.

[11] 陈彦斌, 林晨, 陈小亮. 人工智能、老龄化与经济增长[J]. 经济研究, 2019, (07): 47-63.

[12] 刘洋, 韩永辉, 王贤彬. 工业智能化兼顾促进增长和保民生吗? [J]. 数量经济技术经济研究, 2023, (06): 69-90.

[13] 韩永辉, 刘洋, 王贤彬. 人工智能对区域经济增长的异质性影响与机制识别——基于中国“机器换人”的实证检验[J]. 学术研究, 2023, (02): 97-104.

[14] 韩永辉, 刘洋. 少子老龄化、工业智能化与宏观经济波动——基于内生经济增长理论的DSGE模型分析[J]. 管理世界, 2024, (01): 20-61.

[15] Roberto Biloslavo etc., Artificial intelligence and strategic planning process within VUCA environments: a research agenda and guidelines[J]. Management Decision, 2024, (06): 25-51.

[16] Morteza Ghobakhloo etc., Generative artificial intelligence in manufacturing: opportunities for actualizing Industry 5.0 sustainability goals[J]. Journal Manufacturing Technology Management, Vol.35 No.9 2024 : 94-121.

[17] Jinqi Ye etc., al Is the demographic dividend diminishing in China? Evidence from population aging and economic growth during 1990-2015[J]. Rev Dev Econ, 2021, (25): 2255-2274.

[18] Seyed M. Hosseini and Guy Lichtinger. Generative AI as Seniority-Biased Technological Change: Evidence from U.S. Résumé and Job Posting Data[J]. SSRN, 2025, (10): 1-26.

[19] 周广肃, 李力行等. 智能化对中国劳动力市场的影响——基于就业广度和强度的分析[J]. 金融研究, 2021, (06): 39-58.

[20] 朱琪, 陈臻等. 老龄化背景下人工智能对人工成本的影响: 来自中国31个省份的证据[J]. 华南师范大学学报, 2022, (02): 142-158.

[21] 芦婷婷, 祝志勇. 人工智能、人口结构转型与劳动收入份额变化[J]. 广东财经大学学报, 2022, (04): 4-17

[22] 陈秋霖, 许多, 周羿. 人口老龄化背景下人工智能的劳动力替代效应: 基于跨国面板数据和中国省级面板数据的证据[J]. 中国人口科学, 2018, N0.6, pp: 30-42.

[23] 林晨, 陈小亮, 陈伟泽, 陈彦斌. 人工智能、经济增长与居民消费改善: 资本结构优化的视角[J]. 中国工业经济, 2020, (02): 61-79.

[24] 潘珊, 李剑培, 顾乃华. 人工智能、产业融合与产业结构转型升级[J]. 中国工业经济, 2025, (02): 23-41.

[25] 梁泳梅, 董敏杰. 中国人口变化趋势及经济潜在增长率——兼论延迟退休的影响[J]. 北京联合大学学报(人文社会科学版), 2024, (11): 1-15.

[26] 肖挺, 陈周永, 何小钢. 《工业机器人价格变化的就业效应——基于宏观的经验证据》[J]., 《管理世界》, 2025, (11): 28-42.

[27] 余玲铮, 魏下海, 孙中伟等. 《工业机器人、工作任务与非常规能力溢价——来自制造业“企业-工人”匹配调查的证据》[J]. 《管理世界》, 2021, (01): 47-59.

建筑企业在数智经济背景下财务数智化转型的研究

高旭

中铁建发展集团有限公司, 北京 100043

DOI:10.61369/ASDS.2025100004

摘 要 : 随着企业对数字技术的运用和数字经济的快速发展, 财务数智化转型已成为企业发展的关键要素。时至今日, 财务共享中心已经成为大型企业集团的标配, 也基本实现了财务共享中心的基本职能, 但是如何从财务共享中心向财务数据中心转型, 成为世界一流企业财务管理体系, 是当前亟待解决的问题。基于此, 本文主要从当前建筑企业的财务数智化转型的必要性出发, 分析在建筑企业财务数智化转型过程中遇到的财务管理现状, 并结合创新财务管理思维、加强业财融合等方面提出具体的财务数智化转型的优化方案 [1], 期望能为企业的长久发展探索出一套新的财务管理模式。

关 键 词 : 数智化转型; 建筑企业; 财务管理

Research on Financial Digital and Intelligent Transformation of Construction Enterprises in the Context of Digital Economy

Gao Xu

China Railway Construction Development Group Co., LTD. Beijing 100043

Abstract : With the increasing adoption of digital technologies and the rapid development of the digital economy, financial digitalization has become a critical factor in corporate growth. Today, financial shared service centers have become standard practice for large enterprise groups, having largely fulfilled their core functions. However, transitioning from financial shared service centers to world-class financial data centers remains a pressing challenge for enterprises aiming to establish globally competitive financial management systems. This paper examines the necessity of financial digitalization in construction enterprises, analyzes current financial management challenges during the digital transformation process, and proposes optimized solutions through innovative financial management approaches and enhanced integration of business and finance. The study aims to explore a new financial management model that supports sustainable corporate development.

Keywords : digital and intelligent transformation; construction enterprises; financial management

引言

在当前的数智化浪潮中, 市场竞争日趋激烈, 机遇与挑战并存, 财务数据已成为企业经营管理决策的重要基础, 各行各业都深切感受到数智化转型的迫切性和复杂性。现代市场中的物联网、云计算、互联网、大数据、人工智能等新一代数字科技正在影响着企业的方方面面^[2], 对企业财务管理体系的重大更迭尤为突出。因此, 财务数智化转型不仅成为企业发展的新的驱动力, 更成为实现企业的可持续发展高质量发展的必要因素。

在企业数智化转型过程中, 建筑企业要提高工程项目成本管控能力, 实现企业高质量发展的稳步增长, 就需利用新的数智化技术将财务共享中心向财务数据中心转型, 同时不断助推“业财资税”深度融合, 以适应当前市场的变动、更好地满足企业经营决策、赋能业务的需求, 为企业的长久发展探索出一套新的财务管理模式。

一、建筑企业财务共享中心数智化转型的必要性

随着数智经济时代的到来, 数智化已成为推动经济发展新的驱动力量, 企业进行数智化转型已是大势所趋, 而财务转型是企

业数智化转型的具体实践, 是实现世界一流企业财务管理体系建设的强力支撑。财务作为企业价值创造管理的核心部门, 在数智化、信息化飞速发展的时代, 财务的管理模式和运营模式更需要与时俱进、不断创新、转型以满足企业多维度管理的需要。企业

应充分运用大数据、云计算等技术对财务数据进行分析，为企业发展提供财务支持，对建筑施工企业来说，掌握和应用这些技术可以在激烈的市场竞争中占据优势，同时能有效解决大型建筑施工企业下属项目机构较多，在对工程项目进行管理时需要处理大量的、高度重复的财务数据难题。

在财务数智化转型过程中，应将财务工作与业务工作相互融合，将财务共享服务中心打造成企业的数据汇集中心。深度整合企业数据、强化业财数据的融合，实现企业财务管理的数智化转型，同时探索新的财务共享模式，实现财务核算的集中管理，并实现数智化、智能化的财务预算与分析。财务的数智化转型，更能优化企业的资源，提质增效，在提高管理工作中的业财融合程度过程中，能够加强财务工作对具体业务工作的指导作用，以提升内部的财务管理效率。

在数字经济的背景下，建筑企业实现财务管理模式的转型，能够在未来竞争中占据优势地位，同时增加企业的核心竞争力，对财务数智化的整合能够更好地帮助决策者及时掌握企业当前的经营状况和资源配置情况，从而为企业决策提供更有力的财务支持，确保企业战略规划的可执行性。

二、建筑企业财务数智化转型过程中的财务管理现状

（一）财务管理思维和制度建设相对落后

建筑施工企业的特点是核算的项目、管理层级多且比较分散，但项目的财务人员未能转变观念、创新意识不强及财务人员转型滞后等问题，导致企业高业务水平的管理会计人才较少。因此，施工企业财务人员的工作仍为事后的会计核算，依旧把低附加值、高度重复的工作作为财务管理的主要工作，没有转向预算管理、绩效管理、经营分析等财务相关工作上来，在实务中大多数仍然依赖于惯性思维工作，无法完全地参与到企业日常经营决策中^[3]。

（二）财务共享中心职能相对传统

当前我国大部分企业建立财务共享服务中心仅仅是为了满足集团管控和提高财务核算准确性的需求，把部分标准化、流程化、重复性高的财务工作转移到财务共享中心集中处理。从而导致大多数企业的财务团队仍在做着大量高度重复的、低附加值的财务传统基础核算工作^[4]。例如企业全面预算管理工作，很多企业尚未建立完善的预算管理体系，导致预算管理工作仅仅流于形式，未能发挥精准考核“指挥棒”的作用。

建筑施工企业的智慧工地、OA 系统等平台产生了很多业务数据，而财务共享服务中心平台仅仅处理高度重复基础的财务工作，无法整合这些平台的数据，不能挖掘分析出对企业经营决策至关重要的信息，引导企业快速做出正确的经营决策，因此财务共享中心职能相对传统，无法实现财务分析的价值创造职能

（三）业财融合困难，内部统筹性较弱

财务数智化转型很重要的一个环节就是推进业财融合，然而目前在数智化转型的过程中，业务部门和财务部门的目标设定存在分歧：前者更注重市场拓展和产品创新，后者则关注成本控制

和风险管理^[5]。另外，业务部与财务部之间沟通渠道并不畅通，合作机制也不够健全。信息在传递过程中，常常会出现延误或失真的情况，这进一步加剧了两个部门之间的隔阂。特别是，财务部门由于对业务的了解不够充分，难以获取全面、及时的信息，导致在决策时缺乏准确的依据，无法为业务部门提供有力的支持。而业务对于财务的了解也不够充分，难以获取全面、及时的信息，从而影响了决策的质量和效率，导致无法达成一致，从而削弱了业务对财务的支持作用。

三、施工企业数智化转型阶段财务管理优化建议

（一）创新财务管理思维，健全制度建设

在数字经济背景下施工企业的财务管理工作，不再是单纯的会计核算，更多的是打造业务型财务、战略型财务、创新型财务以形成新的财务管理模式，完善制度建设，根据企业的整体战略规划持续优化财务管控体系。因此，需持续推动价值创造型财务管理模式的构建^[6]。一方面，财务管理体系内容要与企业的战略相结合，服务于企业的高质量发展战略定位，为企业实现高质量发展提供专业力量；另一方面，建筑施工企业的财务管理要从项目整体进行成本管控，做好全面预算管理、实现管理闭环，提高企业效益水平、成本管控水平、精细化管理水平。

（二）利用智能化系统，数据的高效整合

在企业数智化转型中，利用智能化系统对数据进行整合，以提升资产的使用效率，优化资本配置。例如，在预算管理和分析工作中，构建预算管理体系和分析模板不是一成不变的，特别是随着内部管理需要的增加，对预算管理和分析工作也要求越来越精细，需要在海量数据中，进行有效挖掘与提炼，形成完整、可利用的内部管理报告。再如，通过对经营活动进行分析，很多的业务数据，来源于业务系统的数据采集，而分析也不能再是事后的财务数据，而是前沿的业务数据，尚未反映在财务账面。因此，对经营活动的分析重心需要转向对未来的预测和数据的挖掘分析。

（三）推动业财融合，建立财务共享数据中心体系

业财融合意味着打破财务部门与业务部门之间的壁垒，使财务工作深入到业务的各个环节，实现财务与业务的有机结合。对于建筑企业而言，建立业财融合的财务共享数据中心，能够整合企业内部的财务与业务数据，形成一个统一的数据资源池^[7]。通过对这些数据的深度挖掘与分析，企业可以更加全面、准确地了解各个项目的成本、进度、质量等关键信息，为项目全面预算、决算提供有力的数据支持，从而确保决策的科学性与准确性。

（四）建立司库管理系统，提高资金使用率

司库管理系统的建立也是财务数智化转型的重要组成部分，它能够实现企业资金的高效管理与调配，提高资金使用效率，降低资金风险。同时，与财务共享数据中心相结合，能够为企业提供更加实时、准确的资金信息，进一步增强企业的财务管理能力。目前司库管理系统正从传统的“资金管控”角色，向“价值创造”与“战略支撑”中心演进。使其成为一个更具有操作性的

工具，同时还是一个集成了数据分析、智能决策与前沿技术的战略平台。

（五）打造完整科学的财务体系，实现良好的财务管理

在数字经济背景下，建筑企业可以利用大数据、人工智能等先进技术，对财务数据进行实时监控与分析，及时发现潜在的风险与问题，并采取相应的措施加以解决，打造数据化、智慧化、精细化管理的财务体系，实现价值创造型财务管理。同时，优化成本投入与产出的比例，提高企业的运营效益。

（六）建立财务共享标准体系，统一数据标准

财务共享标准体系作为集团财务共享建设的基础和业财融合的关键内容，对于建筑企业的财务数智化转型具有重要意义，它能够规范财务流程，统一数据标准，提高财务信息质量，确保财务数据的准确性、完整性和及时性，使企业可以有效控制管理成本，提高财务工作对业务工作的支持与指导作用，使业务活动更好地符合企业发展需求，从而增强企业的运营效益，提高企业的管理稳定性。

（七）打造数智化的财务管理平台，推动“业财资税”深度融合

积极打造数智化的财务管理平台，推动“业财资税”深度融合，积累企业的数据资产，并深入挖掘这些数据资产的价值^[8]。同

时，充分利用云计算、大数据、人工智能等先进信息技术，构建一流的财务管控体系^[9]，以创新思维为核心，共建数智化管理体系，不断提升数字战斗力，进一步提高财务管理的自动化水平，为决策提供更加精准的支持。最后，加强数据治理和信息安全，确保数据的完整性和安全性，避免数据泄露和不当使用，建立可靠的数据生态环境，确保企业在未来竞争中占据优势地位。

四、结论

面对数智化转型的大潮，施工企业必须抓住当前转型机遇，通过建设高效的财务共享中心，打造智能化的管理平台，推动财务管理向数智化、智能化的方向发展。建筑企业要提高工程项目成本管控能力，实现企业高质量发展的稳步增长，利用新的数智化技术将财务共享中心向财务数据中心转型，同时不断助推“业财资税”深度融合^[10]，以适应当前市场的变动、更好地满足企业经营决策、赋能业务的需求，唯有如此，企业才能在新的产业变革中取得先机，实现更高质量、更有效率、更加公平、更可持续、更为安全地发展。

参考文献

[1] 刘行波. 施工企业数字化转型下的财务管理研究 [J]. 财务管理研究, 2022, 4(3): 17.
[2] 张钰. 数字化转型背景下 B 集团财务共享服务中心优化研究 [D]. 山东大学, 2021.DOI: 10.27272/d.cnki.gshdu.2021.001886.
[3] 黄芳. 建筑企业财务数智化成熟度模型构建 [J]. 财务管理研究 2024.
[4] 赵晶. 建筑企业智慧财务体系构建研究 [J]. 财务管理研究 2024.
[5] 陈洁. 财务数智化与建筑企业核心竞争力提升 [J]. 财务管理研究 2024.
[6] 王小文. 企业集团财务共享服务中心建设研究 [J]. 会计师, 2021(24): 47-48.
[7] 王瑞. 基于财务共享服务的财务转型研究 [J]. 投资与创业, 2021, 32(23): 150-152.
[8] 李琳. 财务机器人对建筑企业会计工作的影响 [J]. 财务管理研究 2024.
[9] 唐洁. 数字经济下建筑企业财务管理转型研究 [J]. 中国中小企业, 2021, (11): 166-167.
[10] 郑俊萱. 建筑企业财务共享服务中心建设研究 [J]. 财务管理研究 2024.

业财融合驱动下的营运资金管理效能提升路径探析

齐俊钰

广州西麦科技股份有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ASDS.2025100005

摘 要： 本研究首先剖析软件与信息技术服务行业在营运资金管理上面临的共性挑战（如项目制现金流不稳定、研发投入资本化与回收周期长等）。在此基础上，构建一个以业财融合为核心驱动力的系统性提升框架。研究将结合行业最佳实践，并重点以 XM 科技公司的实践案例进行深入剖析，详细阐述其通过流程再造、数据赋能、机制构建与金融创新等具体路径，实现营运资金周转效率优化的实操过程与管理思考，以为同类型企业提供可借鉴的实践蓝图。

关 键 词： 业财融合；营运资金管理；软件与信息技术服务；管理效能

Exploration on the Path to Improve the Efficiency of Working Capital Management Driven by the Integration of Business and Finance

Qi Junyu

Guangzhou VCMY Technology Co.,Ltd., Guangzhou,Guangdong 510000

Abstract： This study first analyzes the common challenges faced by the software and information technology service industry in working capital management (such as unstable project-based cash flow, lengthy R&D investment capitalization and payback periods, etc.). Building on this, it constructs a systematic enhancement framework driven by business-finance integration as the core. The research will integrate industry best practices and focus on an in-depth case study of the practical experiences of XM Technology Company. It will elaborate in detail on the specific pathways—including process reengineering, data enablement, mechanism building, and financial innovation—through which the company optimized its working capital turnover efficiency, along with the associated management insights. The aim is to provide a practical blueprint for reference by similar enterprises.

Keywords： business-finance integration; working capital management; software and information technology services; management effectiveness

引言

在数字经济时代，软件与信息技术服务业已成为推动社会经济发展的关键力量。然而，该行业普遍存在的项目制管理、研发投入高、回款周期长等特点，使其营运资金管理面临严峻挑战，资金效能低下已成为制约许多企业高质量发展的瓶颈。传统的、事后核算型的财务管理模式难以应对这一挑战，推动业务与财务的深度融合，实施精细化、前瞻性的资金管理，已成为企业内在的迫切需求。本研究以实践为导向，旨在探索业财融合驱动下，提升软件与信息技术服务业营运资金管理效能的有效路径，力图为同行业企业提供一套可借鉴、可操作的策略与方法，助力其在激烈的市场竞争中构建坚实的资金保障与核心竞争力^[1]。

一、行业变局下的管理突围

（一）为何要聚焦营运资金管理效能？

对于身处快速迭代、竞争激烈的软件与信息技术服务企业而言，现金流的健康与周转效率，远比会计利润更能决定企业的生存与发展。我们在管理实践中常常面临如下困境：尽管报表收入持续增长，但企业却时常感到“钱荒”，宝贵的营运资金被大量

沉淀在漫长的项目周期、缓慢的客户回款以及与业务脱节的采购库存中。这种“增长而不增效”的局面，不仅束缚了企业的研发投入与市场拓展能力，更积累了巨大的财务风险。

因此，提升营运资金管理效能，绝非单纯的财务指标优化，而是关乎企业战略安全与经营韧性的核心管理议题。它要求我们财务管理者必须跳出传统核算的范畴，将管理触角前移至业务活动的每一个环节，从资金的“记账员”转变为资金效能的“设计

作者简介：齐俊钰（1985.08—），湖北武汉人，广州西麦科技股份有限公司，会计师，研究方向：智能财务与企业价值创造、风险管理与内部控制效能、企业融资策略与资本结构优化。

师”和“驱动者”。本研究正是源于这一现实管理需求，旨在探索一条切实可行的高效之路^[2]。

（二）从“价值守护”到“价值创造”：业财融合的必然性

要解决上述困境，唯有一条路径：深度推进业财融合。业财融合并非简单的系统对接或数据共享，它本质上是一场管理变革，其核心在于使财务思维与业务活动实现同频共振，让财务规则内嵌于业务流程，让业务数据转化为决策信息。

在营运资金管理上，这意味着：

1. 从“事后算账”到“事前算赢”：在合同签订前，财务即介入评审收款条款与利润空间；在采购发生前，预算已与项目进度精准匹配。

2. 从“孤立数据”到“驱动业务”：将应收账款账龄、库存周转天数等财务指标，转化为销售、采购、项目管理等业务部门的行动指南与考核依据。

唯有如此，财务管理才能从后台走向前台，从成本的“控制者”转变为价值的“共创者”，从而真正驱动营运资金在安全、高效的轨道上运行，为企业持续增长注入强劲动力。

二、软件与信息技术服务业营运资金管理的内在逻辑与共性挑战

软件与信息技术服务业以其轻资产、高增长、高附加值的特点成为国民经济的先导产业^[3]。然而，其独特的业务模式也导致了其营运资金管理区别于传统制造业和零售业，呈现出鲜明的行业特性，并伴随着一系列严峻的管理挑战。

（一）行业特性解析：营运资金的“三高”现象

通过对行业内典型企业的财务结构进行分析，可以发现其营运资金配置普遍存在“三高”现象：

1. 高货币资金储备：由于行业技术迭代快、经营不确定性高，企业为应对研发投入、人才争夺和市场机遇，通常需要保持较高水平的货币资金，以维持财务弹性。

2. 高应收账款占比：项目制、定制化开发及与客户（尤其是政府、大型国企）的结算流程，导致销售款项回收周期长，应收账款在流动资产中占比较高，是资金沉淀的“重灾区”。

3. 高资金沉淀（存货与合同履约成本）：对于这类提供“软硬件一体化”解决方案的企业，为保障项目交付，需要备货特定的硬件设备，从而形成一定规模的存货，占用大量资金。此外，在项目验收前，持续的人力成本和物料成本投入形成的合同履约成本也占用了大量资金^[4]。这种高资金沉淀现象进一步加剧了企业营运资金的管理压力。

（二）核心循环剖析：营运资金效率的三大瓶颈

在软件与信息技术服务行业中，营运资金流转的效率主要受到三个核心循环瓶颈的制约。

首先，收款循环因项目周期长、客户审批流程复杂而变得漫长且不确定。这导致回款速度缓慢，应收账款周转率偏低。销售部门往往更关注合同金额，而忽视客户资质和付款条款的合理性，而财务部门的滞后介入使得回款风险难以在事前和事中得到

有效控制。

其次，付款循环面临刚性支出与弹性管控之间的矛盾。人力成本作为主要支出，具有很强的刚性，而硬件采购和外包服务等支出若不能与项目进度和收款情况精准匹配，将加剧现金流压力。采购与项目执行的脱节可能导致资金提前占用或供应不及时，进而影响项目进度和收款^[5]。

最后，项目循环中成本与现金流的管理存在“黑箱”现象。项目成本归集不及时、不准确，研发支出在资本化与费用化之间的判断模糊，直接影响财务对项目真实毛利和现金流状况的实时核算。项目经理通常更关注技术实现与交付进度，而对预算执行和资金占用缺乏足够的责任意识，这进一步加剧了项目循环中的营运资金管理难题。

这三个循环并非孤立存在，而是相互交织、相互影响，共同构成了行业的营运资金生态系统，其关系如下图所示：

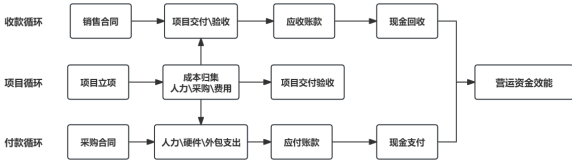


图1：软件与信息技术服务业营运资金核心循环关系图

（三）管理现状与关键挑战：业财壁垒是根源

尽管管理者普遍认识到营运资金管理的重要性，但多数企业仍面临以下关键挑战，其根源直指业务与财务之间的壁垒：

1. 数据孤岛，分析滞后：业务数据（项目进度、合同变更）与财务数据（成本、收款）存储在不同系统，信息整合困难，无法生成对管理决策有及时指导意义的分析报告。

2. 流程割裂，责任模糊：“销售－交付－回款”流程被人为分割，部门间职责不清。销售不对回款负责，项目组不关心资金占用，财务只能被动付款和记账。

3. 考核分离，目标冲突：公司对业务部门的考核往往侧重于收入、利润和交付进度，而忽略了应收账款周转率、项目现金流等效率指标，导致部门行为与公司整体资金效率目标相悖^[6]。

综上所述，软件与信息技术服务业由于其业务模式的内在特性，其营运资金管理天然面临着收款、付款和项目三大循环的效率瓶颈，而组织内部的业财壁垒，是导致这些瓶颈无法被有效突破的根本原因。因此，任何旨在提升营运资金管理效能的努力，都必须以打破业财壁垒、推动深度融合为核心。

三、XM 科技业财融合驱动的营运资金管理实践

XM 科技作为一家软件与信息技术服务企业，其业务模式兼具项目制、软硬件结合及高研发投入的特点，在营收增长的同时，也曾面临回款周期长、项目成本超支、现金流与利润背离等典型挑战。

（一）管理升级动因：从增长压力到内生动能

XM 科技的管理层认识到，在业务规模快速扩张的同时，传统的、事后核算型的财务管理模式已无法支撑企业的可持续发展。

尽管报表收入持续增长，但经营活动净现金流 / 净利润比值长期较低，以及营收与经营活动现金流变动出现背离等现象，暴露出盈利质量与资金效率的深层次问题。这促使公司下定决心，推动一场由财务部门牵引的、以业财融合为核心的深度管理变革，旨在从根本上优化营运资金的流转效率，确保增长的健康性与可持续性。

（二）核心实践路径：业财融合的“四轮驱动”模型

XM 科技的实践可归纳为一个由四大路径构成的“四轮驱动”模型，涵盖了流程、数据、机制与金融四大领域，这也是财务负责人的核心工作场域。

1. 路径一：流程重塑——打通业财壁垒，优化资金流转

通过构建以“项目”为核心维度的业财一体化管理平台，实现了对“销售—立项—采购—执行—收款”全业务流程的深度重塑。该平台通过无缝集成 CRM（客户关系管理）、ERP（企业资源计划）和财务核算模块，确保业务流、信息流和资金流的高度同步。例如，销售合同的关键收款节点（如预付款、验收款、质保金）被直接内嵌至系统中，项目达成里程碑时，系统自动触发对账和开票流程，财务与项目经理能够实时跟踪，有效减少人为延误和沟通成本。此外，企业还通过建设“供应商协同平台”，优化了采购至付款的流程。采购订单的发起与项目预算及进度计划紧密关联，确保了按需采购。同时，付款条款与项目收款节点进行松耦合绑定，推行动态付款计划，从而平滑现金流出，减少预付账款的波动。这些举措显著提升了资金流转效率，降低了资金占用成本。

2. 路径二：数据赋能——构建动态监控，驱动精准决策

企业基于业财一体化平台的数据基础，开发了公司级的“营运资金健康度仪表盘”。这一可视化管理工具将抽象的财务指标转化为直观的管理信号，实时监控关键指标，包括逾期应收账款占比、项目预算执行偏差率和库存周转趋势。通过多维度分析，系统能够快速定位催收责任，及时预警超支项目。企业定期召开跨部门协同会议，与销售、交付、采购团队共同解读数据，将财务分析转化为具体的业务行动指令。例如，当仪表盘显示某类客户的应收账款账期显著长于平均水平时，企业会据此调整信用政策及合同收款条款，从而优化资金回笼效率。这种数据驱动的决策模式，有效提升了营运资金管理的精准性和响应速度。下面的流程图清晰地展示了 XM 科技如何利用数据驱动营运资金管理的闭环流程：

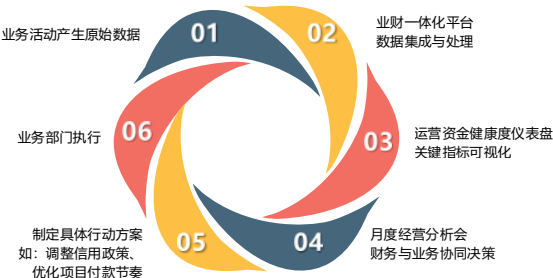


图2：利用数据驱动营运资金管理的闭环流程

3. 路径三：机制保障——固化内控流程，构建管理文化

通过强化内控与“三会”治理，将优化后的营运资金管理流

程固化于内部控制制度及“三会”议事规则中。例如，在董事会授权下，建立严格的客户信用分级管理制度和超预算支出审批流程，从源头上规避资金回笼风险。企业还推行“项目全生命周期成本核算”机制，财务人员早期介入项目投标与定价，通过系统动态跟踪人力、采购、费用等成本，并在项目结束后进行毛利率复盘分析。同时，将项目现金流回正周期和最终毛利率纳入项目团队的绩效考核，促使业务人员从“只管干活”转变为“既管交付、又管赚钱、更管回款”，有效提升了项目资金管理的透明度和效率。

4. 路径四：金融创新——匹配资金周期，拓宽融资渠道

积极构建多渠道融资体系，以应对项目前期的资金压力。企业充分利用自身的经营数据资产，例如纳税信用、软件著作权以及高质量的应收账款，成功拓展了传统银行贷款之外的融资渠道。具体措施包括开展供应链金融活动，如对应收账款进行保理以加速现金回流；利用软件著作权等无形资产进行知识产权质押融资，为战略性研发提供资金支持；以及基于良好的纳税记录申请“税务贷”等低息信用贷款产品，以及利用专精特新小巨人资质申请的科技型企业纯信用贷款。企业通过精准匹配不同期限和成本的融资工具与营运资金周期，例如供应链金融覆盖项目前期的设备采购投入，短期和中长期贷款支持研发项目投入、日常运营支出和其他项目实施期间的人工支出，从而确保资金链的安全性并优化资本结构^[7]。这种创新的融资策略不仅缓解了企业的资金压力，还为其长期发展提供了坚实的财务支持。

（三）业财融合下的指标体系重构与实践对比

在推行业财融合的过程中，XM 科技监控的财务指标体系重心发生了显著变化，从关注静态结果转向动态过程和业务动因。

下表清晰地展示了这一转变：

监控维度	传统财务指标 (侧重事后)	业财融合下的管理指标 (侧重事中、事前)	财务管理应用
收款循环	应收账款周转率	合同收款计划达成率、逾期应收账款占比	与销售绩效挂钩，每周追踪
付款循环	应付账款周转率	采购订单与预算匹配度、供应商账期利用率	优化付款节奏，维护供应链关系
项目循环	存货周转率	项目预算执行偏差率、项目现金流回正周期	项目复盘与奖金核算的核心依据

XM 科技的实践表明，提升营运资金管理效能并非财务部门的孤军奋战，而是一场以流程为骨架、数据为神经、机制为血脉、金融为羽翼的系统性工程。通过将财务管理的思维、方法和工具深度嵌入业务活动的全价值链，公司逐步从被动的“救火”状态，转向对资金周转进行主动、前瞻的精准管控。这一转变为 XM 科技在激烈的行业竞争中构建了坚实的内部资金保障，也为后续章节提炼普适性的管理模型奠定了坚实的实践基础。

四、管理启示与可复用的路径模型

通过对 XM 科技实践案例的深度剖析，我们可以超越单一企业的经验，提炼出对软件与信息技术服务业具有普适价值的管理启示，并构建一个可复制、可推广的路径模型，并反思财务管理者在这一转型过程中的核心角色演变。

（一）从个案到范式：业财融合驱动营运资金管理的“双轮驱动”模型

基于 XM 科技的实践，构建了“业财融合驱动营运资金管理效能提升双轮驱动模型”（见下图）。该模型清晰地展示了提升营运资金管理效能的系统框架与逻辑闭环。

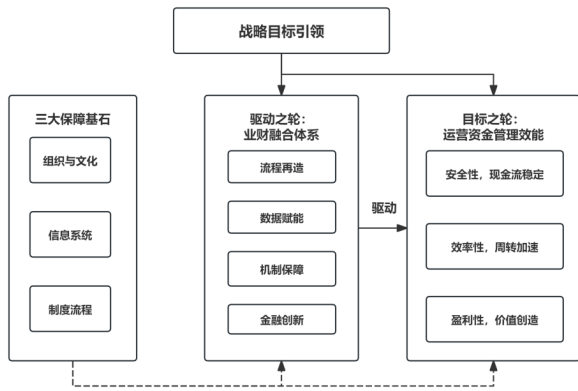


图3：业财融合驱动营运资金管理效能提升双轮驱动模型

该模型的核心内涵在于：

1. 一个引领：一切活动始于公司的战略目标，确保营运资金管理服务于企业整体价值最大化。

2. 双重驱动：

驱动之轮（业财融合体系）：由“流程再造、数据赋能、机制保障、金融创新”四大举措构成，它们环环相扣，共同发力，是持续运转的“发动机”。

目标之轮（营运资金管理效能）：体现为“安全性、效率性、盈利性”三个层层递进的目标，是驱动之轮作用的最终成果。

3. 三大基石：“组织与文化、信息系统、制度流程”是支撑两大轮系平稳、高效运转的基础环境。

此模型为同业企业提供了清晰的行动路线图：企业需在三大基石的保障下，通过驱动之轮的四大举措持续发力，最终推动目标之轮的三大效能提升，实现从“要我做”到“我要做”、从“被动管理”到“主动赋能”的根本性转变^[8]。

（二）财务管理的价值重塑：从“业务伙伴”到“价值整合者”

本案例研究对财务管理者的角色定位提出了新的要求。在 XM 科技的转型实践中，财务部门的角色实现了三级跳：

1. 从“记账员”到“业务伙伴”：这是业财融合的初级阶段。财务人员走出办公室，理解业务逻辑，运用财务数据为业务

部门提供预算、成本、分析等支持，但其核心仍是“支持”与“服务”。

2. 从“业务伙伴”到“价值驱动者”：这是进阶阶段。财务通过设计并运营“营运资金健康度仪表盘”、将资金效率指标纳入 KPI 等管理行为，主动引导和驱动业务活动向更优的资金效率方向靠拢，此时财务已成为管理的“驱动者”。

3. 从“价值驱动者”到“价值整合者”：这是业财融合的高级形态。财务负责人利用其贯穿前后端的独特视角，成为连接战略与执行、打通各部门职能壁垒的“整合枢纽”。通过主导系统搭建、协调三会、设计融资方案等工作，实质上是在整合公司内外部资源，精心策划整个组织的价值创造流程。

这一角色演变的核心在于，财务管理的价值不再局限于合规与控制，更在于其作为“企业神经系统”的协同与整合能力，确保企业在高速发展中保持平衡与韧性。

（三）研究局限与未来展望

本研究虽深入剖析了单一案例，但结论的普适性有待更广样本验证。同时，因商业保密而对数据脱敏，可能影响实证精确性。未来，营运资金管理将深度融合技术演进，向智能化与自适应方向发展。智能化预测方面，可借助大数据与机器学习技术，结合历史项目数据、宏观经济指标及客户行为，构建动态现金流预测模型，实现从事后分析到事前模拟的转变。自适应管理则可探索区块链在供应链金融与合同履约中的应用，构建可信自动化结算体系，并利用 AI 算法实时调整采购计划、付款建议和信用政策，使营运资金管理成为自我学习、自我优化的智能系统。

五、结论

本研究聚焦于软件与信息技术服务业营运资金管理的现实挑战，深入探讨了业财融合在此领域的关键作用。通过对 XM 科技实践路径的细致剖析，我们揭示了如何借助优化流程、数据赋能、机制创新与金融工具四大策略，将财务管理深度融入业务运营，实现资金存量的高效盘活与周转效率的显著提升。研究提炼出的“双轮驱动”模型及对财务角色演变的洞察，不仅为 XM 科技的实践提供了有力支持，更为同行业企业未来规划提供了宝贵借鉴。在商业环境日益复杂的当下，构建以业财融合为核心的精细化营运资金管理体系，已成为企业提升竞争力、决胜未来的关键战略基石。未来研究可进一步细化行业特性分析，增强业财融合效能评估的精确性，同时探索智能化、自适应管理水平的提升路径。

参考文献

[1] 卢玉涛. 提质增效推动营运资金管理效能评价分析 [J]. 市场周刊, 2024, 37(05): 57-60.
[2] 宋刚. 上市煤炭企业营运资金管理存在的问题和改进对策 [J]. 市场周刊, 2024, 37(03): 21-24.
[3] 张强. 转型背景下焦化公司营运资金管理研究 [J]. 财经界, 2023, (12): 51-53. DOI: 10.19887/j.cnki.cn11-4098/f.2023.12.016.
[4] 叶倩. 基于提质增效的营运资金管理效能评价研究——以 X 钢铁企业为例 [J]. 当代会计, 2020, (16): 100-102.
[5] 唐耀祥. 基于提质增效的营运资金管理效能评价研究 [J]. 交通财会, 2020, (03): 54-59.
[6] 许诺. 业财融合下 A 公司营运资金管理优化研究 [D]. 安徽财经大学, 2024. DOI: 10.26916/d.cnki.gahcc.2024.000369.
[7] 王晓琪. 基于业财融合的企业营运资金管理研究 [J]. 中国农业会计, 2024, 34(18): 57-59. DOI: 10.13575/j.cnki.319.2024.18.010.
[8] 廖芸玲. 业财融合模式下企业营运资金管理研究 [J]. 中国农业会计, 2025, 35(04): 45-47. DOI: 10.13575/j.cnki.319.2025.04.004.

国有企业复杂会计事项处理规范与财务报告质量提升路径探析

陈玲

广东中天粤会计师事务所（特殊普通合伙），广东 广州 510630

DOI:10.61369/ASDS.2025100006

摘 要： 国有企业在国民经济中占据主导地位，其财务报告质量关乎国家经济决策与资源配置效率。本文基于高级会计师实务视角，深入剖析国企在合并报表、研发支出资本化、资产减值等复杂会计事项处理中面临的规范性与操作性挑战。研究认为，当前问题根源在于准则理解偏差、内控体系薄弱及信息系统支撑不足。据此，本文系统提出以“制度—技术—人才”为核心的三维提升路径：通过构建精细化内控与财务数字化夯实数据基础，通过深化准则应用与业财融合提升专业判断准确性，最终通过优化财务团队能力与绩效评价体系，形成保障财务报告高质量披露的长效机制，为国企财务治理现代化提供实践借鉴。

关 键 词： 复杂会计事项；财务报告质量；合并报表；内部控制；财务数字化

Analysis of the Handling Norms for Complex Accounting Issues in State-Owned Enterprises and the Paths to Enhance Financial Reporting Quality

Chen Ling

Guangdong Zhongtianyue Accounting Firm (Special General Partnership), Guangzhou, Guangdong 510630

Abstract： State-Owned Enterprises (SOEs) occupy a dominant position in the national economy, and the quality of their financial reports is crucial for national economic decision-making and resource allocation efficiency. Based on the perspective of senior accounting practice, this paper deeply analyzes the normative and operational challenges faced by SOEs in handling complex accounting issues such as consolidated financial statements, capitalization of R&D expenditures, and asset impairment. The research posits that the root causes of the current problems lie in deviations in understanding accounting standards, weak internal control systems, and insufficient support from information systems. Accordingly, this paper systematically proposes a three-dimensional enhancement pathway centered on "Institution – Technology – Talent": by constructing refined internal controls and financial digitalization to solidify the data foundation, and by deepening the application of standards and business-finance integration to improve the accuracy of professional judgment. Ultimately, through optimizing the financial team's capabilities and performance evaluation system, a long-term mechanism for ensuring high-quality disclosure of financial reports is formed, providing practical references for the modernization of SOE financial governance.

