

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 (Zhaode 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

应用统计与数据科学

Applied Statistics and Data Science

第1卷 第4期 2025年6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 伟、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 直播电商消费者冲动购买行为驱动因素分析 何樟彩
Analysis of the Driving Factors of Impulse Purchasing Behavior among
Live-streaming E-commerce Consumers He Zhangcai
- 005 基于 ARIMA 模型上的 CPI 的建模及预测 黄梓鹏
Modeling and Forecasting CPI Based on the ARIMA Model Huang Zipeng
- 009 数字经济与产业链韧性的耦合协调分析 赖喜祥, 唐文静, 杨茜, 梁鑫
Coupling and Coordination Analysis of Digital Economy and Industrial
Chain Resilience Lai Xixiang, Tang Wenjing, Yang Xi, Liang Xin
- 015 数字化转型下企业财务风险管理体系优化研究 陈婕妍
Research on the Optimization of Enterprise Financial Risk Management
System under Digital Transformation Chen Jieyan
- 018 商业银行金融科技应用对风险承担的影响路径探究 方祺瑞
An Exploration of the Impact Path of Fintech Application in Commercial
Banks on Risk-Taking Fang Qirui

管理统计 | MANAGEMENT STATISTICS

- 021 中国创新创业大赛获奖项目动态演进、区域差异与经验启示
——以苏浙沪粤为例 龚广祥, 梁一心, 林佳昕, 林叶
Dynamic evolution, Regional Differences and Experience Enlightenment of Award-
Winning Projects in China Innovation and Entrepreneurship Competition
— A Case Study of Jiangsu, Zhejiang, Shanghai and Guangdong Gong Guangxiang, Liang Yixin, Lin Jiaxin, Lin Ye
- 026 工商管理框架下供应链弹性构建与风险管控的协同机制研究 周正涛
Research on the Collaborative Mechanism of Supply Chain
Resilience Construction and Risk Control under the Framework of
Business Administration Zhou Zhengtao
- 030 基于多阶段动态规划电子产品生产过程决策研究 刘盈颖, 叶敏怡
Research on Decision-making in the Production Process of Electronic
Products Based on Multi-stage Dynamic Programming Liu Yingying, Ye Minyi

统计与教育教学 | STATISTICS AND EDUCATION TEACHING

- 036 项目驱动教学方法在本科留学生概率统计课程中
的改革探索 冯峥晖, 林应臻, 黄子健
Exploring the Reform of Project-Driven Teaching Methods in Probability
and Statistics Courses for International Undergraduate Students Feng Zhenghui, Lin Yingzhen, Huang Zijian
- 040 数字教学新篇章, 立体几何迷雾散
——VR 技术支持下的高中数学立体几何直观教学思考与实践 李庭洲
A New Chapter in Digital Teaching: Dispelling the Mysteries of Solid Geometry —
Reflections and Practices on Intuitive Teaching of Senior High School Mathematics
in Solid Geometry with the Support of VR Technology Li Tingzhou
- 043 基于 OBE 理念的高级语言程序设计课程
教学改革与实践 刘淼, 王海荣, 徐东燕
OBE-Based Teaching Reform and Practice in
Advanced Language Programming Liu Miao, Wang Hairong, Xu Dongyan

047	数据整合驱动的极大似然估计教学改革探索——以转录动力学建模为例 Exploring of Teaching Reform of Maximum Likelihood Estimation Driven by Data Integration: A Case Study in Transcription Dynamics Modeling	杨喜艳, 王子豪, 吴亚豪 Yang Xiyan, Wang Zihao, Wu Yahao
050	统计学课程中“数据 – 政策 – 价值观”思政教学模式的创新实践研究 Research on the Innovative Practice of “Data-Policy-Values” Ideological And Political Teaching Mode In Statistics Courses	陈喜强, 欧阳勤 Chen Xiqiang, Ouyang Qin
054	立德树人背景下多元统计分析课程实践教学探索 Research on Practical Teaching of the Course "Multiple Statistical Analysis" under the Background of Cultivating Virtue and Cultivating Talents	王纯杰, 李晶, 袁晓惠 Wang Chunjie, Li Jing, Yuan Xiaohui

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

058	基于校园学习行为与主观感知数据的学生画像分析 Student Profiling Analysis Based on Campus Learning Behaviors and Subjective Perception Data	纪志荣, 路春燕, 胡洁莹 Ji Zhirong, Lu Chunyan, Hu Jieying
062	生产装置仪表数据采集系统搭建与智能运维技术研究 Research on the Construction of Instrument Data Acquisition System for Production Facilities and Intelligent Operation and Maintenance Technology	董永才, 陈飞, 梁留法, 王灵飞 Dong Yongcai , Chen Fei , Liang Liufa, Wang Lingfei
066	大数据驱动的企业精准营销模式构建与实践 Construction and Practice of Precision Marketing Model for Enterprises Driven by Big Data	孙玥 Sun Yue
069	面向无人机的电池智能均衡调控与能效优化技术应用研究 Research on Intelligent Battery Balancing Control and Energy Efficiency Optimization Technology for Unmanned Aerial Vehicles	李文昊, 刘佰易, 张路坛, 洪镇峰 Li Wenhao, Liu Baiyi, Zhang Lutan, Hong Zhenfeng

统计方法及应用 | STATISTICAL METHODS AND APPLICATIONS

073	基于 LightGBM 模型的信贷违约概率预测研究 Research on Credit Default Probability Prediction Based on LightGBM Model	黄乐乐, 陈林 Huang Lele, Chen Lin
076	基于 BIM 技术的电力工程全生命周期管理优化研究 Research on Optimization of Full Life Cycle Management of Power Engineering Based on BIM Technology	章斌 Zhang Bin
080	基于多模型对比的中国宠物行业发展的预测与决策分析 Forecasting and Decision-making Analysis of China's PetIndustry Development Based on Multi-model Comparison	苑孟理想, 赵娜娜, 吴嘉润, 周梦雪, 孙可欣, 刘新红 Yuan Menglixiang, Zhao Nana, Wu Jiarun, Zhou Mengxue, Sun Kexin, Liu Xinhong

直播电商消费者冲动购买行为驱动因素分析

何嶂彩

广东工业大学管理学院, 广东 广州 510520

DOI:10.61369/ASDS.2025040001

摘要： 目的：本文旨在突破传统 S-O-R 研究范式的局限，探索直播电商情境下的冲动消费形成路径，揭示主播人格化特征与情境建构的协同机理。方法：引入具身认知理论，构建包括情景营造、主播特质、促销策略 3 个外生变量、2 个中间变量（认知浸入、情绪唤醒）和 1 个内生性（购买冲动）的整合模型。本项目拟以淘宝、抖音等电商平台为研究对象，收集有效样本 1,523 份，采用结构方程、Bootstrap 等方法对各变量间的直接作用、间接作用以及中介作用路径进行检验。结果：情景建构对冲动性购买行为的影响最大（0.61），认知浸入（ $\beta=0.12$ ）情绪唤醒（ $\beta=0.21$ ）双路径效应；主播特征对购买冲动的直接影响不显著，其中主播的认知浸入（ $\beta=0.37$ ）和情绪唤醒（ $\beta=0.24$ ）；限时折扣在情感唤醒中具有完全的中介作用（ $\beta=0.29$ ）；用户收看频率与冲动性购买之间存在显著的负相关关系（ $\beta=-0.15$ ），而电视节目的类型对其影响并不明显。情境建构具有认知浸入→情绪唤醒的链式中介作用（ $\beta=0.08$ ）。结论：直播电商冲动性消费是“知-情”双路径协同效应的结果，多维场景刺激、主播专业互动能力和即时性推广策略是其关键驱动因素，其中情感唤醒起到核心中介作用。建议商家对场景设计进行优化，增强主播的专业性和互动性，设计合理的限时折扣策略，并利用情感营销提升消费者的紧迫感。