Keywords： complex accounting issues; financial reporting quality; consolidated financial statements; internal control; financial digitalization

引言

新一轮国有企业改革深化提升行动对财务信息的透明度与决策价值提出了更高要求。然而，国有企业在处理合并报表、研发支出资本化及资产减值等复杂会计事项时，常因准则执行的灵活性、内部控制的滞后性以及业财数据的割裂性，面临职业判断依据不足、处理过程规范性难以保障的普遍挑战。这一现状不仅直接影响财务报告的可信度与有用性，更可能制约企业的长期健康发展与国有资本的优化配置^[1]。本文旨在系统分析上述问题的成因与影响，并据此探讨一套集制度保障、技术赋能与深度融合于一体的财务报告质量提升路径，为国企财务治理的现代化转型提供实务层面的参考。

作者简介：陈玲（1989.02-），湖南湘潭人，广东中天粤会计师事务所（特殊普通合伙），会计师，研究方向：数字化转型与财务模式创新、财务共享服务与流程再造、国有企业财务治理与复杂会计事项处理、智能财务技术与应用前沿、业财融合与财务价值创造、智能化时代的内部控制与风险管理体系演进。

一、国有企业复杂会计事项的特征与处理现状

国有企业作为国民经济的主导力量，其经营业务往往具有规模体量大、产业链条长、管理层级多等特点，这直接导致了其经济业务与交易事项的复杂性。此类复杂会计事项，通常指那些交易结构繁琐、涉及重大专业判断且对财务报表产生实质性影响的经济活动。与一般商事企业相比，国有企业的复杂会计事项还深刻烙印着其独特的制度背景。在实务中，国有企业的复杂会计事项集中体现于几个典型领域。其一，是源于复杂组织结构的多层合并报表问题。在集团化运营模式下，国有企业常常存在大量的内部交易与往来，股权结构可能涉及交叉持股或特殊目的实体，如何精准界定合并范围、完整抵消内部未实现损益，成为确保合并报表真实、完整反映集团整体财务状况与经营成果的首要挑战。其二，是研发投入的会计处理困境。在创新驱动发展战略指引下，国企研发活动日趋活跃，然而如何依据会计准则严格区分研究阶段与开发阶段，并为开发阶段支出资本化积累充分、适当的证据，在实践中往往存在较大判断空间，容易成为操纵利润的灰色地带^[2]。其三，长期资产与商誉的减值测试亦是难点。这类测试高度依赖于对未来现金流量、折现率等参数的预测，其主观性较强，在宏观经济波动时，如何做出既符合准则要求又能经得起监管与市场检验的减值判断，对财务人员构成了严峻考验。

尽管相关会计准则已对上述事项提供了原则性指引，但在当前国有企业的处理实践中，仍普遍存在若干失范现象。首要问题体现在对原则导向准则的理解与应用机械化，部分财务人员习惯于寻找“唯一解”，未能深入理解交易的经济实质，导致会计处理与商业实质脱节。其次，职业判断过程呈现出较强的主观性与随意性，有时甚至受到非市场因素的干扰，此外，业务前端与财务后端的信息孤岛现象尚未彻底消除，许多复杂交易的关键信息传递不及时、不完整，致使财务部门在核算时面临“巧妇难为无米之炊”的窘境。最后，与之配套的内部控制体系对于此类复杂事项的监督与复核，有时也流于形式，未能建立起有效的、贯穿事项全流程的管控机制，使得处理过程中的风险难以被及时识别与纠正^[3]。这些现状共同构成了提升国有企业财务报告质量道路上必须正视与解决的底层障碍。

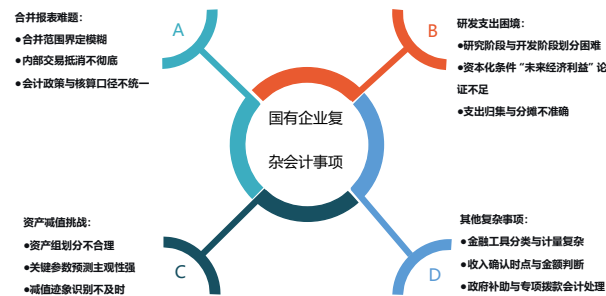


图1：国有企业复杂会计事项主要类型及挑战分析图

二、复杂会计事项处理失范对财务报告质量的深层影响

国有企业复杂会计事项处理失范对财务报告质量产生系统性影响。首先，这会直接侵蚀会计信息的可靠性特征。以合并报表

内部交易抵消不完整为例，这种做法将直接虚增合并层面的营业收入和资产价值，导致财务报表无法真实反映企业集团的财务状况和经营成果，严重动摇报表使用者对财务信息的基本信任。

其次，处理失范显著降低了会计信息的相关性价值。在研发支出会计处理中，无论是将研究阶段支出不当资本化以美化利润，还是将符合条件的开发支出全部费用化，都会扭曲企业创新投入与产出的真实关系，使报表使用者无法依据财务信息准确评估企业的创新能力和长期增长潜力，严重削弱信息的预测价值和反馈价值。

再者，处理过程的模糊性与披露不足共同削弱了财务报告的透明度。复杂事项涉及的重大判断和关键假设若未充分披露，将使报表使用者难以理解企业经营实质，形成信息黑箱，加剧信息不对称问题。最后，这些问题将汇聚引发严重的审计与监管风险。处理不规范不仅可能导致审计范围受限、审计意见类型受影响，还可能招致监管问询甚至行政处罚，给企业带来严重的合规成本与声誉损失^[4]。

因此，规范复杂会计事项处理，不仅是提升财务信息质量的内在要求，更是企业防范风险、实现稳健发展的必要保障。

表1：复杂会计事项处理失范对财务报告质量的影响分析

质量维度	受影响的表现	典型案例
可靠性	信息无法真实反映经济实质，存在虚增或虚计	内部交易抵消不完整，虚增合并利润
相关性	信息预测与反馈价值降低，误导决策	研发支出不当资本化 / 费用化，扭曲创新绩效
透明度 / 可理解性	披露不充分，关键判断与假设被隐藏	资产减值关键参数披露模糊，风险揭示不足
合规性	引发审计调整、监管问询与处罚风险	因会计处理不当被出具非无保留审计意见

三、提升路径一：构建规范高效的财务治理与内控体系

前文分析表明，国有企业复杂会计事项的处理失范，根源在于制度性约束的缺失、技术性工具的落后以及专业性判断的偏差。具体而言，“合并范围界定模糊”与“内部抵消不彻底”源于内部控制与数据治理的薄弱；“结账效率低下”与“判断主观性强”反映出对先进数据分析工具应用的不足；而“研发阶段划分困难”与“减值参数预测随意”则直接指向财务团队专业能力与业财融合深度的短板。为解决上述症结，本文构建以“制度—技术—人才”为核心的三维提升路径，以下将逐一展开论述。

针对上述挑战，其根本解决之道在于构建一个以制度为基石、以技术为驱动、人才为核心的协同治理体系。解决国有企业复杂会计事项的处理难题，其根基在于建立一个权责清晰、运行高效的财务治理与内部控制体系。这一体系为所有复杂的职业判断和会计处理提供了必要的制度环境、流程保障和人才支撑，是确保财务报告质量的第一道，也是一道极为关键的防线。脱离了这一坚实基础的任何技术性解决方案，都将是空中楼阁。

（一）强化财务团队能力建设：从核算型团队向价值创造型团队转型

复杂会计事项的处理，其核心在于“人”的专业判断。传统

的、侧重于基础核算的财务团队已无法满足当前的管理需求。亟需推动财务团队由核算型向深度参与业务、支持战略决策的价值创造型转型。作为财务团队的领导者，其职责远不止于任务分配，更在于构建一个持续学习与知识共享的机制。具体而言，可以主导建立“复杂会计事项案例库与操作指引”，将以往处理过的诸如重大并购中的合并报表编制、大型研发项目的资本化判定、复杂金融工具的计量等典型案例进行梳理、归纳与提炼，形成标准化的分析框架与判断要点^[9]。同时，定期组织跨部门的专题研讨会，邀请业务、法务及技术部门的同事共同参与，就特定复杂交易的商业模式与合同条款进行深入解读，确保财务判断能够扎根于业务实质。这种持续性的、以解决实际问题为导向的培训与交流，能够显著提升团队成员对会计准则的理解深度与应用能力，使其在面对新型复杂事项时，能够有章可循、有据可依，从而系统性地提升职业判断的准确性与一致性，为月度及年度结账工作的高效、精准完成奠定坚实的人才基础。

（二）完善针对复杂事项的专项内部控制制度

健全的内部控制是防范差错与舞弊、保障会计信息可靠性的关键。对于常规交易，内控措施通常较为成熟，但对于复杂会计事项，则必须设计并执行更具针对性的专项控制活动。这些控制活动的核心在于实现“过程留痕、集体决策、独立复核”。首先，应推动建立重大会计事项集体决策机制，例如成立由财务、业务、风控及技术专家组成的专门委员会，对达到一定重要性水平的资产减值计提、研发支出资本化、重大关联交易定价等事项进行集体审议，其决策过程及依据应形成详尽的书面记录并存档。这一机制能有效分散个体决策风险，抑制主观随意性。其次，须严格执行多层复核制度。对于复杂事项的会计处理，从经办人员到部门负责人，再到财务总监，每一层复核都应是实质性的专业审视，而非流于形式的签字。复核重点应关注会计政策适用的恰当性、证据的充分性以及披露的完整性。结合派驻工作经验，通过强化对资产盘点与往来款项核对的监督，能够有效夯实资产质量，为后续的减值测试等复杂会计处理提供可靠的初始数据，这正是内控措施在源头保障信息质量的具体体现^[9]。

（三）深化全面预算管理对经济业务的源头管控

全面预算管理不仅是资源配置工具，更是财务治理的重要抓手，它能从事前规划的角度对可能产生的复杂会计事项进行前瞻性规范。在编制年度全面预算时，财务部门应主动引导业务部门，对预期发生的重大资本性支出、战略性研发项目、潜在的股权投资与并购等经济活动进行充分论证与提前规划。例如，对于一个计划中的大型研发项目，在预算编制阶段就应明确其总体方案、阶段划分的初步设想、资源投入计划及预期成果，这实际上是为未来会计处理中关于“研究阶段”与“开发阶段”的划分，以及资本化条件的满足与否，预设了判断框架与证据收集方向。通过预算执行情况的跟踪与分析，可以动态监控这些重大经济活动的进展，一旦发现实际情况与预算假设发生重大偏离，便能及时启动会计处理的重新评估程序。这种将预算管理与复杂事项会计处理前置衔接的模式，实现了对经济业务的源头管控，将事后的被动核算转变为事前的主动管理，极大提升了财务报告编制的

主动性与可预见性。

表2：关键复杂会计事项内部控制要点表

事项类型	关键控制点	核心输出文档 / 记录	责任主体（示例）
研发支出资本化	研发项目立项评审、阶段划分技术鉴定、支出归集与分摊审核、未来经济利益论证	项目立项书、阶段验收报告、费用归集表	技术部门、研发部门、财务部、管理层
长期资产减值	减值迹象日常监控、资产组划分审定、关键假设与参数的跨部门评议、减值测算复核	减值测试报告、关键参数审议记录	资产管理部门、财务部、战略部门
复杂内部交易抵消	内部交易协议备案、往来对账机制、未实现利润计算与审核模板化	内部交易协议、对账确认函、抵消计算底稿	各业务单元、集团合并报表岗位
长期股权投资	投资前尽职调查、对被投资方权力与可变回报的评估、权益法核算的持续跟踪	尽职调查报告、投资决策会议纪要、投资收益计算表	投资部、法务部、财务部

该表清晰地列明了针对不同复杂事项的关键控制活动、所需的证据记录及责任部门，为内控建设提供了直观的实务操作指南。

四、提升路径二：驱动财务数据处理与报告编制的智能化转型

在筑牢制度与人才基础之上，技术的战略性应用是解决国有企业复杂会计事项处理难题、突破效率与准确性瓶颈的关键驱动力。面对海量数据、复杂勾稽关系与严格的报告时限，传统依赖手工、分散式的处理模式已难以为继。通过推动财务管理与先进信息技术的深度融合，构建智能化的财务处理与报告体系，能够从源头上保障数据的完整性与一致性，显著提升复杂判断的精准度，并最终实现财务报告编制工作的质的飞跃^[7]。

（一）ERP 系统优化与整合：打通业财数据壁垒，奠定合并基础

企业资源计划（ERP）系统作为财务数据的核心枢纽，其配置与优化水平直接决定了复杂会计事项处理的效率与准确性。当前许多国企的 ERP 系统仍存在各业务模块（如采购、销售、生产、项目）与财务模块集成度不高、数据标准不统一的问题，导致信息孤岛现象严重。作为财务系统的关键用户，必须深度参与并推动 ERP 系统的持续优化，核心目标在于实现业务数据向财务数据的自动、精准转化。一个典型的应用是构建集团统一的内部交易协同平台。通过在系统内固化内部交易的识别规则与对账流程，实现成员单位间交易数据的线上自动推送、实时核对与差异预警，这正是针对第二章所指出的‘内部交易抵消不彻底’与‘往来差异核对困难’（见图1）的根本性解决方案，从而彻底改变以往依赖手工对账、效率低下且易出错的局面。此外，在系统初始化阶段，就必须建立集团内统一、细化的会计科目体系与辅助核算项目，确保不同主体对同一经济业务的记录口径一致，为后续自动生成合并抵消分录提供纯净、规范的底层数据。这正是将合并报表工作从“后期手工缝合”前移至“事中自动编织”的根本性变革，能有效保障月度及年度结账工作的高效完成。

（二）数据分析工具的深化应用：提升职业判断的客观性与数据支撑

对于高度依赖估计和预测的复杂事项，引入先进的数据分析工具可以极大地弥补人为判断的局限性，使决策过程更加客观、透明。在资产减值测试领域，为克服前文所述的‘关键参数预测主观性强’（见表1）的挑战，可以尝试引入商业智能（BI）工具或构建专门的财务模型。通过接入历史经营数据、行业景气指数、市场竞品价格等内外部数据源，构建动态的现金流预测模型。该模型能够基于多种情景（如乐观、基准、悲观）进行模拟测算，为管理层确定资产组可收回金额提供更丰富、更量化的数据支持，减少对单一、主观预测的依赖。同样，在研发支出管理上，为解决‘研究阶段与开发阶段划分困难’这一长期存在的判断困境（见图1），可以利用项目管理软件与财务系统的接口，实时归集研发工时、物料领用等数据，并结合项目里程碑节点，为研发阶段的划分提供客观、可验证的行为证据，使得资本化起止时点的判断更具说服力。这些技术的应用，实质上是将财务人员的角色从“数据加工者”部分转向“数据分析师”与“模型构建者”，使其能够基于更广泛的数据集做出更精准的职业判断^[8]。

（三）构建财务报告一体化平台：实现从交易到报告的端到端自动化

财务数字化建设的终极目标是构建一个覆盖全流程的财务报告一体化平台，实现从业务发生、账务处理到报告披露的端到端自动化。这一平台超越了传统 ERP 的范畴，它集成了机器人流程自动化（RPA）、人工智能（AI）与数据仓库等多项技术。例如，利用 RPA 机器人自动执行银行对账、往来函证发送、报表附注数据抓取等高度重复、规则明确的操作，将财务人员从因信息系统孤岛而产生的、第二章所分析的繁琐日常核对工作中解放出来，使其能将精力投向更高价值的分析判断。更进一步，可以探索自然语言处理（NLP）技术，自动识别重大合同中的关键条款（如所有权转移、支付条件等），辅助收入确认的判断。最终，所有经过清洗和规范化的数据将汇入统一的数据平台，通过预设的报表模板和合并规则，系统能够自动生成初步的财务报表及附注（如图2所示）。财务人员则可将精力集中于对异常情况的核查、对会计政策的审视以及对报表整体的分析性复核上。这一变革将财务报告的编制周期从“以周计算”缩短至“以天甚至小时计算”，并最大限度地降低了人工干预带来的操作风险，使财务部门能够更快、更准确地响应内外部信息需求，为战略决策提供实时支持。



图2：智能财务报告体系数据流转图

五、提升路径三：聚焦关键复杂事项的准则执行与价值创造

在筑牢制度根基与拥抱技术赋能之后，国有企业财务报告质量提升的最终落脚点，在于对每一项关键复杂会计事项进行精准、深入的准则应用与业务洞察。这一层次超越了流程与工具，直指财务工作的核心——专业判断。它要求财务人员不仅是准则的执行者，更是业务的理解者与价值的发现者，通过将会计准则的精髓与企业的具体经济实质深度融合，确保财务报告能够真实、公允地反映企业价值，并在此过程中主动创造管理效益。

（一）合并报表：穿透股权表象，聚焦“控制”实质

合并报表的核心难点在于合并范围的精准界定。实践中，应超越持股比例这一法律形式，严格遵循“控制”的实质定义——即投资方拥有对被投资方的权力，通过参与其相关活动享有可变回报，并能运用权力影响回报金额。这意味着对通过章程协议、潜在表决权等方式实质控制的结构化主体或特殊目的实体，也必须纳入合并范围。财务团队需提前参与重大交易设计，审阅相关合同并进行穿透分析；同时建立标准化内部交易抵消模板，确保未实现损益及往来款项的完整准确抵消。基于经济实质的合并报表，方能真实完整地呈现企业集团的整体财务面貌。

（二）研发支出：构建业财融合的精细化项目管理框架

研发支出资本化与费用化的判断是财务工作的难点，关键在于建立贯穿项目全周期的业财融合管理框架。应与技术部门共同制定《研发项目财务管理规范》，明确以获取专利、通过验收、进入试生产等客观里程碑作为阶段划分标准。财务人员需嵌入项目管理，确保支出准确归集至具体项目，并追踪进展、收集技术可行性和经济效益证据。此精细化框架既能确保资本化判断的合规准确，又能通过投入产出分析优化研发资源配置，为企业创新提供财务支撑。

（三）资产减值：建立跨部门联动的动态估值与风险管理机制

资产减值测试因依赖未来现金流预测而颇具挑战。需将其从财务部门主导的期末计算，转变为跨部门协作的持续评估过程。企业应组建由财务、战略、运营及市场等部门组成的资产价值评估小组，定期审议关键假设（如产品售价、销量增长率、折现率等），确保与战略规划、预算及行业研究一致。如此，减值测试即转化为动态监控资产质量、识别业务风险的预警机制，使财务报告能更及时反映环境变化对资产价值的影响，显著提升信息相关性。

（四）税务筹划：战略协同与合规遵从下的价值创造

税务管理是业财融合与价值创造的重要体现。对于复杂会计事项，税务筹划应前置融入交易设计与处理全过程。以固定资产加速折旧为例，财务人员不仅需准确核算税费差异，更应在资本预算阶段主动评估政策对现金流及税负的影响，为投资决策提供支撑。在处理集团重组、技术转让等重大交易时，需与法务、投资部门协同设计架构，平衡税务效益与合规风险。这种战略性税务管理在管控风险的同时，直接创造现金流价值，推动财务部门

向价值创造中心转型。

六、结论

本文系统地论证了国有企业提升复杂会计事项处理规范性与财务报告质量的实践框架。核心结论在于：一流的财务报告质量，源于“制度－技术－人才”三大支柱的协同发力。制度是确

保行为规范的基石，技术是实现精准高效的工具，而人才的专业判断与业务洞察，则是连接制度、技术与经济实质的灵魂。面向未来，国企财务人员必须实现从“账房先生”到“价值工程师”与“风险管理师”的战略转型。唯有如此，财务报告才能超越简单的数字汇总，真正成为反映企业真实价值、支撑科学决策、服务国企高质量发展的“战略仪表盘”。这一转型之路，任重道远，但势在必行。

参考文献

- [1] 冯瑞芝. 基于不确定性会计事项处理问题的探究 [J]. 中国市场, 2015, (40): 120-121. DOI: 10.13939/j.cnki.zgsc.2015.40.120.
- [2] 许盼盼. 新会计制度下国企会计核算存在的问题及对策研究 [J]. 活力, 2024, 42(18): 145-147.
- [3] 陈诗雨, 刘龙. 国有企业混合所有制改革中过渡期损益不同归属的实务处理 [J]. 经济师, 2023, (01): 84-85+87.
- [4] 张禹林. 国企改制中资产“无偿划转和有偿划转”辨析及相应会计处理 [J]. 大连海事大学学报 (社会科学版), 2022, 21(04): 107-113.
- [5] 孙维. 无偿受让国有股权的税务与会计处理探讨 [J]. 审计与理财, 2022, (02): 55-56. DOI: 10.19419/j.cnki.36-1264/f.2022.02.008.
- [6] 王艺赟. 国有资产资本化的计量计价及财务会计处理 [J]. 国有资产管理, 2021, (02): 26-33.
- [7] 吴少平. 会计准则变革助力企业财务报告质量提升 [J]. 中国商人, 2024, (12): 242-244.
- [8] 姚硕. 数字经济下数据资产入表对企业财务报告质量的影响研究 [J]. 中国农业会计, 2024, 34(22): 73-75. DOI: 10.13575/j.cnki.319.2024.22.015.

业财融合视角下中小企业财务数字化转型咨询 方法论与应用

潘秋环

政旦志远（深圳）管理咨询有限公司，广东 深圳 518000

DOI:10.61369/ASDS.2025100007

摘 要： 在数字经济的迅猛发展浪潮之中，财务数字化转型已然成为企业打造核心竞争力的关键所在，然而战略方面存在的模糊不清状况、资源的匮乏以及人才的短缺等结构性困境，致使广大中小企业在转型道路上遭遇重重险阻，前行颇为艰难，本文依据一线咨询实践经验，希望能够破解这一难题，系统地构建起一套囊括“诊断评估、蓝图规划、路径实施、持续运营”的咨询赋能方法论体系。借助对 A 科技公司的全面案例解析，具体呈现出该方法论怎样帮助企业突破发展瓶颈，达成财务能力的实质性提升与跨越，研究提炼出保障转型成功的关键因素要点，并对咨询服务未来的演进趋势进行展望，期望可为中小企业提供一套有可复制性、可落地执行的实践框架以及决策指南。

关 键 词： 财务数字化转型；中小企业；咨询赋能；业财融合；敏捷实施

Consulting Methodology and Application of Financial Digital Transformation of Small and Medium-Sized Enterprises from the Perspective of Industry and Finance Integration

Pan Qiuhan

Zhengdan Zhiyuan (Shenzhen) Management Consulting Co., Ltd, Shenzhen, Guangdong 518000

Abstract： In the rapid development wave of the digital economy, financial digital transformation has become the key to the core competitiveness of enterprises, but the structural difficulties such as ambiguity in the strategy, lack of resources and shortage of talents have caused the majority of small and medium-sized enterprises to encounter many obstacles on the road of transformation, and it is quite difficult to move forward. The consulting empowerment methodology system. With the help of a comprehensive case analysis of A technology company, it specifically presents how the methodology can help enterprises break through the bottleneck of development and achieve substantial improvement and leapfrog of financial capabilities, study and extract the key factors to ensure the success of transformation, and look forward to the future evolution trend of consulting services, hoping to provide a set of replicable and implementable practice frameworks and decision-making guidelines for small and medium-sized enterprises.

Keywords： financial digital transformation; small and medium-sized enterprises; consulting empowerment; integration of industry and finance; agile implementation

引言

当下我们所处的时代，是由大数据、人工智能、云计算以及区块链等新一代信息技术所驱动的数字经济时代，中国信息通信研究院统计得出，2022年中国数字经济规模达到了50.2万亿元，在GDP中所占比重为41.5%，已然成为推动国民经济高质量发展的核心动力^[1]，在这样的背景状况下，企业的运营模式、竞争格局以及价值创造逻辑正经历着深刻的重塑过程。

对于国央企以及大型民企来讲，凭借着雄厚的资源，它们的财务数字化转型路径已然比较清晰，大多是借助引入SAP、Oracle等大型ERP系统，构建财务共享中心等办法来推进^[2]，而中小企业作为中国经济的毛细血管，数量超过5200万户，贡献了50%以上的税收、60%以上的GDP以及80%以上的城镇就业，然而在数字化转型过程中却普遍陷入不敢转、不会转的艰难处境^[3]。

这样的困境呈现出结构性特征，从战略角度来看，管理者对于数字化的认知大多停留在会计电算化范畴，欠缺长远的战略眼光^[4]，在资源方面，预算存在限制且复合型人才匮乏，以至于难以承受大型系统所需的成本，于管理层面而言，业务流程的标准化程度不够，信息孤岛问题较为突出，这对业财融合以及系统落地形成了妨碍^[5]。

因此，中小企业难以复制大企业重资产、长周期的转型模式，亟需小步快跑、量体裁衣的轻量化方案^[6]。在此过程中，专业财务咨询机构的作用凸显，正从方案提供者转变为赋能者与共创伙伴^[7]。

作者简介：潘秋环，政旦志远（深圳）管理咨询有限公司，职称：会计师，研究方向：内控。

一、中小企业财务数字化转型的深层痛点与独特需求剖析

为有效赋能中小企业，必须深入理解其真实痛点与核心需求。与大型企业追求体系完备性、架构前瞻性不同，中小企业的诉求更务实、场景化，且高度结果导向^[4]。其核心痛点可归纳为以下四个维度：

（一）战略定位不够清晰使得转型方向不明以及投资回报存在不确定性

中小企业的管理者大多深陷于日常运营之中，很难开展系统性的战略思考，他们对于数字化的认知大多时候呈现出两极分化的状况：一种是过度地神化数字化，期望凭借一套系统来解决所有的管理问题，另一种则是过度地简化数字化，将其视作可有可无的工具升级^[5]。关键的症结在于缺少可把数字化转型与企业战略目标进行有效衔接的路径，因为难以对转型投入的回报进行量化预测，决策过程中充满了顾虑，他们所需要的并非宏大的愿景，而是一本清晰的账目——首先做什么、投入多少以及可带来哪些具体的收益^[6]。

（二）资源双重约束构成了中小企业面临的颇为现实的挑战

资源双重约束体现为资金与人才两方面的短板：资金层面，传统 ERP 实施费用往往高达数十万甚至上百万元，超出了中小企业的承受限度，故而它们更倾向于按需付费、可快速部署且有弹性扩容特点的云化、SaaS 化解决方案^[6]，人才问题则更为较大，当前财务人员知识结构较为单一，在事后核算以及报表编制方面较为擅长，然而却欠缺数据分析、流程优化以及业务协同能力^[7]。引进复合型人才成本高昂且难度颇大，可行的转型方案应当内置知识转移与能力建设机制，以此帮助企业培育内部的发展动力^[8]。

（三）数据孤岛化堪称妨碍中小企业管理升级的关键妨碍因素

企业于不同阶段引入的进销存、财务、OA 等系统各自行事，数据标准存在差异，致使业务与财务数据彼此脱离，财务数据大多时候沦为事后的记录，难以实时呈现前端业务的动态情况^[10]，典型的状况是，项目实际成本数据无法及时传递至财务部门，造成项目毛利核算严重滞后，使得管理层决策缺乏及时且准确的数据支持^[9]。如此一来，打通业财数据链，达成全流程数据的实时同步以及可视化管理，已然成为中小企业提升精细化管理水平的急切需求^[12]。

（四）管理依靠人治，流程的标准化程度欠缺

中小企业在运营方面大多时候过度依赖核心人员的经验以及习惯，从报价审批一直到费用报销，都缺少统一的制度规范，这种依据个人意志来管理的模式，致使操作惯性不佳、效率比较低，还潜藏着职责不清晰以及合规操作方面的隐患^[4]，财务数字化转型的核心价值其中之一，就是把关键业务流程融入系统，用刚性的规则替换弹性的人治，将优秀实践固定下来，降低对关键个人的依赖，从系统层面提升组织的运营稳健性以及风险抵御能力^[8]。

经过综合分析可以看出，中小企业有一些独特需求，这些需

求可提炼总结为三个要点，其一为经济适用且可快速产生效果的解决方案，其二是有清晰的里程碑以及可以看到成果的实施途径，其三是自始至终贯穿且能为内部团队赋予能力的建设机制，这三个要点共同构成了专业服务机构对中小企业进行有效赋能的关键切入点^[3]。

二、赋能型财务咨询方法论的构建：四阶段螺旋式上升模型

面向中小企业的核心需求，构建了一套有动态闭环特性的赋能型咨询方法论，此模型着重突出与客户共同开展创造活动，将价值驱动作为核心要点，超越了传统的方案交付模式^[7]，整个体系是由四个相互紧密关联、可迭代优化的阶段所构成。

（一）阶段一：全面诊断——绘制转型现状图

此阶段作为项目的基石，会对企业展开系统化的健康体检，精准地识别出现状与目标之间的差距，采用三维立体诊断法，其中战略与业务洞察方面，借助和创始人以及核心管理层进行深度访谈并举办工作坊，深入去理解企业的商业模式以及战略目标^[9]。最关键的是弄清楚数字化转型需要解决的关键业务问题，像是提升接单能力、控制项目成本或者加速资金周转等，流程与组织评估方面，运用流程穿行测试方法，系统地梳理从订单到回款、采购到付款等核心业务流程，识别出效率瓶颈以及风险点，评估现有财务组织的架构、职责以及人员能力与未来数字化要求的匹配程度。技术与数据审计方面^[5]，全面盘点企业现有的 IT 资产，评估系统功能、集成度以及数据质量，结合自研的数字化成熟度评估模型进行多维度的量化评分，最终形成《企业财务数字化成熟度评估报告》，这份报告可客观地反映现状，是凝聚转型共识的关键工具^[6]。

（二）阶段二：蓝图规划阶段

此阶段要共创转型导航图，在清楚了解现状之后，此阶段会和企业一同设计出可行的未来蓝图以及分步实施的路径，关于愿景与目标共建，要明确财务职能转型后的新定位，是从记账型转变为业务伙伴型，还是成为价值创造中心，还要设定具体可衡量的目标，像缩短财务报告出具的时间、提高项目毛利率核算的准确率^[2]。在应用场景优先级排序方面，采取小切口、高价值的策略，联合业务部门挑选出痛点明显、价值较高且容易实施的场景作为优先试点，比如自动化费用报销、客户信用管理以及实时项目仪表盘^[8]，对于轻量化技术架构选型，针对中小企业的特点，推荐采用 SaaS 云服务加上低代码平台再加上 RPA 的组合架构^[6]。这种模式有着初始投入少、部署迅速、弹性扩展等优点，制定敏捷实施路线图，把整体目标分解成一系列可独立交付、周期短的迭代项目，明确各个阶段的范围、目标以及产出，保证转型过程可控制、可看见，每一步可带来实际的业务价值^[3]。

（三）阶段三：推动落地以保证转型取得实际成效

此阶段核心任务是把规划方案落实到实际行动中，重点在于可敏捷地执行并且保证用户充分参与进来，以此保障最终能达成预期成果，组成联合团队来保障方案落地实施：项目实施团队是

由咨询顾问以及客户方的财务、业务方面的关键人员共同构成的^[5]。这样的模式可保证方案切实解决业务中存在的痛点问题，而且也是一个可以进行贴身指导、传授经验的过程，保证相关能力可在组织内部得以内化^[7]，采用敏捷迭代的方式来控制风险：开发工作运用短周期的敏捷冲刺模式，借助每日站会保持沟通的透明度，并且借助周期性的成果演示及时获取用户反馈信息，根据反馈动态调整细节，有效控制项目出现偏差的风险^[10]。同时要对配套管理机制进行升级，在系统上线之际，要对相关的业务流程以及管理制度展开梳理和优化，达成线上线下规则的统一，这是保证系统效能可真正发挥作用的软件基础设施建设^[8]。

（四）阶段四：确立长效机制以达成持续运营

此阶段的关键目标在于，从项目交付转变至能力内化，帮助企业构建起自我驱动且持续优化的运营体系，知识转移与人才梯队建设方面：重点是为企业培育内部的种子团队，让其拥有系统运维以及基础配置的能力，接着借助有针对性的全员培训，保证新系统融入日常工作的各个环节^[5]。构建标准化运营体系：协助企业打造涉及监控、支持、需求反馈以及数据安全的标准运营流程，这一体系是系统稳定、高效、安全运行的制度保障，是实现长久稳定的基础^[2]，价值衡量与迭代优化：设立价值看板，定期评估转型对关键业务指标的实际影响，依据客观数据洞察优化机会，规划后续迭代路径，构建一个可自我审视、自我完善的动态优化闭环^[7]。

此方法论的核心要点是实现双向赋能以及共创，它的最终目的，并非仅仅是保证系统可成功上线这一有技术属性的交付成果，更关键的是要为企业注入有持续进化、自我驱动特性的内生能力^[4]。

三、全周期实践案例深度解析：A 科技公司的困局与破局

以国家级高新技术企业 A 公司作为实例，深入分析其数字化转型的动因，A 公司主要从事软件定制开发业务，年营收达 5000 万，然而快速发展的业务与薄弱的管理基础之间产生了尖锐矛盾，其一在项目管理方面，数十个项目同时开展，成本数据却不能实时同步，财务核算只能在事后进行，项目盈亏只能依靠粗略估算，导致管理层对经营过程失去了有效的监控^[10]。其二在内部运营方面，费用报销流程繁琐且冗长，平均周期长达 10 天，严重影响了效率，员工满意度较低，同时财务团队被大量的纸质单据审核工作所困扰^[5]，其三在风险控制方面，兼职人员费用结算缺乏标准流程，操作不够规范，这造成了管理上的漏洞，还构成了税务与法律风险^[8]。

（一）深度诊断：量化差距，凝聚共识

通过问卷调查、深度访谈和流程分析，诊断出 A 公司的核心问题在于业财分离与管理滞后。其数字化成熟度评分仅为 2.1 分（满分 5 分），表现为仅有基础财务软件，项目管理工具与财务系统完全隔离，数据依赖手工整理。基于诊断结果，与管理层共同确立了三大转型目标：提升财务运营效率、实现项目精细化管理、

强化费用合规控制。

（二）蓝图规划：三步走战略

速赢阶段（第 1-3 个月），上线云端费用管理系统，实现报销流程自动化。核心阶段（第 4-9 个月），搭建项目成本核算平台，打通业务与财务系统。深化阶段（第 10 个月及以后），引入 BI 工具，构建管理层数据驾驶舱。

（三）敏捷实施与成效：步步为营，价值彰显

速赢阶段：引入 SaaS 费用管理平台，集成携程商旅、滴滴企业版，应用 OCR 技术自动识别发票，预设多级审批流程。成效：报销周期从 10 天缩短至 2 天；财务审核工作量下降 70%；员工满意度提升 40%。

核心阶段实施的具体情况如下：借助低代码平台来定制开发项目成本归集中心，借助 API 接口自动同步 Jira 系统的工时数据以及财务系统的支出数据，以此达成实时毛利核算，所取得的成效为：项目毛利率核算的准确率从原本不足 60% 提升到了 95% 以上，管理层可随时查看项目的盈利状况，兼职费用结算实现了标准化，合规风险得以降低。

（四）打造可实现持续运营的长效机制

转型若要成功落地，需依靠有可持续性的运营能力，我们帮助 A 公司构建了三大保障机制，其一为内部支持体系，从中选拔并培养内部数字专员，由这些专员负责日常运维、权限管理以及报表开发等工作，以此形成自我支撑能力，其二是定期复盘机制，设置季度回访环节，与 A 公司团队一同审视系统运行数据，从中发现问题并持续进行优化。其三是前瞻规划机制，结合 A 公司拓展海外市场的业务战略，共同谋划系统升级路径，保证数字化能力可与业务发展保持同步。

四、解码成功基因，从容应对挑战

依靠在 A 公司等企业所开展的实践活动，我们归纳总结出中小企业实现财务数字化转型成功的三项关键要素，同时还提出了应对常见挑战的切实可行策略。

（一）关键成功要素之中，高层深度参与是转型的首要推动力量

企业最高管理者不只是项目批准者，更要成为转型的首席倡导者，参与关键决策、协调资源、破除组织壁垒，为变革提供持续的战略支持^[8]，业务价值引领把解决痛点与创造实效当作核心，每个转型举措都围绕具体业务问题来开展，保证技术投入紧密服务于业务增长，防止为数字化而数字化，让业务部门成为转型的真正受益者与支持者^[9]。内生能力培育以知识转移与团队赋能作为重心，咨询的目标不只是交付系统，还要帮助企业构建自主运营与持续优化的能力，项目贯穿知识传递与人才培养，保证顾问离开后企业拥有能理解、使用并迭代系统的内部团队^[7]。

（二）典型挑战以及应对策略

挑战之一是组织变革引发的员工抵触情况，员工会因为习惯发生改变产生抗拒心理，应对策略如下：实施全面的变革沟通工作，清晰阐明转型给员工带来的价值所在，提供系统的培训以及

分层辅导，以此降低学习的门槛，树立内部标杆用户，发挥其示范作用，设计渐进式的适应方案^[4]。

挑战之二是历史数据质量欠佳以及迁移存在险阻，企业的历史数据大多时候标准不一致，清理成本较高，这成为了系统实施的妨碍因素^[10]，应对策略为，秉持上线即治理的原则，不追求一次性达到完美迁移，制定分阶段的数据清洗计划，借助系统规则反向推动数据规范录入，对非关键的历史数据进行归档处理，集中资源保障未来数据的质量^[6]。

挑战之三是需求蔓延以及项目范围失控，业务部门不断提出新的需求，容易致使范围膨胀以及交付延期^[5]，应对策略是：在项目启动阶段明确界定各个迭代周期的范围，严格执行变更控制流程，新增需求统一纳入需求池，经过评估之后安排到后续迭代中，保证当前阶段目标清晰、交付可控^[3]。

五、结论与未来展望：迈向智能、协同的价值共创新生态

经理论与实践验证，专业财务咨询依靠系统化方法论以及实践经验，可有力帮助中小企业以可控成本达成财务管理数字化升

级^[4]，赋能式咨询的最关键的是从单纯给予结果转变为传授方法，给予企业自主持续发展的能力^[7]，财务咨询服务会朝着更深入、智能的方向发展^[2]，从流程数字化迈向数据资产化。服务重点会从流程优化，转变为协助企业把数据当作战略资产进行系统管理，借助搭建数据中台、深入挖掘数据，达成真正的数据驱动决策^[8]，从自动化到智能化，人工智能与机器学习会融入财务核心环节，咨询服务会聚焦推动预测性分析、智能风险预警以及动态预算优化等能力，拓展财务的价值创造边界^[9]。从内部优化到生态协同，随着产业互联网发展，咨询服务会借助区块链、开放 API 等技术，帮助中小企业对接上下游生态，实现与供应商、客户及金融机构的实时数据协同与价值共享，提升整体价值链效率^[10]。

面对当前这样的变革趋势，财务人员需要积极主动地进行转型，从传统的核算工作者转变为业务伙伴、数据分析师以及变革推动者^[7]，只有不断持续地进化，才可为企业提供帮助，使其在数字经济环境中稳健前行，为中国的高质量发展贡献出自身的专业力量^[1]。

参考文献

-
- [1] 中国信息通信研究院. 2023,《中国数字经济发展研究报告(2023年)》年度报告.北京:中国信息通信研究院.
 - [2] 徐策. 2023,《迈向未来财务:中国企业财务数字化转型白皮书》普华永道白皮书,2023年版.
 - [3] 曹文杰. 2023,《迈向未来财务:中国企业财务数字化转型白皮书》普华永道白皮书,2023年版.
 - [4] 刘政、谭静和张雨婷. 2022,《中小企业数字化转型的“困境”与“破局”:基于赋能理论的案例研究》管理学报19(04),518-531.
 - [5] 华为公司企业架构与变革管理部. 2021,《华为数字化转型之道》机械工业出版社.2022年版.
 - [6] 元年研究院. 2022,《元年财务数字化转型研究与案例实践白皮书》元年科技股份有限公司 白皮书2022年版.
 - [7] 普华永道(PwC). 2022,《财务职能:把握机遇》特许公认会计师公会(ACCA).研究报告]
 - [8] 张庆龙. 2021,《企业财务数字化转型的本质与方向——基于华为的案例研究》会计之友,(01),2-9.
 - [9] 黄鸿飞. 2023,《迈向未来财务:中国企业财务数字化转型白皮书》普华永道白皮书,2023年版.
 - [10] 肖静华、谢康和廖雪华. 2021,《数字化转型与企业管理适应性重构——基于海尔与华为的双案例研究》管理世界37(03),花木兰.Employee 168-188.

统计学专业选修课教学模式探索 ——以生存分析课程为例

陈旭, 周杰明

湖南师范大学 数学与统计学院, 湖南 长沙 410000

DOI:10.61369/ASDS.2025100008

摘要： 本文基于统计学专业选修课应用导向强、定位灵活的特点，以“生存分析”课程为载体，系统探讨统计建模思想深度融入于教学全过程的改革路径。立足生存分析方法与现实问题的紧密关联，课程构建以建模任务为驱动的教学体系，引导学生在真实情境中完成“问题识别—模型构建—结果阐释”的全流程训练，有效强化其统计建模素养与跨学科应用能力。教学实践突出选修课的拓展性与实践性，通过多元融合的教学模式激发学生主动学习与创新探索意识，切实推动课程目标从知识传授向能力建构的根本转变，为同类课程的教学改革提供有益参考。

关键词： 生存分析；统计建模；统计思维能力；问题解决能力；实践教学

Exploration of Teaching Models for Elective Courses in Statistics — A Case Study of Survival Analysis Courses

Chen Xu, Zhou Jieming

School of Mathematics and Statistics, Hunan Normal University, Changsha, Hunan 410000

Abstract： Based on the applied focus and flexible positioning of elective courses in statistics, this paper takes the "Survival Analysis" course as a case study to explore a reform path that systematically integrates statistical modeling thinking into the entire teaching process. Given the close connection between survival analysis methods and real-world problems, the course establishes a modeling task-driven teaching system, guiding students through comprehensive training in "problem identification—model construction—result interpretation" within authentic contexts, effectively enhancing their statistical modeling literacy and interdisciplinary application skills. The teaching practice emphasizes the expansive and practical nature of elective courses, employing a multi-integrated teaching model to stimulate students' initiative in learning and innovative exploration. This approach fundamentally shifts the course objective from knowledge transmission to capacity building, offering valuable insights for teaching reforms in similar courses.

Keywords： survival analysis; statistical modeling; statistical thinking ability; problem-solving skills; practical teaching

引言

统计学专业的课程体系通常遵循“基础—核心—进阶”的金字塔式培养结构。专业核心课程，如概率论、数理统计、应用回归分析、多元统计分析、时间序列分析等，构成了统计学知识体系的基石，旨在使学生系统掌握统计学的基本原理、理论框架与核心方法^[1]。然而，随着数智时代的深入发展，大数据与人工智能技术的迅猛发展深刻改变了数据环境与应用场景，传统课程体系在内容更新、实践教学等方面存在不足，难以适应新时代的教学需求^[2]。

在核心课程之外，专业选修与进阶课程承担着拓展与深化学生学习路径的重要作用。该类课程通常聚焦于某一前沿方向或交叉学科领域，例如贝叶斯统计、机器学习、非参数统计，以及生存分析、生物统计学等^[3]。其教学目标侧重于培养学生将统计理论应用于复杂

项目资助：2025年湖南省普通高等学校教学改革研究项目，AI赋能问题驱动：构建统计学教学新生态（202502000329）；2024年湖南师范大学教学改革研究项目，统计学专业学生创新实践能力培养模式研究；2023年湖南省普通高等学校教学改革研究重点项目，“双碳”目标下统计学专业创新实践能力培养模式研究（HNJG-20230217）；2019年湖南师范大学教学改革研究项目，“双万计划”建设背景下统计学专业人才培养综合改革与实践。

作者简介：

陈旭，湖南师范大学数学与统计学院，副教授，研究方向为风险理论，生存分析，邮箱：chenxu981388@hunnu.edu.cn；

周杰明，湖南师范大学数学与统计学院，副教授，研究方向为随机控制，邮箱：jmzhou@hunnu.edu.cn。

现实情境的能力，以及跨学科融合的创新思维^[4]。当前，统计学专业在人才培养目标设定上存在不够清晰、难以量化评估的问题，同时培养方式未能充分考虑学生的个性化需求，限制了学生潜力的发挥^[2]。因此，选修课教学模式的改革与创新成为推动统计学教育适应新时代需求的重要路径，具体包括产学研结合与校企合作、项目驱动与案例教学、赛教融合与导师制等多种模式^[5、6]。

生存分析作为数理统计的一个重要分支，专注于研究生存时间这类非负随机变量，特别适用于处理删失数据等不完全信息问题。其在医学临床试验、工业可靠性检测、保险精算等多个领域具有广泛应用，体现出显著的实用价值与学科交叉特性^[7]。随着大数据与人工智能技术的快速发展，其方法体系持续拓展，应用前景日益广阔^[8]。

作为一门典型的专业进阶选修课，生存分析课程兼具“理论深化”和“应用驱动”双重属性。它不仅以坚实的数理统计基础为前提，更注重培养学生处理实际复杂数据和解决特定领域问题的综合能力^[9]。然而，传统的“教师讲授、学生听讲”型教学模式难以适应此类高层次能力培养的需求，学生往往仅掌握书本知识，缺乏对实际问题的深入分析和解决能力^[10]。因此，本文基于教学实践，以生存分析课程为例，对统计专业选修课的教学模式开展如下探索与改革，旨在通过项目驱动、赛教融合等策略，提升学生的实践能力与创新思维，促进统计学教育适应数智时代的专业人才需求^{[6][11]}。

一、教学定位与目标

作为一门专业选修课，生存分析课程立足于深化与拓展学生专业能力的设置初衷，将教学定位从传统的理论知识传授，转向以培养学生的系统性统计建模能力为根本目标。在这一目标指引下，课程设计强调以真实问题为出发点，引导学生经历“从实际问题回溯至理论方法，再回归至问题解释”的完整建模闭环，强化统计思维在实战中的系统训练。

具体教学实施涵盖以下关键环节：首先，培养学生精准界定实际问题的能力，使其能够将现实需求转化为可操作的统计议题；其次，系统训练数据预处理技能，包括缺失值处理、变量变换与数据结构辨识；进而指导学生根据问题特点与数据条件，选择适当的生存分析模型（如Cox模型、参数模型等），进行模型构建与统计推断；最后，着重强化对结果的合理解释能力以及规范研究报告的撰写素养，使学生不仅能输出统计结果，更能将结论还原至实际语境，提供具有决策参考价值的建议。

通过这一全过程、系统化的训练，本课程致力于实现从“学知识”到“建能力”的转变，突出选修课在拓展学生专业视野、激发创新潜能与强化实践应用方面的独特作用。

二、教学实施路径

为实现从“知识传授”到“能力构建”的根本转变，本课程以系统化思维重构教学路径，构建了一个以“理解—实践—竞技—反思”为主线的能力训练闭环。该体系整合六大教学环节，形成有机衔接、逐层递进的教学生态。其一，基于课程内容进程的分层讨论深化理解，在理论讲授中嵌入由浅入深的案例研讨，确保学生扎实掌握方法原理，筑牢建模基础。其二，通过项目式学习与虚拟仿真课程双轮驱动，引导学生在真实课题与沉浸式情境中综合运用知识，实现从方法学习到问题解决的过渡，二者共同构成“虚实结合”的核心实践载体。其三，一方面推行“以赛促学”，将高水平学科竞赛作为检验学习成效、激发创新潜能的平台，另一方面通过解析标杆成果，拓宽学生学术视野，提升其

批判性思维与成果标准意识；此外，“赋能与增效”环节将人工智能协作作为横向支撑，全面渗透于前述所有环节，培养学生驾驭现代工具、实现人机协同的统计素养。这六个环节并非简单并列，而是以核心实践为载体，以基础输入、目标牵引和工具赋能为支撑，共同推动学生在螺旋上升的循环中，完成统计建模能力的系统性建构。

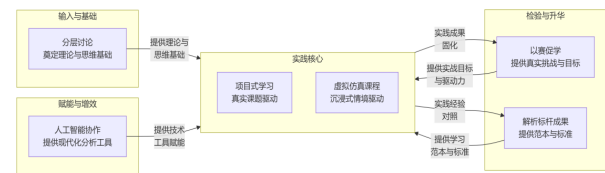


图1：教学实施路径

（一）分层讨论深化理解

为系统提升学生的建模思维与学术表达能力，课程设置了三次阶梯式课堂讨论，逐步推动学生从方法认知走向综合应用。

首次讨论安排在课程早期（约第3讲），重点引导学生理解生存分析的研究范畴与实际问题的统计转化过程。通过研读多领域文献与小组汇报，学生学会识别适用数据、明确研究目标，并初步确立建模方向（如生物医学、金融风险、工程可靠性等），实现从方法论学习到应用场景的自然衔接。第二次讨论在Cox比例风险模型等内容讲授后展开，着重训练学生比较不同生存分析方法的异同、适用条件与局限。该环节融入学术写作规范讲解，推动教学策略由方法导向转向问题导向，帮助学生构建清晰的研究思路，为课程论文撰写奠定基础。最后一次讨论作为课程论文的集中展示环节，采用小组答辩、组间互评与模拟评审等形式，全面锻炼学生的表达、协作与批判性思维能力。论文质量与汇报表现均纳入平时成绩评价体系，有效激发学习主动性与团队意识。

通过上述分层递进的讨论机制，课程强化了理论与实践的结合，突出了学生在学习过程中的主体地位，显著提升了其在统计建模、软件操作与学术表达等方面的综合能力，并构建了过程与结果并重的多元评价机制。

（二）项目式学习贯穿全程

在教学实施中，课程以统计建模，实际问题为导向，采用“分组+讨论+论文”的项目式教学模式。课程初期即进行学生分组，每组4-5人，围绕一个竞赛选题或自选真实课题开展贯穿整个学期的项目研究。教学内容按建模流程模块化推进，包括数据预处理、Kaplan-Meier估计、Cox比例风险回归模型、参数模型等核心知识单元。学生需结合自选项目数据，分阶段完成模型建立、验证与结果解读，从而实现“做中学”、强化统计建模与数据分析的全流程实践能力。课程中完成的优质调研报告和模型成果还可直接作为参赛基础，形成“以课助赛、以赛促学”的良性循环。

（三）解析标杆成果，拓宽学术视野与批判思维

本环节组织学生系统研习近年来国内外高水平竞赛的优秀获奖作品，旨在直观展现生存分析的前沿应用与规范的研究流程。通过重点分析这些标杆成果的选题立意、模型构建、实证分析及写作规范，引导学生掌握科学的研究设计与表达方法。

在课堂实施中，设置案例复盘与模拟评审环节，鼓励学生以小组形式从选题可行性、模型稳健性、结果可视化等维度进行互评与研讨。这一过程不仅有助于学生理解高质量研究的共性特征，更有效培养了其批判性思维能力、学术鉴赏力与团队协作素养，实现从模仿学习到创新思考的过渡。

（四）推行“以赛促学、课赛融合”的实践机制

“以赛促学”是将学科竞赛融入教学过程的实践模式，有助于激发学生对统计学选修课程的主动学习兴趣与探究动力。课程通过引入全国大学生统计建模大赛等与生存分析高度相关的赛事，推动“课赛融合”，引导学生从知识接受者转变为实际问题的探索者与解决者。竞赛所具有的现实性、挑战性与成果导向性，能够促使学生关注医疗健康、金融风险、设备寿命预测等真实场景中的问题，培养其严谨的科学态度与持续学习的习惯。

在竞赛参与过程中，学生需独立完成从问题定义、数据预处理、模型构建评估到结果解读的全流程训练。这不仅巩固了课程所学的核心方法，也强化了使用R、Python等工具进行建模、可视化与结果表达的实际操作能力，有效提升了统计建模与数据分析的综合应用水平。

此外，竞赛课题多源于跨学科的实际问题，涉及医学、经济学、工程技术等多个领域，要求学生结合具体背景灵活运用模型，从而强化其统计思维与跨学科问题解决能力。通过团队协作完成竞赛项目，学生也在沟通协作、报告撰写与成果展示等软技能方面得到锻炼，实现知识、能力与素养的协同发展。

（五）构建虚拟仿真课程，创设沉浸式建模环境

为拓展项目实践的广度与深度，本课程引入了虚拟仿真实验教学，构建“虚实结合”的实践教学体系。该模块以“海外上市中国公司的生存与发展”为核心情境，模拟中概股公司在海外资本市场中面临的真实挑战（如政策冲击、做空危机、跨境监管与退市风险），为学生提供高度逼真、可重复试错的沉浸式分析环境。

课程围绕生存分析的核心知识点，设计了前后衔接的四个实

验模块：模块一：数据基础与“生存”定义，引导学生结合商业背景明确定义“生存”与“终止”事件，并处理右删失数据；模块二：生存模式探索与比较，指导学生运用Kaplan-Meier方法与Log-rank检验，绘制并比较不同特征公司的生存曲线；模块三：多因素风险模型构建，要求学生建立Cox比例风险模型，探究财务与市场协变量对生存风险的影响，并完成比例风险假设检验；模块四：动态预测与决策支持，学生需基于所建模型进行未来1-3年的生存概率预测，并为虚拟的“基金管理委员会”撰写风险评估与投资建议报告。

通过这一连贯的模块化训练，学生在接近真实的商业故事中，系统完成了从数据预处理、模型构建到决策支持的全流程实战，有效内化了理论知识，显著提升了在复杂、高风险场景下运用统计模型解决实际问题的能力。

（六）融入人工智能协作，培养人机协同的现代统计素养

为应对人工智能时代对统计人才的新要求，本课程将人机协同理念全面融入教学实践，旨在培养学生批判性使用AI工具、提升工作效率的现代统计素养。

在教学实施中，课程通过在项目式学习、虚拟仿真、竞赛准备等环节布置难度较高、涉及复杂数据操作或探索性建模的任务，鼓励学生自主选用大型语言模型或AI编程助手等工具辅助完成。关键要求在于，学生必须在研究报告与课堂汇报中设立专门章节，清晰阐述AI的协作边界与具体贡献，包括：说明在数据清理、代码编写、文献梳理或结果解读等哪些环节借助了AI；展示了与AI交互的关键提示词；并详细记录了对AI输出结果所进行的人工校验与修正过程。

这一设计旨在引导学生将AI定位为“高效辅助者”而非“权威决策者”。通过反思AI的工作，学生能更深刻地理解统计模型的局限性与专业思维的核心价值，从而培养其在人机协同环境中的批判性思维与主导能力。此举不仅提升了学生在各教学环节中的实践效能，更是对其未来科研与职业发展中关键能力的重要补充与前瞻性培养。

三、考核方式与评价机制

为全面反映学生在统计建模实践中的综合表现，本课程对传统考核方式进行了系统改革，构建了融合过程性评价与终结性评价的多元成绩体系。大幅提高实践环节在总评成绩中的占比，具体评价内容包括小组调研报告的质量、课堂讨论的参与贡献度、课程论文的撰写与答辩表现以及在竞赛中的实际成果等。在评价过程中，重点关注学生模型构建的科学性、软件操作的熟练度、团队协作效率及学术汇报的表达能力，并对在竞赛中取得突出成绩的学生给予额外激励，全面调动其学习与创新积极性。

在教学实施过程中，通过课程问卷、学生座谈、竞赛成绩分析及教师听课反馈等多渠道系统收集意见与建议，全面评估学生对“以赛促学”教学模式的接受程度与实际学习效果。教师依据多源反馈和课程考核数据，对教学内容、案例设计、讨论主题与实践任务进行动态优化与调整，持续提升生存分析课程的教学质

量与人才培养实效。

四、结语

本课程通过构建“理论—实践—创新”深度融合的教学体系，系统整合分层讨论、项目式学习、虚拟仿真、以赛促学、标杆解析与人工智能协作六大环节，形成贯穿“理解—实践—竞技—反思”全过程的闭环培养路径，有效提升了学生的统计建模核心素养与综合应用能力。分层讨论以阶梯式推进学生从方法认知走向学术表达；项目式学习与虚拟仿真课程构建“虚实结合”的实践载体，强化全流程建模能力；以赛促学与标杆解析分别在实战与反思中激发创新潜能、塑造学术标准；人工智能协作则作为赋能工具，全面支撑各环节的效率提升与素养拓展。配合多元

综合评价机制，课程实现了过程与结果并重、能力与素养协同的教学导向。实践表明，该体系显著增强了学生对生存分析方法的应用水平与研究素养，多届学生在课程项目与学科竞赛中表现优异，充分验证了教学改革的实效性。

本课程的探索为统计类选修课的教学改革提供了系统化、可操作的实施路径。以“能力建构”为中心，通过多层次的教学活动设计、真实问题驱动、虚实结合的实践平台、竞赛与标杆双轨激励，以及人机协同的素养嵌入，有效突破了传统课程中理论与现实脱节的瓶颈。此类课程应持续突出学生的主体性，强化教学内容的前沿性与整合性，完善动态反馈与持续优化的教学机制。未来，可进一步推动跨学科协作与产教资源融合，提升课程的开放性与社会适应力，从而更好地支撑卓越统计人才的培养目标。

参考文献

[1] 孟生旺, 袁卫. 大数据时代的统计教育 [J]. 统计研究, 2015, 32(4): 3-5.

[2] 陈梦根, 王璇. 数智时代统计学专业培养体系改革研究 [J]. 调研世界, 2025(04): 84-96.

[3] 雷娜. 大数据时代应用统计硕士教学模式改革与创新研究 [J]. 金融理论与教学, 2024(04): 102-106.

[4] 唐莉. 基于实践与应用能力培养的应用统计专业改革与实践 [J]. 试题与研究, 2022(11): 48-49.

[5] 王天松, 杨凤, 郭涵, 杨红梅. 大数据背景下培养统计专业学生数据分析能力的若干思考 [J]. 昌吉学院学报, 2021(4): 129-132.

[6] 王献东, 李鹤. 基于赛教融合的统计类专业课程教学改革研究 [J]. 创新创业理论与实践, 2025, 8(11): 151-154.

[7] 杨永霞, 李玉叶, 韩伟等. 应用型人才培养模式下多元统计分析课程改革研究与实践 [J]. 赤峰学院学报 (自然科学版), 2016, 32(4): 17-18.

[8] 张海莹, 鲁笛, 杨贞. 培养 AI 时代统计学高阶思维能力的教学策略研究 [J]. 黑龙江教师发展学院学报, 2025, 44(9): 81-84.

[9] 曾冬平, 乔守明. 大数据专业统计学课程项目式教学模式的 OBE 实践与效果分析 [J]. 教育视界, 2025(6): 102-104.

[10] 徐祯. “以赛促学”的实践教学模式在金融统计学课程中的运用研究 [J]. 现代商贸工业, 2023, 44(6): 160-162.

[11] 叶提芳, 张耀峰, 王磊等. “导师牵引 + 学科竞赛驱动”的大学生全生命周期创新创业能力培养模式实践——以统计学专业为例 [J]. 湖北经济学院学报 (人文社会科学版), 2024, 21(4): 140-142.

医学院校硕士研究生胜任力量表研制及信度效度评价

于海兵¹, 冯颖恩¹, 黄文龙¹, 曾莹¹, 黄艳芳¹, 吴烁佳¹, 黄馨仪¹, 胡跃华^{3*}, 金花^{2*}

1. 广东医科大学 公共卫生学院, 东莞第一附属医院, 广东 东莞 523808

2. 广东医科大学 药学院, 广东 东莞 523808

3. 中国疾病预防控制中心流病办, 北京 102211

DOI:10.61369/ASDS.2025100009

摘 要 : 目的: 研制适用于医学院校硕士研究生的胜任力量表, 并检验其信度与效度, 为评价医学院校硕士研究生能力素质提供标准化工具。方法: 通过文献回溯法、专家小组座谈、行为事件访谈和 Delphi 法建立医学院校硕士研究生胜任力指标体系, 并以此编制调查问卷。采用方便抽样法对医学院校硕士研究生进行问卷调查, 通过 t 检验分析量表条目区分度, 采用 Cronbach's α 系数评价信度, 使用探索性因子分析和验证性因子分析检验量表效度。结果: 医学院校硕士研究生胜任力量表包含政治思想素质、个性特征、自我价值观和学术科研能力 4 个维度, 共 35 个条目。t 检验结果显示量表各条目区分度良好; 提取的 4 个公因子解析总变异量的 77.247%; 量表的总 Cronbach's α 系数为 0.975。验证性因子分析结果显示, 平均提取方差值 (AVE) 均大于 0.5, 组合信度 (CR) 均大于 0.7。结论: 本研究构建的胜任力量表具有良好的信度及效度, 结构合理稳定, 可以用于医学院校硕士研究生胜任能力的测评。

关 键 词 : 医学院校; 硕士研究生; 胜任力量表

Study on the Reliability and Validity of the Competency Scale for Master's Degree Students in Medical College

Yu Haibing¹, Feng Yingen¹, Huang Wenlong¹, Zeng Ying¹, Huang Yanfang¹, Wu Shuojia¹,
Huang Xinyi¹, Hu Yuehua^{3*}, Jin Hua^{2*}

1.School of Public Health, Guangdong Medical University, Dongguan First Affiliated Hospital, Dongguan,
Guangdong 523808

2.School of Pharmacy, Guangdong Medical University, Dongguan, Guangdong 523808

3.Epidemiology Office, China Center for Disease Control and Prevention, Beijing 102211

Abstract : Objective: To develop a competence scale suitable for master's degree students in medical colleges, test its reliability and validity, and provide a standardized tool for evaluating the competence and quality of master's degree students in medical colleges. Methods: The competency index system of master's degree students in medical colleges was established by literature retrospective method, expert panel discussion, behavioral event interview and Delphi method, and the questionnaire was prepared based on this, convenient sampling was adopted to conduct questionnaire survey on master's degree students in medical colleges, and the differentiation of items in the scale was analyzed by t test. Cronbach's α coefficient was used to evaluate the reliability of the scale, and exploratory factor analysis and confirmatory factor analysis were used to evaluate the scale validity. Results: The competence scale for master's degree students in medical colleges consisted of four dimensions: political and ideological qualities, personality traits, self-values, and academic research

基金项目: 广东省研究生教育创新计划项目 (2020JGXM057); 广东省本科高校教学质量与教学改革工程建设项目 (粤教高函 [2023] 4 号); 广东省本科高校在线开放课程指导委员会 (重点) 研究课题 (2022ZXKC182); 广东医科大学大学生创新实验 (重点) 项目 (SZDY001); 广东省研究生教育创新计划研究生示范课程建设项目 (2024SFKC_047); 2024 年度广东省教育科学规划项目 (高等教育专项) (2024GXJK528); 2024 年度广东省本科高校课程思政改革示范项目 (粤教高函 2024-27 号); 广东医科大学本科教学质量与教学改革工程项目 (1JG24155)。

作者简介:

于海兵, 广东医科大学公共卫生学院, 医学博士, 副教授, 硕士研究生导师, 研究方向为现代统计方法在疾病模型构建中的应用;

冯颖恩, 广东医科大学公共卫生学院, 硕士研究生, 研究方向为现代统计方法在疾病模型构建中的应用;

黄文龙, 广东医科大学公共卫生学院, 硕士研究生, 研究方向为现代统计方法在疾病模型构建中的应用;

曾莹, 广东医科大学公共卫生学院, 本科生, 研究方向为现代统计方法在疾病模型构建中的应用;

黄艳芳, 广东医科大学公共卫生学院, 硕士研究生, 研究方向为现代统计方法在疾病模型构建中的应用;

吴烁佳, 广东医科大学公共卫生学院, 本科生, 研究方向为现代统计方法在疾病模型构建中的应用;

黄馨仪, 广东医科大学公共卫生学院, 本科生, 研究方向为现代统计方法在疾病模型构建中的应用。

通讯作者:

金花, 广东医科大学药学院, 工科博士, 副教授, 博士后合作导师, 硕士研究生导师, 研究方向为纳米药物研发及其作用机制的研究;

胡跃华, 中国疾病预防控制中心流病办, 医学博士, 硕士研究生导师, 研究方向为健康统计分析、医学数据挖掘。

abilities, with a total of 35 items. The t test results showed that the differentiation of each item was good. The total variance of the four common factors extracted was 77.247%. The total Cronbach's α coefficient of the scale was 0.975. The results of confirmatory factor analysis showed that the average extraction variance (AVE) was greater than 0.5, and the combined reliability (CR) was greater than 0.7. Conclusions: The constructed competency table has good reliability and validity, reasonable and stable structure, and can be used to evaluate the competency of master's degree students in medical colleges.

Keywords : medical college; master's degree students; competency scale

引言

当前，我国医疗卫生事业正迈向高质量发展新阶段，以习近平同志为核心的党中央明确提出推动高水平人才培养“质量革命”，在此背景下，医学生教育改革也在持续深化。作为我国国民教育的最高阶段之一，研究生教育是培养高层次人才的主要途径之一^[1]，其中医学研究生教育，对于培养高素质、高层次的医学人才至关重要，是高层次医学人才培养的核心环节。因此，研究生教育改革被视为关乎未来医学发展的重要举措^[2,3]。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》提出构建“高质量的教育体系”和“全方位全周期的健康体系”，这两大体系的建设既与医学院校研究生教育体系的完善紧密衔接，更需要以高端医学院校专业人才为支撑，而后者正是实现“健康中国”战略目标的核心保障^[4,5]。因此，如何科学开展硕士研究生能力素质评价、构建适配的培养体系，始终是医学院校重点关注与探索的重要课题。

胜任力量表是一系列用于评价个体胜任特征与综合素质的标准化组合工具。其核心价值不仅体现在能够精准评估岗位知识等易量化的胜任力维度，更在于可有效衡量个性、动机、态度及价值观等难以直接量化的深层胜任力特征，而这类评估的信度与效度，直接决定了能否可靠测量所要衡量的概念或属性^[6-9]。目前，在国内学界，关于胜任力量表的研究主要集中在企业经济^[10-12]和高等教育领域^[13-15]。但在高等教育领域，针对医学研究生的胜任力研究现有成果多聚焦于单一专业背景的医学研究生群体^[16,17]，或仅针对医学院校研究生某几项特定胜任力要素展开探讨^[18,19]，缺乏对医学院校硕士研究生整体胜任力的综合研究。

基于此，本文旨在将胜任力量表系统引入医学院校硕士研究生的评价与培养体系，构建更为完善的基于胜任力量表的评价和培养体系。研究有助于进一步提升研究生素质教育的针对性和实效性，为医学院校评价和培养优秀硕士研究生提供重要的参考依据。

一、研究方法

（一）量表初稿编制

本研究通过系统文献梳理，借鉴麦克利兰胜任力特征辞典，结合医学院校硕士研究生教育现状，初步确定《医学院校硕士研究生胜任力词典》，并开展 Delphi 专家咨询^[20,21]，经6名职称为副高级以上且有超过10年医学院校教育或管理经验的专家共同审定，多次修改后根据最终确定的胜任力词典编制问卷。问卷包括基线资料调查表和胜任力评价量表两部分。考虑到调查对象的人口学特征可能对胜任力评价产生影响，对基线资料调查表进行设计，包括调查对象性别、年龄、政治面貌、学校、年级、专业、入学方式、学位类型、奖学金获得情况、论文发表情况、科研比赛情况；胜任力评价量表由专家以及项目组经过初筛后得到4个维度，35个条目。其中包括政治思想素质（5个条目），个性特征（10个条目），自我价值观（8个条目），学术科研能力（12个条目），详见表1。量表采用五级李克特量表（Likert Scale）进行评分，将各条目“符合程度”划分为5个等级并对应赋值：非常符合（5分）、符合（4分）、一般符合（3分）、不符合（2分）、非常不符合（1分）。

表1：医学院校研究生评价量表维度与要素体系

维度	要素	评价等级				
政治思想 素质 (A)	1. 社会责任感与使命感	1	2	3	4	5
	2. 政治立场与理想信念	1	2	3	4	5
	3. 正确人生价值观	1	2	3	4	5
	4. 奉献精神与敬业精神	1	2	3	4	5
	5. 遵纪守法	1	2	3	4	5
个性特征 (B)	1. 自信从容且勇于挑战	1	2	3	4	5
	2. 情绪稳定性与自控能力	1	2	3	4	5
	3. 生活乐观且富有激情	1	2	3	4	5
	4. 专注力	1	2	3	4	5
	5. 团队奉献力	1	2	3	4	5
	6. 时间管理能力	1	2	3	4	5
	7. 抗挫折能力	1	2	3	4	5
	8. 团队合作精神	1	2	3	4	5
	9. 诚实守信	1	2	3	4	5
	10. 创新能力	1	2	3	4	5

自我价值观 (C)	1. 健康心理状态	1	2	3	4	5
	2. 健康心理认知观	1	2	3	4	5
	3. 人际交往与沟通	1	2	3	4	5
	4. 乐于助人	1	2	3	4	5
	5. 关心他人	1	2	3	4	5
	6. 团队价值观	1	2	3	4	5
	7. 财富观	1	2	3	4	5
	8. 职业道德感	1	2	3	4	5
学术科研能力 (D)	1. 专业知识	1	2	3	4	5
	2. 英语知识	1	2	3	4	5
	3. 文献查找能力	1	2	3	4	5
	4. 知识运用能力	1	2	3	4	5
	5. 创造性思维能力	1	2	3	4	5
	6. 科研能力	1	2	3	4	5
	7. 文章撰写能力	1	2	3	4	5
	8. 学术交流能力	1	2	3	4	5
	9. 汇报演讲能力	1	2	3	4	5
	10. 仪器使用能力	1	2	3	4	5
	11. 实验结果分析能力	1	2	3	4	5
	12. 撰写报告能力	1	2	3	4	5

(二) 调查对象

2022年10月至12月,选取医学院校硕士研究生作为研究对象,抽样方法为方便抽样。纳入标准:(1)医学院校在读硕士研究生;(2)知情同意并自愿参加。排除标准:(1)因各种原因中断学业的硕士研究生;(2)经研究者解释后不能配合本研究者;(3)未完成问卷填写;(4)问卷存在明显逻辑问题。样本量计算:根据因子分析样本量计算方法^[22],以条目数的5~10倍作为研究样本量进行探索性因子分析(Exploratory Factor Analysis, EFA)和验证性因子分析(confirmatory factor analysis, CFA)^[23],假设失访率为20%,估算需要样本至少219例~438例。在问卷发放阶段,采用问卷星进行线上问卷调查。

(三) 统计学方法

数据采用SPSS 25.0统计软件进行分析,对于计量资料,符合正态分布采用 $\bar{X} \pm S$ 表示,若不符合正态分布则采用M(P25, P75)表示。对于计数资料,则用率或构成比表示。采用独立样本t检验对量表条目的区分度进行评价。采用探索性因子分析和验证性因子分析对量表的效度进行评价;Cronbach's α 系数对量表的信度进行评价。取 $\alpha=0.05$ 作为检验水准,以 $P < 0.05$ 表示差异具有统计学意义。

二、结果

(一) 预调查

正式调查开始之前,通过方便抽样选取医学院校20名硕士研究生作为预调查对象,面对面发放纸质问卷。预调查对象基

本特征如下:男8名(40%),女12名(60%);中共党员4名(20%),共青团员14名(70%),群众2名(10%);专业型10名(50%),学术型10名(50%);研一5名(25%),研二7名(35%),研三8名(40%);取得职业医师/技师资格证5名(25%),未取得职业医师/技师资格证15名(75%)。问卷首页明确标注了本次调查的研究目的、意义及详细填写说明,并着重声明问卷填写的匿名性、保密性与自愿性。问卷填写完成后,当场核查问卷完整性,确认无误后即时收回,有效避免数据缺失。问卷信度结果分析显示,量表总的Cronbach's α 系数为0.979,量表内部一致性信度可靠。同时,通过对预调查对象的反馈收集发现,所有参与者均认为量表各条目语义表述清晰、无歧义,内容易于理解。

(二) 正式调查

1. 调查对象基线特征

正式调查共回收问卷478份,其中有效问卷469份,有效率98.12%。具体来看,调查对象中男性167(35.61%)名,女性302(64.39%)名;调查对象平均年龄为 (24.15 ± 2.50) ,年龄段主要集中在19~24岁(337, 71.86%);政治面貌以共青团员为主(337, 71.86%);就入学方式而言,调查对象大多数通过统考入学(462, 98.51%);且研究生院校为普通院校(461, 98.29%)居多;专业型与学术型硕士占比分别为33.69%, 66.31%;在年级分布方面,以一年级研究生为主,共357人(占比76.12%),二、三年级研究生占比相对较低。详见表2。

表2: 调查对象的基本情况(N=469)

基本信息	分类	人数(n)	构成比(%)
性别	男	167	35.61
	女	302	64.39
年龄	19~24	337	71.86
	25~29	113	24.09
	30以上	19	4.05
	中共党员	105	22.39
政治面貌	共青团员	337	71.86
	群众	26	5.54
	其他	1	0.21
本科毕业院校	985/211院校	24	5.12
	普通院校	445	94.88
研究生入学方式	统考	462	98.51
	普通推免	7	1.49
研究生院校	985/211院校	8	1.71
	普通院校	461	98.29
研究生学位	专业型	158	33.69
	学术型	311	66.31
	研一	357	76.12
	研二	81	17.27
年级	研三	31	6.61

2. 量表信度分析

选用Cronbach's α 系数法进行信度分析,结果见表3,总体Cronbach's α 系数为0.975,各维度Cronbach's α 系数均大于0.9,表明量表的信度高。

表3：医学院校研究生胜任力评价量表信度评价	
维度	Cronbach's α 系数
政治思想素质	0.966
个性特征	0.959
自我价值观	0.947
学术科研能力	0.965
医学院校研究生胜任力评价量表	0.975

3. 量表区分度分析

通过临界值比较的方法，按问卷总得分前27%和后27% 分位数的分值，划分出高分组和低分组，并进行独立样本 t 检验，以测试条目的敏感性和区分度。如果每个条目在高低分组的得分均值之间的差异具有统计学意义（ $P < 0.05$ ），则说明该条目具有较高的敏感性和区分度。反之，则考虑删除该条目。本研究共收集469份有效问卷，按总分排序后，前126份为高分组，后126份为低分组，共纳入252名研究生。独立样本 t 检验结果表明，高低分组在所有35个条目上的得分均存在显著差异（ $P < 0.001$ ），见表4，因此量表条目区分度良好，全部35个条目均可保留。

表4：低分组与高分组的独立样本 t 检验结果

条目	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值	条目	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
A（政治思想素质）			C3	-14.466	< 0.001
A1	-10.453	< 0.001	C4	-15.430	< 0.001
A2	-10.286	< 0.001	C5	-16.634	< 0.001
A3	-9.160	< 0.001	C6	-15.293	< 0.001
A4	-12.832	< 0.001	C7	-17.356	< 0.001
A5	-9.422	< 0.001	C8	-11.894	< 0.001
B（个性特征）			D（学术科研能力）		
B1	-21.373	< 0.001	D1	-18.090	< 0.001
B2	-20.389	< 0.001	D2	-14.723	< 0.001
B3	-21.345	< 0.001	D3	-16.053	< 0.001
B4	-21.398	< 0.001	D4	-18.135	< 0.001
B5	-21.351	< 0.001	D5	-21.172	< 0.001
B6	-23.815	< 0.001	D6	-20.190	< 0.001
B7	-21.370	< 0.001	D7	-16.697	< 0.001
B8	-16.910	< 0.001	D8	-18.265	< 0.001
B9	-13.721	< 0.001	D9	-17.546	< 0.001
B10	-21.244	< 0.001	D10	-14.988	< 0.001
C（自我价值观）			D11	-17.028	< 0.001

表7：探索性因子分析总方差解释

因子	初始特征值			提取载荷平方和			旋转载荷平方和		
	特征值	方差贡献率 %	累计贡献率 %	特征值	方差贡献率 %	累计贡献率 %	特征值	方差贡献率 %	累计贡献率 %
1	19.201	54.861	54.861	19.201	54.861	54.861	9.199	26.282	26.282
2	4.325	12.357	67.218	4.325	12.357	67.218	6.744	19.268	45.550
3	1.799	5.141	72.359	1.799	5.141	72.359	6.251	17.861	63.411
4	1.746	4.989	77.247	1.746	4.989	77.247	4.878	13.937	77.347

表8：各公因子旋转后的成分矩阵

条目				
	1	vc	v	4
D4 能综述中、英文学术文献，传播和应用知识	0.848			
D6 运用科研的方法进行相关医学研究	0.846			

C1	-20.201	< 0.001	D12	-18.972	< 0.001
C2	-12.062	< 0.001			

4. 量表内容效度分析

对二轮专家小组座谈会中的打分结果进行统计，得出各条目内容效度 I-CVI 为 0.83~1.00；政治思想素质、个性特征、自我价值观和学术科研能力 4 个维度 I-CVI 分别为 0.88、0.90、0.86、0.91；量表 S-CVI 为 0.91，详见表 5。

表5：医学院校硕士研究生胜任力量表内容效度（N=469）

	政治思想素质	个性特征	自我价值观	学术科研能力	医学院校硕士研究生胜任力评价量表
I-CVI/ S-CVI	0.86	0.88	0.87	0.86	0.87 ^a

注：“a”表示 S-CVI。

5. 结构效度分析

（1）探索性因子分析

探索性因子分析采用最大正交旋转主成分法对量表的条目进行分析。选择因子载荷量较高的条目，考虑删除载荷量小于 0.4 的条目。在开展探索性因子分析前，需先通过 KMO 检验与 Bartlett 球形检验判断数据是否适合因子分析。结果显示，KMO 值为 0.970，Bartlett 球形度检验中 $\chi^2 = 19110.476$ ， $P < 0.001$ ，见表 6，表明本研究数据适合做因子分析。采用主成分分析和最大方差法旋转进行因子分析，共提取出 4 个公因子，对总体方差的累计贡献率为 77.347%，见表 7。量表中 35 个条目的因子载荷均 ≥ 0.4 ，所有条目均予以保留；其中条目 B4、B6、B7、B8、B9、C1 出现双载荷 ≥ 0.4 的情况，其中条目 B4、B6、B7 和 C1 在原维度因子载荷更大，故维持在原维度；条目 B8 “有团队意识与合作精神”与条目 B9 “诚实守信”在个性特征和自我价值观维度上因子载荷均 > 0.4 ，且高值载荷非原维度，经讨论，认为团队合作精神和诚实守信更契合个性特征维度的内涵，故仍将其归属于个性特征维度。公因子的命名与事先量表设计中维度命名一致，即政治思想素质、个性特征、自我价值观和学术科研能力。详见表 8。

表6：KMO 和巴特利特检验

KMO 取样适切性量数		0.970
巴特利特球形度检验	近似卡方	19110.476
	自由度	595
	显著性	< 0.001

D5 能提出问题、假设，培养创造性思维和创新能力的	0.843	
D11 具备实验结果的统计分析能力	0.817	
D7 积极撰写并发表科研文章	0.812	
D2 熟练掌握英语，并能很轻松的阅读英文文献	0.809	
D9 参加学术会议发言或进行壁报展示	0.806	
D12 具备工作报告（如病历、流调报告、检验结果报告）撰写能力	0.791	
D8 积极参加国内外学术交流会议	0.774	
D10 具备实验室常规仪器的使用与操作的能力	0.716	
D3 熟练掌握各种文献检索网站（如 pubmed 数据库、中国知网、维普数据库等）	0.712	
D1 掌握所学专业及其他医学相关知识	0.683	
C3 您认为掌握与他人沟通的技巧是很有必要的	0.831	
C6 您认为团队合作是必要的，众人拾柴火焰高，团队的力量大于个人	0.816	
C8 您能遵守医学职业的基本道德规范、伦理原则和法律责任	0.809	
C4 您认为应该力所能及地去帮助别人，认为参加志愿服务是光荣的	0.784	
C2 您认为谁都会有情绪低沉的时候，有负面情绪是一种正常现象	0.776	
C5 您总是能顾及到别人的感受，而不是只考虑自己	0.708	
B9 诚实守信	0.636	0.419
B8 有团队意识与合作精神	0.585	0.532
C7 您认为金钱只是人生的一部分，而不应该是人生的终极目标	0.580	
B2 有较强的自我心理调节能力，总能让自己保持情绪稳定		0.753
B6 您总是能合理安排自己的时间，能按照时间规划完成计划	0.416	0.752
B4 总是能抵挡住很多诱惑（手机，电脑，网络等），专注于手头的任务	0.440	0.742
B3 总是保持积极乐观的生活态度，对生活充满激情与活力		0.715
B1 自信从容，不畏难，不退缩，喜欢接受有挑战性的任务		0.706
B5 从不斤斤计较，愿意花费时间和精力在公共事务上		0.691
B10 有较强创新能力和自我发展能力		0.689
B7 有一定的抗挫折能力	0.426	0.680
C1 您常常处于一种心情愉悦，轻松的状态	0.491	0.550
A5 遵守学校规章制度及道德规范		0.878
A3 反对封建迷信，拒绝邪教		0.877
A2 政治言论及思想表现正确		0.866
A1 传承民族精神，弘扬爱国主义，承担国家使命和社会责任		0.858
A4 积极主动参与学校组织的各种义务性政治活动		0.780

（2）验证性因子分析

基于探索性因子分析的结果，采用极大似然法（Maximum Likelihood Estimation, MLE）评估因素与观察指标之间的拟合程度，依据修正条目对量表进行修正，验证量表的有效性，标准化拟合路径见图1，该量表共包含四个潜变量：政治思想素质、个性特征、自我价值观、学术科研能力；四个潜变量之间皆呈正相关，且各潜变量之间的差异均有统计学意义（ $P < 0.05$ ），表明维度划分有意义。该量表的各种拟合度指标良好，均达到了适配标准以上，如 $c2/df$ 为 2.657（拟合好）、近似误差均方根（RMSEA）为 0.060（拟合较好）、拟合优度指数（GFI）为 0.853（拟合较好）、均方根残差（RMR）为 0.048（拟合好）等，且各因子与条目之间均显著相关（ $P < 0.001$ ），以上指标均在标准范围内，提示量表拟合度良好，详见表9。此外，各因子的平均提取方差值（AVE）均大于 0.5 且组合信度值 CR 均大于 0.7，也表明量表的聚合效度和组合信度良好，详见表 10。

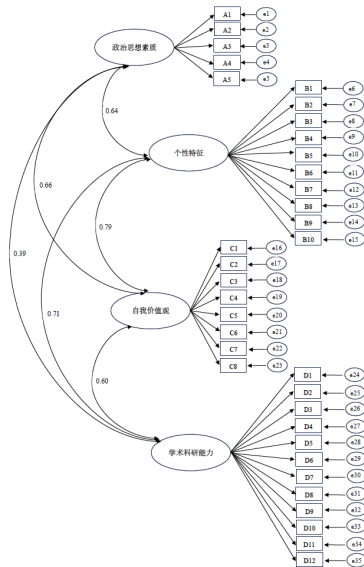


图 1：医学院校硕士研究生胜任力量表结果方程模型标准化路径图（N=469）

表9：医学院校硕士研究生胜任力量表拟合指数（N=469）				
指标类型	拟合指数	判断准则	模型检验结果	是否符合标准
绝对拟合指数	c ² 指标	P < 0.05	< 0.001	达到显著水平
	c ² /df	< 3拟合更好	2.657	拟合好
	近似误差均方根（RMSEA）	< 0.05拟合好；0.08–0.10拟合一般	0.060	拟合较好
	拟合优度指数（GFI）	取值在0–1之间，> 0.9拟合好	0.853	拟合较好
	调整的拟合优度指数（AGFI）	取值在0–1之间，> 0.9拟合好	0.819	拟合较好
	均方根残差（RMR）	< 0.05拟合好；< 0.08一般	0.048	拟合好
	规范拟合指数（NFI）	取值在0–1之间，> 0.9拟合好	0.931	拟合好
相对拟合指数	增值拟合指数（IFI）	> 0.9	0.956	拟合好
	不规则拟合指数（TLI）	> 0.9	0.948	拟合好
	比较拟合指数（CFI）	取值在0–1之间，> 0.9拟合好	0.955	拟合好
表10：医学院校硕士研究生胜任力量表 AVE 与 CR 指标（N=469）				
	政治思想素质	个性特征	自我价值观	学术科研能力
AVE	0.853	0.700	0.704	0.694
CR	0.967	0.959	0.950	0.964

三、讨论

随着科教兴国战略推进与医学高等教育发展，医学院校硕士研究生队伍持续壮大。在学术繁荣的大环境下，对医学院校研究生综合素质能力的培养提出了新的要求^[24,25]。然而，目前我国在医学院校研究生综合素质评价方面的研究相对有限^[26,27]，因此，本研究构建并验证医学院校研究生胜任力量表，对完善评价体系、提升培养实效具有重要价值。

信度与效度是衡量评价量表质量的核心指标，决定量表数据的可靠性与结果的有效性。本研究通过分析量表的 Cronbach’s α 系数来评估信度，结果显示整体 Cronbach’s α 系数为 0.975，而四个维度中最低的 Cronbach’s α 系数为 0.947，表明量表内部条目间一致性强。因此，可以认为医学院校硕士研究生胜任力评价量表具有良好的信度^[28,29]。在效度分析方面，内容效度和结构效度的检验也得以采用。内容效度的结果显示 S-CVI 为 0.91，I-CVI 在 0.83 至 1.00 之间，表明实际测量内容与量表设计内容高度吻合，提示量表具有较好的内容效度。在结构效度分析中，探索性因子分析出 4 个公因子，与量表预设的四个维度（政治思想素质、个性特征、自我价值观和学术科研能力）一致，且累计方差解释率达到了 77.247%，说明 4 个公因子可有效解释量表大部分信息变异。在验证性因子分析中，通过极大似然法测试因素与观察指标之间的拟合程度，经过模型修正后，结果显示路径系数图未出现异常参数，回归结果显示路径系数的 P 值均小于 0.05，路径系数的正负号符合实际逻辑，符合拟合标准^[30]，这表明本研究的量表结构具有较好的拟合度，结构效度也较高。

医学院校研究生的培养质量直接关系我国未来医疗卫生事业

发展格局，是推进健康中国战略、建设社会主义医疗强国的关键环节。本研究以政治思想素质、个性特征、自我价值观、学术科研能力为核心维度，系统评估医学院校研究生胜任力水平。结果显示，研究生的政治素质与个性特征、自我价值观和学术科研能力之间存在正相关关系，相关系数分别为 0.64、0.66 和 0.39，表明政治素质主要受个性特征和价值观的影响，即个性特征越鲜明（如责任意识、奉献精神）、自我价值观越坚定（如职业使命感、社会责任感），其政治思想素质越易形成正向发展态势。此外，研究生的科研能力与个性特征和价值观之间也存在正相关关系，相关系数分别为 0.71 和 0.60，说明研究生的科研创新能力不仅依赖专业知识储备，更受个性特征与价值观的深层驱动。因此，为进一步提高医学院校研究生的政治素质和科研能力，各大医学院校应注重培养研究生的个性特征，包括提高研究生的奉献能力、合作能力和抗压能力。此外，还应注重加强研究生的价值观，包括提高职业道德观、团队道德观和专业能力等。为了进一步提升医学院校研究生的综合胜任力，各大医学院校应以培养研究生的科研能力和政治素质为基础，优化和加强研究生培养方案，将研究生培养与新时代国家医疗体系所需的目标人才相结合，为新时代社会主义医疗体系的建设提供人才支撑。

综上所述，我国医学院校研究生的总体胜任力水平有待进一步提高。培养单位应以研究生胜任力的影响因素为关注点，积极推进研究生能力素质培养工作。本研究虽构建可靠量表并揭示维度关联，但未深入分析胜任力具体影响因素。后续可扩大样本、丰富结构，通过回归分析等深入探究胜任力的关键影响因素，为医学院校研究生胜任力提升提供更精准的策略建议。

参考文献

[1] 程怀志, 郭斌, 张梨. 浅析医学研究生教育的发展趋势 [J]. 大庆社会科学, 2021(05):147–150.

[2] Kovacs G L, Ludany A, Koszegi T, et al. Graduate and postgraduate state university education of laboratory specialists in Hungary: medical doctors, pharmacists and laboratory analysts[J]. Biochemia Medica, 2011, 21(1):22–29.

[3] 刘仕勇, 杨辉. 医学研究生临床科研创新能力的培养 [J]. 西北医学教育, 2012, 20(1):51–53.