关键词： 直播电商；冲动性消费；中介效应

Analysis of the Driving Factors of Impulse Purchasing Behavior among Live-streaming E-commerce Consumers

He Zhangcai

School of Management, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510520

Abstract： Objective: This paper aims to break through the limitations of the traditional S-O-R research paradigm, explore the formation path of impulse consumption in the context of live-streaming e-commerce, and reveal the synergy mechanism between the personification characteristics of live-streamers and the construction of the context. Method: Introduce the embodied cognition theory and construct an integrated model including three exogenous variables, namely scenario creation, host traits, and promotion strategies, two intermediate variables (cognitive immersion and emotional arousal), and one endogeneity (purchase impulse). This project intends to take e-commerce platforms such as Taobao and Douyin as the research objects, collect 1,523 valid samples, and adopt methods such as structural equations and Bootstrap to test the direct effect, indirect effect and mediating effect paths among various variables. Result: Scenario construction has the greatest impact on impulsive purchasing behavior (0.61), and cognitive immersion ($\beta=0.12$) and emotional arousal ($\beta=0.21$) have dual-path effects; The direct influence of the characteristics of the live-streamer on the purchase impulse is not significant, among which the cognitive immersion of the live-streamer ($\beta=0.37$) and emotional arousal ($\beta=0.24$); Time-limited discounts have a complete mediating effect in emotional arousal ($\beta=0.29$); There is a significant negative correlation between the viewing frequency of users and impulsive purchases ($\beta=-0.15$), while the type of TV programs has no obvious influence on it. Situation construction has a chain mediating effect of cognitive immersion → emotional arousal ($\beta=0.08$). Conclusion: Impulsive consumption in live-streaming e-commerce is the result of the synergy effect of the "knowledge-emotion" dual path. Multi-dimensional scene stimulation, the professional interaction ability of hosts, and the immediate promotion strategy are its key driving factors, among which emotional awakening plays a core mediating role. It is suggested that merchants optimize the scene design, enhance the professionalism and interactivity of the hosts, design reasonable time-limited discount strategies, and use emotional marketing to increase consumers' sense of urgency.

Keywords： live-streaming e-commerce; impulsive consumption; mediating effect

引言

近几年来，随着移动互联网的迅猛发展以及社交媒体的兴起，直播电商作为一种新兴的消费形态迅速崛起，成为推动我国数字经济发展的—支重要力量。在这一全新的购物模式下，主播通过实时互动、场景展示和商品说明等方式，有效地激发了消费者的购物欲望，促使他们快速做出购买决策^[1]。相较于传统电商，直播电商具有更强的沉浸感和感染力，消费者更容易产生“看中即买”的冲动购买行为。冲动购买行为不仅影响消费者的消费决策，同时也对商家的营销策略和平台运作机制提出了更高的要求。因此，深入探究直播电商情境下消费者冲动购买行为机理具有重要的理论和实践价值^[2]。通过对影响因素的梳理，可以帮助企业对产品推广策略进行优化，提高转化效率，为消费者提供更合理、更有秩序的消费环境。

一、冲动性消费行为定义及特征

冲动消费是指在没有经过充分思考和理性分析的前提下，受到外界刺激或者情感的驱使，突然产生强烈的购买欲望，并快速作出购买决定的一种非计划性消费行为。该行为多发生于消费者情绪高涨、环境氛围浓厚或促销诱导等情境下，缺乏对产品实际需求、性价比和后果的深度评估^[3]。冲动消费行为具有突发性、冲动性、非理性等特点，常伴有愉悦、愉悦、满足等情感体验，但事后也会产生后悔或消极情绪。在现代消费环境中，特别是在视觉、听觉和情感刺激高度集中的情况下，比如直播电商、短视频带货等，消费者更容易被主播话术、限时抢购、低价促销等因素所影响，产生购买冲动^[4]。因此，深入理解直播电商环境下消费者冲动消费行为的内涵和特征，对于深入剖析消费者在直播电商环境下的心理和行为机理具有重要意义，同时为后续研究提供理论依据。

二、研究模型构建

（一）“刺激—路径—反射”模型概述

本研究以传统的 S-O-R 模型为基础，以具身认知理论为基础，构建了一种扩展模型（图1）。刺激层包含三个外生变量：场景构造（ X_1 ）、主播特征（ X_2 ）和促销策略（ X_3 ）。路径层覆盖认知浸入（ M_1 ）和情绪唤醒（ M_2 ）双重中介；其中，反应层是将购买冲动 Y 作为内生性变量^[5]。采用 Bootstrap 方法进行链式调节，设定用户收看频率（ CV_1 ）、设备类型（ CV_2 ）等控制变量。

（二）研究假设的提出

- H1：主播专业度正向影响认知沉浸（ $\beta > 0.3$ ）
H2：限时折扣通过情感唤醒产生完全中介效应
H3：弹幕互动密度与购买冲动呈倒 U 型关系
H4：场景娱乐性对 35 岁以上群体作用显著（ $p < 0.01$ ）

三、研究设计与数据收集

（一）问卷设计与数据来源

本文将促销策略（限时折扣、满折扣）、主播特质（专业、互动、可信）、场景营造（视觉设计、背景音乐、商品陈列）和消费者特质（冲动、情绪敏感）四个维度进行整合，构建基于情

感唤醒程度（愉悦情绪、消费唤醒）的研究模型。通过淘宝和抖音直播平台的 API 接口，以混合抽样的方式获取用户行为数据，并结合雪球抽样补充样本。

问卷共有 31 个问题，包括两个方面：

人口统计信息：性别，年龄，职业，平均消费水平等；

变量测量：采用 Likert7 级量表，参考 Cai&Mohn（2018）直播购物情境量表，Rook&Fisher（1995）冲动特质量表和吴萍（2022）情绪路径量表（Cronbach's $\alpha = 0.902$ ），采用 Likert7 级量表进行预试验优化。

总共获得了 1,800 份调查问卷，在剔除了逻辑上的矛盾和异常填写时长的无效问卷后，得到了 1,523 份有效样本（有效率 84.6%），样本涵盖了 18-45 岁的主流消费者，详细的分布情况见表 1。

表 1 样本人口统计特征（N=1,523）

变量	类别	频数	占比
性别	男性	687	45.1%
	女性	836	54.9%
年龄	18-25 岁	802	52.7%
	26-35 岁	531	34.9%
职业	学生	623	40.9%
	白领	742	48.7%
月均消费	3,000 元以下	415	27.3%
	3,000-8,000 元	897	58.9%

（二）变量定义与量表选取

研究变量及测量指标如表 2 所示，所有潜变量的组合信度（CR）均大于 0.7，平均方差提取率（AVE）大于 0.5，表明量表具有良好收敛效度。

表 2 变量测量体系及信效度检验

潜变量	观测变量	因子载荷	CR	AVE
促销策略	限时折扣吸引力（PS1）	0.813	0.884	0.602
	满减优惠感知价值（PS2）	0.796		
主播特质	专业知识可信度（HT1）	0.832	0.917	0.687
	实时互动响应度（HT2）	0.845		
情绪唤醒	愉悦情感强度（EA1）	0.872	0.931	0.733
	消费紧迫感（EA2）	0.854		

（三）数据分析方法

使用 AMOS28.0 构建结构方程模型（SEM），通过最大似然法估计参数。模型拟合指标为： $\chi^2/df=2.08$ （<3），RMSEA=0.039

(<0.06) , CFI=0.957 (>0.9) , TLI=0.942 (>0.9) , 表明模型适配度良好。采用 Bootstrap 法 (5,000 次抽样) 检验中介效应, 置信区间设为 95%。