- [4] 黄奇帆. 伟大复兴的关键阶段——学习《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》的认识和体会 [J]. 人民论坛, 2021(15):6-10.
- [5] 本刊特邀评论员. 为健康中国建设和卫生健康事业发展提供科技支撑和人才保障 [J]. 人口与健康, 2022(09):1.
- [6] 刘晓冬, 王婷婷, 李艳梅, 单连慧. 公益类医学科院所科研人员胜任力模型的构建 [J]. 中国现代医生, 2022, 60(31):143-145.
- [7] 李双贵. 基于职位特征的高校辅导员胜任力模型的构建 [J]. 职教通讯, 2017(10):68-72.
- [8] 孙荣霞. 基于胜任力模型的人力资源管理专业实践教学体系研究 [J]. 中国成人教育, 2013(19):188-191.
- [9] 卞丽芳, 王薇. 构建护理领域胜任力模型的研究进展 [J]. 护理与康复, 2013, 12(2):126-128.
- [10] 康高梅子. 论企业销售人员胜任力模型的构建 [J]. 市场周刊, 2021, 34(01):177-179.
- [11] 齐岳, 刘磊, 陶晓彤, 耿若绮. 资管新规背景下理财经理胜任力模型的构建与应用——以P银行为例 [J]. 改革与开放, 2020(15):11-19+25.
- [12] 张芊雪. 人力资源绩效管理体系构建: 胜任力模型视角 [J]. 中国集体经济, 2019(01):118-119.
- [13] 张阳. 中国临床医学专业本科毕业生岗位胜任力模型构建与现状调查研究 [D]. 中国医科大学, 2019.
- [14] 王超, 黄玉婷, 王丽琴. 口腔医学生岗位胜任力模型的构建 [J]. 世界最新医学信息文摘, 2018, 18(07):170.
- [15] 李娟. 医学类教师岗位胜任力模型的构建研究 [J]. 赣南医学院学报, 2016, 36(05):678-681.
- [16] 刘淑云, 肖茂春, 毛雪梅等. 耳鼻咽喉科学专业学位论文研究生临床技能岗位胜任力模型构建与应用 [J]. 教育现代化, 2019, 6(24):33-35.
- [17] 王丽丹, 汪娟, 周晓磊等. 临床医学专业学位论文研究生胜任力模型构建与分析 [J]. 齐齐哈尔医学院学报, 2016, 37(30):3822-3825.
- [18] 胥娇, 王志博, 张东华, 董靖竹, 周佳, 薄红. 临床医学专业学位论文研究生职业胜任力模型的构建与综合评价 [J]. 中国高等医学教育, 2017(02):126-127.
- [19] 尹若兮. 新医科背景下基于岗位胜任力的临床医学专业学位论文研究生培养路径构建研究 [J]. 卫生职业教育, 2021, 39(07):1-2.
- [20] 卢尚坤, 王宏彬. 新商科背景下高校研究生导师胜任力结构要素研究 [J]. 对外经贸, 2022(07):111-113+147.
- [21] 张小燕, 杜合英, 钟丽华, 张世华. 消毒供应中心护士岗位胜任力量表的构建 [J]. 护士进修杂志, 2022, 37(19):1771-1774+1778.
- [22] 吴明隆. 问卷统计分析实务——SPSS操作与应用 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2009: 207-208.
- [23] Gregory ME, Nyein KP, Scarborough S, et al. Examining the Dimensionality of Trust in the Inpatient Setting: Exploratory and Confirmatory Factor Analysis[J]. J Gen Intern Med. 2022;37(5):1108-1114.
- [24] 杜育红, 赵冉. 新时代科教兴国战略: 内在逻辑、现实证据与实现路径 [J]. 教育与经济, 2023, 39(02):3-8+19.
- [25] 袁娜, 焦楠, 黄宁宇, 叶同乐, 胡鑫悦, 翟双庆. 中医师岗位胜任力模型构建研究 [J]. 中医教育, 2022, 41(06):37-40.
- [26] 刘丽芳. 医学院校教学质量评价的现状与思考 [J]. 中国高等医学教育, 2016(11):3-4.
- [27] 王哲, 梁红霞. 大学生体育获得感模型及测评体系构建——基于结构方程模型分析 [J]. 湖北体育科技, 2022, 41(07):629-635.
- [28] 李灿, 辛玲. 调查问卷的信度与效度的评价方法研究 [J]. 中国卫生统计, 2008(5):541-544.
- [29] Cook DA, Beckman TJ. Current concepts in validity and reliability for psychometric instruments: theory and application[J]. Am J Med. 2006 Feb;119(2):166.e7-16.
- [30] Flora D B, Flake J K. The purpose and practice of exploratory and confirmatory factor analysis in psychological research: Decisions for scale development and validation[J]. Canadian Journal of Behavioural Science, 2017, 49(2):78-88.

基于注意力机制的 CEEMDAN-CNN-LSTM 股指价格预测

詹志滨, 张振华*

广东外语外贸大学 数学与统计学院, 广东 广州 510006

DOI:10.61369/ASDS.2025100010

摘 要 : 针对股价的高频不确定性、长期记忆性, 本研究提出了基于注意力机制特征赋权和自适应分解技术的 CEEMDAN-CNN-LSTM 神经网络模型。首先, 使用自适应分解技术 (CEEMDAN) 进行模态分解, 将原始时间序列分解为高低频段和趋势项。其次, 利用卷积神经网络 (CNN) 和长短期记忆神经网络 (LSTM), 独立对高低频信息进行信号提取和特征学习, 并通过注意力模块 (AM) 进行信号特征的权重自适应分配。最后, 集成各频段预测值作为最终结果。本研究选取沪深 300 和中证 500 股票指数进行实证分析, 结果显示, 基于注意力机制的 CEEMDAN-CNN-LSTM 模型, 既能避免突变信号的遗漏, 专注于序列依赖关系, 同时又能有效提取共性特征, 避免过拟合与预测结果偏右等问题。与其他主流预测模型相比, 其预测精度更高, 预测误差显著降低, 泛化能力更强。

关 键 词 : 注意力机制; CEEMDAN; CNN; LSTM; 股票指数

Attention-based CEEMDAN-CNN-LSTM Model for Stock-Index Price Forecasting

Zhan Zhibin, Zhang Zhenhua*

School of Mathematics and Statistics, Guangdong University of Foreign Studies, Guangzhou, Guangdong 510006

Abstract : To capture the high-frequency uncertainty and long-memory characteristics of stock-index movements, we propose an attention-based CEEMDAN-CNN-LSTM neural network that synergistically combines adaptive decomposition with feature-weight learning. First, the complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (CEEMDAN) is employed to disentangle the raw price series into high-frequency, low-frequency and trend components. Second, a convolutional neural network (CNN) and a long short-term memory network (LSTM) are trained separately on each frequency band to extract local patterns and long-range dependencies, while an attention module (AM) autonomously re-weights the extracted features according to their instantaneous relevance. Finally, the band-specific forecasts are aggregated to produce the ultimate prediction. Empirical experiments on the CSI300 and CSI500 indices demonstrate that the proposed model retains abrupt signals, preserves sequential dependence, and concurrently learns common factors without suffering from right-skewed or over-fitted forecasts. Compared with five mainstream benchmarks, the proposed approach significantly reduces prediction error and exhibits superior generalisation capability.

Keywords : Attention Mechanism; CEEMDAN; CNN; LSTM; stock index

引言

全球经济风云变幻, 我国经济正处于新旧动能转换的关键节点。习近平总书记强调金融安全关乎国家安全, 股票市场作为金融体系核心枢纽, 价格波动影响深远。它不仅关乎系统性金融风险防范, 对投资者而言, 精准预测股价更是实现资产增值、规避风险的核心要务。而机器学习技术凭借海量数据处理与复杂模式识别能力, 能深度挖掘市场多维度信息, 精准捕捉股价波动规律, 与股价预测需求高度契合, 为相关研究者开辟了科学决策新路径。

基金项目: 本文获广东省哲学社科规划项目 (No.GD24CTS03); 语言工程与计算广东省重点实验室招标项目 (No.LEC2020ZBKT002) 支持。

作者简介: 詹志滨, 广东外语外贸大学数学与统计学院, 硕士研究生, 研究方向: 时间序列分析、数据挖掘。

通讯作者: 张振华, 广东外语外贸大学数学与统计学院, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向: 统计机器学习。

在特征学习上,学者们已经深刻意识到长短期记忆神经网络(LSTM)能够克服股价预测长期依赖性,但对如何充分挖掘有效特征这一核心问题,学者们展开了不同的研究。肖田田为挖掘股票间价格的潜在影响作用,通过K-means聚类对同类股票的价格趋势进行共性特征挖掘,再输入到目标股票价格的LSTM预测神经网络中,揭示了同类股票股价间互相预测的可行性^[1]。马致远为解决传统量化模型的多维度因子筛选问题,分别提出了基于主成分分析和等距映射算法改进的LSTM模型,提高了LSTM的预测性能^[2]。沈山山和李秋敏就时间特征提取角度,利用卷积神经网络(CNN)提取时间维度特征,并用注意力机制(AM)自动赋权,提高LSTM的预测效果^[3],而刘芸从LSTM结构上进行调整,搭建基于AM的双向长短期记忆网络(BiLSTM)模型来预测股价崩盘风险^[4]。

不过,随着对金融市场宏观结构和机器学习的深入研究,学者们开始将信号处理和深度学习等跨学科技术结合起来,构建混合或集成模型。比如刘铭和单玉莹基于经验模态分解(EMD)和LSTM结合的模型,对上证指数、深证指数和沪深300进行了预测,给出了不同波动性下的不同股指预测模型^[5];再如黄后菊和李波将信号去噪领域的变分模态分解(VMD)与麻雀搜索优化算法(CSSA)相结合,改良优化了LSTM股票价格预测模型^[6];又如贺毅岳等人将互补集成经验模态分解(CEEMD)与LSTM结合,重新提出一种优化预测模型^[7]。

为了显著提升预测精度并增强模型的稳健性,本研究针对股指时间序列数据的高复杂性,在CEEMD、CNN、LSTM的基础上^[8]改进分解技术并加入注意力机制模块,构造一种融合自适应分解和卷积神经网络-长短期记忆网络-注意力机制模块的混合模型(CEEMDAN-CNN-LSTM-AM)。模型构建的流程如下:首先,利用CEEMDAN技术对原始股指收盘价进行深入的模式分解,解构出k个反映局部特性的固有模式函数(IMF)分量,有效降低数据的内在复杂性。其次,针对每个IMF分量,独立构建并运用CNN提取时空节点特征,将特征传入LSTM进行预测,并通过注意力模块进行信号特征的权重自适应分配。最后,经由全连接层的处理,输出各IMF的预测结果,集成加总出最终股指收盘价的预测值。通过沪深300和中证500指数的实证分析,结果表明该混合模型优于其它预测模型,在预测精度、适用性以及模型泛化能力方面均表现出明显的优势,展现出强大的特征分解和提取能力。

一、研究方法

(一) 自适应分解 CEEMDAN

CEEMDAN是一种自适应信号分解算法,是对传统经验模态分解(EMD)和集合经验模态分解(EEMD)的改进,特别适用于非线性、非平稳信号的分析^[9]。该算法在每次分解阶段加入自适应噪声,并通过逐层平均IMF分量,消除重构造误差,提高分解一致性和稳定性。其算法步骤如下:

1. 对原始信号添加高斯白噪声,构造含噪信号:

$$x_i(t) = x(t) + c_i s_i(t) \quad (1)$$

其中, c_i 为高斯白噪声权值系数; $s_i(t)$ 为第 i 次处理时产生的高斯白噪声。

2. 对每个含噪信号进行EMD分解,提取第一层IMF并计算其均值:

$$IMF_1(t) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K IMF_{i1}(t) \quad (2)$$

其中, $IMF_{i1}(t)$ 表示CEEMDAN分解得到的第1个模式分量; $r_1(t)$ 表示第1次分解后的余量信号:

$$r_1(t) = x(t) - IMF_1(t) \quad (3)$$

3. 对余量信号的重复上述分解过程,逐层提取IMF,直到残差为单调函数或满足停止条件。公式表示为:

$$r_j(t) = \frac{1}{K-1} \sum_{i=1}^{K-1} (r_{j-1}(t) - IMF_{ij}(t) + c_{j-1} \delta_{j-1}(t)) \quad (4)$$

其中, $IMF_{ij}(t)$ 表示CEEMDAN分解得到的第 j 模式分量;

$c_{j-1} \delta_{j-1}(t)$ 表示对序列进行EMD分解后的第 $j-1$ 个IMF分量; c_{j-1} 表示CEEMDAN对第 $j-1$ 阶段余量信号加入噪声的权值系数; $r_j(t)$ 表示第 j 阶段余量信号。

4. 输出模式函数,得到若干IMF分量和一个最终残余项,完成信号分解。总原始信号的分解过程可表示为:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n IMF_i(t) + r_n(t) \quad (5)$$

(二) 卷积神经网络 CNN

卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)通过离散卷积与层级非线性变换,能够高效捕获数据的局部相关性与平移不变特征,已广泛应用于计算机视觉、自然语言处理及金融时间序列建模^[10]等领域。其典型拓扑由交替堆叠的卷积层与池化层构成,并在卷积后引入激活函数以赋予网络非线性表达能力。

1. 卷积层

将卷积核视为在时序或图像平面上滑动的局部感知器,对输入片段执行加权求和与偏置后,经激活函数输出特征图。为缓解梯度消失并降低计算开销,通常采用ReLU(Rectified Linear Unit)作为非线性映射:

$$y_j^l = \max \left\{ 0, \sum_{i \in M_j} x_i^{l-1} \otimes W_{ij}^l + b_j^l \right\} \quad (6)$$

其中, x_i^{l-1} 为第 $(l-1)$ 层的第 i 个特征图, W_{ij}^l 与 b_j^l 分别表示第 l 层的第 j 个卷积核的权重与偏置, \otimes 代表离散卷积运算, y_j^l 为经过ReLU后的输出特征图。

2. 池化层

在保留显著特征的同时降低特征图分辨率,进而缩减参数量

并提升模型泛化性能。本文采用最大池化：

$$p^l = \text{Maxpool}(y^l) \quad (7)$$

其中， p^l 为池化后的输出，Maxpool 以不重叠窗口取最大值，实现局部特征的二次抽象与降维。

(三) 长短期记忆网络 LSTM

长短期记忆网络 (Long Short-Term Memory, LSTM) 是一类专门为捕获长距离时序依赖而设计的循环神经网络 (RNN) 变体。针对传统 RNN 在反向传播过程中因梯度指数级收缩或膨胀而导致的梯度消失 / 爆炸难题，LSTM 通过引入记忆单元与门控机制 (输入门、遗忘门、输出门) 对信息流进行显式且可学习的控制，从而稳定地建模长期动态。

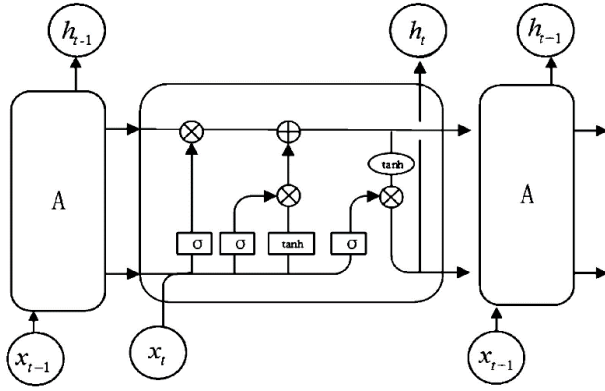


图1: LSTM 网络结构展开图

图1为 LSTM 的网络结构展开图，其中 x_t 表示当前 t 时刻的输入， h_t 表示当前 t 时刻细胞的状态值，其时间步 t 的前向计算可概括为：

$$i_t = \sigma(W_i * [h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (8)$$

$$f_t = \sigma(W_f * [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (9)$$

$$o_t = \sigma(W_o * [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (10)$$

$$C_t = \tanh(W_c * [h_{t-1}, x_t] + b_c) \quad (11)$$

$$C_t = f_t \odot C_{t-1} + i_t \odot C_t' \quad (12)$$

$$h_t = o_t \odot \tanh(C_t) \quad (13)$$

其中， i_t 、 f_t 、 o_t 分别表示输入门、遗忘门与输出门的激活值； C_t' 为候选记忆， C_t 为更新后的细胞状态； $W*$ 与 $b*$ 为对应门的可学习参数； \odot 代表逐元素乘积， $\sigma(\cdot)$ 与 $\tanh(\cdot)$ 分别为 Sigmoid 与双曲正切激活函数。该结构通过门控向量对细胞状态进行选择保留、更新与输出，在保持端到端可微的同时，显著增强了网络对长程依赖的建模能力。

(四) 注意力机制 AM

注意力机制 (Attention Mechanism, AM) 通过可学习权重模拟人脑的选择性聚焦过程，对输入序列中的关键信息予以强化。给定输入序列 $H=[h_1, \dots, h_T]$ 生成查询 Q 与共享键值 h (键值共享简化)，随后计算相关性得分 S ，并经 Softmax 归一化得到

注意力权重 A ，最终输出上下文向量 $C = A \cdot h$ ，实现动态加权聚合。其计算流程如下：

$$S = v \cdot \tanh(W_q Q + W_k h), v \in R^{d_h} \quad (14)$$

$$A = \alpha_{t,d} = \text{softmax}(S) = \frac{\exp(e_{t,d})}{\sum_i \exp(e_i)} \quad (15)$$

$$C = Ah = \sum_t \sum_d \alpha_{t,d} \cdot h_{t,d} \quad (16)$$

其中 S 表示时刻 t 查询 Q 与共享键值 h 的相关性得分； W_q 、 W_k 为可训练权重矩阵； v 为可学习向量 (维度与隐藏层维度 d_h 一致)，通过向量 - 内积将矩阵压缩为标量得分； $\alpha_{t,d}$ 为归一化后的注意力权重； C 为融合全局信息的上下文向量。

在 CEEMDAN-CNN-LSTM 框架中，注意力模块置于 LSTM 输出端，对通道 - 时间二维特征图 $H \in R^{T \times D}$ 的每一位置 (t, d) 计算 softmax 权重 $\alpha_{t,d}$ ，并执行逐点加权，所得上下文向量 C 经展平后输入回归层。该机制沿通道 - 时间二维平面自适应分配权重，动态强化关键通道及关键时间窗的贡献，从而显著提升模型预测精度。

(五) CEEMDAN-CNN-LSTM-AM 组合框架

图2给出了面向股价序列的建模流程，具体步骤如下：

1. 自适应分解：利用 CEEMDAN 将原始序列分解为若干本征模态函数 (IMFs)，完整保留从高频噪声到低频趋势的多尺度信息。
2. 标准化：对各 IMF 序列进行归一化处理，以消除量纲差异。
3. 分量建模：对每个 IMF 独立构建 CNN-LSTM-AM 子模型，依次通过卷积层提取局部特征、LSTM 捕获长期依赖、注意力机制强化关键时序贡献，并经由全连接层输出单步预测结果。
4. 加性重构：将各 IMF 的预测值按时间步累加，得到最终股价预测序列，并通过逆标准化恢复原始尺度。
5. 性能评估：采用多误差指标与基线模型对比，验证框架有效性。

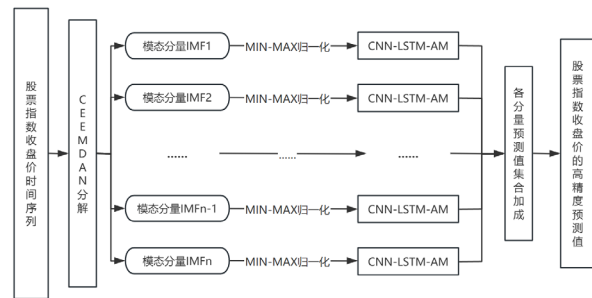


图2: 股指分解预测建模流程图

二、实证分析

(一) 数据来源

本研究使用的实验数据来源于锐思数据库 (<https://www.resnet.com/db>)，具体包括沪深300指数和中证500指数自2005

年1月4日至2024年7月1日的收盘价数据，共计4734个交易日。取前80%作为训练集，后20%作为测试集。

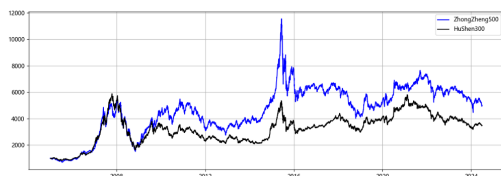


图3：沪深300股指与中证500的收盘价走势图

（二）数据预处理

本研究采用滑动窗口的方式，将选取过去30个交易日的沪深300指数收盘价来预测下一个交易日的收盘价，分别创建出3787个训练样本和947个测试样本。训练样本用于训练各模型的结构与参数，而测试样本则用于评估模型的预测性能。在每次训练模型前，为了提高模型的拟合精确度，需要先对输入的序列数据进行Min-Max归一化处理，消除量纲的影响。

（三）参数设置

本研究所采用的CEEMDAN-CNN-LSTM-AM模型参数及其对比模型参数均采用网格搜索进行超参数寻优，最终自研模型的主要参数设置如下：批处理样本规模为32，迭代次数设置为50，生成器选择Adam优化器，学习率为0.001，损失函数为均方误差MSE，其余各模型的网络层超参数如表1所示。

表1：各模型超参数设置

模型	超参数	取值
CNN-LSTM-AM	卷积层	1
	卷积核数	32
	卷积核大小	3
	其它隐藏层	2
	隐藏层神经元数	64
CNN-LSTM	卷积层	1
	卷积核数	32
	卷积核大小	3
	其它隐藏层	2
	隐藏层神经元数	128
LSTM	隐藏层	2
	隐藏层神经元数	128

其中，为充分验证CEEMDAN-CNN-LSTM-AM模型的预测效果，选取MLP、SVR、LSTM、CNN-LSTM、CNN-LSTM-AM等五种主流模型与CEEMDAN-CNN-LSTM-AM模型进行消融实验和对比实验。

（四）评价指标

为系统评估模型的预测精度，本文采用平均绝对误差（MAE）与均方根误差（RMSE）、绝对百分比误差（MAPE）三项指标。设 y_i 为第 i 个样本的实际观测值， \hat{y}_i 为对应预测值，则各指标定义如下公式17-19所示，上述指标取值越小，表明模型预测值与真实值之间的偏离程度越低，预测性能越优。

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (17)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (18)$$

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (19)$$

除上述指标外，进一步引入确定系数（ R^2 ）来衡量模型的整体拟合优度。 R^2 值越接近1表示模型拟合得越好。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (20)$$

（五）沪深300股指序列的CEEMDAN分解

从图4可以看出，沪深300指数被分解为9个固有模态函数（IMF）和1个残余项，从IMF1到IMF9的频率逐渐下降。IMF1至IMF4包含了大量高频信号，可能代表突发事件或者市场情绪对股价序列的影响，而IMF5至IMF9的噪声较少，更多地反映了序列本身的惯性趋势特征。由此来看，采用CEEMDAN分解可以有效提高复杂序列预测的精确性和准确性。

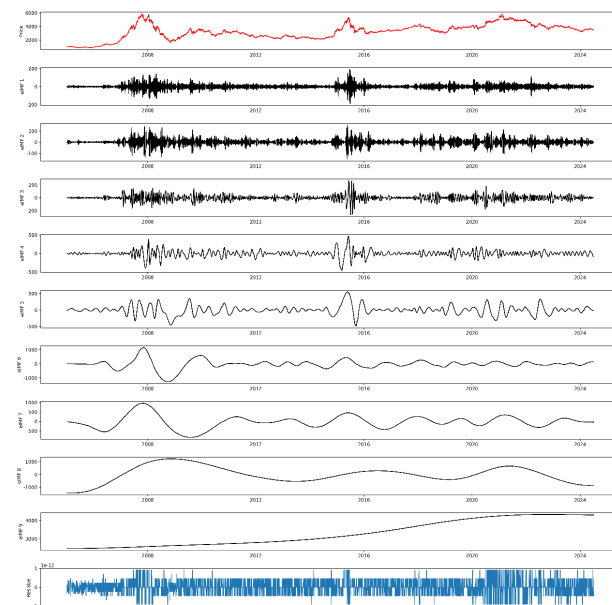


图4：沪深300股指序列CEEMDAN自适应分解结果

（六）沪深300的不同模型预测效果对比

图5给出了六组模型对沪深300在测试集上的预测效果图，相较于其它对比模型，CEEMDAN-CNN-LSTM-AM预测值与真实值的曲线更加贴合，预测滞后性和曲线右偏的问题得到显著改善，偏移程度最小，预测精度最高。不同模型的具体评价指标结果如表2所示。表2结果显示，CEEMDAN-CNN-LSTM-AM在所有指标上均显著优于其余五种模型。其MAE较CNN-LSTM-AM、CNN-LSTM、LSTM、MLP与SVR分别降低5.7%、36.2%、50.7%、43.8%与59.6%；RMSE分别减少17.0%、37.5%、46.6%、50.1%与64.6%；MAPE分别下降3.4%、34.1%、50.6%、40.8%与56.4%；决定系数 R^2 则分别提升1.0%、3.3%、5.3%、6.4%与14.8%。综合来看，CEEMDAN分解与注意力机制

的联合引入, 使该模型在股价预测任务中展现出更强的稳健性与更高的精度。

表2: 沪深300的不同模型评价结果

模型	MAE	RMSE	MAPE	R ²
CEEMDAN-CNN-LSTM-AM	78.320	91.081	1.831	0.979
CNN-LSTM-AM	83.066	109.721	1.896	0.969
CNN-LSTM	122.786	145.681	2.779	0.946
LSTM	158.973	170.472	3.711	0.926
MLP	139.427	182.409	3.092	0.915
SVR	193.886	257.069	4.203	0.831

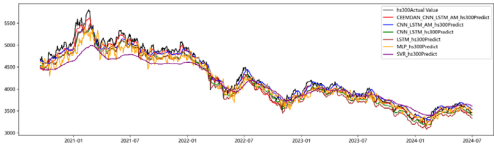


图5: 沪深300股指不同模型预测曲线图

(七) 中证500的不同模型预测效果对比

为了检验自研模型的稳健性和泛化能力, 本研究选取同一时间段的中证500指数, 进行相同的数据集处理和自适应分解, 进一步有效评估 CEEMDAN-CNN-LSTM-AM 模型的学习迁移能力。表3给出了六组模型在中证500指数测试集上的评价结果, 图6是不同模型的预测曲线对比图。

可以看到, 相较于沪深300, 中证500覆盖中盘成长股, 平均市值较小, 成分股中信息技术、工业、材料行业权重更高, 主要以成长型、高弹性为主, 跟踪的是高景气行业, 故中证500的整体波动幅度较大, 突变因素较多, 因此六组模型的学习拟合能力都有所下降。尽管如此, CEEMDAN-CNN-LSTM-AM 模型仍然能充分分解信号并提取关键特征, 显示出良好的预测性能, 可迁移能力和泛化能力都更为出色。

表3: 中证500股指的不同模型评价结果

模型	MAE	RMSE	MAPE	R ²
CEEMDAN-CNN-LSTM-AM	90.423	118.203	1.519	0.959
CNN-LSTM-AM	153.035	186.857	2.434	0.898
CNN-LSTM	188.371	216.705	2.992	0.863
LSTM	200.106	220.947	3.238	0.858
MLP	202.503	234.873	3.247	0.839
SVR	195.739	248.323	3.281	0.821



图6: 中证500股指不同模型预测曲线图

三、结束语

本研究提出多尺度深度预测框架 CEEMDAN-CNN-LSTM-AM。以沪深300为标的, 滚动窗口实验显示, 该模型全面碾压五种基线: 与次优的 CNN-LSTM-AM 相比, RMSE 降低 17.0%, MAE 下降 5.7%, MAPE 缩减 3.4%, R² 提高 1.0 个百分点至 0.979; 相较于传统 LSTM, RMSE、MAE、MAPE 分别锐减 46.6%、50.7%、50.6%, R² 提升 5.3 个百分点。结果表明, “分解-独立建模-注意力加权-重构”链路有效解耦复杂频率混叠, 显著抑制噪声并强化特征。该框架为高频风控与量化配置提供了精度更高、解释性更强的工具。

参考文献

[1] 肖田田. 基于 K-means-LSTM 模型的证券股价预测 [J]. 科技和产业, 2024, 24(03): 210-215. DOI: CNKI: SUN: CYK.0.2024-03-030.

[2] 马致远. 基于股票预测模型 LSTM 的降维比较 [J]. 科技和产业, 2025, 25(11): 8-16. DOI: CNKI: SUN: CYK.0.2025-11-002.

[3] 沈山山, 李秋敏. 基于注意力机制的 CNN-LSTM 短期股票价格预测 [J]. 软件, 2022, 43(02): 73-75. DOI: CNKI: SUN: RJZZ.0.2022-02-043.

[4] 刘荟. 基于深度学习 BiLSTM-Attention 模型的股价崩盘风险预测研究 [J]. 信息系统工程, 2025, (08): 146-149. DOI: CNKI: SUN: XXXT.0.2025-08-038.

[5] 刘铭, 单玉莹. 基于 EMD-LSTM 模型的股指收盘价预测 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学), 2021, 35(12): 269-276.

[6] 黄后菊, 李波. 基于 VMD-CSSA-LSTM 组合模型的股票价格预测 [J]. 南京信息工程大学学报, 2024, 16(03): 332-340.

[7] 贺毅岳, 李萍, 韩进博. 基于 CEEMDAN-LSTM 的股票市场指数预测建模研究 [J]. 统计与信息论坛, 2020, 35(06): 34-45.

[8] 丛敬奇, 成鹏飞, 赵振军. 基于 CEEMD-CNN-LSTM 的股票指数集成预测模型 [J]. 系统工程, 2023, 41(04): 104-116.

[9] 皇甫陈荫, 阮贺彬, 徐俊俊. 融合 CEEMDAN-CNN-LSTM 的风电机组多气象场景功率回归预测 [J]. 综合智慧能源, 2025, 47(09): 38-50.

[10] 朱婷, 颜七笙. 融合改进变分模态分解和 CNN-Bi LSTM-AM 的股价预测研究 [J]. 辽宁工业大学学报 (自然科学版), 2025, 45(02): 134-140. DOI: 10.15916/j.issn1674-3261.2025.02.012.

基于生成对抗 – 元迁移协同的锂离子电池剩余使用寿命动态预测

孟昌皓, 刘奕彤, 文佳睿, 王国强*

上海工程技术大学 数理与统计学院, 上海 201620

DOI:10.61369/ASDS.2025100011

摘 要 : 锂离子电池剩余使用寿命 (Remaining Useful Life, RUL) 预测是保障设备运行安全与实现智能运维的关键技术挑战。然而, 现有方法仍面临小样本数据稀缺、特征提取高度依赖人工经验以及模型泛化能力不足等挑战。为此, 本文提出一种融合数据增强与深度学习的 RUL 预测框架, 旨在提升预测精度与模型鲁棒性。首先, 基于电池容量退化曲线的演化趋势, 采用模糊 C 均值聚类对退化模式进行划分, 并结合 Wasserstein 梯度惩罚生成对抗网络实现条件式数据增强, 生成与真实退化趋势一致的合成样本, 有效缓解小样本问题。其次, 设计基于元学习优化的自编码器, 通过动态调整学习率与动量参数, 提升特征提取的稳定性与鲁棒性, 克服传统自编码器收敛不稳定的问题。接着, 构建融合自适应注意力机制的双向长短期记忆网络, 利用层次化注意力机制聚焦关键时间步特征以增强时序建模能力。最后, 在 HNEI 和 CALCE 公开锂离子电池数据集上对所提方法进行验证。实验结果表明, 本文所提方法在提升锂离子电池 RUL 预测精度方面具有显著优势。

关 键 词 : 剩余使用寿命预测; 智能运维; WGAN-GP; BiLSTM; 元自编码器

Dynamic Prediction of Lithium-Ion Battery Remaining Useful Life Based on Generative Adversarial-Meta Transfer Learning Collaboration

Meng Changhao, Liu Yitong, Wen Jiarui, Wang Guoqiang*

School of Mathematics and Statistics, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620

Abstract : Predicting the Remaining Useful Life (RUL) of lithium-ion batteries represents a critical technical challenge for ensuring equipment operational safety and enabling intelligent operation and maintenance. However, existing methods still suffer from small-sample data scarcity, heavy reliance on handcrafted features, and poor model generalization performance. To address these issues, this paper proposes a RUL prediction framework integrating data augmentation and deep learning to enhance prediction accuracy and model robustness. First, Fuzzy C-Means (FCM) clustering is applied to categorize battery degradation patterns based on the evolution of capacity degradation curves, and the Wasserstein GAN with gradient penalty (WGAN-GP) is employed for conditional data augmentation, generating synthetic samples consistent with real degradation trends to effectively alleviate the small-sample data scarcity issue. Second, an autoencoder optimized through meta-learning is designed to dynamically adjust the learning rate and momentum parameters, thereby improving the stability and robustness of feature extraction and overcoming the convergence instability of traditional autoencoders. Subsequently, a Bidirectional Long Short-Term Memory (BiLSTM) network equipped with a hierarchical adaptive attention mechanism is constructed, which automatically focuses on key time-step features to enhance temporal modeling capability. Finally, the proposed method is evaluated on the publicly available NASA and CALCE lithium-ion battery datasets. Experimental results demonstrate that the proposed approach achieves significantly higher RUL prediction accuracy compared to baseline methods.

Keywords : remaining useful life prediction; intelligent operation and maintenance, WGAN-GP; BiLSTM; meta-autoencoder

基金项目: 国家自然科学基金“高维数据统计推断中协方差矩阵估计的优化模型与算法研究”(11971302)。

作者简介:

孟昌皓, 上海工程技术大学数理与统计学院, 本科, 研究方向为机器学习、深度学习、故障诊断与寿命预测;

刘奕彤, 上海工程技术大学数理与统计学院, 硕士研究生, 研究方向为故障诊断与寿命预测;

文佳睿, 上海工程技术大学数理与统计学院, 硕士研究生, 研究方向为剩余寿命预测。

通讯作者: 王国强, 上海工程技术大学数理与统计学院, 教授, 博士生导师, 研究方向为最优化理论与算法、高维数据统计推断、金融统计与风险管理、统计优化、信用评估、智能运维、机器学习和人工智能等。

引言

锂离子电池因其高能量密度、高输出电压、长循环寿命、较低自放电率及环境友好性，已广泛应用于多个领域，包括电网储能、电动汽车、通信基站等关键行业，并在航空、航天、航海及军事通信等高科技领域展现出重要的技术价值^[1]。随着全球能源结构的转型，锂离子电池的市场需求持续增长，其应用场景不断扩展。电池在长期运行过程中，由于内部电化学反应的不可逆退化，其性能逐渐衰减，进而影响剩余使用寿命（Remaining Useful Life, RUL）和运行安全性^[2]。准确预测 RUL 对于保障电池运行的安全性与可靠性、优化维护策略至关重要，有助于预防突发故障、降低安全隐患并减少资源浪费^[3]。

近年来，锂离子电池的 RUL 预测已成为国内外研究的热点，并取得了显著进展。然而，现有预测模型仍然面临诸多挑战，包括如何构建高质量训练数据集、缓解小样本问题、精准表征电池退化特征并挖掘深层时序信息等^[4]。目前，锂离子电池 RUL 预测方法主要分为机理模型、数据驱动和混合方法三大类：基于机理的预测方法主要依赖等效电路模型、电化学模型或经验退化模型，通过物理化学原理描述电池的衰退过程。然而，该类方法通常存在数学建模复杂、计算成本高、参数标定困难等问题。例如，基于粒子滤波的 RUL 预测方法能够较好地跟踪电池的非线性退化过程^[5]，但在面对复杂工况时，其预测性能仍受限。数据驱动方法借助机器学习与深度学习技术，通过大规模电池退化数据学习预测模型，无需深入理解电池退化的物理机制，因此在适应性、计算效率及鲁棒性方面表现优异^[6]。例如，支持向量机（Support Vector Machine, SVM）、高斯过程回归（Gaussian Process Regression, GPR）、循环神经网络（Recurrent Neural Network, RNN）及长短期记忆网络（Long Short-Term Memory, LSTM）等方法已成功应用于锂离子电池的 RUL 预测^[7-10]。其中，GPR 能够有效量化预测的不确定性，而 LSTM 擅长捕捉时间序列中的长期依赖特征。此外，结合卷积神经网络（Convolutional Neural Network, CNN）与 LSTM 的混合模型，能够同时提取局部时序模式与全局依赖关系，进一步提升预测性能^[11]。混合方法融合了机理模型和数据驱动方法的优势，在提高预测准确度的同时，增强了模型的泛化能力。例如，粒子滤波（Particle Filter, PF）结合神经网络的方法已被用于锂离子电池 RUL 预测^[12]。此外，数据驱动方法的集成学习策略，如结合 CNN 与 LSTM 的多模态模型，能够提升预测的稳健性，降低数据噪声的影响^[13、14]。

尽管混合方法的研究已取得突破，但现有研究仍面临数据稀缺性与模型泛化能力不足等关键问题。特别是，在历史数据有限或质量较低的情况下，预测模型的性能可能显著下降。针对这一挑战，本文提出一种基于梯度惩罚生成对抗网络（Wasserstein GAN with Gradient Penalty, WGAN-GP）的数据增强框架，用于提升模型输入特征的多样性，以改善 RUL 预测的泛化能力^[15、16]。同时，考虑到复杂工程设备的 RUL 受多个相互关联部件的退化影响^[16]，以及数据量的限制，本文进一步引入模糊 C 均值聚类（Fuzzy C-Means, FCM），结合 WGAN-GP 的条件生成机制，实现退化模式感知的数据增强，从而优化 RUL 预测性能。然而，现有方法在特征提取方面仍然高度依赖人工经验，导致模型训练受限、参数调节过程繁琐。为此，本文提出基于自编码器（Autoencoder）与元学习（Meta-Learning）的特征优化策略。该方法不仅能够高效学习数据的深层特征表示，还能在多任务环境下提升模型的适应能力。研究表明，双向长短期记忆网络（Bidirectional Long Short-Term Memory, BiLSTM）在序列预测任务中的表现优于单向 LSTM^[17]，且引入注意力机制（Attention Mechanism）能够进一步提高预测精度。为此，本文结合 BiLSTM 与自适应注意力机制，并采用层次注意力策略，以缓解 Transformer 结构的计算复杂度问题，同时增强局部信息处理能力，从而进一步提升 RUL 预测的准确性^[18]。

本文主要贡献如下：提出基于 WGAN-GP 的退化模式感知数据增强框架，通过模糊 C 均值聚类引导数据生成，提高 RUL 预测的泛化能力；构建融合自编码器与元学习的特征提取策略，优化数据表示能力以提升模型在多任务环境下的适应性；结合 BiLSTM 与自适应注意力机制，增强时间序列特征建模能力，有效提升 RUL 预测的准确性和稳健性。本文的研究工作为锂离子电池剩余寿命预测提供了一种高效且稳健的解决方案，为未来复杂工业系统的智能健康管理奠定了理论与实践基础。

一、基础模型介绍

（一）自编码器模型框架

自编码器是一种无监督学习方法，其目标是通过编码器将输入数据映射到低维潜在空间（即编码过程），然后使用解码器从该低维空间重建原始数据。自编码器由两部分组成：编码器和解码器，其主要目标是最小化重构误差。下面简要回顾自编码器的模型框架，详细可参考^[19]。

编码器：

$$Z = f_{\text{encode}}(X; \theta_{\text{encode}})$$

解码器：

$$\hat{X} = f_{\text{decode}}(Z, \theta_{\text{decode}})$$

损失函数：

$$L_{\text{reconstruction}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|X_i - \hat{X}_i\|^2$$

正则化项：

$$L_{\text{reg}} = \lambda \sum_j \|\theta_j\|^2$$

自编码器的总损失函数:

$$L_{\text{autoencoder}} = L_{\text{reconstruction}} + L_{\text{reg}}$$

其中: f_{encode} 是编码器函数, 包含了多个全连接层和激活函数, 其参数为 θ_{encode} ; f_{decode} 是解码器函数, 同样由多个全连接层和激活函数构成, 其参数为 θ_{decode} 。

(二) 元学习器模型

元学习的目标在于使模型在遇到新任务时能够更快速地适应。其核心思想是通过优化过程来学习如何有效地进行模型优化。具体来说, 元优化器可以用于更新模型的超参数, 例如学习率和动量等, 其中关键特性之一便是动量优化。动量优化不仅考虑当前梯度, 还结合历史梯度信息来更新模型参数, 从而使参数更新过程更加平稳, 减少波动并加快收敛速度。在实际训练中, 元学习优化器会同时关注训练集和验证集上的共同损失, 以优化模型性能。下面简要回归元学习器模型, 详细可参考^[20]。

训练集损失函数:

$$L_{\text{train}} = \frac{1}{N_{\text{train}}} \sum_{i=1}^N \|X_i - \hat{X}_i\|^2 + \lambda \sum_j \|\theta_j\|^2$$

验证集损失函数:

$$L_{\text{val}} = \frac{1}{N_{\text{val}}} \sum_{i=1}^N \|X_i - \hat{X}_i\|^2 + \lambda \sum_j \|\theta_j\|^2$$

动量优化的更新规则:

$$v_{t+1} = \beta_{v_t} + (1 - \beta) \nabla_{\theta} L_{\text{train}}$$

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \eta v_{t+1}$$

共同损失函数:

$$L_{\text{meta}} = \alpha L_{\text{train}} + (1 - \alpha) L_{\text{val}}$$

其中: N_{train} 和 N_{val} 分别是训练集和验证集的样本数量; X_i 和 \hat{X}_i 分别是第 i 个样本的真实值和重构值; v_{t+1} 表示当前时间步的动量, β_{v_t} 是动量衰减因子, 控制历史梯度的影响; $\nabla_{\theta} L_{\text{train}}$ 是损失函数对模型参数的梯度, η 是学习率。

(三) BiLSTM 模型

BiLSTM 通过引入记忆单元来捕捉长期依赖关系, 其核心在于三个门控机制: 输入门、遗忘门和输出门。双向 LSTM 由两个 LSTM 层构成, 其中一个按时间顺序处理序列, 另一个则按逆时间顺序处理序列, 最终将两个方向的隐藏状态进行拼接。下面简要回顾 BiLSTM 的计算过程, 详细可参考^[21]。

LSTM 单元的计算过程为:

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_t - 1, x_t] + b_f)$$

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_t - 1, x_t] + b_i)$$

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_c \cdot [h_t - 1, x_t] + b_c)$$

$$C_t = f_t * C_t - 1 + i_t * \tilde{C}_t$$

$$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_t - 1, x_t] + b_o)$$

$$h_t = o_t * \tanh(C_t)$$

其中: f_t 是遗忘门的激活值, i_t 是输入门的激活值; \tilde{C}_t 是候选记忆内容; C_t 是当前记忆单元的状态; o_t 是输出门的激活值; h_t 是当前隐藏状态; W_f, W_i, W_c, W_o 是权重矩阵; b_f, b_i, b_c, b_o 是偏置向量; $*$ 是元素级乘法。

BiLSTM 的隐藏状态通过拼接前向和后向 LSTM 的隐藏状态得到:

$$h_t = [\bar{h}_t, \overrightarrow{h}_t],$$

其中, \bar{h}_t 表示从第一个时刻到第 t 时刻的正向 LSTM 隐含状态, \overrightarrow{h}_t 表示从最后一个时刻到第 t 时刻的反向 LSTM 隐含状态。

(四) 注意力机制与残差连接

注意力层的核心思想是通过输入序列中每个时刻的隐藏状态进行加权求和, 从而生成一个上下文向量。具体来说, 注意力机制会根据每个时刻的输入信息对隐藏状态分配不同的权重, 这些权重是通过学习得到的。权重的大小决定了该时刻隐藏状态对生成上下文向量的贡献程度, 即某一时刻的隐含信息对于当前任务的重要性^[22]。通过这种方式, 注意力层能够使模型聚焦于序列中最重要的部分, 从而提升模型在序列建模中的表现和准确性。

在该层中, 具体步骤如下:

首先, 给定输入序列的每个时刻的隐藏状态 h_t , 通过加权矩阵 W 和偏置项 b 计算评分向量, 即

$$\text{score}_t = \tanh(W h_t + b)$$

其次, 通过权重矩阵 V 计算注意力权重, 即

$$\alpha_t = \text{softmax}(V^T \text{score}_t)$$

其中, 注意力权重 α_t 表示每个时刻对最终输出的贡献程度。

最后, 对输入的隐藏状态加权求和, 得到上下文向量, 即

$$c = \sum_{t=1}^T \alpha_t h_t, \quad c \in R^{2d}$$

该上下文向量表示对输入序列的加权汇总, 包含了不同时间步的上下文信息。

在深度学习中, 残差连接用于将输入直接加到输出上, 从而缓解梯度消失问题, 并提升网络的训练效果^[23]。在本文模型中, 残差连接的形式是将经过注意力层输出的上下文向量 c 与其经过全连接层后的输出相加, 具体表示为

$$\text{residual} = c + \text{Dense}(c)$$

其中: $\text{Dense}(c)$ 表示对上下文向量 c 进行一次全连接层的操作, 并使用 ReLU 激活函数。

二、模型改进

(一) 基于元学习的自编码器模型

本文通过结合自编码器与元学习优化器的方法旨在提高模型训练的效率和泛化能力以及训练平稳性。自编码器通过将数据块

射到低维潜在空间,进行有效的降维与特征提取,而元学习优化器通过动态调整如学习率和动量等超参数,结合训练集与验证集的损失,优化模型更新策略。该结合能够加速收敛过程、避免过拟合,同时提高模型在未见数据上的表现。元学习优化器通过引入历史梯度信息和自适应更新机制,使得训练过程更加平滑、稳定,最终提升自编码器的训练效率和泛化能力。具体步骤如下:

步骤1 前向传播:给定输入数据 X , 经过编码器映射得到低维表示 Z , 然后通过解码器重构输入 \hat{X} 。

步骤2 计算损失:自编码器的损失包括 $L_{reconstruction}$ 和 L_{reg} , 结合训练与验证集损失。

步骤3 梯度计算与优化:元学习优化器计算 $\nabla_{\theta} L_{train}$, 并利用动量更新规则调整如学习率等模型参数。

步骤4 训练过程的迭代:通过 L_{train} 和 L_{val} 动态调整参数,最终使得自编码器能够有效地学习数据的低维表示。

为了验证元自编码器的优越性,本实验在 HNEI 数据集上进行了自编码器训练,并对训练损失的变化过程进行了对比分析,结果如图1、2所示。从图中可以看出,相较于传统自编码器,元自编码器在训练过程中收敛表现更稳定,损失下降更平滑,最终达到更优的收敛效果,表明其具备更强的泛化能力和鲁棒性。

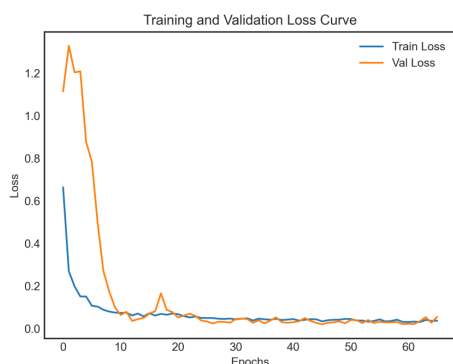


图1: 自编码器训练损失曲线

Fig.1: Training Loss Curve of Autoencoder

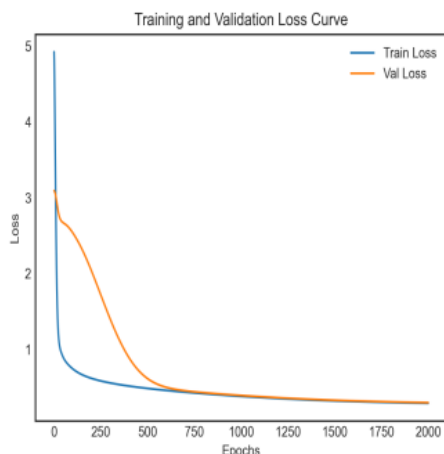


图2: 元自编码器训练损失曲线

Fig.2: Training Loss Curve of Meta-Autoencoder

(二) 基于注意力机制的 BiLSTM 模型改进

在文献24验证注意力机制在该类问题中有效性的基础上,本文提出了一种结合注意力层与层次化注意力层的多层次注意力机制,使 BiLSTM 能够更精准地聚焦于关键时间步的显著特征,从而进一步提升预测的精度与可解释性^[24]。此外,残差连接的引入有效缓解了深层神经网络中的梯度消失问题,并在训练过程中增强了模型的稳定性。图3展示了包含两层次注意力机制的 BiLSTM 结构。

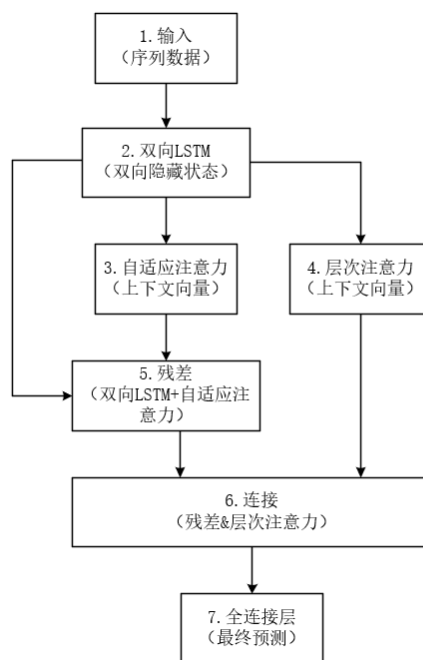


图3: 改进的 BiLSTM 的框架图

Fig.3: Framework of the Improved BiLSTM

为了验证引入注意力机制的 BiLSTM 模型的优势,本文于后文实验部分中列出了 BiLSTM 与引入的注意力机制的 BiLSTM 的相关指标对比情况。

BiLSTM 与注意力机制结合的具体步骤如下:

步骤1 输入: 序列数据 $X = (x_1, x_2, \dots, x_T)$ 。

步骤2 BiLSTM: 输出 BiLSTM 的 h_t 隐藏状态。

步骤3 自适应注意力层: 输出上下文向量 c_1 。

步骤4 层次化注意力层: 输出上下文向量 c_2 。

步骤5 拼接: 自适应注意力层与层次化注意力层的输出特征拼接。

步骤6 残差连接: 生成残差表示 *residual*。

步骤7 全连接层: 经过全连接层,得到最终的预测值。

三、实验过程与结果分析

在前文改进模型的基础上,本文基于两个不同来源的数据集进行了锂离子电池 RUL 预测实验证明改进模型有效性和泛化能力,实验过程包含以下关键阶段:首先对原始数据进行必要的预

处理。其次，实施特征工程，包括构建滚动窗口特征、小波包变换特征，以及利用元自编码器和模糊 C 均值聚类提取潜在健康因子，并生成聚类簇。接着，采用 WGAN-GP 进行数据增强以丰富样本多样性。为进一步优化模型性能并提升数据的丰富性，使用训练好的 WGAN-GP 生成器为每个聚类簇生成合成样本，并将其与真实数据结合。然后，通过滑动窗口方法将数据转换为序列形式，以满足时间序列建模的需求。数据集按照时间顺序划分为训练集和测试集，确保在模型训练过程中的数据独立性。最终，引入带有注意力机制的 BiLSTM 模型进行训练及性能评估。整体流程如图 4 所示。

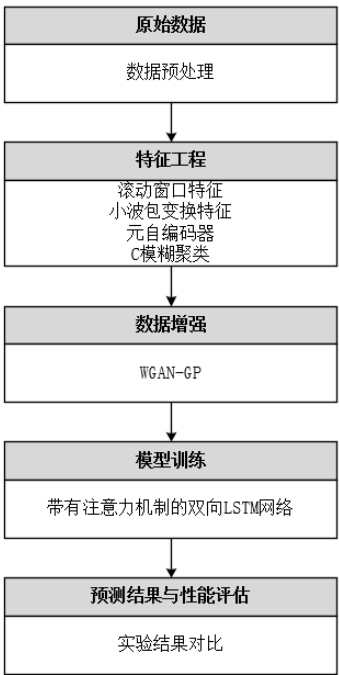


图 4：总流程概述图

Fig. 4: Overview of the Overall Process

(一) 数据集与数据预处理

1. 数据集

本文采用 HNEI 和 CALCE 数据集，以验证本文提出的模型在锂离子电池 RUL 预测任务中的有效性与模型的泛化能力。

HNEI 数据集来源于夏威夷自然能源研究所 (Hawaii Natural Energy Institute)，包含 14 个 NMC-LCO 18650 型号锂离子电池的实验数据。这些电池的额定容量均为 2.8 Ah，在 25° C 恒温条件下，以 C/2 速率的恒流恒压 (CC-CV) 方式充电，并采用 1.5C 速率放电，循环测试超过 1000 次。

CALCE 数据集是由马里兰大学先进生命周期工程中心 (Center for Advanced Life Cycle Engineering, CALCE) 提供，本文选取其中的 CS2_35 电池数据。

通过结合不同来源的数据，本文的方法不仅保证了实验的严谨性，还增强了模型在不同电池类型和使用条件下的适应性。多数据源的融合避免了模型仅在相同工况下训练，确保了锂离子电池

池 RUL 预测的科学性与鲁棒性。

2. 数据预处理

本文综合考虑肯德尔相关系数、特征重要性分析以及锂离子电池的相关背景知识等^[25、26]，选择以下健康因子，如表 1 和表 2 所示。

表 1：健康因子选择 (HNEI)
Table 1: Selection of Health Factors (HNEI)

Feature Columns	Description
Cycle_Index	Cycle index
Discharge Time (s)	Discharge time (in seconds)
Decrement 3.6–3.4V (s)	Decrement time for voltage range 3.6–3.4V
Max. Voltage Dischar.(V)	Max voltage during discharge
Min. Voltage Charg. (V)	Min voltage during charge
Time at 4.15V (s)	Time spent at 4.15V
Time constant current (s)	Time constant current is applied
Charging time (s)	Charging time (in seconds)

表 2：健康因子选择 (CALCE)
Table 2: Selection of Health Factors (CALCE)

Feature Columns	Description
Charge_Capacity(Ah)	Charge capacity in ampere-hours (Ah)
Current(A)	Current in amperes (A)
Voltage(V)	Voltage in volts (V)
Discharge_Capacity(Ah)	Discharge capacity in ampere-hours (Ah)
Charge_Energy(Wh)	Charge energy in watt-hours (Wh)
Discharge_Energy(Wh)	Discharge energy in watt-hours (Wh)
dV/dt(V/s)	Rate of change of voltage with respect to time in volts per second (V/s)
Internal_Resistance(Ohm)	Internal resistance of the battery in ohms (Ω)

同时，本文对健康因子使用 Z-score 标准化，对于目标列采用最小 - 最大标准化。

(二) 特征工程

在特征工程阶段，本文采用多层次特征提取方法。首先，利用移动窗口技术对时间序列数据进行滑动处理。其次，引入小波包变换，并采用元自编码器对特征进行降维。最后，应用模糊 C 均值聚类算法。特征工程流程如图 5 所示。

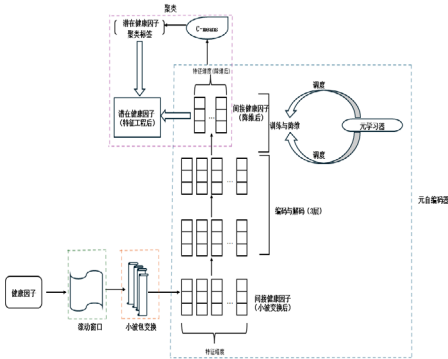


图 5：特征工程流程图

Fig.5: Feature Engineering Workflow

1. 滚动窗口技术

为了更精确地捕捉时间序列数据中的趋势和波动，本文通过对每个原始特征应用不同大小的移动窗口及统计量来构建新特征，具体细节如表3所示。这些滚动统计特征能够有效反映健康因子的短期波动与长期趋势，从而增强模型对健康因子动态特性的理解。此外，利用特定窗口大小的滚动平均值对数据进行平滑处理，有助于减少噪声，进而提升小波包变换的效果，使得特征提取过程更加平稳和稳定。

表 3: 统计量与窗口大小 (共用)
Table 3: Statistics and Window Size (Common)

特征名称	窗口大小	指标描述
Rolling Mean (15)	15	窗口大小为 15 的滚动平均值
Rolling Std (15)	15	窗口大小为 15 的滚动标准差
Rolling Max (15)	15	窗口大小为 15 的滚动最大值
Rolling Min (15)	15	窗口大小为 15 的滚动最小值
Rolling Mean (20)	20	窗口大小为 20 的滚动平均值
Rolling Std (20)	20	窗口大小为 20 的滚动标准差
Rolling Max (20)	20	窗口大小为 20 的滚动最大值
Rolling Min (20)	20	窗口大小为 20 的滚动最小值

2. 小波包变换

锂离子电池数据中常见的局部突变现象通常反映了电池状态的急剧变化，这对健康预测、RUL 估计及故障检测等任务具有重要意义^[26, 27]。为了进一步增强特征的频域表示，本文采用小波包变换对增强后的特征进行频域分析。在选择小波基时，选用了 Daubechies 4 (db4) 小波基，因其在平滑性和局部化能力方面具有显著优势，能够更精确地捕捉信号中的细节特征，尤其适用于分析具有局部突变或快速变化的时间序列信号。

在小波包变换的层级选择上，考虑到数据点数与变换层级数之间的对数关系以及特征提取的需求，本研究将变换层级设置为 3。此设置既能充分揭示信号中的多频率信息，又在计算复杂度和频域分辨率之间取得了良好的平衡，从而提高了分析效率与准确性。通过 WPT，能够精确捕捉信号中的细节和周期性模式，进一步增强特征的频域表示，为后续元自编码器和聚类模型的学习提供更加丰富有效的特征支持。小波包变换的效果展示见图6和图7。

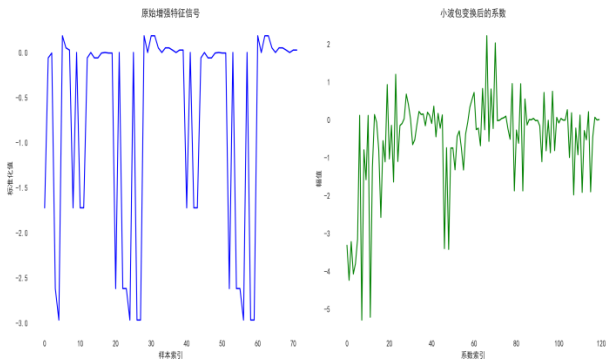


图 6: 小波包变换效果对比图 (HNEI)
Fig.6: Comparison of Wavelet Packet Transform Effects (HNEI)

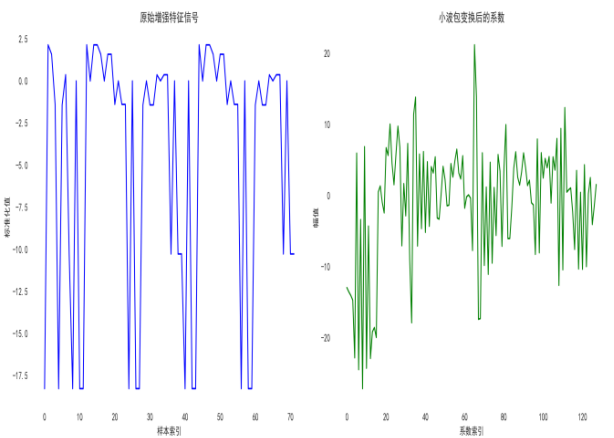


图 7: 小波包变换效果对比图 (CALCE)
Fig. 7: Comparison of Wavelet Packet Transform Effects (CALCE)

3. 元自编码器

本文接下来对高维小波包变换特征进行降维处理。选取编码维度为 8，旨在有效降低特征维度的同时保留重要信息。表 4 详细列出了自编码器的参数选择及其理由。

表 4: 参数选择及其选择理由 (共用)
Table 4: Parameter Selection and Rationale (Common)

参数	选择理由
编码维度: 8	保留足够的信息以支持后续预测任务，同时降低维度。
隐藏层单元: 1024, 512	深层网络结构提升特征表达能力。
激活函数: LeakyReLU	防止“死亡神经元”问题，提高模型的非线性表达能力。
批归一化: 使用	加速训练过程，稳定模型收敛。

通过引入元自编码器模型并结合元学习框架，增强了自编码器的表达能力，使其能够通过非线性映射更精确地捕捉健康因子的潜在表示。在此过程中，元自编码器不仅保留了原始数据中的关键信息，还有效地减少了特征维度，提取了潜在健康因子，提升了模型的泛化能力，并降低了后续任务的计算复杂度。训练中的元学习优化器引导模型在不同数据集上快速适应，确保了自编码器在多任务中的稳定收敛。图8和图9展示了训练集和验证集上损失曲线的变化，进一步体现了训练效果。

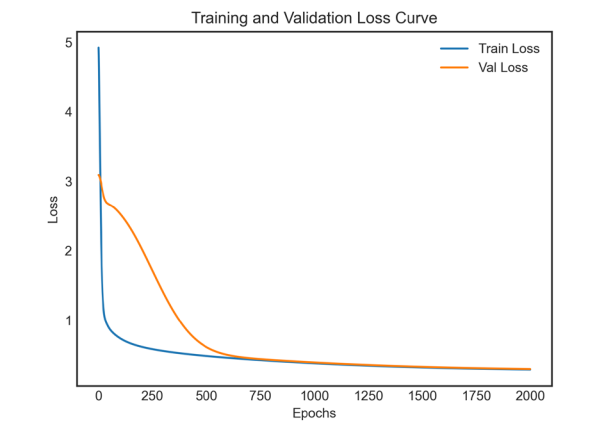


图 8: 元自编码器训练损失曲线图 (HNEI)
Fig.8: Training Loss Curve of the Meta-Autoencoder (HNEI)

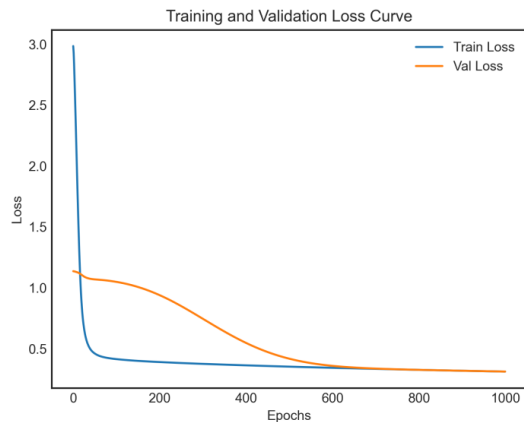


图9：元自编码器训练损失曲线图（CALCE）

Fig.9: Training Loss Curve of the Meta-Autoencoder (CALCE)

4. 模糊 C 均值聚类

本文采用模糊 C 均值聚类对降维后的特征进行聚类分析，从而有效揭示了数据的潜在结构。与传统的 K-Means 等硬聚类方法相比，其允许数据点同时隶属于多个簇，因此更适合处理具有模糊边界和复杂结构的数据。在本实验中，锂离子电池 RUL 相关的特征通常相互复杂且高度关联^[28]，因此选择了软聚类方法。为了确定最佳聚类数，本文结合模糊分区系数、轮廓系数和 Calinski-Harabasz 指数等多种评价指标（详见表5和表6）。根据肘部法则的综合评估，HNEI 和 CALCE 的最佳聚类数均为3。最终，这些簇标签为后续 WGAN-GP 数据生成提供了条件支持，不仅增强了数据的多样性和覆盖范围，还作为 BiLSTM 模型的输入，帮助模型更好地识别不同时间段内锂离子电池的状态，进而提高了训练和预测效果。

表5：聚类数选择指标（HNEI）

Table 5: Cluster Number Selection Criteria (HNEI)

聚类数	模糊分区数	轮廓系数	Calinski-Harabasz 指数
2	0.8249	0.5079	11399.0814
3	0.7840	0.5864	14581.8557
4	0.6929	0.4628	11858.7251
5	0.6426	0.3934	10033.8812
6	0.6358	0.4091	10255.4739
7	0.5896	0.3700	9014.7011
8	0.5862	0.3752	8816.1670
9	0.5488	0.3351	8020.1542
10	0.5258	0.3195	7274.6745

表6：聚类选择指标（CALCE）

Table 6: Cluster Selection Criteria (CALCE)

聚类数	模糊分区数	轮廓系数	Calinski-Harabasz 指数
2	0.8274	0.5696	25937.8647
3	0.8439	0.6375	22636.0165
4	0.7782	0.5176	17094.1645
5	0.7810	0.5521	57612.9704
6	0.7270	0.4481	11172.8021
7	0.7314	0.4806	43681.6356
8	0.7145	0.4802	37992.6625
9	0.6625	0.3819	7049.3613

聚类数	模糊分区数	轮廓系数	Calinski-Harabasz 指数
10	0.6904	0.4577	38902.5276

从特征工程的训练过程和结果可以看出，采用元自编码器及其他特征工程技术能够有效挖掘数据中的潜在信息。通过这些技术的应用，模型不仅在数据表示学习方面获得了更为精确的特征表示，还在数据降维与噪声抑制方面取得了显著优化，特别是采用了平稳降维方法。这些特征工程技术协同作用，有效提升了数据质量，提取了潜在健康因子及其潜在标签，增强了后续模型的预测能力，从而为锂离子电池 RUL 预测提供了更加稳健和可靠的基础。

（三）数据增强：生成对抗网络

在 RUL 预测任务中，数据的数量和多样性对模型的预测性能至关重要。然而，在实际应用中常常面临数据量不足或数据分布不均衡的问题，这使得在不同状态下收集足够的锂离子电池数据进行训练变得困难，从而严重影响了模型的泛化能力和鲁棒性。特别是在锂离子电池领域，由于测试环境、测试周期及实际运行条件的限制，获取充足且多样化的数据往往面临较大挑战。与此同时，本实验通过模糊 C 均值聚类分析发现，HNEI 数据集在各聚类类别中的数据量分别为 7594、4452 和 2918，而 CALCE 数据集在不同聚类类别中的数据量分别为 29122、27770 和 7098，显然存在一定的差异。

为了克服这些挑战，本文提出应用一种基于 Wasserstein 生成对抗网络 (WGAN) 及其梯度惩罚 (Gradient Penalty, GP) 优化的生成对抗网络 (WGAN-GP) 模型进行数据增强。通过引入梯度惩罚项，WGAN-GP 显著提升了训练稳定性，有效缓解了传统生成对抗网络中常见的梯度消失和模式崩溃问题。与传统 GAN 模型相比，WGAN-GP 能够在更少的训练样本下，通过更高的训练稳定性生成质量更高的合成数据^[29]。详细的流程如图10所示。

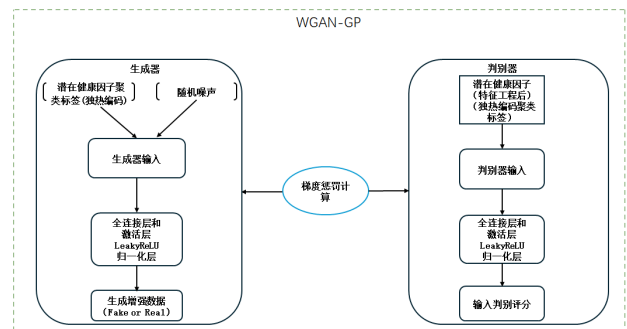


图10：数据增强流程图

Fig.10: Data Augmentation Workflow

具体而言，本文使用 TensorFlow 和 Keras 构建了 WGAN-GP 的生成器和判别器。生成器用于生成与真实锂离子电池数据分布相似的合成数据，而判别器则负责区分真实数据与生成数据。详细的流程和参数选择见图10和表7。

表7：WGAN-GP 参数设置

Table 7: WGAN-GP Parameter Settings

参数名称	值	说明
噪声维度	100	噪声向量的维度
条件维度	best_C	条件向量的维度（最佳聚类数）

参数名称	值	说明
数据维度	自动编码器 降维后特征 维度	生成器和判别器的输入 / 输出维度
批量大小	128	WGAN-GP 训练的批量大小
训练轮次	1000	WGAN-GP 的训练轮次数
判别器训练步数	2	每个生成器训练步骤中判别器 训练次数
梯度惩罚系数	10.0	梯度惩罚项的权重系数
学习率	0.0002	Adam 优化器的学习率
Beta_1 (beta_1)	0.5	Adam 优化器的 Beta_1 参数
Beta_2 (beta_2)	0.9	Adam 优化器的 Beta_2 参数

通过上述参数设置，WGAN-GP 在训练过程中能够稳定地生成高质量的合成数据。为了进一步提升训练效果，我们采用最大均值差异作为关键训练指标，并引入早停机制，确保模型在最优状态下停止训练。具体步骤如下：

首先，为了提升锂离子电池 RUL 预测模型的性能和数据多样性，我们利用训练好的 WGAN-GP 生成器为每个聚类簇生成 200 个合成样本，从而增加数据基数。这一过程包括生成随机噪声向量、构建对应的独热编码条件向量，并通过生成器生成合成的

表 8: BiLSTM 参数选择
Table 8: BiLSTM Parameter Selection

参数	描述	设置值
输入维度	输入序列每个时间步的特量	30
隐藏层维度	LSTM 隐藏层的神经元数量	64, 32
层数	LSTM 层的堆叠数量	2
输出维度	模型输出的维度	1
Dropout 率	防止过拟合的 Dropout 比例	0.1
学习率	优化器的学习率	动态衰减
学习率衰减策略	学习率衰减策略	ExponentialDecay
训练周期数	模型训练的总周期数	200
批量大小	每次训练的样本数量	64

在 BiLSTM 模型的基础上，本文比较了标准 BiLSTM 与带有注意力转移机制的 BiLSTM 两种模型的效果。自适应注意力层通过学习权重，动态聚焦序列中对锂离子电池 RUL 预测至关重要的时间步，如充放电周期中的关键时刻，从而提高预测精度。层次注意力层在此基础上进一步引入第二层注意力机制，捕捉更深层次的特征关系，能够在不同层级识别锂离子电池 RUL 变化的复杂模式。此外，双重注意力机制相互结合，不仅提升了模型的表达能力和预测效果，还避免了复杂注意力转移机制可能导致的过拟合和效率低下的问题。

结果表明，引入混合注意力机制后，模型的各项评价指标（如决定系数、均方误差、均方根误差、平均绝对误差）均优于未使用注意力机制的模型。因此，采用该模型能够更有效地捕捉序列数据中的关键特征，从而提高 RUL 预测的准确性和鲁棒性。HNEI 数据集上两个模型的性能比较见表 9，图 11 展示了预测结果的示意图，直观地显示了实际值与预测值之间的差异。

表 9: 模型的性能比较表 (HNEI)

Model	MAE	MSE	RMSE	R ²
BiLSTM	0.0221	0.0012	0.033	0.98
BiLSTM with Hybrid Attention	0.0211	0.0111	0.032	0.99

RUL 特征数据。同时，为这些合成数据分配所属聚类簇的真实标签中位数，以确保标签的一致性和合理性。接着，将生成的合成数据与真实数据在特征、聚类标签及 RUL 标签上进行合并，形成增强后的数据集。通过统计各聚类簇的数据分布，验证合成数据有效地补充了原始数据中的不足，实现了数据集的平衡性。

(四) 模型构建与训练

1. 模型准备

为了适应时间序列模型的输入要求，本文采用滑动窗口方法将增强后的数据转换为序列形式。具体而言，设定序列长度为 15，并在每个时间步将特征向量与对应的条件向量进行拼接，生成适合深度学习模型输入的序列数据。数据集按时间顺序划分为 80% 的训练集和 20% 的测试集，以确保模型训练过程中不会发生数据泄漏。

2. 模型训练

本文构建了 BiLSTM 模型，旨在通过同时捕捉序列的前向和后向信息来提升对时序数据的理解。在此基础上，引入自适应注意力层和层次化注意力层，构建多层次注意力机制，从而增强模型对关键时间步和重要特征的关注能力。具体参数选择见下表 8。

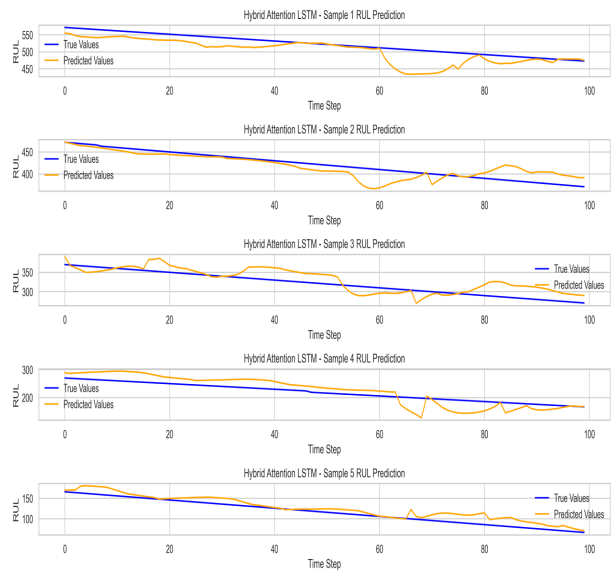


图 11: 预测结果示意图 (HNEI)

Fig.11: Illustration of Prediction Results (HNEI)

CALCE 的两个模型的性能比较如表 10 所示，图 12 展示了预测结果的示意图，直观地展示了实际值与预测值之间的差异。

表 10: 模型的性能比较表 (CALCE)
Table 10: Model Performance Comparison (CALCE)

Model	MAE	MSE	RMSE	R ²
BiLSTM	0.0189	0.0006	0.024	0.97
BiLSTM with Hybrid Attention	0.008	0.0003	0.0179	0.98

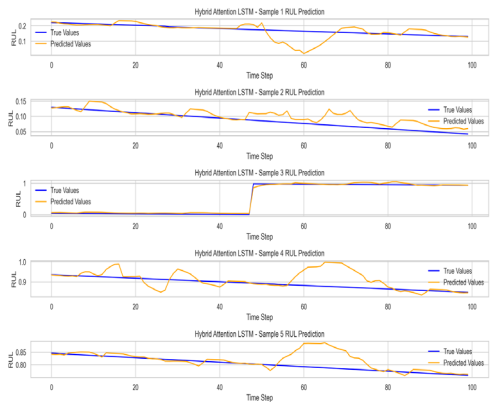


图 12: 预测结果示意图 (CALCE)

Fig.12: Illustration of Prediction Results (CALCE)

此外,带有多重注意力机制的 BiLSTM 在训练过程中的平稳性明显优于标准 BiLSTM 模型,这一现象可以从训练损失曲线和验证损失曲线的变化趋势中观察到(以 CALCE 数据集为例)。如图 13 和图 14 所示,带有多重注意力机制的 BiLSTM 模型在训练过程中表现出更为平滑的损失下降曲线,且损失下降速度较快,训练收敛过程较为稳定。

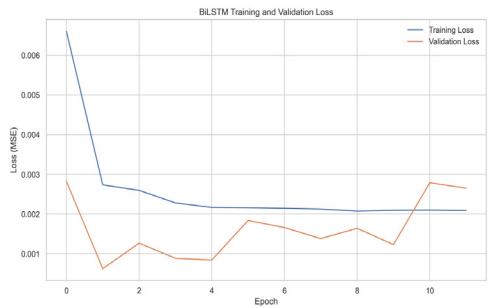


图 13: BiLSTM 模型的损失曲线

Fig.13: BiLSTM Model Loss Curve

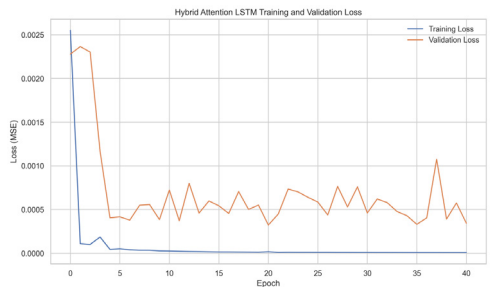


图 14: 带注意力机制的 BiLSTM 模型的损失曲线

Fig. 14: BiLSTM Model Loss Curve with Attention Mechanism

具体来说,标准 BiLSTM 模型在训练过程中存在一定的波动,其损失曲线时常出现震荡,这表明模型在学习过程中可能会

陷入局部最优解,导致收敛速度较慢,并且容易陷入过拟合或欠拟合的状态。相比之下,带有多重注意力机制的 BiLSTM 通过自适应和层次化注意力机制,能够更有效地聚焦于对锂离子电池 RUL 预测最为关键的时间步,从而减少了训练过程中的不必要干扰,提高了模型的学习效率。特别是在训练初期,注意力机制的引入使得模型能够在有限的训练轮次内更好地捕捉到数据中的重要特征,进一步加速了训练过程。

(五) 实验结果对比

本文利用 HNEI 数据集进行锂离子电池健康状态估计和 RUL 预测,并与现有研究进行了对比分析。本文方法与李超等人提出的基于数据扩展的锂离子电池早期寿命在线预测方法进行了对比^[30]。详细实验结果如表 11 所示。由表 11 可知本文该方法在 HNEI 数据集精度上做出一定的提升(尤其在 MAE 和 RMSE 方面),验证其对于 RUL 预测的有效性。

表 11: 实验结果对比 (HNEI)
Fig.11: Comparison of Experimental Result (HNEI)

方法	MAE	RMSE	R ²
GPR+CNN-LSTM	0.5173	0.9982	0.9987
Tr-AttentionLSTM	0.6662	1.0107	0.9982
Transformer	0.7937	1.2072	0.9977
DNN	0.9970	1.4537	0.9978
GPR+CNN-LSTM	0.7351	1.0823	0.9984
本研究	0.0080	0.0320	0.99

本文利用 CALCE 数据集进行锂离子电池健康状态估计和 RUL 预测,并与现有研究进行了对比分析。本文方法与黄煜峰等人^[31]提出的基于卡尔曼滤波优化 Transformer 模型的预测方法,以及王海瑞等人^[32]基于生成对抗网络的 RUL 预测方法进行了对比。详细实验结果如表 12 所示。

表 12: 实验结果对比
Fig.12: Comparison of Experimental Result (CALCE)

来源	预测模型	RMSE	R ²
黄煜峰等人	RNN	0.0911	0.8214
	MLP	0.0959	0.8047
	LSTM	0.0966	0.8785
	GRU	0.0988	0.8592
	In-Transformer	0.0345	0.9789
王海瑞	CNN-BiLSTM	0.135	\
	CNN-BiGRU	0.038	\
	MsDCNN-Informer	0.0037	\
本研究	BiLSTM	0.0179	0.98

四、结束语

本文针对锂离子电池 RUL 预测中的数据瓶颈与模型局限性,提出一种融合数据增强、元学习优化与注意力机制的多模态解决方案。通过 WGAN-GP 结合 FCM 聚类生成退化模式感知的合成数据,缓解了实际场景中数据稀缺性问题;元学习自编码器通过动态优化策略实现特征表达的鲁棒性提升;BiLSTM 与层次化

注意力机制的结合，有效捕捉了退化过程中的局部突变与长期依赖特征。实验表明，相较于现有方法，本文框架在跨数据集场景下的预测效果和稳定性良好。未来研究可从三方面拓展：其一，引入多源异构数据（如温度、阻抗谱）构建跨模态融合模型；其

二，设计在线增量学习机制以适应电池动态退化过程；其三，探索极端工况（如低温、高倍率充放电）下的退化模式可解释性建模。本研究为锂离子电池健康管理的工程化应用提供了理论依据，并为复杂工业系统的智能运维范式革新提供了参考路径。

参考文献

[1] 陈立泉. 锂离子电池改变世界——2019年诺贝尔化学奖成果简析 [J]. 科技导报, 2019, 37(24): 36–40.

[2] 陈建安, 陈曦, POTAPENKO Hanna, 等. 锂电池的电解质安全性的研究进展及军事化前景 [J]. 兵器材料科学与工程, 2025, 48(01): 145–154.

[3] 杜志明, 陈佳伟. 锂离子电池热失控危险性研究进展 [J]. 安全与环境学报, 2021, 21(04): 1523–1532.

[4] 李炳金, 韩晓霞, 张文杰, 等. 锂离子电池剩余使用寿命预测方法综述 [J]. 储能科学与技术, 2024, 13(04): 1266–1276.

[5] 秦琪, 赵帅, 陈绍伟, 等. 基于粒子群优化粒子滤波的电容剩余寿命预测 [J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(20): 237–241+258.

[6] 王志福, 杨忠义, 罗崴, 等. 基于数据驱动的锂离子动力电池剩余使用寿命预测方法综述 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(15): 6279–6289.

[7] 简献忠, 张博, 王如志. 一种改进 RAO 算法与多核 SVM 的锂离子电池寿命预测模型 [J]. 小型微型计算机系统, 2022, 43(11): 2314–2320.

[8] Li L, Wang P, Chao K H, et al. Remaining Useful Life Prediction for Lithium-ion Batteries Based on Gaussian Processes Mixture [J]. PloS One, 2016, 11(9): e0163004.

[9] Chaoui H, Ibe-Ekeocha C C. State of Charge and State of Health Estimation for Lithium Batteries Using Recurrent Neural Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(10): 8773–8783.

[10] Zheng S, Ristovski K, Farahat A, et al. Long Short-Term Memory Network for Remaining Useful Life Estimation[C]//2017 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM). IEEE, 2017: 88–95.

[11] Chen C, Pecht M. Prognostics of Lithium-ion Batteries Using Model-based and Data-driven Methods[C]//Proceedings of the IEEE 2012 Prognostics and System Health Management Conference. IEEE, 2012: 1–6.

[12] 贺宁, 张思媛, 李若夏, 等. 粒子滤波和 GRU 神经网络融合的锂电池 RUL 预测 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(05): 142–151.

[13] 李梦蝶, 赵光, 罗灵鲲, 等. 基于改进 CNN-LSTM 的飞控系统剩余寿命预测 [J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(16): 274–283.

[14] Li X, Zhang L, Wang Z, et al. Remaining Useful Life Prediction for Lithium-ion Batteries Based on a Hybrid Model Combining the Long Short-Term Memory and Elman Neural Networks[J]. Journal of Energy Storage, 2019, 21: 510–518.

[15] Liu Y, Wen J, Wang G. A Comprehensive Overview of Remaining Useful Life Prediction: From Traditional Literature Review to Scientometric Analysis. Machine Learning with Application. 2025: 100704.

[16] 裴洪, 胡昌华, 司小胜, 等. 基于机器学习的设备剩余寿命预测方法综述 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(08): 1–13.

[17] S. Siami-Namini, N. Tavakoli and A. S. Namin, The Performance of LSTM and BiLSTM in Forecasting Time Series, 2019 IEEE International Conference on Big Data, Los Angeles, CA, USA, 2019, pp. 3285–3292.

[18] 董作林, 宋金岩, 孟子迪. 基于模态分解和深度学习的锂离子电池寿命预测 [J/OL]. 储能科学与技术, 1–12[2025-01-20].

[19] 吴美君, 杨新, 潘超凡, 等. 自编码器结合持续学习: 现状、挑战与展望 [J/OL]. 计算机学报, 1–37[2025-01-20].

[20] 李凡长, 刘洋, 吴鹏翔, 等. 元学习研究综述 [J]. 计算机学报, 2021, 44(02): 422–446.

[21] 鲁南, 欧阳权, 黄良升, 等. 基于注意力机制和多任务 LSTM 的锂电池容量预测方法 [J]. 电气工程学报, 2022, 17(04): 41–50.

[22] 王永, 李行健, 邓江洲. 融合注意力机制的残差神经协同过滤推荐模型 [J]. 运筹与管理, 2024, 33(10): 201–208.

[23] Smagulova K, James A P. Overview of Long Short-Term Memory Neural Networks[J]. Deep Learning Classifiers with Memristive Networks: Theory and Applications, 2020: 139–153.

[24] 刘大同, 周建宝, 郭力萌, 等. 锂离子电池健康评估和寿命预测综述 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(01): 1–16.

[25] 林娅, 陈则王. 锂离子电池剩余寿命预测研究综述 [J]. 电子测量技术, 2018, 41(04): 29–35.

[26] Li X, Yu D, Byg S V, et al. The development of machine learning-based remaining useful life prediction for lithium-ion batteries[J]. Journal of Energy Chemistry, 2023, 82(07): 103–121.

[27] Ge M F, Liu Y, Jiang X, et al. A Review on State of Health Estimations and Remaining Useful Life Prognostics of Lithium-ion Batteries[J]. Measurement, 2021, 174: 109057.

[28] 王健雁, 廖成龙, 凌泽. 锂离子电池的循环寿命影响因素研究进展 [J]. 化工新型材料, 2019, 47(S1): 33–35.

[29] Gulrajani I, Ahmed F, Arjovsky M, et al. Improved Training of Wasserstein Gans[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2017, 30.

[30] 李超, 汪伟, 安斯光, 等. 基于数据扩展的锂离子电池早期寿命在线预测 [J]. 现代电子技术, 2024, 47(10): 171–176.

[31] 黄煜峰, 梁焕超, 许磊. 基于卡尔曼滤波算法优化 Transformer 模型的锂离子电池健康状态预测方法 [J]. 储能科学与技术, 2024, 13(08): 2791–2802.

[32] 王海瑞, 侯晓建, 朱贵富, 等. 基于 MsDCNN-Informer 模型的设备剩余寿命预测 [J/OL]. 控制工程, 1–12[2025-03-14].

基于 SVM-RF-ANN 集成模型的珠江流域水质预测

李伟奇, 黄炫, 朱正棋

广州大学 经济与统计学院, 广东 广州 510006

DOI:10.61369/ASDS.2025100012

摘要： 水资源短缺已成为制约区域可持续发展的关键性自然资源瓶颈。作为高度城市化区域，珠江流域面临严峻的水质性缺水问题，实现准确的水质预测是保障水生态安全的重要前提。传统水质预测方法多依赖专家经验，存在效率低、误差累积显著等局限性。本文基于机器学习方法，收集2015–2023年珠江流域部分代表性断面的水质监测数据，并进行规范化预处理。采用支持向量机、随机森林与人工神经网络构建水质类别分类模型，运用网格搜索与交叉验证方法优化模型参数，结合特征重要性分析量化各水质指标对分类结果的贡献度。进一步引入软投票集成策略，进而采用粒子群优化 (PSO) 算法动态确定最优权重，融合各基模型优势以提升整体预测性能。研究结果可为珠江流域水环境精细化管理提供科学依据，有助于提升水质预测的准确性与鲁棒性，推动流域水资源的可持续利用与生态保护。

关键词： 机器学习；水质预测；珠江流域；SVM；RF；ANN

Water Quality Prediction in the Pearl River Basin Using an SVM-RF-ANN Ensemble Model

Li Weiqi, Huang Xuan, Zhu Zhengqi

School of Economics and Statistics, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006

Abstract： Water scarcity presents a critical bottleneck to regional sustainable development. The highly urbanized Pearl River Basin suffers from acute water quality-induced scarcity, making accurate prediction essential for aquatic ecological security. Traditional methods, largely reliant on expert experience, are often inefficient and prone to error accumulation. This study develops a machine learning framework for water quality classification using monitoring data from 2015 to 2023 in the Pearl River Basin. Three algorithms—Support Vector Machine (SVM), Random Forest (RF), and Artificial Neural Network (ANN)—were applied, with hyperparameters optimized via grid search and cross-validation. Feature importance analysis was conducted to identify key water quality indicators. A weighted soft-voting ensemble was implemented, with weights dynamically optimized using Particle Swarm Optimization (PSO), effectively integrating the advantages of each base model. The proposed approach demonstrates enhanced overall accuracy and robustness, offering a reliable tool for refined water quality management and supporting the sustainable utilization and conservation of water resources in the basin.