四、实证分析结果

(一) 样本描述性统计

表3列出了核心变量的描述性统计结果, 其中包括平均数, 标准偏差和极端分布。结果表明: 冲动消费行为 (Y) 的均值为 4.82 (7 级量表) , 标准差 1.35, 显示样本人群有明显的冲动消费倾向差异。情景营造 (X₁) 均值为 5.17, 在外生性变量中最大, 说明视觉设计和背景音乐对消费者的刺激作用更大。其中情绪唤醒 (M₂) 均值为 5.39, 高于认知浸入 (M₁, 4.71), 暗示直播场景下更容易诱发冲动决策。在促销策略 (X₃) 中, 限时折扣吸引力 (PS₁) 均值为 5.62, 远高于消费者在满减折扣时所感知到的折扣价值 (PS₂,4.98), 暗示限时性折扣对冲动性购买具有更强的触发效应^[6]。

表3 核心变量描述性统计 (N=1,523)

变量	观测指标	均值	标准差	最小值	最大值
场景建构 (X ₁)	视觉设计吸引力	5.21	1.18	2.00	7.00
	背景音乐适配度	4.98	1.23	1.00	6.50
	商品陈列合理性	5.32	1.09	3.00	7.00
主播特质 (X ₂)	专业知识可信度	5.05	1.31	2.50	7.00
	实时互动响应度	4.89	1.42	1.50	6.80
促销策略 (X ₃)	限时折扣吸引力	5.62	1.05	3.50	7.00
	满减优惠感知价值	4.98	1.27	2.00	6.30
认知沉浸 (M ₁)	信息处理深度	4.68	1.34	1.80	6.90
	内容专注度	4.75	1.29	2.10	7.00
情感唤醒 (M ₂)	愉悦情感强度	5.45	1.12	3.20	7.00
	消费紧迫感	5.33	1.25	2.80	6.70
冲动购买 (Y)	非计划购买意愿	4.82	1.35	1.00	7.00

(二) 各维度对冲动购买行为的直接与间接影响

结构方程模型 (表4) 发现情景建构 (X₁) 对冲动购买 (Y) 产生效应 0.28 (P<0.001) 、认知浸入 (M₁) 和情绪唤醒 (M₂) 间接效应为 0.61(P<0.01), 表明情景建构 (X₁) 不仅直接触发冲动, 而且通过 “ 认知 - 情感 ” 双路径强化作用。主播特征 (X₂) 对 Y 没有直接作用 (β =0.09,P>0.05), 但是通过 M₁ (β =0.37,P<0.001) 和 M₂ (β =0.24,P<0.001) 间接作用显著, 揭示主播专业性、互动性主要通过增强用户沉浸感和情绪唤醒间接影响购买决策。因此, 本项目提出假设: 1. 限时折扣在情感唤醒中的中介作用为 0.31(P<0.001); 2. 推广策略 (X₃) 对 Y 的直接影响为 0.31(P<0.001), 而情感唤醒则为 0.29(P<0.001), 且认知沉浸性中介作用不显著, 验证了 H2 中限时折扣通过情感唤醒的完全中介机制^[7]。在控制变量方面, 用户浏览次数 (CV₁) 和 Y 之间存在显著的负相关关系 (β =-0.15,P<0.01), 这可能是因为使用频率较高的用户更容易产生消费理性; 设备类型 (CV₂) 对 Y 无显著影响 (P>0.05) 。

表4 结构方程模型路径系数及效应分解

路径类型	路径关系	标准化系数 (β)	t 值	直接效应	间接效应	总效应
直接效应	X ₁ → Y	0.28*	4.92	0.28	-	0.28
	X ₂ → Y	0.09	1.37	0.09	-	0.09
	X ₃ → Y	0.31*	5.64	0.31	-	0.31
中介效应	X ₁ → M ₁ → Y	0.12	3.21	-	0.12 (M ₁)	0.12
	X ₁ → M ₂ → Y	0.21*	6.38	-	0.21 (M ₂)	0.21
	X ₂ → M ₁ → Y	0.37*	7.89	-	0.37 (M ₁)	0.37
	X ₂ → M ₂ → Y	0.24*	5.91	-	0.24 (M ₂)	0.24
	X ₃ → M ₂ → Y	0.29*	6.73	-	0.29 (M ₂)	0.29
控制变量效应	CV ₁ → Y	-0.15	-2.87	-0.15	-	-0.15
	CV ₂ → Y	0.06	1.02	0.06	-	0.06

注: ***p < 0.001, **p < 0.01, *p < 0.05 (双尾检验) 。

(三) 中介效应检验

通过 Bootstrap 检验 (表5) , 发现主播特质 (X₂) 和冲动购买 (Y) 的认知浸入度 (M₁) 为 0.37, 95% 置信区间 [0.29,0.45], 不含 0, 说明路径显著; 情景建构 (X₁) 对 Y 的调节作用为 0.21, 置信区间 [0.16,0.26], 对情感唤醒 (M₂) 的调节作用也是显著的。推广策略 (X₃) 通过 M₂ 产生 0.29 的中介效应, 置信区间 [0.23,0.35], 表明情绪唤醒在其中起着完全的调节作用。另外, 情境建构 (X₁) 通过 “ 认知浸入 → 情绪唤醒 ” 的链式调节作用达到 0.08(95%CI[0.04,0.12]), 揭示认知浸入可能通过加深用户参与间接促进情绪唤醒。

表5 Bootstrap 中介效应检验结果 (5,000 次抽样)

中介路径	效应值	标准误	95% 置信区间 (下限 - 上限)
X ₂ → M ₁ → Y	0.37	0.04	[0.29,0.45]
X ₁ → M ₂ → Y	0.21	0.03	[0.16,0.26]
X ₃ → M ₂ → Y	0.29	0.03	[0.23,0.35]
X ₁ → M ₁ → M ₂ → Y	0.08	0.02	[0.04,0.12]

五、结果讨论及建议

(一) 场景建构对冲动购买行为影响显著, 应优化场景设计

结果表明, 情景建构对冲动性购买行为有直接或间接的显著影响。场景构成中的各要素, 如视觉设计, 背景音乐, 商品陈列等, 都会对消费者产生影响, 从而引起消费者的注意和情感上的共鸣。一方面, 高清晰度的特写镜头和精致的商品陈列, 可以提高产品的吸引力, 使消费者对产品更加容易产生兴趣; 另一方面, 适当运用背景音乐等元素, 可以创造一种舒适的购物气氛, 提高消费者沉浸感^[8]。

为充分发挥情景营造的功能, 企业应注重情景设计的优化。在视觉设计方面, 应充分利用高清晰度、特写等技术手段, 突出商品的特点与优点, 使画面整体美观、和谐。根据不同的商品类型、目标人群, 选用适当的背景音乐, 以唤起消费者的情感。在商品陈列设计上要遵循一定的逻辑与美学原理, 以便于消费者的浏览与选

择。从而进一步提高情景营造对冲动性购买行为的正向影响,进而促进销售。

（二）主播特质间接影响冲动购买，需提升主播专业与互动能力

研究发现,主播特质对冲动性购买行为并无显著直接影响,而认知浸入与情绪唤醒则对冲动性购买行为产生间接影响。主播专业知识的可信性、即时互动的回应性可以提升用户的认知沉浸感与情感唤醒度,进而影响其购买决策^[9]。一位专业的主播,能够回答消费者的问题,让消费者感觉更加可靠,也更加愿意沉浸其中;而具有高度互动性的主播,能够在短时间内对消费者的评论与需求做出回应,加强消费者的参与感与情感联结。

在这种情况下,主播的培养与提升是非常重要的。平台与商家应注重挑选、培育具备专业素养、互动能力强的主播。对主播进行相关培训,提高其专业素养,深刻理解产品的特性、优点及使用方式。与此同时,还要加强对主播互动技能的培训,让他们学会如何与观众有效地交流与互动,及时回访,组织互动活动,增强观众的参与度与黏性。通过提高主播的专业性和互动性,可以更好地发挥主播自身特质对冲动性购买行为的间接促进作用。