Keywords： machine learning; water quality prediction; Pearl River Basin; SVM; RF; ANN

引言

珠江流域水质研究兼具重要的生态安全、经济发展、政策制定与科研创新价值。在生态层面，水质污染直接威胁水生态系统平衡，影响鱼类产卵与栖息环境^[1]；在饮水安全方面，部分水源地水质不达标与中小河流污染问题依然突出^[2]；经济发展层面，2024年广东省生态环境公报显示总磷、化学需氧量与氨氮仍为主要超标指标，由此引发的污染问题已对农业、工业与旅游业产生连锁影响^[3]；政策层面，精准水质预测可为枯水年水量分配与污水处理设施规划提供关键技术支撑^[4]。在科研层面，该领域已呈现出多技术融合的研究态势，例丁号楠运用多元统计解析水质时空特征^[5]，白雯睿等构建 VMD-CNN-LSTM 预测模型^[6]，牛亚朝等探索珠三角水资源生态足迹^[7]，这些工作推动了环境科学与数据科学的交叉创新。

基金项目：2024年度广东省自然科学基金面上项目“基于判别与深度表示的高维数据聚类方法研究”（2024A1515012040）。

作者简介：

李伟奇，广州大学经济与统计学院，硕士研究生，研究方向为机器学习与计算机视觉；

黄炫，广州大学经济与统计学院，硕士研究生，研究方向为机器学习与计算机视觉；

朱正棋，广州大学经济与统计学院，硕士研究生，研究方向为机器学习与计算机视觉。

当前,水质预测研究持续深化。国内学者发展了多元统计、VMD-CNN-LSTM 等多种方法^[5,6],国外则注重卫星与传感器数据融合及复杂人工智能技术^[8,9]。然而,现有方法在应对极端气候事件、复杂污染机制及模型实时性方面仍存在明显不足。

本文集成随机森林、支持向量机与人工神经网络三种机器学习算法,引入粒子群优化算法动态确定最优权重,构建加权组合预测模型,旨在提升珠江流域水质预测的准确性与鲁棒性,为流域水环境精细化管理提供新方法。

一、研究区域数据来源及预处理

(一) 数据来源

本文以珠江流域内蕉门、流溪河、增江口等重要国家地表水考核断面为研究对象^[5],水质监测数据来源于水利部珠江水利委员会 (www.pearlwater.gov.cn)。所用指标包括电导率 (EC)、pH、溶解氧 (DO)、高锰酸盐指数 (CODMn)、化学需氧量、生化需氧量等。

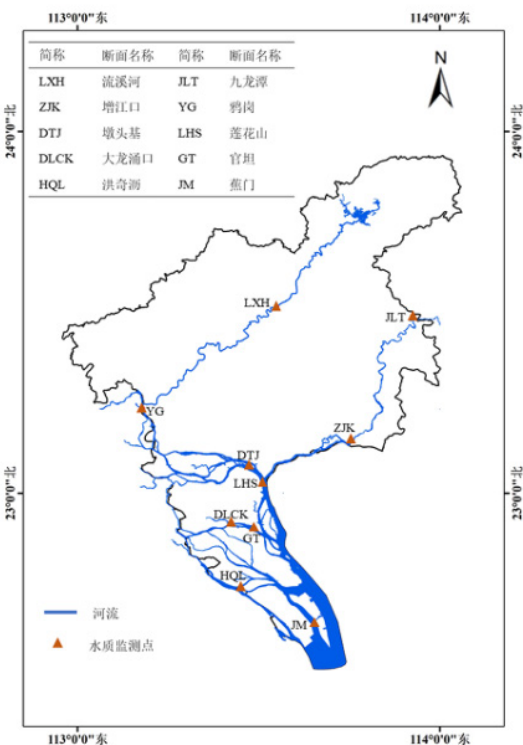


图1: 部分水质监测站点位置图

(二) 数据预处理

针对原始数据存在的缺失、格式不一与量纲差异问题,采用以下流程进行系统预处理:

1. 缺失值处理

针对缺失数据,将表示未监测的“-1”标记替换为 NaN,对缺失率超过70%的指标予以剔除,其余数值型缺失值采用中位数填充,以保持数据分布的稳健性。

2. 类别变量数值化

将文本格式的“综合水质类别”(如“I类”至“劣V类”)进行数值编码映射为0-5的离散标签,以适应模型输入要求。

3. 数据划分与标准化

将完整数据集按7:3的比例划分为训练集与测试集,划分过程设置固定随机种子以确保结果可重现。采用 Z-score 标准化方法对特征数据进行归一化处理,消除量纲影响,提升模型训练效率与预测精度,其公式为:

$$x_{\text{标准化}} = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (1-1)$$

其中, x 代表原始数据, μ 是特征的均值, σ 是特征的标准差。

二、理论背景和相关工作

本文采用随机森林 (RF)、支持向量机 (SVM) 和人工神经网络 (ANN) 三种算法,并构建一种基于粒子群优化 (PSO) 的加权组合模型,以应对珠江流域水质预测的复杂性。

(一) 随机森林的思想及基本原理

随机森林属于 Bagging 类集成算法,其核心机制通过 Bootstrap 抽样构建决策树基学习器,并在节点分裂时引入特征随机选择,以此增强模型多样性并提升泛化性能。对于回归类任务,随机森林的最终输出为所有决策树预测值的算术平均,其数学表达为:

$$y^*(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^*(x) \quad (2-1)$$

其中 N 为森林中树的数量, $y^*(x) (i=1, 2, \dots, N)$ 为每棵树对样本 x 的预测值。

杨宇锋等^[10]应用该模型成功实现了辽河流域氮、磷浓度的高精度预测,验证了其在水质预测任务中的有效性。本文将引入珠江流域水质分类,旨在利用其集成优势捕捉多水质指标与综合类别间的复杂非线性映射。

(二) 支持向量机的思想及基本原理

支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 是一种基于统计学习理论的监督学习模型,其优化目标为在特征空间中构造最大间隔分类超平面,并通过核函数映射处理线性不可分问题。

设有线性可分的训练样本集 $\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^n$, 其中 $y_i \in \{-1, +1\}$ 为类别标签, SVM 的目标是求解如下凸优化问题:

$$\min_{w,b} \frac{1}{2} \|w\|^2 \quad \text{s.t.} \quad y_i(w^T x_i + b) \geq 1, \quad \forall i \quad (2-2)$$

其中， w 为法向量， b 为偏置项。该问题的对偶形式可通过引入拉格朗日乘子进行推导，并利用核函数将原始特征映射到高维空间，以处理线性不可分的情形。常用的核函数包括线性核、多项式核与径向基核等。

丁彦蕊等^[11]采用 SVM 对太湖入湖河流水质关键影响因素进行辨识，证实了该方法在水质特征分析与分类中的有效性。本文借助其结构风险最小化特性，构建珠江流域水质类别的最优判别边界，以提升小样本条件下的分类稳定性。

（三）神经网络的思想及基本原理

神经网络通过模拟生物神经元连接机制构建多层感知机模型，以前向传播实现信号传递，并以误差反向传播算法进行参数优化。

网络中的每个神经元接收前一层神经元的输出，并通过加权求和与非线性激活函数（如 Sigmoid、ReLU 等）产生其输出值。

第 l 层第 j 个神经元的输出 $a_j^{(l)}$ 可表示为：

$$a_j^{(l)} = f\left(\sum_i w_{ji}^{(l)} a_i^{(l-1)} + b_j^{(l)}\right) \quad (2-3)$$

其中， $w_{ji}^{(l)}$ 表示连接第 $l-1$ 层第 i 个神经元与第 l 层第 j 个神经元的权重， $b_j^{(l)}$ 为对应的偏置项， $f(\cdot)$ 为非线性激活函数。

赵颖等^[12]将改进的人工神经网络成功应用于河南部分河流的水质评价，验证了该方法在水质分类任务中的有效性与适用性。本研究利用其强大的非线性拟合能力，模拟珠江流域咸潮入侵等复杂动态水文过程。

（四）组合模型

为集成单一模型的优势并提升整体预测性能，本文构建了一种基于 PSO 的加权集成模型。该模型通过粒子群优化算法动态确定各基模型的最优权重系数，以实现偏差 - 方差权衡。

郭建青等^[13]将粒子群优化算法应用于河流水质参数优化，验证了该优化方法在水环境研究中的有效性。本文采用 PSO 算法优化各基模型的权重系数，构建如下集成表达式：

$$\hat{y}_{\text{ensemble}} = \omega_{\text{RF}} \cdot \hat{y}_{\text{RF}} + \omega_{\text{SVM}} \cdot \hat{y}_{\text{SVM}} + \omega_{\text{ANN}} \cdot \hat{y}_{\text{ANN}} \quad (2-4)$$

其中， \hat{y}_{RF} ， \hat{y}_{SVM} ， \hat{y}_{ANN} 分别代表三个模型的预测值； ω_{RF} ， ω_{SVM} ， ω_{ANN} 为经由 PSO 算法优化得到的非负权重系数，并满足如下约束条件：

$$\omega_{\text{RF}} + \omega_{\text{SVM}} + \omega_{\text{ANN}} = 1 \quad (2-5)$$

该集成策略旨在自适应地融合各基模型的优势，从而在面对珠江流域复杂的非线性水质动态时，展现出更强的鲁棒性与泛化能力。

三、实验结果

本文基于 2015–2024 年珠江流域 10 年重要流域断面的水质监测数据展开，以 2015–2021 年数据作为训练集，2022–2024 年 3 年数据作为测试集，对随机森林（RF）、支持向量机（SVM）、

人工神经网络（ANN）及 PSO 加权集成模型进行了综合对比分析。

（一）模型性能评估

使用准确率、精确率、召回率、F1 分数、类别 1 精确率等指标作为模型的性能评估指标，对各个模型进行了从不同方面的评估（表 1）。

表 1：模型评价对比

模型	准确率	精确率	召回率	F1 分数	类别 1 精确率	类别 1 召回率	抗噪声准确率
SVM	0.76	0.74	0.76	0.75	0.81	0.90	0.76
Random Forest	0.93	0.95	0.90	0.97	0.97	0.91	0.87
ANN	0.81	0.82	0.81	0.81	0.86	0.90	0.78
组合模型	0.94	0.94	0.94	0.93	0.99	0.96	0.89

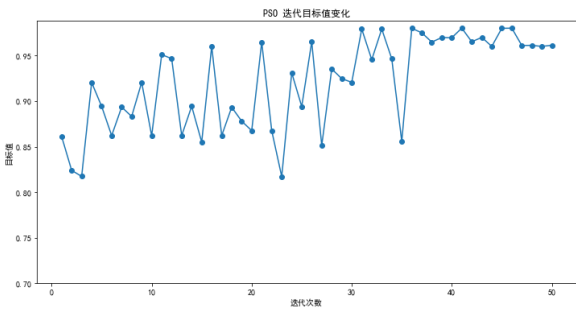


图 2：PSO 迭代目标值变化图

由表 1 可知，随机森林在多项评估指标中表现最优，其准确率达到了 0.93，F1 分数高达 0.97，且具备良好的抗噪性能。支持向量机与人工神经网络的准确率分别为 0.76 与 0.81；其中 SVM 训练耗时较长，ANN 对输入噪声较为敏感，当引入 10% 异常值时，其准确率下降至 0.78。基于 PSO 加权的集成模型综合性能最佳，准确率提升至 0.94，F1 分数为 0.93，在咸潮入侵等复杂水文情景中预测误差显著降低，展现出更优的泛化能力。

同时，各个模型的混淆矩阵（图 3 至图 6）显示，在各类别预测中，随机森林模型的混淆矩阵对角线上具有更高的数值，表明其分类准确率更高且误判更少。SVM 模型在混淆矩阵中的非对角线数值较大，表明其在各个类别上存在一定的误判。组合模型（PSO 加权重）的混淆矩阵中，在各类别上数值准确，组合模型在各类别上均具有较高的预测准确度。

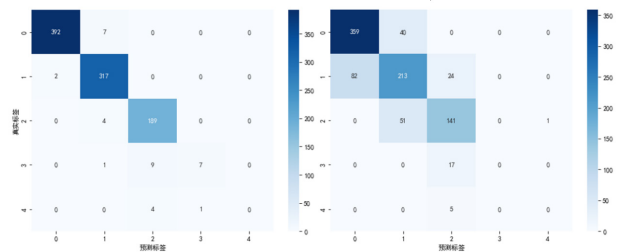


图 3：RF 模型混淆矩阵

图 4：SVM 模型混淆矩阵

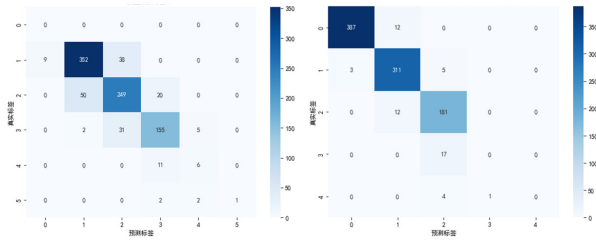


图5: ANN 模型混淆矩阵 图6: 组合模型 (PSO 加权) 混淆矩阵

(二) 模型局限性及改进方向

本文基于机器学习方法构建的水质预测模型在珠江流域应用中表现出较为良好的预测性能,但仍存在以下可改进的方向:

1. 数据维度局限性: 上游监测站点稀疏区域的预测误差达18%, 后续研究可结合灰色预测法^[14]或迁移学习^[15]方法,提升小样本数据区域的预测稳定性。
2. 过程机制融合: 当前模型对污染物迁移转化过程的物理机制刻画不足, 后续可引入流速、流量等水动力参数^[16], 构建机理与数据驱动融合的混合模型。
3. 实时预测优化: 针对模型训练耗时较长的问题, 可研究模型轻量化技术或增量学习算法, 以降低计算成本, 提升预测时效性。

四、结论

本文构建了基于SVM-RF-ANN的机器学习模型体系,实现了对珠江流域水质类别的有效预测。其中,随机森林在特征可解

释性方面表现突出,特征重要性分析显示氨氮、总磷等营养盐指标对水质类别的贡献率超过50%,为核心驱动因子。通过引入粒子群优化算法确定最优权重,建立的加权集成模型显著提升了预测性能,准确率达到94.0%,F1分数为0.93。该模型在咸潮入侵等复杂水文条件下仍保持较强鲁棒性,验证了集成学习策略在应对非线性水质预测问题中的有效性。基于模型分析结果,珠江流域水质管理需重点关注中下游工业点源与农业面源污染,并加强枯水期生态基流保障,以提升水体自净能力。

未来研究将着力于以下方向:一是构建融合水动力学机理与机器学习的“物理机制—数据驱动”混合模型,以弥补现有模型对污染物迁移转化过程刻画的不足;二是整合遥感、无人机与物联网等多源监测数据,提升对新型污染物的识别预测能力;三是引入不确定性量化研究,为应急决策提供风险量化依据;四是结合数字孪生技术,开发珠江流域水质预测与调度一体化平台,实现跨省界面实时预警、污染源追溯及生态补偿政策效果模拟,支撑粤港澳大湾区“水—态—经济”协同发展。

参考文献

- [1] 王建平. 珠江流域生态水力学研究进展 [J]. 中国水利, 2023, (14): 34–38.
- [2] 罗昊, 周雪欣. 珠江流域饮用水水源保护现状及对策 [J]. 水利技术监督, 2024, (08): 70–72.
- [3] 广东省生态环境厅. 2024年广东省生态环境状况公报 [R/OL]. (2025–06–05) [2025–10–10]. 2024年广东省生态环境状况公报 – 广东省生态环境厅公众网
- [4] 郑冬燕. 珠江流域水量分配基本框架研究 [C]// 中国水利学会2013学术年会论文集——S1水资源与水生态, 2013: 444–447.
- [5] 丁号楠. 珠江(广州段)流域河流水质时空特征分析和预测研究 [D]. 华南理工大学, 2023.
- [6] 白雯睿, 杨毅强, 郭辉, 等. 基于VMD-CNN-LSTM的珠江流域水质多步预测模型研究 [J]. 四川轻化工大学学报(自然科学版), 2022, 35(04): 66–74.
- [7] 牛亚朝, 罗柱, 王强, 等. 珠三角区域水资源生态足迹动态分析与预测 [J]. 人民珠江, 2024, 45(05): 34–45.
- [8] van Vliet, M.T.H., Thorslund, J., Stokal, M. et al. Global river water quality under climate change and hydroclimatic extremes. Nat Rev Earth Environ 4, 687–702 (2023).
- [9] Wang, M., Bodirsky, B.L., Rijnveld, R. et al. A triple increase in global river basins with water scarcity due to future pollution. Nat Commun 15, 880 (2024).
- [10] 杨宇锋, 武啸, 王璐, 等. 基于随机森林模型的辽河高时间分辨率氮、磷浓度模拟与预测 [J]. 环境科学学报, 2022, 42(12): 384–391.
- [11] 丁彦蕊, 孙小妹, 王文超, 等. 基于支持向量机的太湖入湖河流水质影响因素的研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(05): 38–40+46.
- [12] 赵颖, 王建英, 孙燕, 等. 改进人工神经网络在河南部分河流的水质评价中的应用 [J]. 环境与发展, 2018, 30(03): 216–217.
- [13] 郭建青, 李彦, 王洪胜, 等. 粒子群优化算法在确定河流水质参数中的应用 [J]. 水利水电科技进展, 2007, (06): 1–5.
- [14] 李娜, 王腊春, 谢刚, 等. 山东省辖淮河流域河流水质趋势的灰色预测 [J]. 环境科学与技术, 2012, 35(02): 195–199.
- [15] 杨晶, 路恒通, 金鑫. 机器学习赋能智慧水利的应用现状 [J]. 水利水电技术, 2024, 55(10): 137–147.
- [16] 聂影, 刘永宏, 梁卫芳, 等. 基于物联网+机器学习的水位、水质预测模型应用研究 [J]. 物联网技术, 2024, 14(10): 89–94.

“一带一路”稀土产业链网络演化特征及脆弱性研究

赵军产, 邓涛, 万子健

湖南工商大学 数学与统计学院, 湖南 长沙 410205

DOI:10.61369/ASDS.2025100013

摘 要： 稀土在国防建设、航空航天以及新能源、新材料等新兴领域，起着不可或缺的作用，为准确把握“一带一路”稀土产业链情况，本文运用复杂网络理论以及蒙特卡洛模拟，对“一带一路”稀土产业链的上、中、下游产品展开研究。研究结果表明：“一带一路”稀土产业链发展态势日益向好；下游稀土产品在贸易额上占据主导地位，且聚类系数更大；整个稀土网络具备小世界网络特性，有较高的网络连通性和凝聚力；中国、印度、土耳其、阿联酋、俄罗斯为稀土产业链中的枢纽国家；中国在“一带一路”稀土产业链中的影响力越来越大，且有着不可替代的关键作用。

关 键 词： 稀土产业链；“一带一路”；复杂网络；结构脆弱性

On Evolution Characteristics and Vulnerability of the Rare Earth Industry Chain Network Along the Belt and Road

Zhao Junchan, Deng Tao, Wan Zijian

School of Mathematics and Statistics, Hunan University of Technology and Business, Changsha, Hunan 410205

Abstract： Rare earth plays an indispensable and important role in emerging fields such as new energy, new materials, aerospace and national defense construction. In order to accurately grasp the rare earth industry chain of the Belt and Road, this paper uses complex network theory and Monte Carlo simulation to study the upstream, midstream and downstream products of the rare earth industry chain of the Belt and Road. The research results show that the development trend of the rare earth industry chain of the Belt and Road is getting better and better; downstream rare earth products occupy a dominant position in trade volume, and the clustering coefficient is larger; the entire rare earth network has the characteristics of a small world network, with high network connectivity and cohesion; China, India, Turkey, the United Arab Emirates, and Russia are hub countries in the rare earth industry chain; China's influence in the rare earth industry chain of the Belt and Road is increasing, and it plays an irreplaceable and key role.

Keywords： rare earth industry chain; the Belt and Road; complex network; structural fragility

引言

稀土素来被称为“工业味精”，它在新能源、新材料、航空航天等尖端科技领域与国防建设中，均发挥着不可或缺的基础材料作用。近年来，随着中国、美国和欧盟等国家相继将稀土矿产列为战略关键清单，稀土作为战略性新兴产业发展的基础资源，成为各国抢占全球经济制高点、提升创新能力的竞争砝码。

关于稀土的研究，在稀土价格方面，Hurst 等^[1]和 Looney 等^[2]认为中国实施的稀土出口配额政策会导致稀土国际市场价格上涨。郑书青等^[3]与罗翔等^[4]发现当地缘政治不确定性增加时，人们对稀土的需求减少，稀土价格降低、交易量减少，稀土收益率的波动减弱，因此认为地缘政治是影响稀土国际价格的重要影响因素。杨斌清等^[5]基于时间序列模型对稀土氧化物进行预测，发现稀土价格数据具有高度的非平稳性、非线性和噪声的特性。

复杂网络方法是近年来的研究热点，随着 Serrano 等^[6]发现全球贸易网络具有复杂网络的“小世界”、“无标度”等特性，复杂网络被广泛应用在各类贸易网络中，如：农产品、石油、天然气、煤炭等贸易网络中^[7-10]。在稀土网络方面，陈健等^[11]认为中国的稀土出口依存度偏高，需要加强对稀土出口配额的控制。Rybak A 等^[12]对考虑稀土金属影响下的欧盟27国能源安全进行了研究，研究结果表

基金项目：国家社会科学基金（24BTJ033）；长沙市自然科学基金项目（kq2402103）。

作者简介：

赵军产（第一作者），男，博士，教授，研究方向为复杂理论及应用；

邓涛，男，硕士，研究方向为贸易安全测度；

万子健，男，硕士，研究方向为贸易网络。

明欧盟27国的能源可及性、可用性、可接受性、可负担性均低于平均水平。Yu G等^[13]基于全球稀土贸易网络,采用Moran指数进行空间相关性分析,结果表明全球稀土产业具有集聚效应,倾向于与周边国家进行贸易。Hu X等^[14]对稀土初级产品贸易网络进行了研究,研究结果表明经济规模、邻接性、测地线、经济距离和制度距离是国家间稀土初级产品贸易的主要驱动力。

然而,上述研究对稀土产业链上、中、下游的韧性缺乏量化分析,尤其是对产业链关键路径未能进行有效识别。鉴于此,本文以复杂网络理论为基础,构建稀土产业链上、中、下游复杂网络模型,通过网络密度、聚类系数、鲁棒性等特征指标,研究“一带一路”稀土产业链网络以及各枢纽国之间贸易的紧密程度与连通性,量化国家间的战略博弈,为我国资源安全、地缘政治和产业政策提供了多维度的分析框架。

一、数据与方法

(一) 稀土产业链网络构建

本文是基于“一带一路”倡议提出后的稀土产业相关数据,运用有向有权图的构造方法构建“一带一路”沿线国家的稀土产业链上、中、下游复杂网络。稀土三大类产品见表1,数据主要来源于联合国数据库,时间跨度为2012年–2020年。

表1: 稀土产业划分
Table 1 Classification of rare earth industry

层级	大类名称	HS 编码
上游产品	稀土矿	253090
	稀土金属矿	280530
	稀土氯 / 氧化物	284690
中游产品	稀土盐类	284610
	稀土铁合金	720299
	稀土肥料	310590
下游产品	稀土发光体	320650
	稀土磁体	850511、850519

本文用有向有权图 $G = w_{ij}$ 表示国家 i 对国家 j 的稀土产品关系,矩阵元素为 $w_{ij} = 0$ 表示不存在关系, $w_{ij} = 1$ 表示存在国家 i 对国家 j 的稀土产品 x 有需求,但国家 j 对国家 i 的产品不一定有需求,也就是说矩阵不是一个对称矩阵,即网络是有向的。由于国家之间不存在负贸易,因此矩阵中所有的值都大于等于0,为了区分国家之间的贸易密切程度,引入稀土贸易总额作为各个国家之间的连接权重,即网络是有权的。

(二) 网络指标说明

1. 点强度指标

点强度是点入度与点出度的和。点入度是指 i 国家对其他国家稀土相关产品的需求,值越大说明自身需求大,对其他国家越依赖。点出度是指 i 国家对其他国家稀土相关产品的供给,值越大说明自身存量越大,对其他国家依赖小。点强度可以表示节点国家在产业链网络中的重要性。点强度的计算公式为:

$$S_i^{in} = \sum_{j=1}^N w_{ji}, S_i^{out} = \sum_{j=1}^N w_{ij}, k_i = S_i^{in} + S_i^{out}$$

其中, k_i, S_i^{in}, S_i^{out} 分别表示节点国家 i 的点强度、点入度与点出度。 w_{ij} 与 w_{ji} 为有向有权网络的邻接矩阵 G 的元素。

2. 中心性指标

中心度指标主要包括度数中心性、中介中心性及接近中心性。

(1) 度数中心性

度数中心度分为入度中心性与出度中心性,入度中心性是指 i 国家稀土相关产品的其他需求国家占总数的比值,出度中心性是指 i 国家稀土相关产品的其他供给国家占总数的比值。度数中心度,反映的是国家之间的稀土产业链影响力,数值越大说明影响力越大。计算公式如下:

$$DC_i^{in} = \frac{\sum_{j=1}^N w_{ji}^0}{N-1}, DC_i^{out} = \frac{\sum_{j=1}^N w_{ij}^0}{N-1}$$

其中, DC_i^{in} 与 DC_i^{out} 分别表示节点国家 i 的入度中心性与出度中心性, N 表示“一带一路”沿线国家的国家总数, w_{ij}^0 与 w_{ji}^0 是邻接矩阵中有向无权重的元素值。

(2) 接近中心性

接近中心性表示当前国家与其他国家的总路径长短,接近中心性越大表示网络的越集中,在产业链网络中也表示与其他节点国家有更多产业往来,可以形容国家在网络中的稳定程度。计算公式如下:

$$CC_i = \frac{1}{(N-1) \sum_{j=1}^N d_{ij}}$$

其中, CC_i 表示节点国家 i 的接近中心性, N 表示“一带一路”沿线国家的国家总数, d_{ij} 表示从节点国家 i 到节点国家 j 的路径数量,当无法到达时,取无穷大。

(3) 中介中心性

中介中心性表示节点国家与其他国家间稀土相关产品的周转能力和控制程度,数值越高说明周转与控制能力越强。计算公式如下:

$$BC_i = \frac{\sum_{j \neq k \neq i}^N \frac{g_{jk}(i)}{g_{jk}}}{(N-1)(N-2)}$$

其中, BC_i 表示节点国家 i 的中介中心性, N 表示“一带一路”沿线国家的国家总数, g_{jk} 表示国家 j 与国家 k 之间的所有路

径, $g_{jk}(i)$ 表示国家 j 与国家 k 之间的所有路径中经过国家 i 的路径数量。

3. 网络整体指标

网络整体指标包括网络密度、平均聚类系数与平均路径长度。

(1) 网络密度

网络密度是形容网络中各个节点的联系紧密程度, 越接近 1 说明稀土产业链网络联系越紧密; 相反越接近于 0, 说明网络中联系越少。计算公式如下:

$$\rho = \frac{|E|}{N(N-1)}$$

式中, E 为“一带一路”稀土产业链网络中实际存在的节点连边数。

(2) 平均聚类系数

平均聚类系数代表着稀土产业链网络中的连通水平, 平均聚类系数越高, 表示网络中各个节点连通性越好。计算公式如下:

$$M = \frac{\sum_i^N \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)}}{N}$$

其中, k_i 表示国家 i 的点强度, E_i 是网络图中国家 i 与周边国家的连边总数。

(3) 平均路径长度

在“一带一路”稀土产业链网络中, 平均路径长度越短, 表示各国间稀土产品交易效率越高。平均路径长度的计算公式为:

$$L = \frac{2 \sum d_{ij}}{N(N-1)}$$

其中, L 为贸易网络的平均路径长度, 即“一带一路”稀土产业链网络中的节点平均距离。

4. 网络结构脆弱性度量指标

Xu X^[15] 提出结构脆弱性下界的度量指标 V , 其定义为节点按照某种最优顺序被逐个移除时, 网络性能变化情况, 计算公式如下:

$$V = 1 - \frac{S(f)}{N}, S(f) = \frac{1}{(1-f)N} \max_{1 \leq k \leq n_f} |G_f|$$

其中, $S(f)$ 表示移除 f 比例节点后的网络最大子群规模, G_f 表示移除 f 比例节点后的网络图, V 表示网络结构脆弱性度量指标, N 表示网络节点数量。

二、网络演化特征及规律

(一) 稀土网络演化过程

在图 1 中, 2012 年的核心节点为中国、土耳其、印度、俄罗斯、波兰与捷克, 次核心国家共有 21 个。2020 年主要领导国家

仍为六个, 其中中国地位仍稳固居于第一, 不参与上游产品链的“一带一路”国家更少。从上游稀土产品供需关系来看, 从 2012 年至 2020 年中国一直是“一带一路”沿线国家最大的上游稀土产品需求国与供给国, 2020 年的需求甚至高达 31.5%, 供给为 18.3%。另外俄罗斯则是主要的稀土矿等上游稀土产品的主要供给国, 2020 年供给占“一带一路”总占比的 18.8%。

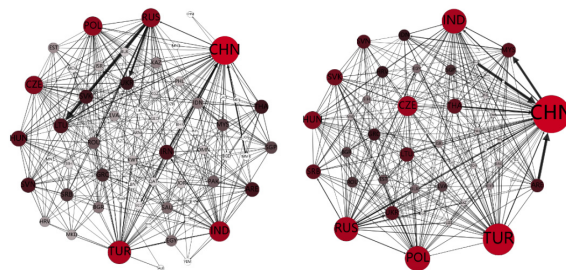


图 1: 上游稀土产品网络对比图 (左为 2012, 右为 2020)

Figure 1: Comparison of upstream rare earth product networks (left for 2012, right for 2020)

在图 2 中, 2012 年核心节点国家为中国、印度, 次核心国家为俄罗斯、波兰、斯洛文尼亚、土耳其、新加坡、泰国、阿联酋和捷克。2020 年核心节点国家增加五个, 13 年的次核心国家成为新的核心国家, 次核心节点国家也有一定幅度的增多。从中游稀土产业链供需关系来看, 中国在“一带一路”中从主要供给国家, 变为主要的需求国家, 印度则借助“一带一路”倡议与更多国家形成了中游稀土产业链供需关系。

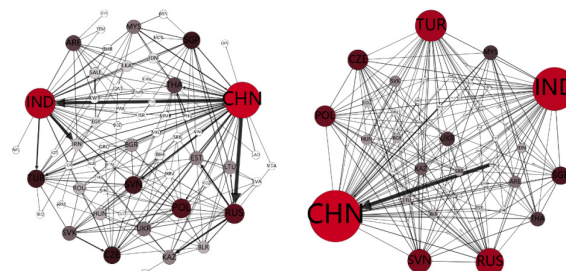


图 2: 中游稀土产品网络对比图 (左为 2012, 右为 2020)

Figure 2: Comparison of midstream rare earth product networks (left for 2012, right for 2020)

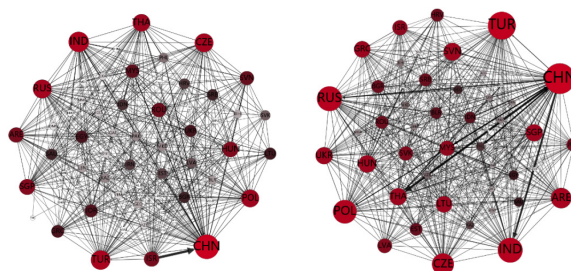


图 3: 下游稀土产品网络对比图 (左为 2012, 右为 2020)

Figure 3: Comparison of downstream rare earth product networks (left for 2012, right for 2020)

在图 3 中, 下游产品本身就是稀土产业链贸易中最重要的部分, 从 2012 年至 2020 年, 下游稀土产业链在“一带一路”沿线国家中的供需关系也最为错综复杂, 2012 年 26 个国家为产业链网络中的核心、次核心节点国家, 2020 年 42 个“一带一路”国家成为核心、次核心节点国家, 说明“一带一路”倡议作用明显, 沿

线国家交通、贸易政策更为便捷，这都直接促进了国家之间的稀土贸易网络更加紧密，稀土贸易量也更多。

可以发现，“一带一路”稀土产品网络关系较为复杂，但整体分布规律较为明显，处于稀土产品网络重要地位的国家，其节点更大，颜色更红，连边更密集。从稀土产品网络图的节点位置来分析，中国、俄罗斯和印度始终占据核心或重要位置，这种核心地位不仅体现了它们在稀土资源储备、生产和出口方面的实力，也反映了这些国家在稀土供应链中的重要作用。从整体上看，中国在“一带一路”沿线国家的影响力逐渐增大，图中表现为节点更大更红，连边更多。另外，中国从2012年三大稀土产品的需求者变为2020年三大稀土产业链的主要供给与需求者，这是我国稀土产业链的不断完善、稀土加工出口能力的不断提高的表现。

（二）稀土贸易网络整体性分析

1. 上、中、下游产品总贸易量与贸易额

从图4中可以看出，“一带一路”沿线国家的稀土产品贸易量主要为上游和下游稀土产品，稀土贸易额主要是下游稀土产品，这是因为经过精加工后的下游稀土产品包括稀土铁合金、稀土磁体等，能够应用于许多高精技术行业的产品，普遍价值很高。而稀土上游产品为稀土矿和稀土金属矿，在贸易中的价值不高。

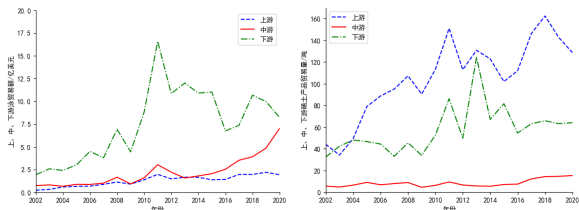


图4：“一带一路”上、中、下游稀土产品贸易（左为贸易额，右为贸易量）

Figure 4: Trade of rare earth products in the upstream, midstream, and downstream of the Belt and Road (left: trade value, right: trade volume)

另外，可以发现2011年下游稀土产品到达峰值，为21.7亿美元，此时的下游稀土贸易量并不是最高的，下游稀土贸易量于2013年到达顶峰，这也对应了2011年稀土精加工产品的全球价格暴涨，该事件一方面是因为作为稀土下游产品最大出口国的中国，对稀土下游产品出口配额的调低，导致了国际稀土市场的恐慌；另一方面是由于全球大宗商品对稀土产品价格的调整，部分稀土贸易商对稀土产品的囤货行为。这两个原因导致2011年国际稀土市场供小于求，全球稀土价格上升。但随着稀土价格的暴涨，也引起了全球的稀土开采与投资的热情，随着各国稀土开采，国际稀土产量增加，供大于求，稀土价格也由此下跌。此外2010年至2016年期间稀土产品贸易量波动大的原因也源于此事件。

2. 网络拓扑指标

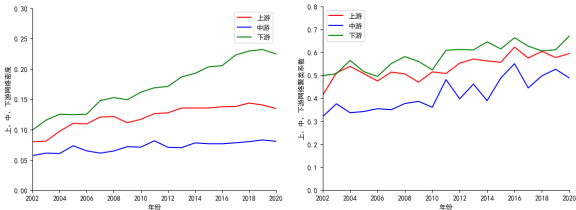
“一带一路”稀土产业网络特征如下表2，从表中可以看出2012年至2020年期间，平均入度、入度中心性呈现上升的趋势，说明“一带一路”稀土国家的平均贸易伙伴数量变多，且关系较为稳定。

表2：“一带一路”稀土产业网络特征
Table 2: Characteristics of the “the Belt and Road” rare earth industry network

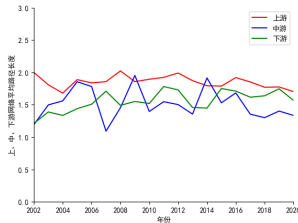
年份	平均入度	入度中心性	接近中心性	网络密度	平均路径长度	平均聚类系数
2012	13.68	0.21	0.50	0.21	1.89	0.64
2013	14.28	0.22	0.49	0.22	1.71	0.66
2014	14.65	0.23	0.51	0.23	1.74	0.66
2015	15.02	0.23	0.51	0.23	1.82	0.64
2016	15.00	0.23	0.52	0.23	1.78	0.66
2017	16.40	0.26	0.53	0.26	1.69	0.65
2018	16.94	0.26	0.54	0.26	1.72	0.65
2019	16.95	0.26	0.53	0.26	1.69	0.67
2020	16.32	0.26	0.52	0.26	1.66	0.70

另外，接近中心性、网络密度、平均聚类系数也呈现上升趋势，说明稀土网络各国家的贸易变得越来越紧密。平均路径长度呈现逐年下降的趋势，说明国家之间的稀土贸易所周转次数减少，贸易效率提高。

如图5中a所示，“一带一路”稀土上、中、下游产品的网络密度整体水平较低，差别较大，但整体上呈现上涨的趋势。65个“一带一路”沿线国家在2002—2020年间都参与了“一带一路”稀土贸易活动，2006年中国将41种稀土金属列入《加工贸易禁止类商品目录》，因此稀土中游产品网络密度在此期间有较大幅度下降。另外，受经济危机、疫情影响，网络密度在2008、2020年出现明显下降，2014年WTO“稀土案”针对中国稀土出口政策进行制裁，导致“一带一路”沿线国家稀土产业链上、中、下游产品网络密度趋于平稳或略有下降。



a. 网络密度 b. 网络平均聚类系数



c. 网络平均路径长度

图5：网络特性指标图

Figure 5: Network characteristic index diagram

从图5中b可以看出，稀土产业链产品的平均聚类系数在2002—2020年间呈现波动上升状态，下游稀土产品的平均聚类系数始终位于三大类产品的首位，说明“一带一路”稀土产业链三大产品中下游产品的贸易网络非常密切。另外，中游产品的聚类系数在2010年至2017年期间波动大，这一时期也是国际稀土政策不断更新的时期，说明“一带一路”沿线国家中的中游稀土产

品贸易不密切，整个中游产品网络易受到影响。

从图5中c可以看出，“一带一路”稀土产品的平均路径长度均在区间[1,2]内，一个国家与另外一个国家稀土产品的贸易关系平均只需要不高于两次的中转，说明稀土上、中、下游产品的网络符合小世界网络特性，具有较高的连通性和网络凝聚力。

（三）贸易枢纽国分析

中介中心性表示节点国家与其他国家间稀土相关产品的周转能力和控制程度，数值越高说明周转与控制能力越强。

如表3所示，可知2012年-2020年间中国始终位于首位，说明中国在“一带一路”稀土贸易中周转与控制能力强，属于网络中的核心枢纽位置。这9年间，印度有5次排名第二，土耳其有4次排名第二，说明印度、土耳其对稀土的控制能力仅次于中国，在网络中也属于非常重要的枢纽位置。阿联酋、俄罗斯在网络中地位较为稳定，基本处于第四、五，在稀土网络中有一定的控制能力。因此认为稀土网络中的贸易枢纽国为中国、印度、土耳其、阿联酋、俄罗斯。

表3：“一带一路”稀土网络中介中心性排名前五
Table 3 Top five intermediary centrality rankings of the “the Belt and Road” rare earth network

2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
中国	中国	中国	中国	中国	中国	中国	中国	中国
印度	印度	土耳其	土耳其	土耳其	印度	印度	印度	土耳其
土耳其	土耳其	印度	印度	捷克	阿联酋	阿联酋	俄罗斯	印度
俄罗斯	阿联酋	阿联酋	阿联酋	印度	土耳其	土耳其	土耳其	阿联酋
阿联酋	俄罗斯	俄罗斯	俄罗斯	阿联酋	俄罗斯	新加坡	新加坡	俄罗斯

（四）结构脆弱性分析

在对静态网络结构进行研究时，网络的结构脆弱性主要体现在网络遭受外部冲击之后所具备的网络稳定性，这些外部冲击通常为：网络关键节点的移除、网络传播路径的改变、网络新入节点的增加，在稀土产业链网络中的具体体现为：国家间贸易制裁、重大突发疾病与自然灾害情况、本国稀土政策变化、稀土采集与加工技术突破、新型稀土贸易组织涌现。

表4：去除五大枢纽国后的网络结构脆弱性表
Table 4: Network structural vulnerability table after removing the five hub countries

年份	稀土行业	上游产品	中游产品	下游产品
2012	0.17	0.48	0.59	0.32
2013	0.28	0.37	0.73	0.37
2014	0.28	0.41	0.63	0.41
2015	0.17	0.43	0.57	0.31
2016	0.18	0.32	0.75	0.32
2017	0.23	0.34	0.66	0.32
2018	0.20	0.33	0.61	0.30
2019	0.20	0.44	0.60	0.24
2020	0.22	0.39	0.63	0.33
平均	0.21	0.39	0.64	0.32

为了研究上述情况发生时稀土网络的变化，本文采用了蒙特

卡洛方法来模拟在不同贸易枢纽国家缺失时的稀土网络，并计算网络的脆弱性指标，该指标可以评估各个枢纽国的缺失对稀土网络结构和功能的影响。去除中国、印度、土耳其、阿联酋、俄罗斯五大贸易枢纽国之后的稀土网络脆弱性如表4所示，从中可以发现，去除五大稀土贸易枢纽国家后，整个稀土行业的平均结构脆弱性为0.21，较为稳定；在稀土上、中、下游产品中，中游产品结构脆弱性指标最高，为0.64，说明五大枢纽国在稀土中游贸易中起着重要作用。

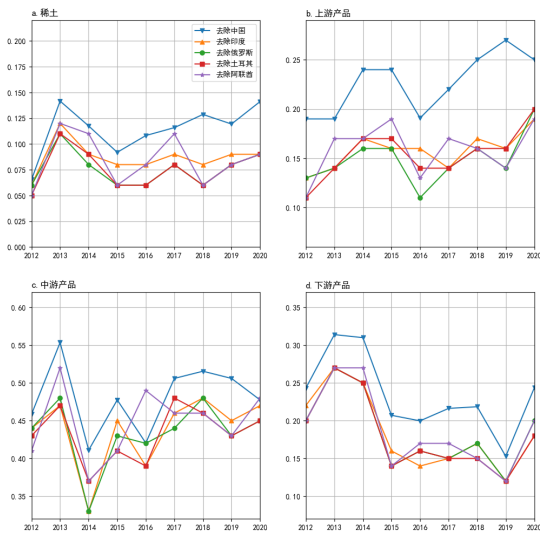


图6：去除单个枢纽国家后的结构脆弱性变化图

Figure 6: Change in structural vulnerability after removing a single hub country

为进一步研究单个国家在网络中的重要性程度，模拟了去除单个国家后稀土网络的结构脆弱性变化情况，研究结果如图6。图中可以看出，去除中国之后的“一带一路”稀土行业及三大产品网络结构脆弱性指标高于其余四个国家，分别平均多0.03、0.07、0.04、0.05。其中，五大枢纽国对稀土中游产品影响最大，去除中国后的中游产品网络的结构脆弱性最大，为0.5535，说明中国与其他国家在中游产品中有着难以替代的贸易地位。另外，在“一带一路”稀土网络中，去除单个枢纽国家后的结构脆弱性指标在[0.05,0.15]之间波动，对整个网络的结构脆弱性影响不大；在上游与下游产品网络中，去除中国后的稀土网络结构脆弱性显著高于其余枢纽国家，其中上游产品平均高出0.07，下游产品平均高出0.05。

三、结论与展望

本文针对“一带一路”沿线主要国家，按照稀土产业链上、中、下游产品构建了稀土产业链网络，并对比“一带一路”倡议提出前后的稀土产业链网络结构差异以及网络的脆弱性，结果表明：“一带一路”稀土产业链发展态势日益向好。“一带一路”稀土产业链中，国家之间的贸易更加紧密，平均贸易伙伴数量变多且较为稳定，稀土贸易的周转次数减少、贸易效率提高。在“一带一路”稀土上、中、下游产品贸易中，下游稀土产品在贸易额上占据主导地位，且聚类系数更大。三大类稀土产品的网络密度

层次间差异明显,但均呈现出逐步上升的趋势。此外,三大类稀土产品网络的平均路径长度均维持在1至2的区间内,网络符合小世界网络特性,具有较高的网络连通性和凝聚力。中国、印度、土耳其、阿联酋、俄罗斯为“一带一路”稀土产业链中的枢纽国家,与其余各国稀土贸易联系多,对稀土产品控制能力强。中国在“一带一路”稀土产业链中的影响力越来越大,在稀土中游产品具备其他国家不可替代的关键作用。

本文研究样本只考虑了稀土产业链,未来的研究还可以适当跨越产业类别,比如研究“一带一路”稀土产业与新能源产业链之间的网络关系,或者将新兴战略行业的基础产业链供应作为研究方向。受限于数据可得性,本文未讨论疫情过后的稀土产业链情况。未来的研究可以进一步探讨疫情前后的“一带一路”稀土产业链网络特征以及核心路径情况。

参考文献

- [1]Hurst C. China's Rare Earth Elements Industry: What Can the West Learn?[R]. Washington: Institute for the Analysis of Global Security, 2010.
- [2]Looney R. Recent developments on the rare earth Front: Evidence of a new technocratic mercantilism emerging in China[J]. World Economics, 2011, 12(1): 78.
- [3] 郑书青, 刘雨斐. 基于 GRACH-MIDAS 模型的地缘政治不确定性对国际稀土价格波动影响的理论与政策研究 [J]. 中国商论, 2022(20): 40-42.
- [4] 罗翔, 李政, 赖丹. 中国稀土矿产品价格波动的经济后果及影响因素研究 [J]. 价格月刊, 2023(08): 8-17.
- [5] 杨斌清, 张希琳. 基于 ARIMA 时间序列模型的稀土氧化物价格预测研究 [J]. 中国稀土学报, 2017, 35(05): 680-686.
- [6]Serrano M A, Boguna M. Topology of the World Trade Web[J]. Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys, 2003, 68(2): 015101.
- [7] 马述忠, 任婉婉, 吴国杰. 一国农产品贸易网络特征及其对全球价值链分工的影响——基于社会网络分析视角 [J]. 管理世界, 2016(03): 60-72.
- [8]Zhang, Chi, Jiasha Fu, and Zhengning Pu. A study of the petroleum trade network of countries along “The Belt and Road Initiative” [J]. Journal of Cleaner Production 222 (2019): 593-605.
- [9]Guo, Yaoqi, Boya Zhao, and Hongwei Zhang. The impact of the Belt and Road Initiative on the natural gas trade: A network structure dependence perspective[J]. Energy 263 (2023): 125912.
- [10] 蒋培祥, 董志良, 张翠芝, 等. 常规能源国际贸易网络演化特征研究 [J]. 复杂系统与复杂性科学, 2021, 18(04): 66-73.
- [11] 陈健, 吴楠. 世界稀土资源现状分析与我国稀土资源可持续发展对策 [J]. 农业现代化研究, 2012, 33(01): 74-77.
- [12]Rybak A, Kolev S D. A synthetic measure of energy security taking into account the influence of rare earth metals. The case of Poland[J]. Energy Reports, 2023, 10: 1474-1484.
- [13]Yu G. Evolutionary analysis of the global rare earth trade networks[J]. Applied Mathematics and Computation, 2022, 430: 127249.
- [14]Hu X, Sun B, Wang C. Impacts of China's exports decline in rare earth primary materials from a trade network-based perspective[J]. Resources Policy, 2023, 81: 103321.
- [15]Xu X, Zhu Y, Xu M, et al. Vulnerability analysis of the global liner shipping network: from static structure to cascading failure dynamics [J]. Ocean & Coastal Management, 2022, 229: 106325.