（三）促销策略直接与间接影响冲动购买，合理制定促销方案是关键

在直播电商环境下,促销策略是影响冲动性购买行为的重要因素,既可直接促进,又可通过情感唤醒产生间接影响。其中,限时折扣吸引力对消费者的影响要大于满减折扣价值,说明即时折扣更易激起消费者购买欲望。限时折扣营造出的紧迫感、稀缺

感,能有效唤醒消费者的情绪,促使其快速作出购买决定。

因此,企业在制定促销策略时,应更多地关注限时折扣等即时性折扣的使用。可以根据不同的产品和目标人群,对限时折扣的时间和强度进行合理的设定,例如对热门商品设定更短的限时折扣时间,加大折扣力度,营造抢购气氛;对于一些小众的产品,可以适当延长折扣期,吸引更多的顾客。还应与其他促销手段如满减等相结合,以满足不同消费者的需要。在促销活动的宣传中,要突出限时折扣的时间节点与优惠力度,使消费者清楚地感觉到打折的吸引力与紧迫性,进而增强促销策略对冲动性购买行为的促进效果。

（四）情感唤醒中介效应明显，强化情感营销势在必行

实证结果显示,情绪唤醒是各维度影响冲动性购买行为的重要中介变量。无论是场景营造,主持人特质,还是促销策略,都会影响消费者的情绪,进而影响其购买决策。情绪因素对消费者购物行为的影响不容忽视,情绪状态(如愉悦情绪强度、消费紧迫感等)的改变将直接影响消费者的冲动性购买行为。

商家与平台要加强情感营销,才能更好地发挥情感唤醒的中介作用。直播时,除了要展示产品的功能、特色之外,还要注意引起消费者情感上的共鸣。比如,通过讲述产品的故事,分享用户的使用体验,来达到情感上的共鸣^[10]。通过弹幕互动、倒计时等手段,加强消费者的消费紧迫感,促使消费者尽早作出购买决定。还可以针对不同的节日、季节等因素,设计相对应的情感主题直播,营造符合主题的情绪氛围,消费者在情绪的驱使下,更易产生冲动的购买行为。加强情感营销,提升直播电商的销售效果与用户体验。

参考文献

- [1] 左晶晶,李盈盈.电商直播过程中氛围线索与消费者冲动购买行为——基于链式中介分析[J].西部经济管理论坛,2024,35(02):89-98.
- [2] 万红霞,高明杰,陈莹.直播电商中消费者冲动购买诱因对持续购买的影响[J].时代经贸,2024,21(02):46-51.
- [3] 王磊,王学基.互动创造消费:旅游电商直播情境下冲动购买的影响机制[J].西南民族大学学报(人文社会科学版),2023,44(12):132-142.
- [4] 李素娟.电商直播交互模式对消费者购买行为的影响研究[J].现代营销(下旬刊),2023,(11):114-116.
- [5] 彭倩倩,赵金婷,庞宇辰.直播间消费者冲动购买影响因素研究[J].科技传播,2023,15(22):135-138.
- [6] 胡丽霞,闵庆飞,李梦一.电商直播技术社会示范性对消费者平台使用意向的影响[J].管理科学,2023,36(01):1-15.
- [7] 范文芳,王千.个性化智能推荐对消费者在线冲动购买意愿的影响研究[J].管理评论,2022,34(12):146-156+194.
- [8] 张建钦.直播电商虚拟氛围对冲动购买行为的影响分析——基于社群意识的中介作用视角[J].河南工业大学学报(社会科学版),2022,38(04):56-63.
- [9] 李晓林,易红,白玉亭,等.直播情境下基于AISAS模型的冲动性购买影响机制研究[J].西华师范大学学报(自然科学版),2023,44(04):391-399+407.
- [10] 黄晓艳.直播电商营销可供性对消费者在线冲动购买的影响——心理距离和心理账户灵活性的链式中介效应[J].商业经济研究,2022,(11):59-62.

基于 ARIMA 模型上的 CPI 的建模及预测

黄梓鹏

华南农业大学数学与信息学院, 广东 广州 510640

DOI:10.61369/ASDS.2025040002

摘要： 本文基于 ARIMA 模型对我国消费者价格指数 (CPI) 进行建模与预测, 结合最小二乘法和贝叶斯估计方法对比分析模型性能。通过差分处理非平稳时间序列, 选择 ARIMA(3,1,0) 模型进行参数估计, 利用 AIC 准则和残差检验验证模型有效性。实证分析显示, 最小二乘法与贝叶斯方法均能较好拟合 CPI 趋势, 预测值与实际值偏差在可控范围内。贝叶斯方法通过引入先验分布和 MCMC 抽样, 增强了参数不确定性建模能力, 尤其适用于小样本或高波动场景。研究结果表明, 两种方法在 CPI 预测中均有效, 在实证例子中, 贝叶斯推断在融合先验信息与动态更新后验分布方面更具优势, 预测值也能为宏观经济政策评估和通胀调控提供了理论支持。

关键词： ARIMA 模型; CPI 预测; 贝叶斯估计; 最小二乘法

Modeling and Forecasting CPI Based on the ARIMA Model

Huang Zipeng

College of Mathematics and Information, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510640

Abstract： This paper models and forecasts China's Consumer Price Index (CPI) using the ARIMA model, comparing the performance of the least squares method and Bayesian estimation. To handle non-stationary time series, differencing is applied, and the ARIMA(3,1,0) model is selected based on parameter estimation. The model's validity is confirmed through AIC criterion and residual diagnostics. Empirical analysis shows that both the least squares and Bayesian methods effectively capture the CPI trend, with prediction errors within a controllable range. The Bayesian approach, incorporating prior distributions and MCMC sampling, enhances the ability to model parameter uncertainty, making it especially suitable for small samples or highly volatile scenarios. The results demonstrate that both methods are effective for CPI forecasting, while Bayesian inference shows advantages in integrating prior knowledge and dynamically updating posterior distributions. The predicted values provide theoretical support for macroeconomic policy assessment and inflation control.

Keywords： ARIMA; CPI forecasting; Bayesian estimation; LSM

引言

消费者价格指数 (CPI, ConsumerPriceIndex) 是衡量居民消费商品及服务价格水平变动的关键指标, 其波动受到多重因素影响, 并与货币政策、产业结构、国际环境等密切相关, 它通常用来衡量一篮子消费品和服务的价格变动, 反映通货膨胀或通货紧缩的水平, 因此预测 CPI 还可以帮助评估已实施的经济政策的效果。例如, 通过比较政策实施前后的 CPI 预测值与实际值, 可以判断政策是否达到了预期的调控目标, 为未来政策调整提供依据。

消费者价格指数 (CPI) 的预测常采用 ARIMA (自回归积分移动平均) 模型, 该模型通过分析时间序列的趋势和季节性进行预测。分析数据的自相关性和移动平均特性来预测的特点, 适用于平稳或可差分平稳的时间序列数据, 国内外就有很多通过 ARIMA 模型预测的案例, 如基于 ARIMA 模型, 马瑶等 (2021) 对中、美、德三国 2000–2020 年月度 CPI 数据建模分析, 验证其预测能力, 发现政府疫情干预对 CPI 影响显著^[1-2]。

在 ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average model) 模型中, 最小二乘法主要用于参数估计阶段。当构建 ARIMA 的自回归和移动平均部分时, 可通过最小二乘法来估计模型参数, 通过最小化预测值与实际观测值的残差平方和来优化模型拟合。接着, 通过 AIC、BIC 准则定阶后, 最后用最小二乘法于参数估计^[3-5]。

贝叶斯推断是一种基于贝叶斯定理的统计方法, 通过结合先验知识与新数据动态更新概率分布, 形成后验概率。其核心思想是先将

验分布（初始假设）与似然估计（观测数据）结合，利用贝叶斯公式计算后验分布（更新后的概率）^[6]。贝叶斯推断将概率视为对事件发生的主观信心而非长期频率，尤其在小数据场景下能保留不确定性，因此可通过马尔可夫链蒙特卡洛（MCMC）等方法进行参数推断，引入先验知识，相较于最小二乘法的点估计，可增强对不确定性的建模能力，更适合处理小样本或高不确定性场景^[7]，但在可找到的案例中使用较少。

一、模型及分布类型介绍

（一）模型介绍

1. ARIMA 模型

ARIMA(p,d,q) 称为差分自回归移动平均模型，AR（Autoregressive）是自回归，p 为自回归项；MA（Moving Average）为移动平均，q 为移动平均项数；I（Integrated）指的是差分整合，d 为时间序列成为平稳时所做的差分次数 ARIMA(p,d,q) 模型模型具有如下的架构^[8]：

$$\begin{cases} \Phi(B)\nabla^d x_t = \Theta(B)\varepsilon_t \\ E(\varepsilon_t) = 0, \text{Var}(\varepsilon_t) = \sigma_\varepsilon^2, E(\varepsilon_t \varepsilon_s) = 0, s \neq t \\ E_s \varepsilon_t = 0, \forall s < t \end{cases}, \quad (1.1)$$

式中：

$\Phi(B) = 1 - \phi_1 B - \dots - \phi_p B^p$ ，为平稳可逆 ARMA(p,q) 模型的自回归系数多项式；

$\Theta(B) = 1 - \theta_1 B - \dots - \theta_q B^q$ ，为平稳可逆 ARMA(p,q) 模型的移动平滑系数多项式；

式（1.1）可以简记为：

$$\nabla^d x_t = \frac{\Theta(B)}{\Phi(B)} \varepsilon_t \quad (1.2)$$

其中 B 为延迟算子 $Bx_t = x_{t-1}$ ，即，为零均值白噪声序列。

显然，ARIMA 模型的实质就是差分运算与 ARMA 模型的组合。所以我们在处理非平稳的时间序列时，只要对其进行差分运算就可得到一平稳的时间序列。

此外，可以看出由于 $\{\varepsilon_t\}$ 为零均值白噪声序列，它要求影响每个观察数据的因素大致一样，本文选用 ARIMA 模型对 CPI 进行研究的原因也是基于 CPI 具有这个性质^[6]。

2. 最小二乘估计

最小二乘估计的原理是使残差平方和达到最小的那组参数值即为最小二乘估计值。由上文可知，ARIMA 模型是针对非平稳时间序列的模型，为了使其变成平稳一般使用差分方法，然后对平稳的时间序列使用 ARMA 模型进行建模，所以实际上它们的原理是相同的，为了简化说明，使 n 阶差分 $x_t = (1-B)^n y_t$ ，然后直接套用 ARMA 模型进行说明：

对于 ARMA(p,q)，记

$$\tilde{\beta} = (\phi_1, \dots, \phi_p, \theta_1, \dots, \theta_q)^T \quad (1.3)$$

$$F_t(\tilde{\beta}) = \phi_1 x_{t-1} + \dots + \phi_p x_{t-p} - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (1.4)$$

残差项为：

$$\varepsilon_t = x_t - F_t(\tilde{\beta}) \quad (1.5)$$

残差平方和为：

$$\begin{aligned} Q(\tilde{\beta}) &= \sum_{t=1}^n \varepsilon_t^2 \\ &= \sum_{t=1}^n (x_t - \phi_1 x_{t-1} - \dots - \phi_p x_{t-p} - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q})^2 \end{aligned} \quad (1.6)$$

当残差平方和达到最小时，所得的参数即为 $\tilde{\beta}$ 的最小二乘估计，即：

$$\begin{aligned} Q(\hat{\beta}) &= \min Q(\tilde{\beta}) \\ &= \min \sum_{t=1}^n (x_t - \phi_1 x_{t-1} - \dots - \phi_p x_{t-p} - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q})^2 \end{aligned} \quad (1.7)$$

由此看见最小二乘估计充分应用了每一个观察值所提供的信息，因而其估计精度高，计算复杂度不高，是人们使用较为普遍的方法^[8-9]。

3. 贝叶斯估计方法

本节为方便描述，直接用 ARMA 模型进行说明。设模型的参数向量为 $X = (x_1, x_2, \dots, x_t)$ ， $\eta = (\phi, \theta)$ ，其中 X 为观察序列， $\phi = (\phi_1, \dots, \phi_p)$ 是自回归参数向量， $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_q)$ 是移动平均参数向量。

贝叶斯理论是利用与未知变量有关的统计数据来获得未知变量的条件分布函数，即未知变量的后验概率密度函数，基本公式为：

$$h(\eta | X) = \frac{\pi(\eta)f(X|\eta)}{g(X)} = \frac{f(X|\eta)\pi(\eta)}{\int f(X|\eta)\pi(\eta)d\eta} \quad (1.8)$$

其中， $h(\eta | X)$ 为后验概率密度函数， $f(X|\eta)$ 为条件密度函数， $g(X)$ 为先验分布函数， $\pi(\eta)$ 为 η 的概率密度函数。

而且 η 的贝叶斯估计为

$$\hat{\eta} = E[h(\eta | X)] \quad (1.9)$$

显然，即使所有的条件都给出，但是要计算式（2.9）存在困难，因此人们引入了马尔科夫蒙特卡罗法^[10]（Markov Chain Monte Carlo）。

MCMC 方法的基本思想是：建立一个马尔科夫链对未知变量 U_t 进行模拟，当链达到稳态分布时即得所求的后验分布。随机点 U_t 来自于分布 $\pi(U)$ ，由不同的抽样方法得到了不同的 MCMC 方法，如 Metropolis-Hastings 方法、Gibbs 抽样方法以及各种复合方法^[11]。

Gibbs 抽样是最简单也是应用最广泛的一种抽样方法。在上述假设条件下，首先给定各个参数的初始值 $\hat{\eta}^{(0)} = (\phi^{(0)}, \theta^{(0)})$ ，然后从上面的分析得到的各个参数 ϕ ， θ 的条件后验密度中循环抽取的 n 次，Gibbs 抽样的第一次迭代如下：

$$\begin{aligned} \tilde{\eta}_1^{(1)} &\sim f(\tilde{\eta}_1 / \tilde{\eta}_2^{(0)}, \dots, \tilde{\eta}_s^{(0)}) \\ \tilde{\eta}_2^{(1)} &\sim f(\tilde{\eta}_2 / \tilde{\eta}_1^{(1)}, \tilde{\eta}_3^{(0)}, \dots, \tilde{\eta}_s^{(0)}) \\ &\vdots \\ \tilde{\eta}_k^{(1)} &\sim f(\tilde{\eta}_k / \tilde{\eta}_1^{(1)}, \dots, \tilde{\eta}_{k-1}^{(1)}, \tilde{\eta}_{k+1}^{(0)}, \dots, \tilde{\eta}_s^{(0)}) \\ &\vdots \\ \tilde{\eta}_s^{(1)} &\sim f(\tilde{\eta}_s / \tilde{\eta}_1^{(1)}, \dots, \tilde{\eta}_{s-1}^{(1)}) \end{aligned} \quad (1.10)$$

其中 \sim 表示左边从右边抽取。以上完成了一次 Gibbs 迭代过程，即完成了由 $\tilde{\eta}^{(0)}=(\phi^{(0)}, \theta^{(0)})$ 到 $\tilde{\eta}^{(1)}=(\phi^{(1)}, \theta^{(1)})$ 经过 n 次迭代，则可以得到各参数的 n 次抽样值。当马尔可夫链在循环迭代 $m(m < n)$ 次后收敛时，由蒙特卡罗积分公式可以得到各个参数的后验均值和方差分别为

$$\begin{cases} E(\tilde{\eta}_k) \approx \frac{1}{n-m} \sum_{t=m+1}^n \tilde{\eta}_k^{(t)}, \\ Var(\tilde{\eta}_k) \approx \frac{1}{n-m} \sum_{t=m+1}^n (\tilde{\eta}_k^{(t)})^2 - \left(\frac{1}{n-m} \sum_{t=m+1}^n \tilde{\eta}_k^{(t)} \right)^2 \end{cases} \quad (1.11)$$