数字经济助力数字新质生产力 ——基于保险调节作用的路径分析

陈思敏

广东外语外贸大学 数学与统计学院, 广东 广州 511400

DOI:10.61369/ASDS.2025100014

摘 要 : 数字经济是数字新质生产力增长的重要着力点。本文构建了数字经济与数字新质生产力评价指标体系, 基于2013–2023年省级面板数据测度发展水平, 并探究其作用机制、区域异质性以及保险的调节作用。研究发现: 第一, 数字经济与数字新质生产力泰尔指数都处于较低水平, 二者区域差异主要源于区域间分化, 两者波动高度同步; 第二, 数字经济显著驱动数字新质生产力提升, 经内生性处理与稳健性检验后结果依然显著; 第三, 异质性分析显示, 数字经济对数字新质生产力的促进作用呈现东部 > 中西部 > 东北部、第二产业 > 第三产业 > 第一产业的梯度特征; 第四, 保险发展通过双向 (原保费收入、资金运用情况) 和单向 (保险密度) 传导路径强化数字经济对数字新质生产力的赋能效应。据此建议, 深化数字技术渗透融合、构建梯度发展体系、打造“保险+数字”双循环生态体系。

关 键 词 : 数字经济; 数字新质生产力; 保险; 调节效应; 双重固定效应模型

The Digital Economy Boosts Digital New Quality Productivity—Path Analysis Based On Insurance Regulation

Chen Simin

School of Mathematics and Statistics, Guangdong University of Foreign Studies, Guangzhou, Guangdong 511400

Abstract : The digital economy is an important focus for the growth of new digital productivity. This paper constructs an evaluation index system for digital economy and digital new quality productivity, measures the development level based on provincial panel data from 2013 to 2023, and explores its mechanism, regional heterogeneity and the moderating role of insurance. The results show that: first, the digital economy and the digital new quality productivity Thiel index are at a low level, and the regional differences between the two are mainly due to regional differentiation, and the fluctuations of the two are highly synchronized. Second, the digital economy significantly drives the improvement of digital new quality productivity, and the results are still significant after endogenous treatment and robustness testing. Third, the heterogeneity analysis shows that the promotion effect of the digital economy on the new digital productive forces shows the gradient characteristics of the east > central and western regions > the northeast, the secondary industry > the tertiary industry > and the primary industry. Fourth, insurance development strengthens the empowering effect of the digital economy on new digital productivity through two-way (original premium income, capital utilization) and one-way (insurance density) transmission paths. According to this suggestion, we should deepen the penetration and integration of digital technology, build a gradient development system, and create an "insurance + digital" dual circulation ecosystem.

Keywords : digital economy; digital new quality productivity; insurance; moderating effect; dual fixed-effect model

引言

在全球数字化浪潮下, 数字经济蓬勃发展, 已成为推动经济增长和产业升级的关键力量。其发展脉络清晰: 自2016年杭州 G20 峰会首次纳入国家政策框架, 至2021年《“十四五”数字经济发展规划》明确提出“协同推进数字产业化和产业数字化, 做强、做优、做大我国数字经济”。据2024年《中国数字经济发展研究报告》, 2023年我国数字经济规模达53.9万亿元, 占 GDP 比重42.8%, 成为

产业数字化的核心动力。历经大数据、人工智能、区块链、量子科技等前沿领域的迭代融合，数字经济已形成综合技术生态。它正引领着经济高质量发展。

在此背景下，作为新一轮科技革命主导力量的数字技术，正对产业形成颠覆性与创造性转变，提升产业数字化水平和数字生产力，最终催生以“提质增效”为特征的数字新质生产力。数字新质生产力是数字技术与实体经济深度融合形成的新型生产力，其核心内涵包含三方面：一是运用数字技术改造提升传统产业，赋能传统产业升级；二是数字经济孕育新兴产业、业态和商业模式；三是数据要素显著提升生产效率和激发创新突破。作为新质生产力的重要分支，它以数字化、智能化为核心特征，体现新发展理念下的先进生产力形态，具体表现为以下四大特征：（1）技术驱动的生产方式变革：依托大数据、云计算、人工智能等技术，实现生产流程数字化与智能化；（2）效率与创新的双提升：优化资源配置与流程管理，显著提高效率并加速技术创新转化；（3）需求响应的精准化：利用数字化手段，实现产品快速迭代与定制化生产，满足个性化、智能化需求；（4）全球竞争力的重构：通过数字化平台与生态系统建设，促进产业链协同创新与全球化布局，形成差异化竞争优势。其先进性体现在两方面：一是推动传统产业向高端化、智能化、绿色化转型；二是培育新业态、新模式，开辟经济增长新赛道。二者的协同作用不仅为经济高质量发展注入新动能，也显著提升了我国在全球价值链中的竞争地位^[1]。

数字新质生产力的出现，确立了“数据”这一新型生产要素。作为数字经济的关键资源，它正在颠覆传统的生产方式。邓炜辉等^[2]从理论层面指出，数据流通能优化传统生产力三要素（劳动力、劳动工具、劳动对象），促进科技创新与产业深度转型。数据与人工智能、云计算、物联网等技术深度融合，催生颠覆性创新，大幅提升生产效率并孕育新产业形态与商业模式。数字新质生产力以“创新驱动”为核心，依托科技创新、人才培养和产业培育构建增长引擎。它通过智能化生产系统、数字化供应链管理和网络化协同平台，推动生产过程智能化、自动化，增强系统互通性，显著提升生产灵活性与市场响应速度。它摒弃了传统依赖土地、劳动力、资本及大规模投资、出口导向的模式，转向“创新质量驱动”发展^[3]。因此，数字新质生产力不仅是对生产力要素的全方位升级，更是对经济发展模式的根本性重塑。它打破传统增长路径，构建适配数字经济时代的新型生产力系统，实现从“要素规模驱动”向“创新质量驱动”的动力转换，为经济高质量发展注入持续动能。

数字经济的蓬勃发展是数字新质生产力形成的核心“催化剂”。这种新兴经济形态，凭借大数据、人工智能、云计算、区块链等技术融合与数据驱动，重塑经济增长机制，提升效率、灵活性与可扩展性，有力推动了数字新质生产力的发展。周小亮等^[4]强调，数字经济催生的新技术不仅提升效率、孕育新商业模式与产业形态、重塑劳动要素要求，其衍生的云计算、人工智能等无形生产资料更全方位赋能生产、分配、交换、消费各环节，优化要素配置，显著提升企业及宏观经济运行效率。总之，数字经济如同无形之手，为生产力的质变营造了良好发展环境并提供了强大推力。

现有文献对数字经济与数字新质生产力的探讨虽日渐增多，然而聚焦其内部驱动效应，特别是考量保险这一外部因素的实证研究仍显匮乏，相关结论多基于理论分析。鉴于此，本文以数字经济为切入点，探究其对数字新质生产力的驱动效应及作用机制。本文首先构建数字经济与数字新质生产力综合评价指标体系，并运用泰尔指数测算2013–2023年两者的协同波动趋势；在此基础上，利用双重固定效应基准回归模型实证检验数字经济对数字新质生产力的边际贡献及显著性；进一步，考虑保险在风险保障、资金融通、市场稳定与创新支持等方面的功能，将其作为调节变量引入模型，揭示其在“数字经济→数字新质生产力”传导路径中的差异化作用。本文旨在厘清数字经济赋能新质生产力的理论逻辑，并为政策制定提供数据驱动的决策依据。

一、文献综述和研究假设

（一）数字新质生产力

数字新质生产力作为新兴领域，当前学术研究相对有限，主要聚焦于其与智能化、数字化产物的结合及影响关系。众多学者从不同维度展开研究：一方面，着眼于数据要素的关键作用。例如，袁天荣等^[4]研究表明公共数据开放能显著提升新质生产力，凸显数据要素的重要性。另一方面，关注人工智能的驱动效应。何元浪等^[5]通过实证分析揭示，人工智能借助提升创新能力、改善能源效率、提高数字化水平三大路径，有力推动新质生产力发展。同时，开放式创新在数字经济背景下也备受关注。刘达等^[6]发现，开放式创新对新质生产力有显著促进作用，且数字技术应用是其中的核心关键因素。此外，数字化转型及特定数字化产品

类型（如数字供应链金融）对企业新质生产力的影响也受到关注^[7–9]。尚路等^[10]聚焦数字原生企业，强调“技术–知识–数据”的深度融合是其新质生产力提升的关键。

数字新质生产力的相关研究主要聚焦于三大领域：经济发展与企业/产业链升级，战略性新兴产业、未来产业与科技创新，促进共同富裕^[11]。数字新质生产力是推动经济高质量发展的强劲引擎^[12]，其驱动力源于数字技术和数据要素的深度融合。在企业层面，它通过提升创新能力、优化生产流程、增强产业链协同合作等方式，驱动企业数字化转型，显著提升产业链整体竞争力。在产业层面，数字技术深度赋能传统产业，变革生产模式与价值创造机制，引领其向高端化、智能化、新质化方向转型升级^[13]。它以人工智能、云计算、区块链等数字技术为基石，是培育壮大战略性新兴产业、布局并孵化未来产业的核心驱动力。在此过程

中,科技创新扮演引领角色。研究表明,数字新质生产力能有效激发数字科技创新活力,为产业发展提供坚实支撑,推动产业链供应链高效协同,助力构建现代化产业体系^[14]。此外,数字新质生产力在促进共同富裕中发挥关键作用,通过数字赋能与数字平权,提升社会公平与效率^[15]。其内在逻辑体现为:一方面,数字新质生产力赋能社会生产,释放数据要素价值,创造更多社会财富,“做大蛋糕”。例如,数字技术与农业生产结合、数据要素融入乡村产业,可突破传统农业生产要素规模报酬递减的局限,推动农村经济发展,有效缩小城乡差距^[16、17];另一方面,数字新质生产力保障数字生产者权益,推动数字公共服务均等化,提升城乡数字协同发展水平,促进区域协调与成果共享^[18],“分好蛋糕”。实证研究显示,数字经济通过延伸农村产业链^[19],降低市场准入门槛^[20],助力欠发达地区共享发展红利。

(二) 保险的调节作用

在数字经济蓬勃发展的背景下,保险业作为经济的“稳定器”和“助推器”,在推动数字新质生产力的形成与发展中发挥至关重要的调节作用。

一方面,数字经济为保险业注入新的活力。数字技术助力保险业优化资源配置、扩大覆盖范围、降低信息不对称,使其能更精准地识别风险、优化定价。借助数字化平台,保险公司得以精准匹配供需,提升盈利能力^[21]。同时,数字经济推动科创企业提升技术水平,保险随之提供覆盖其研发、生产、运营全程的风险保障。这不仅稳定了市场环境,也支持了产品创新,为数字新质生产力的成长奠定了坚实基础。

另一方面,保险通过其核心功能——风险保障和资金融通,为数字新质生产力提供坚实支撑。作为“坚强后盾”,保险有效缓解企业和个人在数字经济转型中面临的技术失败、市场波动等不确定性风险,增强其风险承受能力,使其能专注于科技创新。例如,针对科技企业研发新型数字产品面临的技术风险、知识产权侵权等,保险的经济补偿机制不仅守护企业利益,更加速了科技成果转化与产业化进程。此外,保险资金的长期稳定性使其成为重要的资金提供者。通过资金融通,保险业有力推动传统产业数字化转型,优化社会资源配置,提升资本使用效率,进一步促进数字新质生产力的发展。

综上,数字经济与保险业相互促进,共同服务于数字新质生产力发展。数字经济赋能保险业,拓展其服务能力与市场空间;保险业则依托风险保障、资金融通及稳定市场、推动创新等功能,为数字经济和数字新质生产力的稳健运行与持续创新提供关键支撑。未来,随着数字经济发展,保险业有望在这一进程中扮演更为重要的角色。

由此,本文提出如下研究假设:

假设1:数字经济显著促进数字新质生产力的发展。

假设2:数字经济通过加强保险三大功能显著促进数字新质生产力的发展。

(三) 研究创新点

本文的边际贡献主要体现在以下三方面。在研究视角上,突破数字经济与数字新质生产力直接关联的既有范式,将保险要素

纳入研究视野,基于其风险保障、资金融通、市场稳定与创新三大核心功能进行维度拆解,通过构建“数字经济—保险—数字新质生产力”的三元分析框架及双向作用路径检验,揭示保险在风险承担和资源配置中兼具风险缓冲与资本枢纽的双重角色,为理解数字时代生产力变革机制提供宏观分析视角。在指标测度方面,构建整合传统生产要素数字化与智能化双重特征的数字新质生产力和数字经济指标体系,综合考量劳动者、劳动资料、劳动对象的数字化特征及智能化转型需求,保障二者测度的科学性与时代适配性。在机制分析层面,突破了调节效应的表层验证模式,通过对保险功能作用路径的精细化解构,揭示其在数字经济与数字新质生产力互动过程中内在逻辑的差异性,为理解数字经济赋能数字新质生产力的传导链条提供更清晰的微观视角,使研究结论能更精准地对接实践需求,为相关政策制定与市场实践提供了更具靶向性的操作指南。

二、研究设计

(一) 样本与数据

本文选取我国2013–2023年30个省级面板数据作为研究样本,涵盖东部、中部、西部和东北部地区。数据来源广泛,包括国家统计年鉴、各省份统计年鉴、工信部《通信业统计公报》《中国信息通信统计年鉴》《中国科技统计年鉴》《全国科技经费投入统计公报》以及《北京大学数字普惠金融指数》等。通过多渠道收集,确保研究数据的全面性和准确性。对于少量缺失数据,采用多重线性插补法进行补充,以保证数据的完整性。

(二) 变量测度与说明

数字经济以数字技术为引擎,数据为核心要素,通过技术融合与模式创新重构传统经济形态;数字新质生产力则是其催生的新型生产力范式,本质是以数字技术驱动生产要素创新性配置与全链条升级,推动生产力向高阶跃迁。基于熊彼特创新理论,二者均通过数字技术实现生产要素的“新组合”而非简单技术叠加,打破传统生产函数约束,引发“创造性破坏”式经济演进。这种新组合进一步在索洛模型中表现为全要素生产率的结构性跃升,从而构成数字新质生产力区别于传统技术进步的核心特征。

基于上述差异,数字经济作为中观产业形态,其指标体系侧重规模贡献度(如互联网覆盖率、数字产业增加值占比),而数字新质生产力作为微观生产力跃迁,其指标聚焦技术进步率(如单位能耗产出比、专利研发投入强度)。同时,基于技术—经济范式理论,二者均需关注数字基础设施与产业构建。但数字新质生产力更需遵循马克思生产力理论,从微观生产单元重构出发,包括劳动力革新(人力资本效率)、劳动资料升级(智能设备渗透率)、劳动对象迭代(数据要素投入强度),由此实现“人—机”协同的效率质变,呼应宏观经济带动微观主体发展逻辑。

基于上述分析,本文构建数字经济和数字新质生产力评价指标体系,分别如表1与表2所示。

本文构建的数字经济综合评价指标体系(表1),遵循基础设施支撑、产业转型驱动、创新研发引领的逻辑框架,围绕数字基

础设施建设、数字产业化发展、产业数字化转型及数字创新与研发投入4个核心维度，下设12项二级指标，系统揭示数字经济的基础架构、应用场景与增长动能。具体设计如下：

数字基础设施建设从宽带容量、网络覆盖广度及终端渗透率角度，通过互联网宽带接入端数、移动网络覆盖率以及每百人移动电话普及率三项指标，，量化信息传输硬件的空间布局效率。

在产业层面，数字产业化发展聚焦服务业与金融数字化进程，设置软件业务收入占GDP比重、电信业务总量以及数字普惠金融指数三项指标，分别反映软件服务对区域经济的贡献度、通信服务规模以及金融资源数字化配置效率，共同刻画数字技术产业化的发展深度。

产业数字化转型从企业微观视角切入，设置信息服务业从业人数、企业每百人使用计算机数以及电子商务交易活动企业比例三项指标，分别反映人力资本在数字核心产业的集聚强度、生产工具数字化普及水平以及商贸流程在线化转型进度，全面解析数字经济与传统产业的融合路径。

数字创新与研发投入通过数字技术专利申请授权数、高技术研发经费投入与高技术产业开发区企业个数三重视角，分别量化数字创新数量、创新活动的资金支持强度以及技术密集型企业的空间集聚效应，揭示区域数字经济发展的内生动力与集群优势。

该指标体系突破传统单一经济产出衡量模式，通过整合基础设施密度、产业渗透率、创新浓度等多维数据，既涵盖数字经济“底座－应用－引擎”的纵向传导机制，又突出“技术扩散－要素重组－价值创造”的横向协同效应，为区域数字竞争力诊断、产业链短板识别及政策优化提供有力的结构化分析工具。

表1：数字经济评价指标体系

一级指标	二级指标	单位	方向
数字基础设施建设	互联网宽带接入端数	万	+
	移动网络覆盖率	%	+
	每百人移动电话普及率	部	+
	软件业务收入与GDP比重	%	+
数字产业化	电信业务总量	亿元	+
	数字普惠金融指数	%	+
	信息服务业从业人数	人	+
产业数字化	企业每百人使用计算机数	人	+
	电子商务交易活动企业比例	%	+
	数字技术专利申请授权数	件	+
数字创新与研发投入	高技术研发经费投入	亿元	+
	高技术产业开发区企业个数	个	+

从要素协同性与可持续发展角度出发，围绕新劳动者、新劳动资料、新劳动对象三大核心维度，设置人力资本、研发强度等7个二级指标及13项三级指标，构建数字新质生产力测度指标体系（表2），以全面揭示其结构特征与核心驱动力。具体设计如下：

新劳动者聚焦人力资源与研发投入效能，是经济发展的底层动力。通过R&D人员数量体现区域创新人才储备，以高技术产业

创新专利数量反映技术成果转化能力，打破传统单一劳动力测度模式，凸显知识密集型产业人力资本价值。同时，采用高技术产业研发经费投入占GDP比重表征技术创新的经济支撑强度。

新劳动资料作为效率革新源泉，涵盖数字基础设施与金融支持。数字基础设施从物理设施和生态效益切入，以光缆线路长度、地区面积比重以及互联网宽带接入端个数衡量硬件规模，用绿色全要素生产率评估其可持续贡献，形成“规模－效率”联动的评价模式。金融支持方面，选取数字普惠金融指数和科创企业风险投资额，前者反映金融数字化水平，后者体现风险资本对创新的催化作用，构建资本与科技双向赋能机制。

新劳动对象是效率转变的基础，下设数字产业服务、数字产业投入及能源消耗三个二级指标。数字产业服务从通信、软件与商贸转型维度，分别选取电信业务总量占GDP比重、软件业务收入占GDP比重以及电子商务销售额占GDP比重为指标，解析数字新质生产力对传统产业的全链条渗透效应。数字产业投入借助工业机器人数量与就业人口比重，评估智能制造对劳动力的替代程度，顺应生产工具智能化趋势。能源消耗则以电力消费总量与GDP之比，逆向衡量数字经济发展能源集约化水平，助力绿色转型。

该指标体系创新性地将人力资本迭代、基础设施智能化、生产要素数字化等要素纳入统一框架，既涵盖战略性新兴产业动态特征，又融合绿色低碳约束，为数字新质生产力水平诊断与政策优化提供有力支撑。

表2：数字新质生产力评价指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	单位	方向
新劳动者	人力资本	R&D人员数	年	+
		高技术产业创新专利数	项	+
	研发强度	高技术产业研发经费投入与GDP比重	%	+
新劳动资料	数字基础设施	光缆线路长度与地区面积比重	%	+
		互联网宽带接入端个数	万	+
		绿色全要素生产率	%	+
新劳动对象	金融支持	数字普惠金融指数	%	+
		科创企业风险投资额	千元	+
	数字产业服务	电信业务总量与地区GDP比重	%	+
		软件业务收入与地区GDP比重	%	+
		电子商务销售额与地区GDP比重	%	+
	数字产业投入	工业机器人数量与就业人口比重	%	+
	能源消耗	电力消费总量/GDP比重	%	-

（三）模型构建

数字经济驱动数字新质生产力的质变跃迁，体现为数据要素与智能技术深度融合重构的全域生产力体系。为深入探究这一驱动过程，下文将解析数字经济赋能数字新质生产力增长的作用机制，并构建双重固定效应基准回归模型如下：

$$Digpro_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Dig_{it} + \gamma Control_{it} + \mu_i + \varepsilon_t + \dot{\alpha}_t \quad (1)$$

其中， i 和 t 代表省份和年份， α_0 为常数项， α_1 和 γ 为回归系数； $Digpro_{it}$ 衡量的是 i 地区 t 时期的数字新质生产力水平，

为本文的核心被解释变量； Dig_{it} 代表 i 地区 t 时期的数字经济发展水平，是本文的核心解释变量。

$Control_{it}$ 为一系列可能影响数字新质生产力增长的控制变量。参考韩文龙等（2024），引入产业结构、外商投资规模与政府规模作为控制变量。此外，本文还增加了地区教育规模、社会消费水平，人民生活保障水平以及地区城镇化率，具体变量定义如表3所示。

表3：控制变量

变量名称	变量定义	单位
产业结构（ind）	通过第三产业增加值与第二产业增加值比重衡量	%
政府规模（gov）	通过地方财政一般公共预算支出与GDP 比重衡量	%
外商投资规模数（inf）	通过各地区外商投资规模数量衡量	百万美元
地区教育规模数（edu）	通过各地区教育规模数量衡量	亿元
社会消费水平（scl）	通过社会零售商品总额与 GDP 比重衡量	%
人民生活保障水平（plsl）	通过城乡居民社会养老保险参保人数衡量	万人
地区城镇化率（urb）	通过各地区城镇人口数与年末常住人口数比重衡量	%

为控制省份之间的固有差异和全国数字新质生产力的整体增长趋势，模型还控制了省份固定效应 μ_i 和年份固定效应 ε_t ， δ_{it} 随机误差项。

为检验保险的调节作用，构建如下模型：

$$Digpro_{it} = \beta_0 + \beta_1 Dig_{it} + \beta_2 Dig_{it} * Insurance_{it} + \delta Control_{it} + \mu_i + \varepsilon_t + e_{it} \quad (2)$$

其中， $Insurance_{it}$ 表示 i 地区 t 时期的保险发展水平，用各省原保费收入进行衡量， β_0 为常数、 β_1 、 β_2 、 δ 为回归系数。若 β_2 显著，则表明保险在数字经济与数字新质生产力之间存在调节作用。

本文还拓展了保险的衡量指标，根据保险所展现的功能，从风险保障、资金融通以及市场稳定与创新三个维度来衡量保险在其中的调节效应。三个指标分别对应保险深度和保险密度、保险资金运用情况、保险赔付额，以此替换 $Insurance$ 值。

为更深入了解数字经济与数字新质生产力的变化趋势，利用泰尔指数描绘其在2013–2023年间的总体变化趋势、区域间变化趋势以及区域内变化趋势，如图1和图2所示：

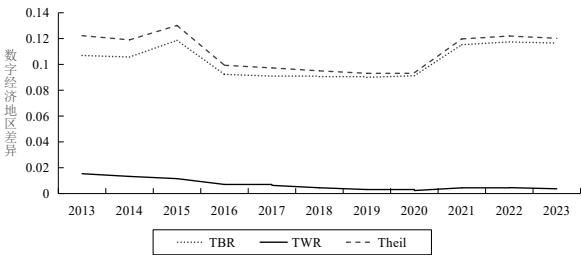


图1：2013–2023年数字经济波动趋势

从图1可见，2013–2023年数字经济的泰尔指数（Theil）整体呈波动趋势，但总体稳定，表明数字经济在各省份的不平等程度相对稳定。具体看，区域间差异（TBR）占比较大，2020年后缓慢上升，反映出地区间数字经济在发展速度和水平上存在一定

差距：经济基础较好、政策支持力度大的地区发展快，部分欠发达地区相对滞后。相反，区域内差异（TWR）处于较低水平且呈下降趋势，显示各省份内部数字经济发展趋于均衡，这可能源于各省份在推动数字经济发展时注重区域内协调，通过加强基础设施建设、产业数字化转型和创新研发等方式缩小省内区域差异。鉴于数字经济的区域差异变化，未来应聚焦区域间协调发展，加大对欠发达地区的支持力度，巩固省内区域均衡发展成果，推动数字经济在各省公平、可持续地健康发展。

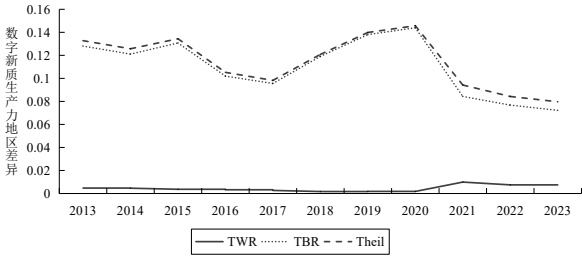


图2：2013–2023年数字新质生产力波动趋势

从图2可见，2013–2023年数字新质生产力的区域差异先升后降。2013–2020年泰尔指数波动上升，显示省际数字新质生产力不平等加剧，区域间差异同步上升。2020–2023年，泰尔指数与区域间差异回落，表明省际不平等缓解。区域内差异则始终较低且稳定水平，说明各省内部数字新质生产力差异较小，这或因数字经济注重区域内协同发展，使数字新质生产力差异维持在低水平。

对比2013–2023年数字经济和数字新质生产力的泰尔指数波动趋势，发现二者波动范围相近。2013–2017年间，数字经济与数字新质生产力的不平等波动程度基本相同，表明此时期二者发展具有显著相关性。然而，2017年后，数字经济的泰尔指数呈现向上趋势，而数字新质生产力则呈先上升后下降的态势。这或许是因为部分地区在经济、技术、基础设施、人才等方面优势显著，数字经济发展迅速，形成集聚效应，导致区域间差异扩大。但随着数字经济的成熟，市场机制不断完善，资源分配更加合理，落后地区开始学习和应用数字技术，使得数字新质生产力的区域差异逐渐缩小。

上述分析初步揭示了数字经济发展对数字新质生产力的作用机制。为更精准地验证数字经济对数字新质生产力的作用机制，本文进一步开展了一系列实证分析。

三、实证结果分析

（一）基准回归

表4：基准回归检验结果

变量	Digpro (1)	Digpro (2)	Digpro (3)	Digpro (4)
Dig	0.6935*** (0.0167)	0.9129*** (0.0359)	0.7868*** (0.0240)	0.8662*** (0.0286)
控制变量	No	No	Yes	Yes
年份固定效应	No	Yes	No	Yes

省份固定效应	No	Yes	No	Yes
样本量	330	330	330	330
R ² 值	0.8003	0.9094	0.8315	0.9280

注：括号内为标准误；*** p<0.01，** p<0.05，* p<0.1

表4为数字经济对数字新质生产力影响的基准回归结果。基于四个模型的分析表明，数字经济对数字新质生产力的影响在1%的统计水平上具有显著的促进作用。同时，R²值均大于0.8，表明数字经济对数字新质生产力具有较好的解释力度。

模型（1）未加入控制变量与固定效应，此时数字经济的回归系数为0.6935，表明数字经济每提升1个单位，数字新质生产力平均增长约69.35%。模型（2）控制了年份与省份固定效应，数字经济的回归系数上升至0.9129，较模型（1）增幅达31.64%。模型（3）引入控制变量但未控制年份与省份固定效应，系数调整为0.7868，较模型（1）提升13.45%。模型（4）同时纳入控制变量与省份、年份固定效应，数字经济的回归系数稳定在0.8662。从模型拟合优度看，R²值由模型（1）的0.8003逐步提升至模型（4）的0.9280，提升幅度达15.96%，表明引入固定效应与控制变量后显著增强了模型的解释力。

这一实证结果与我国当前经济社会发展的现实情况高度契合。随着数字经济蓬勃发展，其对数字新质生产力的推动作用日益凸显。在农业领域，数字技术贯穿农作物种植、管理、收割及销售环节，提升产业生产效率并规范产销链。在工业领域，数字技术使生产过程更加智能、绿色，提高生产效率的同时，增强产品质量和创新能力。在服务业领域，数字经济催生了数字金融、智慧物流、远程医疗等新业态，创造新的市场需求，优化资源配置，推动产业结构数字化。综上，数字经济快速发展为数字新质生产力的形成和壮大提供了强大动力，也为我国经济高质量发展注入源源不断的活力。

（二）内生性检验

考虑到模型可能存在内生性问题，如遗漏变量或逆向因果问题（数字新质生产力也可能反过来促进数字经济的增长），本文进行内生性检验。参考韩文龙等^[9]的做法，使用GMM估计进行内生性检验，以解释变量（数字经济）的一阶滞后和二阶滞后作为工具变量。结果显示（表5），在纳入控制变量及省份与年份双向固定效应后，系统GMM和差分GMM的估计系数分别为1.0067和0.9818，均在1%水平上显著。相较于未处理内生性问题的基准模型结果（ $\beta=0.8662$ ），系统GMM和差分GMM的估计系数分别提高了约16.22%和13.35%，表明在控制潜在内生性后，数字经济对数字新质生产力的正向效应显著增强。由于工具变量数量

大于核心解释变量数，本文进行Hansen工具变量过度识别检验以验证工具变量的外生性。结果显示，系统GMM和差分GMM对应的Hansen检验P值分别为0.9480和0.7030，均大于0.1，表明不能拒绝“所有工具变量均为外生”的原假设，即工具变量满足外生性条件。综上，内生性检验结果表明，在控制潜在内生性问题后，数字经济对数字新质生产力的显著正向促进作用依然成立，且估计效应强度较基准结果有所增强。

表5：内生性检验结果

变量	Digpro	Digpro
	(1)	(2)
	系统 GMM	差分 GMM
Dig	1.0067*** (0.1758)	0.9818*** (0.1743)
控制变量	Yes	Yes
年份固定效应	Yes	Yes
省份固定效应	Yes	Yes
样本量	300	300
R ² 值	0.3040	0.2760
Hansen P 值	0.9480	0.7030

注：括号内为标准误；*** p<0.01，** p<0.05，* p<0.1

（三）稳健性检验

为提高基准回归结果的稳健性，本文进行以下三方面的检验：首先，截尾处理解释变量。在5%和10%水平上对解释变量进行截尾处理以缓解极端值影响，结果（见表6列（1）和列（2））显示，数字经济变量的系数分别为0.7701和0.6125，在1%统计水平上显著；R²值分别为0.9070和0.9040，模型拟合优度良好。这表明核心结果对极端值不敏感，模型具有稳健性。其次，更换变量指标构建方法。为检验指标构建方式的影响并处理潜在的多重共线性，采用主成分分析法替代熵值法重构被解释变量和解释变量指标。结果（见表6列（3））表明，数字经济变量的回归系数为0.4241，在1%统计水平上显著。这表明即使采用不同的指标构建方法，数字经济对数字新质生产力的正向促进作用依然稳健存在。最后，剔除特定地区样本。参考李天一等^[22]的做法，将全样本分别剔除甘肃、黑龙江和吉林省后各得到一个子样本。回归结果（见表6列（4）-（6））显示，数字经济变量的系数分别为0.8318、0.8316和0.8405，均在1%统计水平上显著；对应的R²值均大于0.9，模型在子样本内拟合良好。核心系数保持高度显著且数字相近，表明个别省份（如甘肃、黑龙江、吉林）的特殊情况不会显著影响数字经济对数字新质生产力的整体促进作用。

表6：稳健性检验结果

变量	Digpro	Digpro	Digpro	Digpro	Digpro	Digpro
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	截尾5%	截尾10%	主成分分析法	剔除甘肃	剔除黑龙江	剔除吉林省
Dig	0.7701*** (0.0915)	0.6125*** (0.1126)	0.4241*** (0.1034)	0.8318*** (0.0298)	0.8316*** (0.0223)	0.8405*** (0.0221)
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
年份固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
省份固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
样本量	298	264	328	319	319	319
R ² 值	0.9070	0.9040	0.5195	0.9070	0.9030	0.9040

注：括号内为标准误；*** p<0.01，** p<0.05，* p<0.1

（四）异质性分析

由基准回归结果可知，在控制省份和年份固定效应后，数字经济对数字新质生产力的促进作用更为显著。这表明区域差异

可能对二者关系产生重要影响。为此，本文将样本按省份划分为东部、中部、西部以及东北部地区进行分组回归，结果如表7列（1）-（4）所示。

表7：区域异质性结果

变量	区域异质性				产业异质性		
	Digpro	Digpro	Digpro	Digpro	Digpro	Digpro	Digpro
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
	东部	西部	中部	东北部	第一产业	第二产业	第三产业
Dig	0.7721*** (0.0471)	0.4550** (0.1472)	0.3915** (0.1106)	-0.0364 (0.0949)	0.3023 (0.2921)	0.8781*** (0.1160)	0.7492*** (0.0390)
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
年份固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
省份固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
样本量	110	121	66	33	88	154	88
R ² 值	0.9699	0.9414	0.9774	0.9904	0.9620	0.9380	0.9800

注：括号内为标准误；*** p<0.01，** p<0.05，* p<0.1

结果显示，东部地区的数字经济系数为0.7721，在1%统计水平上显著；中部和西部地区的系数分别为0.4550和0.3915，均在5%统计水平上显著；东北部地区的系数为-0.0364，统计上不显著。总体而言，数字经济对数字新质生产力的促进作用呈现明显的区域梯度：东部地区效应最强，中部和西部地区次之且显著弱于东部，东北地区则未观察到显著的正向效应。各地区回归的R²均大于0.9，表明模型在各子样本内均具有良好的拟合优度。

上述区域异质性可能源于以下原因：第一，经济发展阶段差异：东部地区经济发达，产业基础雄厚，具有更成熟的承接数字经济红利、推动产业升级和培育数字新质生产力的条件。中西部地区和东北地区处于工业化和城市化深化阶段，产业数字化基础 and 创新能力相对薄弱，短期内数字经济对数字新质生产力形成的推动作用面临更大挑战。第二，资源禀赋差异：东部地区在人力资本、技术创新资源和数字基础设施方面具有显著优势，为数字经济发展提供了强大支撑。中西部和东北地区在高端人才集聚、核心技术研发能力和创新生态建设方面存在短板，制约了数字经济向新质生产力的高效转化。第三，政策导向与实施效能差异：虽然国家层面加大了对中西部和东北地区的数字经济发展政策支持力度，但政策效果的显现往往存在时滞，且受地方执行能力和配套环境的影响。相比之下，东部地区得益于更早布局 and 更完善的地方性政策体系，其政策红利释放更为充分及时。最后，市场环境与发展潜力差异：东部地区市场机制成熟，企业创新活力旺盛，能够敏锐捕捉并有效利用数字经济机遇。中西部和东北地区的市场环境相对滞后，市场主体（尤其是创新型中小企业）活力不足，亟需通过深化市场化改革、优化营商环境来激发内生动力，从而更有效地将数字经济潜力转化为新质生产力。此外，东北地区面临的结构性转型压力（如传统产业负担重、人才外流）可能是导致其数字经济效应不显著的重要因素。综上，区域间在发展阶段、要素禀赋、政策效能及市场活力等方面的系统性差异，可能是导致数字经济对数字新质生产力促进作用呈现显著区域异质性的关键原因。

进一步考虑到三大产业在数字技术应用基础、改造路径和发展速度上存在显著差异，这些差异可能影响各产业数字新质生产

力的形成效率，本文进行了产业异质性分析，结果如表7列（5）-（8）所示。

结果显示：第二产业和第三产业的数字经济系数分别为0.8781和0.7492，均在1%统计水平上显著；而第一产业的数字经济系数为0.3023，统计上不显著。总体而言，数字经济对数字新质生产力的驱动作用呈现明显的产业梯度：对第二产业（尤其是制造业）的促进作用最强，第三产业次之，对第一产业则未观察到显著的当期促进作用。各产业的R²均大于0.9，表明模型在三大产业子样本内均具有良好的拟合优度。

上述产业异质性主要源于以下原因：（1）技术应用领域与基础差异：制造业是第二产业的重要组成部分，生产流程标准化程度高，数字技术（如物联网、工业物联网）能够精准嵌入并优化关键环节，实现生产智能化、网络化与实时管控，效率提升路径清晰且效果显著。金融和信息技术服务业是第三产业的典型代表，其作为数字经济的核心组成部分或高度关联行业，具备天然的数字化基因和丰富应用场景，能够深度整合并创新应用数字技术，驱动服务模式创新与效率提升。第一产业以农林业为主，高度依赖自然条件（如土壤、气候），生产过程可控性低。即使部分环节（如灌溉、监测）实现自动化，其整体生产效率和稳定性受自然因素制约大，数字化改造的预期回报相对较低且风险较高，技术适配难度大。（2）产业组织形态与资源禀赋差异：第二、三产业的企业规模较大、产业链条完备、组织化程度高，具备更强的资源动员能力（资金、技术、数据）投入数字化研发、基础设施建设和规模化应用推广，易于形成数字化的规模效应和网络效应。而第一产业多以小农户经营为主，生产单元分散、规模化程度低、产业链条短且整合度弱。主体（农户）数字化意识和能力相对薄弱，缺乏持续投入的动力和资金。分散的经营模式难以支撑集约化、规模化的数字技术应用，导致数字经济红利难以有效渗透和扩散。（3）数字人才储备与应用能力差异：第二、三产业是数字人才的主要集聚地，拥有大量具备数字技能的专业人才，能够更有效地推动数字经济与实体经济的深度融合，实现技术落地与产业升级，而第一产业则长期面临高素质、懂数字技术的农业人才严重短缺问题，制约了数字技术在农业领域的深度应用和创新能力。尽管近年来支持青年人返乡创业的政策力度加

大，旨在缓解人才困境，但其积极效果再当前阶段尚未充分显现于数字新质生产力的提升上。

（五）保险的调节效应

在市场环境下，保险的作用包括风险保障、资金融通以及促进市场稳定与创新。为检验保险在数字经济促进数字新质生产力过程中的调节作用，本文基于保险的核心功能构建指标体系：

表8：调节效应结果

变量	Digpro (1)	Digpro (2)	Digpro (3)	Digpro (4)	Digpro (5)
	原保费收入	保险深度	保险密度	保险资金运用	保险赔付额
Dig	0.8494*** (0.0281)	0.8634*** (0.0303)	0.8596*** (0.0223)	0.8444*** (0.0290)	0.8647*** (0.0294)
Dig * M	0.1406** (0.0663)	2.9414 (3.2068)	0.3051** (0.1132)	0.1929*** (0.0507)	0.0229 (0.0570)
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
年份固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
省份固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
样本量	330	330	330	330	330
R ² 值	0.9299	0.9284	0.9291	0.9308	0.9283