其中 $\tilde{\eta}_k$ 表示参数向量 $\tilde{\eta}=(\phi, \theta)$ 中的任意参数。

二、实证分析

1. 建模前数据处理

CPI 数据的收集比较容易，政府部门每隔一段固定的时间都会发布该阶段的 CPI 数据，以供社会参考。

下面是我国 2021 年 6 月到 2024 年 6 月的 CPI 数据：

表 2.1 2021 年到 2024 年 1-6 月我国 CPI 指数

	1月	2月	3月	4月	5月	6月
2021						101.1
2022	101.5	100.7	100.8	101	101.3	100.9
2023	99.2	99.7	99.5	99.8	100	100.1
2024	100.7	100.1	100.1	100.3	100.3	100.2

表 2.2 2021 年到 2024 年 7-12 月我国 CPI 指数

	7月	8月	9月	10月	11月	12月
2021	101	101.1	100.7	100.9	101.5	102.3
2022	100.4	99.8	99.7	100.2	100.9	101.5
2023	99.7	100	100.1	99.8	99.5	99.7
2024	100.5					

首先，先得到数据的序列图以及自相关系数图（图 2.1），明显地序列并不平稳，所以我们进行一、二阶差分运算，得到新的序列图以及自相关系数图。

由时序图 2.2、2.3 可以看出差分后的图像趋向于平稳，再由自相关系数图得自相关系数基本在两倍的标准差内波动，进一步确定了差分后的序列的平稳性。

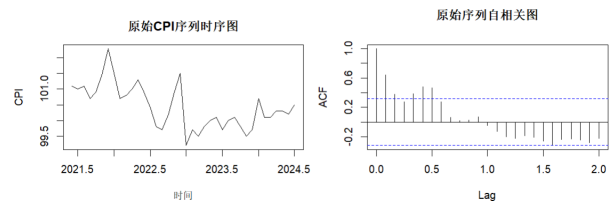


图 2.1 CPI 数据时序图、自相关系数图

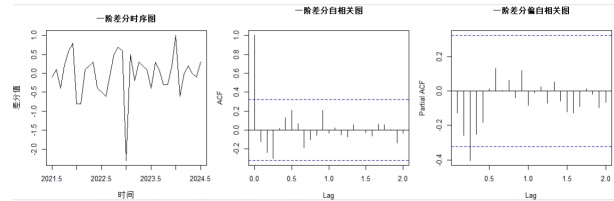


图 2.2 CPI 数据一阶差分时序图、自相关系数、偏自相关系数图

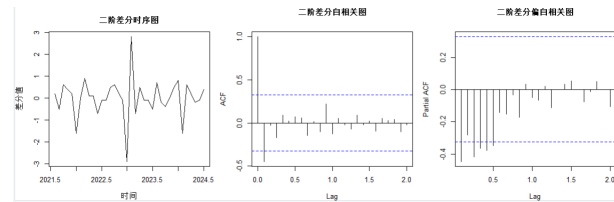


图 2.3 CPI 数据二阶差分时序图、自相关系数、偏自相关系数图

2. 建立模型并预测

由图 2.2 和 2.3 看一、二阶差分后的序列图明显是平稳的，计算一、二阶差分序列 $\{\nabla y_t\}$ 、 $\{\nabla^2 y_t\}$ 方差分别为 0.3392、0.7833，后者方差偏大，选用一阶差分。由图 2.1 可看出数据无明显的季节效应，选用 ARIMA(3,1,0) 和 ARIMA(1,1,1) 模型。

然后，分别对数据进行建模，分析模型参数结果：

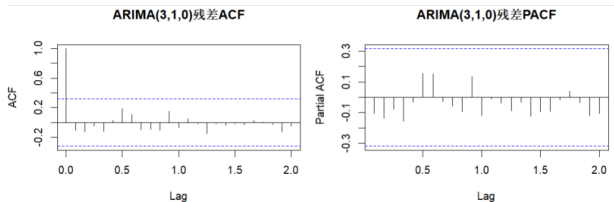


图 2.4 ARIMA(3,1,0) 模型残差检验图、自相关系数残差图

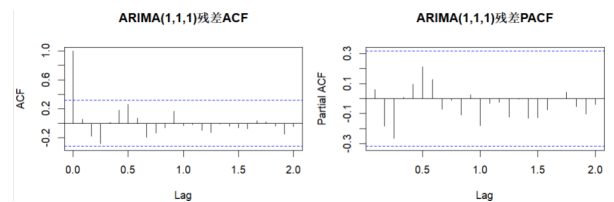


图 2.5 ARIMA(1,1,1) 模型残差检验图、自相关系数残差图

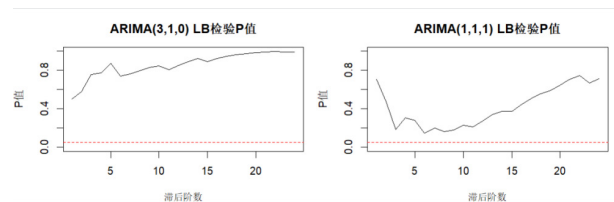


图 2.6 模型 LB 统计量的 P 值检验图

由 AIC 准则，数值越小模型拟合越好，以及残差检验图 P 值越大越拒绝模型无效的假设，最终选用 ARIMA(3,1,0)。根据最小二乘法运算，所以模型为：

$$x_t = 0.7411x_{t-1} - 0.0473x_{t-2} - 0.0730x_{t-3} + 0.3792x_{t-4} + \varepsilon_t \quad (2.1)$$



图2.7 预测与实际相比较（红色线为实际数据的走向）

可见，拟合结果不完美，但仍然在上下限两倍的标注差中，在可控制的范围内^[12]。

3. 使用贝叶斯统计分析

基于前文对两个 ARIMA 模型的分析，加上对后面的结果有可比性，我们仍然 ARIMA(3,1,0) 模型。对于以贝叶斯统计分析和贝叶斯统计推断为基础的数学模型构建过程为：将先验信息和样本数据信息通过贝叶斯定理，建立后验理论模型并进行参数估计，最后进行模型检验。得到如表 3.3 结果，得模型为：

$$x_t = 0.7450x_{t-1} - 0.0706x_{t-2} - 0.0782x_{t-3} + 0.4037x_{t-4} + \varepsilon_t \quad (2.2)$$

表 2.3 30000 次 Gibbs 抽样迭代的参数后验估计统计量

参数	均值	标注差	标准误	2.5%	97.5%
ϕ_1	-0.10283	0.2660	0.00096	-0.7479	0.6053
ϕ_2	-0.17603	0.2623	0.00094	-0.8333	0.4703
ϕ_3	-0.23108	0.2632	0.00094	-0.8995	0.4640

下面是各参数的 Gibbs 抽样过程图：

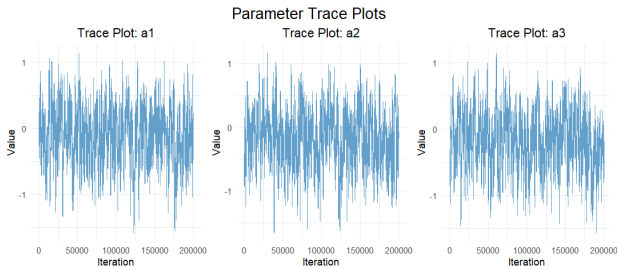


图 2.8 各参数的 Gibbs 抽样过程图

下面是个参数的后验分布概率密度估计图：

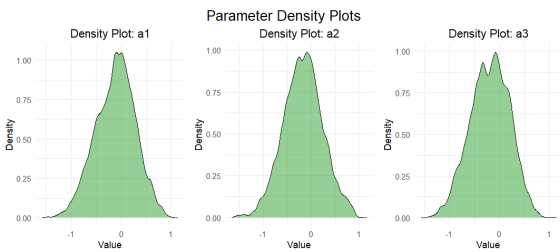


图 2.9 各参数后验概率密图

然后，我们再利用所得到的模型进行往后 6 阶的预测，预测图与实际图对比：

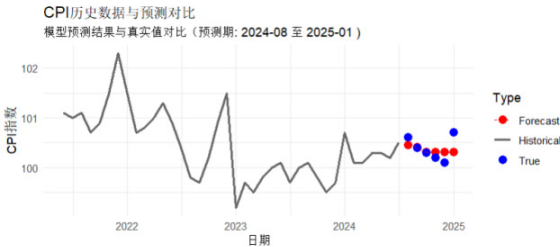


图 2.10 预测与实际相比较（红色线为实际数据的走向）

可见预测效果。根据误差指标，在这里贝叶斯方法的误差更小，两种方法都得到的大致真实的走向，这也说明了两种方法都是有有效的。

表 2.4 误差指标

指标	MAE	MSE	RMSE
最小二乘法	0.1610	0.0400	0.2000
贝叶斯方法	0.1474	0.0394	0.1986

三、结论

近年我国经济发展仍将面临复杂的国际和国内环境，但是总的来说经济回升，基础需进一步夯实。对比历史数据和现实情况可以发现，2023 以来，CPI 的涨幅处于低位，物价整体平稳，但低于通常认为经济运行健康状态下的 CPI 涨幅 2%–3%，物价上涨动力不足，而真实的 2024 年下半年的数据显示比估计略高，这说明 CPI 有所回升，但是经济恢复向好态势仍有待进一步巩固。

参考文献

[1] 邓迎春. 经济时间序列 ARMA 模型的贝叶斯分析及其应用. 湖南大学学院硕士毕业论文, 2006, 6.

[2] 马瑶, 孙中玉, 邹益玲. 基于 ARIMA 模型对中, 美, 德三国 CPI 的分析与预测 [J]. 经济研究导刊, 2021(8):5.

[3] 方珂昊, 赵凌. 基于偏最小二乘方法的 ARIMA 模型在股票指数预测中的应用 [J]. 四川文理学院学报, 2018, 28(5):5.DOI:CNKI:SUN:DXSZ.0.2018-05-002.

[4] 洪京一. 基于 ARIMA 模型的上海市居民消费价格指数实证分析 [J]. 中小企业管理与科技, 2021.

[5] 肖曼君, 夏荣尧. 中国的通货膨胀预测基于 ARIMA 模型的实证分析. 上海金融, 2008, (8): 38-42.

[6] 刘红梅. ARIMA 模型在股票价格预测中的应用. 广西轻工业, 2008, (115): 92-93.

[7] 刘乐平. 贝叶斯计量经济学从先验到结论. 中国经济学年会, 2006, (3): 53-56.

[8] 王燕. 应用时间序列分析. 北京: 中国人民大学出版社, 2000. 140-174.

[9] 孙荣恒. 应用数理统计. 第二版. 北京: 科学出版社, 2002. 67-85.

[10] 吴海霞, 刘露锋. 蒙特卡罗方法在实际问题中的应用. 太原师范学院学报, 2009, (1): 5-8.

[11] W N Venables, B D Ripley Springer. Modern Applied Statistics with S Fourth edition. New Jersey: U S Patent, 2002. 1-147.

[12] Frank R Kleibergen, Henk Hoek. Bayesian Analysis of ARMA Models. Tinbergen Institute Discussion Paper, 2000, (3): 23-29.

数字经济与产业链韧性的耦合协调分析

赖喜祥, 唐文静, 杨茜, 梁鑫*

广西师范大学 数学与统计学院, 广西 桂林 541006

DOI:10.61369/ASDS.2025040003

摘要 : 基于2013年—2022年省域面板数据,对数字经济与产业链韧性耦合协调的时空演变及影响因素进行分析。运用熵值法构建指标体系对我国省域数字经济与产业链韧性进行测度,引入耦合协调度模型计算出两者的协调发展水平,并探究耦合协调的时空演变。对数字经济与产业链相关政策新闻进行文本挖掘,归纳出可能影响耦合协调系统的因素,选择随机森林算法分析耦合协调度的影响因素及影响因素的影响程度。通过上述分析得到我国数字经济与产业链韧性的耦合协调度在空间上存在着很大的不平衡等结论,为数字经济与产业链韧性协同发展提出根据不同地区耦合协调度差异性因地制宜、有针对性地采取措施等建议。

关键词 : 数字经济; 产业链韧性; 耦合协调

Coupling and Coordination Analysis of Digital Economy and Industrial Chain Resilience

Lai Xixiang, Tang Wenjing, Yang Xi, Liang Xin*

Department of Statistics, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541006

Abstract : Based on the provincial panel data from 2013 to 2022, the spatio-temporal evolution and influencing factors of the coupling and coordination between the digital economy and the resilience of the industrial chain were analyzed. The entropy method is used to construct an index system to measure the provincial digital economy and industrial chain resilience in China. The coupling coordination degree model is introduced to calculate the coordinated development level of the two, and the spatio-temporal evolution of coupling coordination is explored. Text mining was conducted on policy news related to the digital economy and industrial chain to summarize the factors that may affect the coupling and coordination system. The random forest algorithm was selected to analyze the influencing factors of the coupling and coordination degree and the influence degree of the influencing factors. Through the above analysis, it is concluded that there is a significant spatial imbalance in the coupling and coordination degree between China's digital economy and industrial chain resilience. Suggestions such as taking targeted measures based on the differences in coupling and coordination degrees in different regions are proposed for the coordinated development of the digital economy and industrial chain resilience.

Keywords : digital economy; industry chain toughness; coupling coordination

引言

近年来数字经济已日益成为推动产业变革的核心驱动力^[1]。据相关统计,2018年到2022年中国数字经济规模从约30万亿元增长到50.2万亿元,总量稳居世界第二,占GDP比重提升至41.5%,数字经济成为“稳增长”“促转型”的重要引擎。云计算等数字技术与产业场景进一步融合,不断强化产业发展的“韧性”。

与此同时,国内外经济环境发生着巨大的变化,如何提高产业链的稳定性,成为国内研究的焦点。习近平总书记提出“要打造具有战略性和全局性的产业链,增强产业链韧性”“产业链、供应链在关键时刻不能掉链子”。二十大报告围绕“提升产业链供应链韧性和

基金项目:

广西研究生教育创新计划项目(XYCSR2024077)

广西哲学社会科学研究课题(23BTJ001)

广西研究生教育创新计划项目(YCSW2024233)

作者简介:

赖喜祥,广西师范大学数学与统计学院硕士研究生;

唐文静,广西师范大学数学与统计学院硕士研究生;

杨茜,广西师范大学数学与统计学院硕士研究生。

通讯作者:梁鑫,广西师范大学数学与统计学院副教授,电子邮箱:liangxin@gxnu.edu.cn。

安全水平”等作出重要部署。数字经济的发展可以提高产业链韧性的同时也会使产业链韧性面临一些挑战。因此研究数字经济和产业链韧性的协调发展对于增强产业链韧性和推进数字化转型具有重要意义。

在此背景下，李文龙等（2023）采用熵权法对产业链韧性进行测算，考察产业协同集聚、数字经济对产业链韧性的影响^[2]；谷城，张树山（2023）考察数字经济影响产业链韧性水平的效果、作用机制^[3]。孙文远等（2024）研究数字经济对产业链韧性的影响效应^[4]。孙畅等（2024）构建数字经济与产业耦合共生系统研究成渝地区二者的分布^[5]。黄敦平（2024）从数字基础设施、数字产业化、产业数字化的耦合协调出发，研究皖江城市带数字经济产业协同发展水平及影响因素^[6]。这些文献中用到的耦合协调模型等方法为本文模型的构建提供参考。