注：括号内为标准误；*** p<0.01，** p<0.05，* p<0.1

风险保障功能：采用保险密度（人均保费，反映居民保障水平）和保险深度（保费 /GDP，反映行业经济重要性）衡量。充分的保障可降低数字化转型风险，激励创新投入。

资金融通功能：采用保险资金运用情况衡量。保险资金的长期性、稳定性可为数字经济相关项目提供关键资本支持。

促进市场稳定与创新功能：采用保险赔付额衡量。保险的及时赔付为稳定市场环境，驱动数字化创新提供基础。

综合规模指标：采用原保险保费收入衡量保险业整体规模，其调节效应可能融合多种功能。

回归结果显示（表8），保险不同功能维度对“数字经济→数字新质生产力”路径的调节作用存在差异：（1）显著正向调节：原保费收入、保险密度和保险资金运用情况的交互项系数分别为0.1406、0.3051、0.1929，且统计显著，这表明保险业整体规模的扩大，可能通过综合效应（如风险池扩大、资金实力增强）助数字经济效能提升；居民风险保障水平（保险密度）的提升，有效降低了微观主体参与数字化转型的风险顾虑，增强了其投入意愿和能力；保险资金对实体经济的投入，为数字技术研发、应用和数字产业壮大提供了宝贵的长期资本支持。（2）调节作用不显著：保险深度交互项系数不显著，可能原因在于保险深度是一个受宏观经济周期（GDP波动）和行业周期影响强烈的宏观比例指标，其短期波动与微观层面的数字经济创新及生产力转化过程的关联较弱且不稳定，难以形成显著、稳定的调节合力。保险赔付额交互项系数不显著，主要因为赔付本质上是风险事件发生后的经济补偿行为，核心功能在于损失恢复和市场秩序稳定。它对需要事前风险承担和长期投入的数字经济创新与生产力提升过程缺乏直接的前置激励作用。理赔流程的复杂性和时效性也可能限制其稳定效果的即时显现。

综上，保险业通过提升居民和企业的风险保障水平（保险密度）以及为数字经济提供长期资本支持（保险资金运用），能够

显著增强数字经济对数字新质生产力的促进作用。然而，反映行业相对规模的宏观指标（保险深度）和事后补偿功能（赔付额）在本模型中未表现出显著的调节效应。未来应着力完善保险保障体系（特别是覆盖创新风险的险种）、优化保险资金对接数字经济的渠道和效率，并持续提升服务质量（包括理赔体验）以更好发挥其支持数字经济高质量发展的功能。

（六）保险的作用路径分析

上述的调节效应分析揭示了数字经济与数字新质生产力之间关系的复杂性，它表明数字经济在推动数字新质生产力的发展过程中会受到保险的影响。尽管调节效应分析能够揭示二者间关系的动态性和依赖性，但它无法深入解释保险为何会产生这样的调节作用。因此，进一步的机制分析对于探讨调节变量的具体作用路径和内在逻辑至关重要。为此，本文进一步数字经济对数字新质生产力的作用机制，重点关注以下两条路径：数字经济→保险指标→数字新质生产力、保险指标→数字经济→数字新质生产力，结果如表9所示：

表9：机制分析结果

变量	间接效应 系数	抽样偏差	Bootstrap 标准差	95% 置信区间
路径1：数字经济→保险指标→数字新质生产力				
原保费收入	0.0182	0.0016	0.0112	[0.0016,0.0476]
保险密度	0.0047	0.0031	0.0193	[-0.0285,0.0514]
保险资金运用情况	0.0183	0.0016	0.0113	[0.0015,0.0476]
路径2：保险指标→数字经济→数字新质生产力				
原保费收入	0.1008	-0.0011	0.0236	[0.0523,0.1484]
保险密度	0.2273	0.0024	0.0323	[0.1688,0.2936]
保险资金运用情况	0.1015	-0.0011	0.0234	[0.0532,0.1486]

如表9所示，路径1表明核心解释变量（数字经济）显著促进保险发展水平，进而提升数字新质生产力。可以看到，原保费收入和保险资金运用情况这两个调节因子是显著的，说明数字经济通过增加原保费收入，改善保险资金运用情况促进数字新质生产力的增长，其中介效应均为0.0182，而保险密度没有反映出它在这项机制中的中介作用。上述现象的可能原因是：随着数字经济发展，数字技术提供企业和个人机遇，但未知的挑战也随之而来，使得企业和个人对保险需求增加，推动原保费收入上升；保险资金运用为数字经济领域企业和个人提供长期稳定资金支持，为数字新质生产力发展提供更多风险保障。然而，可能是由于其衡量方式主要反映人均保费支出，保险密度与数字新质生产力的直接关联较弱，而且数字经济发展初期，其数值提升对数字新质生产力促进作用存在时滞，或由于地区发展不平衡导致其促进效果不显著。

路径2显示原保费收入、保险密度与保险资金运用情况均能够通过促进数字经济增长显著提升数字新质生产力的增长，间接效应依次为0.1008、0.2273和0.1015。这是因为原保费收入持续增长形成一个长期稳定的资金池，为传统工业数字化改造、5G基站等新兴数字经济基础设施提供低成本融资支持；同时，高保险密度意味着更高的社会风险保障需求，可以显著降低数字化投入产生的风险的不确定性，提升数字人才抗风险能力；此外，保险资金较长的资本投资周期特性与数字经济发展回报周期高度匹配，为数字产业发展提供长期稳定的资金投资，这无疑对数字新

质生产力发展起到促进作用。可以看出，尽管保险密度在数字经济促进数字新质生产力过程中没有显著的调节作用，但其却能够显著提升数字经济增长水平，且促进效应远大于原保费收入与保险资金应用情况（0.2273 VS. 0.1008）。

综上，原保费收入和保险资金运用情况可以通过双向作用机制对数字新质生产力产生促进作用，而保险密度仅能通过影响数字经济促进数字新质生产力的增长。

四、结论与建议

（一）研究结论

本文基于数字经济与数字新质生产力的理论内涵构建二者的评价指标体系，利用2013–2023年省级面板数据测度二者发展水平，并探讨了数字经济对数字新质生产力的作用机制与保险在其中的调节作用机制。主要结论如下：第一，数字经济波动与数字新质生产力波动趋势相似，二者的泰尔指数都处于较低水平，区域内部差异不显著，主要集中于区域间差异；第二，数字经济的提升可以显著促进数字新质生产力的增长，且在考虑内生性问题以及进行稳健性检验后结果依然显著；第三，数字经济对数字新质生产力的促进作用呈现东部 > 中西部 > 东北部、第二产业 > 第三产业 > 第一产业的梯度特征；第四，数字经济在保险（原保费收入）这一调节因子的作用下表现出对数字新质生产力的促进作用，将保险按照其作用划分后，保险密度和保险资金运用情况与数字经济结合，也展现出对数字新质生产力的促进作用；第五，路径分析显示，原保费收入与保险资金运用情况可以通过促进数字经济的增长刺激数字新质生产力的发展，而数字经济反过来也会影响原保费收入与保险资金运用情况，进而促进数字新质生产力增长；保险密度可以通过促进数字经济提升数字新质生产力发展水平，但不能作为中介因子提升数字新质生产力发展水平。

（二）政策建议

结合前文研究，本文提出以下几点政策建议。

第一，深化数字技术渗透融合，激发数字新质生产力跃升发展。数字经济能够显著促进数字新质生产力的发展，要充分利用数字经济释放的数字技术要素，激发数字新质生产力跃升式增长。通过设立国家级数字新质生产力发展基金，为5G、工业互联网、人工智能等新型基础设施建设提供坚实的资金支持，推动这些前沿技术在不同的领域蓬勃发展，加快数字技术与实体经济的深度融合，激发产业升级的新动能。实施数字经济产业链协同发展，通过明确产业链关键环节和核心企业，整合上下游资源，强化协同创新，培育数字产业集群，提升我国数字经济的整体实力和国际影响力。此外，完善数据要素市场交易机制至关重要，要建立数据资产确权、流通和定价制度体系，促进数据资产的合理配置和高效利用，进一步释放数据要素的价值，推动数字经济

向更高层次迈进，激发数字新质生产力向更高水平跃升，为经济社会高质量发展注入更强劲的动力，实现创新驱动发展的战略目标。

第二，构建梯度协同发展体系，实施差异化区域和产业调控机制。数字经济对数字新质生产力的促进作用存在显著的区域和产业化差异，既要建立“国家–区域–省域”三级数字技术配置体系，也要形成“重点突破–协同推进–基础支撑”的产业数字技术赋能体系：在东部地区打造数字经济核心增长极，重点突破高端制造业和现代化服务体系数字化格局，通过设立“高端制造业数字创新中心”和“智慧服务平台”，建设长三角数字技术创新走廊和粤港澳数字产业融合示范区等，推进“东数西算”扩容计划发展，努力建设好国家级算力枢纽节点；在中西部地区加强工业与粮食生产基建项目，运用数字技术构造“工农双轮驱动”新基建，创新“东数西训”“东数西存”等跨域协作模式，同步实施农业全产业链数字化改造，建立农业遥感大数据中心，通过中央财政专项转移支付、新基建专项债券等工具，重点支持“农业与5G+工业互联网深度融合应用先导区”建设，并依托先导区带动文旅产业数字化升级，打造“农业+工业”文旅体验示范基地；针对东北地区设立老工业基地数字化转型试验区，开展装备制造、能源化工等传统产业数字化改造试点，同时筑牢农业数字化基础设施支撑作用。为有效降低转型风险、提升企业改造意愿，建议在试点区设立“数字转型保险池”，为数字化改造项目提供保险补贴和风险兜底。同时，积极推行数字化改造税收抵免政策和“头部企业+资源型地区”结对帮扶机制，加强数字振兴省际联盟在东北地区的落地应用。由此，形成“政策激励+保险保障+区域协同+技术赋能”的综合体系，全方位破除东北数字化转型难题。

第三，构建“保险+数字”双循环生态体系。保险在数字经济促进数字新质生产力中有显著的正向调节作用，要充分发挥好这一调节效应，激发数字新质生产力水平发展。在制度供给方面，要完善“保险+数字”顶层设计框架，明确保险机构参与数字新基建的权责边界，重点制定数字基建特殊风险保险条款，同时允许外资险企为跨境数字贸易提供定制化产品；在促进市场稳定方面，应联合国家机构设置指数化检测机制量化结果，实现动态化调整数字保险产品的风险定价模型，同时基于数字技术，运用科技赋能保险产品，实现多场景保险加持，如数字技术实现环境监测，以实现数字基建环境效益金融化。在政策制定方面，放宽保险资金数字企业投资限制，建立专项保险基金支持科创企业数字化发展，引导资金进入数字科技领域，同时开展区域性保险密度提升计划，强化个人和企业风险保险意识，以刺激保险需求和供给双向衔接，间接扩散数字经济渗透基础。

参考文献

- [1] 周小亮，王子成，吴洋宏. 数字经济时代微观经济理论的探索与思考 [J]. 长安大学学报 (社会科学版), 2024, 26(04): 58–75.
- [2] 邓炜辉，何金海. 数据流通赋能新质生产力：理论逻辑与法治保障 [J/OL]. 西南金融, 1–13.
- [3] 韩文龙，张瑞生，赵峰. 新质生产力水平测算与中国经济增长新动能 [J]. 数量经济技术经济研究, 2024, 41(06): 5–25.

- [4] 袁天荣, 张佩雯, 刘瑞. 数据要素共享与新质生产力——基于有效市场和有为政府的机制分析 [J/OL]. 经济与管理, 1-11[2025-03-07].
- [5] 何元浪, 袁健红. 人工智能发展与新质生产力提升: 理论机制与实证检验 [J/OL]. 科技进步与对策, 1-11[2025-03-07].
- [6] 刘达, 王晓丹, 王淑瑶. 数字经济背景下开放式创新如何促进新质生产力发展 [J/OL]. 现代财经 (天津财经大学学报), 2025, (03): 66-82.
- [7] 刘芳, 居长志. 重塑商贸流通新质生产力: 数字经济赋能的理论机制与实证检验 [J]. 商业经济研究, 2025, (04): 15-20.
- [8] 潘宏亮, 胡国富. 企业能否通过数字化转型催生新质生产力?——基于科技创新视角的实证研究 [J]. 技术经济, 2025, 44(02): 31-42.
- [9] 周雷, 张瑾怡, 郑峰, 等. 数字供应链金融对提升实体企业新质生产力的影响与机制——基于金融科技创新监管试点的准自然实验 [J/OL]. 金融理论与实践, 2024, (12): 44-58.
- [10] 尚路, 李东红, 韩思齐, 等. 产学研合作如何激发数字原生企业发展新质生产力——知识编排视角下的探索性单案例研究 [J]. 中国工业经济, 2025, (01): 174-192.
- [11] 冉永春, 陈晶晶. 数字新质生产力研究的现状、热点及展望——基于 CiteSpace 的文献计量分析 [J]. 重庆理工大学学报 (社会科学), 2025, 39(01): 49-59.
- [12] 李占平, 王辉. 数字新质生产力与实体经济高质量发展: 理论分析与实证检验 [J]. 统计与决策, 2024, 40(10): 12-16.
- [13] 任保平, 巩羽浩. 数字新质生产力推动传统产业新质化的机制与路径 [J]. 兰州大学学报 (社会科学版), 2024, 52(03): 13-22.
- [14] 张文, 黄鹿. 科技创新赋能产业链供应链现代化: 理论机理与经验证据 [J]. 统计与决策, 2024, 40(23): 167-172.
- [15] 高小涵, 王立娟. 数字新质生产力、现代产业体系构建与共同富裕 [J]. 工业技术经济, 2024, 43(06): 20-29.
- [16] 魏珊. 数字新质生产力、技术变迁与农民农村共同富裕 [J]. 技术经济与管理研究, 2024, (12): 23-28.
- [17] 代津榜, 唐路元. 新质生产力驱动农民农村共同富裕的机制与路径 [J]. 经济体制改革, 2025, (02): 155-162.
- [18] 豆素勤, 王强. 数字产业协同创新、新质生产力与共同富裕 [J/OL]. 统计与决策, 2025, (09): 18-23
- [19] 张彰. 数字新质生产力、农业产业链延伸与共同富裕 [J]. 统计与决策, 2024, 40(09): 37-42.
- [20] 张瑶. 乡村振兴视角下流通数字化赋能城乡共同富裕的实证检验 [J]. 商业经济研究, 2025, (08): 105-109.
- [21] 张宁, 柳开. 数字经济对保险发展的影响研究——基于中介效能视角 [J]. 保险研究, 2024, (02): 45-56.
- [22] 李天一, 张伟, 张玄逸. 新质生产力发展与共同富裕: 基于劳动者干中学效应的分析 [J]. 数量经济技术经济研究, 2025, 42(03): 5-25.

基于画像模型的高职数学教学定点追踪策略研究

任治国

江门职业技术学院，广东 江门 529090

DOI:10.61369/ASDS.2025100015

摘 要： 随着教育信息化的发展，多维度下个性化教学决策已成为高职教育改革的重要方向。本文以高职数学课程为例，探讨了如何利用教育大数据构建学生个性化画像模型，并基于该模型开展精准教学实践。研究结合了改进的 K-means 聚类算法与支持向量机（SVM）预警模型，通过采集学习行为、知能结构、个人特质及环境交互四维数据，形成了动态的学生画像。教学实践表明，基于画像模型的分层教学与个性化干预，能有效提升教学效率与学生学业表现，为实现“因材施教”提供了可操作的路径。

关 键 词： 学生画像；高职数学；K-means 聚类；学业预警

A Study of Teaching Practices in Higher Vocational Mathematics Using a Personalized Student Profiling Model

Ren Zhiguo

Jiangmen Polytechnic, Jiangmen, Guangdong 529090

Abstract： With the development of educational informatization, personalized teaching decision-making in multiple dimensions has become an important direction in the reform of higher vocational education. Taking the higher vocational mathematics curriculum as an example, this paper explores how to utilize educational big data to construct a personalized student profile model and implement precision teaching practices based on this model. The study integrates an improved K-means clustering algorithm with a Support Vector Machine (SVM) early warning model, collecting four-dimensional data—learning behavior, knowledge-ability structure, personal traits, and environmental interaction—to formulate dynamic student profiles. Teaching practice demonstrates that stratified teaching and personalized interventions based on the profile model effectively enhance teaching efficiency and student academic performance, providing an actionable pathway to achieve "teaching students according to their aptitude."

Keywords： student profiling; higher vocational mathematics; K-means clustering; academic early warning

引言

高职数学课程作为专业学习的必要工具，长期面临生源结构多元化、学习动机和信心不足、传统“一刀切”教学效果不佳的困境。教师往往依赖考试成绩、课堂提问等滞后性指标判断学情，难以在教学过程中实现及时、精准的干预，充分体现学生的自主学习个性。

尽管智慧校园和在线学习平台上积累了大量数据，但这些数据更多停留在简单的统计与展示层面，未能深度转化为指导教学决策的“智能”。因此，构建一个能够精准刻画学习者特征、预测学习风险、并引导个性化资源推送的数字化模型，已成为破解高职数学教学困境的迫切需求。本研究以江门职业技术学院大数据与会计班的《经济数学》课为例，旨在系统构建并实证检验一个适用于高职数学的个性化学习画像模型，以期实现从“宏观群体教学”到“微观个体赋能”的范式转变。

一、学生画像模型的教育学理论背景

（一）多元视角下的数学学习评价

加德纳的多元智能理论揭示了人类智能的多样性，指出个体

在语言、逻辑数学、空间、内省和自然观察等诸方面各具潜能^[1]。

在数学学习中，学生的理解能力不仅体现在解题速度与准确率上，更可能表现为逻辑推理、空间想象、问题建模或合作探究等不同智能的协同作用。因此，仅以考试成绩作为评价标准，容易

基金项目：“三维”联动视域下高职数学课程的实践与创新（广东省高等职业院校教育与体育类专业教学指导委员会，编号：2022G120）。

作者简介：任治国（1978-），男，汉族，内蒙古凉城县人，研究方向为数学教学、数据挖掘和数学建模。

忽视学生在数学思维过程中的独特优势与成长轨迹。唯有构建多维度的评价体系，关注学生在学习过程中的表现、策略选择与情感投入，才能真正反映其数学素养的全貌，为后续教学提供科学依据。

（二）面向全体的掌握式学习路径

掌握学习理论强调，学习成效的差异并非源于能力高低，而是学习所需时间与教学支持的差异^[2]。只要给予充分的时间和合

适恰当的教学干预，绝大多数学生都能达到既定的学习目标。在数学教学中，这意味着不应以统一进度要求所有学生，而应关注个体是否真正理解核心概念。个性化学习画像模型正是基于这一理念，通过持续诊断学生的学习状态，识别其知识盲点与认知风格，动态调整教学节奏与方式，为每位学生量身定制“适恰条件”，从而实现“学不会”到“学会”的转化，真正落实精准化教学和个性化培养。

（三）数据驱动精准教学支持

学习分析理论为教育数字化转型提供了方法论支撑，它主张通过采集和分析学习过程中的行为数据，深入理解学生的学习模式与困难成因。在构建个性化学习画像模型时，这一理论指导我们整合作业完成情况、课堂互动、测评反馈等多源数据，运用技术手段识别学习趋势与潜在风险。这不仅使教师能及时干预，也为优化教学设计、资源配置和评价机制提供实证依据。技术赋能下的学习分析，让教育决策从经验驱动转向数据驱动，为实现科学、高效、个性化的数学教学提供了坚实的技术保障。

二、学生画像模型的构建过程

（一）学生画像模型的定义

学生画像模型是教育数字化转型的结果，它不只是一个简单的学生标签集合，而是一个动态的、多维的、基于数据驱动的学生数字孪生体。其构建始于对学生在学习全周期中产生的海量、多维度数据的系统性采集与分析，最终目标是形成一个能够深度刻画学生个体特征、预测其发展轨迹、并赋能教育决策的智能系统。模型主要的算法框架结构如下：

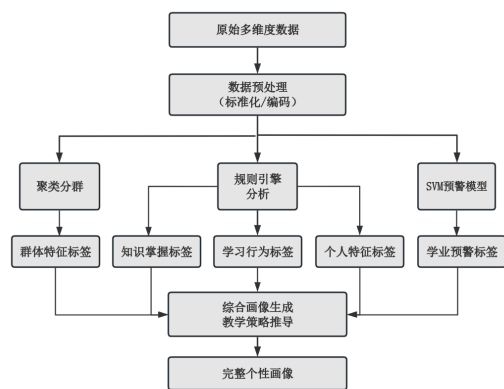


图1：学生个性完整画像算法框架流程图

1. 多维度原始数据

学生画像的生命力在于其数据基础的广度与深度。这些数据

远远超越了传统的考试成绩，构成了一个立体的数据生态。在这些数据中，我们主要是从学习行为、知能结构、个人特质和环境交互这四个维度上展开分析。详细的数据维度和指标如下表1所示：

表1：学生画像模型的数据维度与指标示例

维度	子维度	具体数据指标	数据来源
学习行为	投入度	线上学习时长、视频观看完成率、登录频率	超星学习通
	专注度	作业平均耗时、视频反复观看节点	平台学习日志
	互动性	论坛发帖/回帖数、向教师提问次数	平台交互数据库
知能结构	基础知识	特定知识点的掌握度	考试小题分分析、作业数据
	思想方法	数学思想的应用频率与正确率	作业与测验的质性分析
	应用能力	数学建模、解决专业相关应用题的得分率	项目作业、案例分析报告
个人特质	情感态度	数学学习信心、数学价值认同度	问卷调查（前测/后测）
	元认知能力	学习计划性、自我监控与调节策略使用频率	学习日记、自我报告量表
	学习风格	活跃型/沉思型、感悟型/直觉型	行为数据推断
环境交互	资源偏好	对微课、图文、交互式模拟等资源的点击率与停留时长	平台日志
	社交网络	在学习社群中的中心度、影响力	社交网络分析（SNA）

2. 立体化的数字表征

通过对上述数据的融合与分析，画像模型将学生从抽象的“群体中的一员”转化为鲜活的“数字个体”。这种数字化表征主要有以下几个方面的特点。能够生成“知识图谱”，以直观展示学生在各知识板块的掌握程度，清晰标识出优势领域与薄弱环节；为学生标上形如“逻辑推理能力强、应用迁移能力待提升、学习计划性不足”一系列动态的能力标签，使个体之间有很明显的边界轮廓；通过分析行为与交互数据，识别出学生最高效的学习路径与资源偏好，容易判断其属性；基于历史数据轨迹，利用机器学习模型预测学生未来的学业表现与发展方向，为个性化培养方案提供可靠性依据。

3. 从数据到决策的智能闭环

构建画像的最终价值并非止于“描述”，而在于“赋能”，即形成一个可持续优化的教育智能闭环系统。这样教师不再是凭主观经验猜测，而是通过数据了解每个学生独特的学情，能准确把握每个学生的学习现状；基于画像，模型可以自动研判，对不同类型有不同需求的学生进行分类识别和个性化指导；与此同时教师也可以根据模型中所反馈的数据结果发现班级的共性薄弱点，及时调整教学进度与重难点讲解策略，实现“以学定教”。

（二）数据采集体系的构建

数据是画像模型的原始基石。根据建模需要，并结合高职数学的学科特点，我们如表1构建了四个维度的数据采集体系，根据表1的实际分布特征，我们采用均值插补与动态调整相结合的渐

进漂移算法，对30名学生的学科成绩、课堂表现等稀疏字段进行系统性填充，形成完整的规范化数据集，确保数据质量满足后续的建模分析与统计研究要求。该处理方法既保持原始数据分布规律，又能通过置信度阈值控制实现合理推断。

表2：数据平台导出的真实学习数据

学号	视频完成率 (%)	作业正率 (%)	测验成绩	概念理解	计算能力	应用能力	学习信心	资源偏好
1	95	92	95	0.95	0.95	0.95	5	视频
2	88	85	88	0.90	0.88	0.85	4	图文
3	45	60	62	0.60	0.65	0.55	2	视频
4	92	89	91	0.92	0.90	0.90	5	图文
5	78	82	80	0.85	0.82	0.75	4	视频
6	82	78	81	0.80	0.82	0.80	4	图文
7	65	70	72	0.70	0.75	0.65	3	视频
8	90	88	89	0.88	0.89	0.87	5	图文
9	50	65	68	0.65	0.70	0.60	2	视频
10	85	83	84	0.83	0.85	0.82	4	图文
11	40	55	58	0.55	0.60	0.50	2	视频
12	75	77	76	0.75	0.78	0.72	3	图文
13	92	90	93	0.91	0.93	0.92	5	视频
14	60	68	70	0.68	0.72	0.65	3	图文
15	50	55	58	0.50	0.60	0.50	2	图文
16	35	40	52	0.40	0.55	0.45	1	视频

17	88	86	87	0.85	0.87	0.86	4	图文
18	70	72	74	0.70	0.75	0.70	3	视频
19	55	62	65	0.60	0.65	0.60	2	图文
20	48	58	60	0.55	0.62	0.55	2	视频
21	82	84	83	0.82	0.85	0.81	4	图文
22	92	91	94	0.93	0.94	0.93	5	视频
23	68	72	75	0.70	0.76	0.72	3	图文
24	42	52	56	0.50	0.58	0.50	2	视频
25	85	87	86	0.86	0.87	0.85	4	图文
26	58	65	68	0.63	0.68	0.62	3	视频
27	45	58	61	0.55	0.63	0.55	2	图文
28	90	92	91	0.90	0.92	0.90	5	视频
29	38	48	54	0.45	0.55	0.47	1	图文
30	40	45	50	0.45	0.50	0.40	1	图文

（三）个性化画像建模的过程

1. 数据预处理

为保证数据挖掘结果的质量^[3]。对于不同量纲的指标（如完成率与成绩），需要进行无量纲化处理^[4]，以便于后续的综合分析。本文采用的是z-core 标准化方法将所有初始数据转化为均值为0，标准差为1的正态分布数据。标准化后的数据如下表3所示。

表3：z-core 标准化真实学习数据

学号	视频完成率	作业正确率	测验成绩	概念理解	计算能力	应用能力	学习信心	资源偏好
S01	1.72	1.72	1.71	1.71	1.69	1.75	1.67	1
S02	1.22	1.25	1.24	1.26	1.21	1.20	1.00	0
S03	-0.78	-0.25	-0.56	-0.56	-0.41	-0.69	-0.33	1
S04	1.58	1.38	1.46	1.47	1.39	1.45	1.67	0
S05	0.58	0.83	0.69	0.89	0.76	0.49	1.00	1
S06	0.87	0.57	0.76	0.72	0.76	0.69	1.00	0
S07	-0.13	0.12	0.11	0.12	0.26	-0.09	0.33	1
S08	1.36	1.21	1.18	1.13	1.25	1.32	1.67	0
S09	-0.65	-0.05	-0.25	-0.31	-0.09	-0.39	-0.33	1
S10	1.00	0.95	0.90	0.84	0.95	0.98	1.00	0
S11	-0.91	-0.50	-0.75	-0.68	-0.59	-0.88	-0.33	1
S12	0.36	0.45	0.34	0.38	0.41	0.29	0.33	0
S13	1.58	1.43	1.54	1.44	1.52	1.55	1.67	1
S14	-0.39	0.02	0.01	-0.06	0.09	-0.09	0.33	0
S15	-0.65	-0.50	-0.75	-0.87	-0.59	-0.88	-0.33	0
S16	-1.18	-1.09	-1.21	-1.12	-0.84	-1.07	-1.67	1
S17	1.22	1.09	1.07	0.89	1.09	1.17	1.00	0
S18	0.07	0.19	0.23	0.12	0.26	0.20	0.33	1
S19	-0.52	-0.17	-0.34	-0.56	-0.41	-0.39	-0.33	0
S20	-0.74	-0.33	-0.67	-0.68	-0.51	-0.69	-0.33	1
S21	0.87	1.02	0.97	0.78	0.95	0.88	1.00	0
S22	1.58	1.49	1.60	1.54	1.60	1.65	1.67	1
S23	-0.20	0.19	0.34	0.12	0.34	0.29	0.33	0
S24	-0.87	-0.67	-0.90	-0.87	-0.67	-0.88	-0.33	1
S25	1.00	1.15	1.01	0.97	1.09	1.06	1.00	0
S26	-0.45	-0.05	-0.25	-0.43	-0.17	-0.49	0.33	1

S27	-0.78	-0.33	-0.62	-0.68	-0.34	-0.69	-0.33	0
S28	1.36	1.49	1.46	1.34	1.43	1.45	1.67	1
S29	-1.05	-0.92	-1.07	-1.00	-0.84	-0.98	-1.67	0
S30	-0.91	-1.02	-1.28	-1.00	-0.92	-1.17	-1.67	0

其中“1”代表“图文”，“0”代表“视频”。

从表3中不难发现不同学习者在多维能力评估中呈现显著分化特征：

其一，学生 S01 在应用能力维度呈现显著优势，其标准化分数较其他评估维度平均高出 1.12 个标准差单位。该数据表明该生在知识迁移和实际问题解决方面具备突出的实践能力，尤其在教学设计情境下的理论应用表现显著优于同组样本。

其二，学生 S16、S29、S30 在学习信心维度呈现显著性负向偏离。这种自我效能感的显著降低与其他能力维度形成耦合效应，反映出典型的学习困难综合表征。此现象符合 Bandura 自我效能理论中“表现成就→效能感知”的循环增强模型。

值得关注的是学习者 S05 的离散化特征：其在认知理解、知识整合、元认知策略等维度均位于前 35% 分位，然而应用能力维度相对滞后。这种结构化能力差异提示可能存在的“能力－实践”转化障碍，建议通过情境化学习设计进行针对性干预。

前面虽然从统计角度对异常的学生数据进行了分析判断，得到了有益于教学的结论，但是只是使用少数的数据，没有体现大多数学生的实际学习情况和满足教师个性化教学的需要，下面继续从聚类分析的角度构建聚类模型，对学生个体进行分类。

2. 用聚类分析构建群体画像

为发现学生学习高职数学中的典型群体与模式，我们采用 k-mean 加强算法对学生进行分群。考虑到维度太多，分类过程的复杂性问题，本文通过对“章节测验成绩”、“作业平均正确率”和“视频观看完成率”这三类关键特征进行聚类分析（因为 7 类特征聚类与三类特征比较差别不大，但难度增加了很多），将学生划分为以下四类典型群体：

表 4：学生学习高职数学典型全体分类

聚类标签	群体类型	学生数量	占比	学生学号
群体 1	被动困难型	9	30%	S03, S11, S15, S16, S20, S24, S27, S29, S30
群体 2	兴趣驱动型	7	23.3%	S07, S09, S14, S18, S19, S23, S26
群体 3	踏实努力型	9	30%	S02, S05, S06, S10, S12, S17, S21, S25, S28
群体 4	自主卓越型	5	16.7%	S01, S04, S08, S13, S22

根据聚类分析的分层教学策略，教师可以制定有针对性的教

学方案：对于群体 4（自主卓越型），他们属于“学习高度自律、各项能力全面优秀、适合挑战性拓展任务”的学生。教师的教学目标主要聚焦于培养学生的批判性思维与创新能力，发展学生的学术探究与科研素养，提升学生的知识创造与传播能力。教师可引导学生依据自身兴趣与方向开展跨学科学习，参与教师团队的开放性研究课题，鼓励学生多参加学术竞赛，并为学生搭建展示平台。对于群体 3（踏实努力型），他们属于“学习态度认真、各项指标良好、需要突破应用能力瓶颈”的学生。教师的教学目标是促进学生知识迁移与应用能力的发展，突破高阶思维能力的转化，实现从掌握到创新的跨越。教师可以根据实际构建进阶思维训练体系、设计知识整合性学习任务、开发中等难度的综合性问题，让学生实现个性化提升。对于群体 2（兴趣驱动型），他们属于“学习表现不稳定、对感兴趣的内容参与度高、需要激发学习兴趣与加强基础”的学生。教师需要构建系统化的基础知识体系，激发深层学习动机与学习兴趣，培养可持续的学习习惯；教师根据这类学生的实际需求运用问题导向教学法、实施情境化案例教学、开展项目式探究学习。对于群体 1（被动困难型），他们是“学习投入严重不足、知识掌握程度低、需要重点干预和补齐”的典型代表。教师找出学习困难的根源，重塑学生学习的信心、利用知识图谱补足其短板，帮助学生建立良好的学习习惯。

3. 个体画像标签的生成

在群体画像的基础上，我们融合知能结构和个人特质数据，利用 Apriori 算法^[5]将输入的学生行为序列和选择记录在关联规则挖掘下生成隐形关联标签，如一个学生经常观看“概念视频并能超高标准率的完成基础练习题”，则给他附上“偏好可视化学习路径”的标签。利用基于阈值的判断，生成具体的多维特征标签，使每个学生生成更具个性化的画像，从而方便教师的区别指导和分类教学。个性化画像标签系统是一个集无监督学习（聚类）、有监督学习（分类/预测）、关联规则挖掘和基于规则的专家系统于一体的混合智能框架^{[8][9]}。它先将学生“物以类聚”，再对其“个体诊断”，最后通过一系列规则将数据洞察转化为教师可以轻松理解的、可操控的个性化标签。在具体指向性数据中我们根据实际情况对每个学生的 3-7 个维度的数据进行细分。根据每个月更新的学习数据，教师就可以跟踪标签变化情况，可以动态调整教学策略。具体的结果如下表如示：

表 5-1：群体 4（自主卓越型）群体的个体特征画像

学号	核心特征	知识结构	学习行为	个人特质	教学策略
S01	全面卓越	函数概念理解深刻 极限计算方法精通 应用建模能力突出	学习高度自律 视频和作业 高质量完成	学习信心强烈 偏好视频资源	挑战竞赛题目 参与数学建模
S04	扎实深刻	函数性质掌握扎实 重要极限运用熟练 连续性判断准确	学习计划性强 测验成绩稳定优秀	自我驱动明显 偏好图文学习	深度拓展学习 指导同伴学习 课程资源开发
S08	系统方法	函数分类清晰 计算技巧娴熟 应用思路系统	学习过程稳定 作业质量持续优异	方法论意识突出 偏好图文资源	学术研究引导 跨学科应用探索

S13	全面均衡	概念理解全面 方法掌握系统 问题解决精准	学习投入持续 各维度表现均衡	自主学习能力强 偏好视频学习	创新项目参与 学术论文导读 研究性学习
S22	创新灵活	性质应用灵活 复杂计算准确 创新应用突出	学习深度显著 探索欲望强烈	批判性思维突出 偏好视频资源	高级应用挑战 数学竞赛培训

表5-2：群体3（踏实努力型）群体的个体特征画像

学号	核心特征	知识结构	学习行为	个人特质	教学策略
S02	规范认真	基础概念掌握良好 四则运算准确 应用能力需提升	学习态度认真 作业规范仔细	稳定性强 偏好图文学习	应用迁移训练 中档综合题目 学习方法优化
S05	潜力待挖	函数定义理解清晰 重要极限掌握良好 复合函数基本掌握	投入中等但 质量良好 进步稳定	信心充足 偏好视频学习	加强学习投入引导激发潜在能力
S06	稳定可靠	函数性质理解良好 计算方法扎实 应用表现稳定	学习过程可靠 表现持续	坚持性突出 偏好图文资源	综合应用拓展 解题策略训练
S10	系统均衡	概念掌握全面 计算技巧良好 复合函数处理稳定	学习系统性强 质量均衡	发展均衡 偏好图文学习	实际问题建模训练创新思维培养
S12	基础扎实	基础知识扎实 四则运算熟练 复杂问题需指导	基础牢固 进步轨迹稳定	踏实稳重 偏好图文资源	复杂问题分解训练思维拓展指导
S17	协调规范	分类理解清晰 方法掌握良好 应用能力中等	学习规范 质量良好	协调性好 偏好图文学习	应用能力提升实际问题解决训练
S21	适应良好	性质应用良好 重要极限扎实 复合函数稳定	投入良好 表现可靠	适应性强 偏好图文资源	创新应用训练 跨学科问题解决
S25	目标明确	概念理解深刻 计算技巧熟练 综合应用良好	质量优秀 进步明显	目标明确 偏好图文学习	卓越能力培养 深度探究引导
S28	规划系统	基础扎实 方法全面 复合函数准确	学习系统 表现稳定	规划性强 偏好视频资源	应用创新能力养 研究性学习入门

表5-3：群体2（兴趣驱动型）群体的个体特征画像

学号	核心特征	知识结构	学习行为	个人特质	教学策略
S07	波动敏感	概念基本理解 计算不稳定 应用需加强	表现波动大 兴趣导向明显	对应用问题敏感偏好视 频学习	学习兴趣激发 系统基础巩固 情境化教学
S09	需激励	定义理解正确 重要极限不稳定 基础需巩固	表现起伏 需要监督	需要外部激励 偏好视频资源	学习习惯建立 基础强化训练 成功体验积累
S14	直观导向	性质理解一般 方法不牢固 复合函数易错	投入不足 需要引导	对直观问题有兴趣偏好 图文学习	可视化教学 渐进式练习 学习动机培养
S18	潜力待激	概念基本清晰 四则运算稳定 复合函数需练习	有潜力 需持续激励	反应灵敏 偏好视频资源	目标设定指导 及时反馈机制
S19	焦虑困难	基础不牢固 计算错误多 复合函数困难	习惯不良 需要重建	存在学习焦虑 偏好图文学习	基础重新学习 小步骤成功体验
S23	图形敏感	分类理解一般 应用不稳定 基础需加强	选择性投入 需要规范	对图形分析敏感 偏好图文资源	图形化教学 结构化练习设计
S26	目标依赖	概念需要深化 方法不系统 能力一般	持续性不足 需要督促	需要明确目标 偏好视频学习	系统化复习 针对性练习

表5-4：群体1（被动困难型）群体的个体特征画像

学号	核心特征	知识结构	学习行为	个人特质	教学策略
S03	动力缺乏	概念模糊、计算常错 复合函数困难	投入严重不足 习惯差	学习动力缺乏 偏好视频资源	单独辅导、知识体系重建、小目标达成

S11	信心缺失	概念理解错误、方法混乱、应用完全不会	学习近乎停滞 需要重启	自信心严重不足 偏好视频学习	零基础教学、心理支持、个性化辅导
S15	基础薄弱	概念严重缺失、基础薄弱、无法处理应用	质量极低 需全面干预	学习无助感明显 偏好图文资源	基础概念重建 大量基础练习 成功体验积累
S16	紧急干预	基础知识接近零、极限不理解、完全陌生	投入最低 急需关注	极度缺乏信心 偏好视频学习	紧急基础补差 心理建设支持
S20	习惯不良	概念理解困难、计算错误多、处理困难	习惯不良 需要重塑	学习挫折感强 偏好视频资源	系统重学基础、分步骤训练、培养习惯
S24	回避放弃	定义记忆模糊、方法不会、概念缺失	学习几乎放弃 需要唤醒	学习回避明显 偏好视频学习	概念重建教学、趣味性入门、个性化激励
S27	思维混乱	性质理解混乱、掌握错误、无法解决	质量很差 需要重铸	思维混乱 偏好图文资源	逐步引导学习、概念澄清、基础技能训练
S29	完全缺失	概念完全缺失、基础为零、毫无概念	学习停滞 急需干预	完全失去信心 偏好图文学习	极简基础训练 心理重建支持
S30	全面危机	基础严重缺乏、概念不理解、完全不会	表现最差 全面危机	学习绝望感 偏好图文资源	危机干预教学 个性化基础课程 持续心理支持

4. 学业预警模型：SVM 分类预测

在所发的调查问卷中，超过85% 的学生表示，“现在的数学课更懂我”，学习任务“稍稍注意点就能够学明白”，学习焦虑感明显下降。教师从“批改作业”的繁重劳动中部分解放，能将更多精力投入到教学设计和与学生的深度互动中。教学决策有了数据支撑，变得更加科学和自信，教师上课积极性有了明显的增强，师生关系更加融洽，学风也有了质的提升。

画像模型不仅要静态描摹，更应具备动态预测能力。本文为了更好的体现其动态预测能力，使用支持向量机算法来构建学业预警模型^[6-8]。以学生过往的学习行为数据和阶段性知识掌握数据作为特征，来预测其未来学业成绩（如期末考试是否及格）的风险等级，从而实现精准预警。

三、学生画像模型的实证对比分析

我们以“导数及其应用”这一章（为期两周）的教学为例，展示如何将学生画像模型融入一个完整的“评估—画像—干预—再评估”教学闭环中。经过数据分析对比我们可得到下述表5的结论。

表6：实验班与对照班教学效果对比			
评估指标	实验班 (画像模型)	对照班(传统 教学)	提升幅度
期末考试平均分	75.8	69.3	增加6.5分
期末考试及格率	90%	80%	增加10%
低分段	3 (7.5%)	8 (20%)	减少62.5%
学生满意度	92%	78%	增加14%

四、结论与展望

本研究详细构建并验证了一个适用于高职数学教育的、集数据采集、分析建模、可视化解读与教学干预于一体的学生个性化画像模型。通过将改进的 K-means 聚类算法与 SVM 预警模型相结合^[9]，并将其融入一个完整的教学闭环，证明了该模型能有效帮助教师洞察学情、识别差异、预测风险、精准施教。

总之，基于学生个性化画像模型的教学实践，代表着高职教育从“标准化批量生产”向“个性化精准培育”转型的重要方向。它让“因材施教”这一千年教育理想，在数据智能时代变得可操作、可衡量，最终让每一位学生都能在适合自己的道路上获得成长与发展。

参考文献

[1] 陈玥. 基于核心素养的生物学中考命题研究——以天津市、海南省、广东省 2017-2019 年生物学中考试题为例 [D]. 天津师范大学, 2020.

[2] 王欣, 杨秀玲, 李葵南, 等. 布鲁姆掌握学习理论联合案例教学法在《健康评估》教学中的应用 [J]. 天津护理, 2021, 29(05): 590-592.

[3] 徐思, 吕扬. 混合式教学背景下学生画像技术的应用——以高职数学系列课程为例 [J]. 学园, 2024, 17(01): 24-26.

[4] 崔曙光. 基于智慧课堂的高职学生特征模型构建研究 [J]. 电脑知识与技术, 2020, 16(19): 204-205+216.DOI: 10.14004/j.cnki.ckt.2020.2331.

[5] 赵小川. 深度学习经典案例解析 [M]. 机械工业出版社: 202105: 230.

[6] 秦争艳. 基于数据可视化的学生数据标签及学生画像在教学系统中的应用研究 [J]. 信息记录材料, 2021, 22(02): 138-140.DOI: 10.16009/j.cnki.cn13-1295/tq.2021.02.090.

[7] 申民哲. 基于数据挖掘的学生画像与学业预警方法研究 [D]. 郑州轻工业大学, 2022.DOI: 10.27469/d.cnki.gzzqc.2022.000041.

[8] 基于数据挖掘的学生画像与学业预警系统设计与实现 [Z]. 江苏电子信息职业学院, 2025.

[9] 刘浩洋, 户将, 李勇锋, 文再文. 最优化: 建模、算法与理论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2020.