自物理中的耦合概念被推广到其他领域以来，在时空耦合上的研究逐渐增多，较多的主题为耦合协调、时空分异等，如周德田等（2021）对科技金融和经济高质量发展水平进行耦合研究^[7]；魏振香等（2021）结合耦合度和PVAR模型分析两系统间的耦合发展^[8]；高煜等（2023）和杨梦洁（2023）对全数字产业化与产业数字化进行耦合协调分析^[9-10]；不少文献涉及到数字经济与其它系统的耦合协调^[11-12]……这些研究为本文的耦合分析提供方法上的参考。此外，许多文献在建立耦合协调模型后分析区域差异及影响因素^[13]。在影响因素中，运用到的模型有面板Tobit模型、空间杜宾模型等模型、机器学习算法等。李宜斌（2024）和杨志鹏（2023）在研究影响因素中采用随机森林模型，为本文探究影响因素提供思路^[14-15]。不少学者对数字经济、数字经济对产业链韧性的影响、提升产业链韧性有所研究，但在数字经济与产业链韧性耦合问题上研究较少。本文基于2013—2022年我国省域面板数据分析我国各省数字经济与产业链韧性的协调性，试图为数字经济与产业链韧性协调发展提出建议。

一、指标体系的构建与数据来源

（一）数据来源

本文用于测度指标的数据及用到的影响因素数据来源于国家统计局官网及中国经济社会大数据平台。所用地图基于国家地理信息公共服务平台下载的审图号为GS（2024）0650号的标准地图制作，底图无修改。

（二）指标选取

本文参考胡德龙等^[16-17]，从数字产业化、产业数字化两个维度出发，对各省数字经济体系进行构建如表1所示。结合数据的可获得性，在数字产业化维度中选取互联网宽带接入用户、移动电话年末用户两个指标来描述数字基础措施，用电信业务总量来描述数字产品服务，用信息传输、软件和信息技术服务业城镇单位就业人员来描述数字技术服务。在产业数字化维度上，本文主要选取电子商务销售额等指标从电子商务、数字物流两个角度来进行测度。

表1 数字经济指标体系

维度	基础指标	单位	属性
数字产业化	信息传输、软件和信息技术服务业城镇单位就业人员	万人	+
	电信业务总量	亿元	+
	互联网宽带接入用户	万户	+
	移动电话年末用户	万户	+
产业数字化	电子商务销售额	亿元	+
	有电子商务交易活动的企业数比重	%	+
	快递量	万件	+
	邮政业务总量	亿元	+

产业链韧性是指产业链在面对外部环境威胁和冲击时内部要素的抵抗力恢复力和创新力。借鉴部分研究^[18]对产业链韧性指标的测度，选取产业多样化和创新能力两个正向指标进行刻画。

产业多样化指数越大，产业链应对外来冲击的抵抗力和恢复力越强。创新能力越强，产业链面对冲击时的更新力越强。其中，产业多样化参考^[19]中的方法，采用产业集中度的倒数来衡量，产业集中度用第*i*产业增加值占生产总值的比重平方和来表示，具体计算公式为：

$$ID=1/\sum_{i=1}^N S_i^2$$

其中ID为产业多样化指标， S_i 为*i*产业增加值占生产总值的比重。对于创新能力，本文采用各省专利申请数量作为测度的指标。得到产业多样化和创新能力的指标后，运用熵值法计算出2013年-2022年各省市产业链韧性的指标。

二、数字经济与产业链韧性耦合协调分析

（一）数字经济与产业链韧性耦合协调模型

本文借用物理中的耦合，对数字经济和产业链韧性建立双系统耦合协调度模型如下：

$$C=\sqrt{\frac{S_1 \times S_2}{(\frac{S_1+S_2}{2})^2}}$$
$$D=\sqrt{C \times T}$$
$$T=\alpha S_1+\beta S_2$$

其中 S_1 表示数字经济指标，表示 S_2 产业链韧性指标，C为耦合度，T为数字经济与产业链韧性的综合评价指标， α 、 β 分别表示综合评价指标中数字经济指标、产业链韧性指标的权重，D为耦合协调度。耦合度C越接近于1，耦合情况越好。耦合协调度的取值不同，协调等级也不同。

表2 耦合协调度划分标准

耦合协调度 (D)	耦合协调等级	耦合协调度 (D)	耦合协调等级
0.0<D ≤ 0.1	极度失调	0.5<D ≤ 0.6	勉强协调
0.1<D ≤ 0.2	严重失调	0.6<D ≤ 0.7	初级协调
0.2<D ≤ 0.3	中度失调	0.7<D ≤ 0.8	中级协调

0.3<D ≤ 0.4	轻度失调	0.8<D ≤ 0.9	良好协调
0.4<D ≤ 0.5	濒临失调	D >0.9	优质协调

设定数字经济与产业链韧性同等重要，即赋予数字经济与产业链韧性指标的权重 $\alpha = \beta = 0.5$ ，对模型进行求解，得到各省耦合协调度如表3所示。

表3 数字经济与产业链韧性耦合协调度表

地区	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年
北京市	0.4298	0.4523	0.4838	0.4905	0.5297	0.5596	0.5884	0.6148	0.6006	0.6097
天津市	0.1592	0.1727	0.1929	0.1954	0.2041	0.2340	0.2573	0.2791	0.2445	0.2438
河北省	0.2557	0.2667	0.2799	0.2857	0.3046	0.3659	0.4254	0.4685	0.3557	0.3573
山西省	0.2100	0.2167	0.2288	0.2274	0.2399	0.2764	0.3086	0.3331	0.2610	0.2683
内蒙古自治区	0.2036	0.2058	0.2189	0.2218	0.2338	0.2648	0.2910	0.3083	0.2464	0.2531
辽宁省	0.2784	0.2863	0.3000	0.2963	0.3122	0.3422	0.3726	0.3942	0.3316	0.3392
吉林省	0.2202	0.2284	0.2356	0.2368	0.2464	0.2680	0.2896	0.2985	0.2496	0.2509
黑龙江省	0.2387	0.2492	0.2570	0.2583	0.2739	0.2938	0.3153	0.3276	0.2736	0.2802
上海市	0.3500	0.3927	0.4080	0.4233	0.4423	0.4793	0.5134	0.5389	0.5426	0.5670
江苏省	0.4268	0.4338	0.4572	0.4527	0.4847	0.5540	0.6110	0.6489	0.5326	0.5510
浙江省	0.3824	0.4044	0.4386	0.4571	0.5002	0.5595	0.6324	0.6914	0.5825	0.5919
安徽省	0.2816	0.3035	0.3248	0.3311	0.3495	0.3990	0.4460	0.4767	0.3971	0.4114
福建省	0.3108	0.3231	0.3443	0.3495	0.3717	0.4111	0.4421	0.4652	0.4009	0.4072
江西省	0.2678	0.2829	0.3080	0.3040	0.3236	0.3552	0.3883	0.4109	0.3530	0.3599
山东省	0.3912	0.3999	0.4199	0.4378	0.4660	0.5181	0.5534	0.5935	0.5087	0.5210
河南省	0.3430	0.3583	0.3804	0.3904	0.4191	0.4764	0.5267	0.5753	0.4685	0.4762
湖北省	0.3251	0.3420	0.3614	0.3694	0.3878	0.4223	0.4687	0.4837	0.4300	0.4408
湖南省	0.3181	0.3330	0.3450	0.3524	0.3681	0.4122	0.4563	0.4924	0.4101	0.4174
广东省	0.5296	0.5556	0.5864	0.6132	0.6744	0.7715	0.8525	0.9198	0.7875	0.8065
广西壮族自治区	0.2938	0.3042	0.3179	0.3229	0.3356	0.3799	0.4170	0.4524	0.3773	0.3841
海南省	0.2215	0.2564	0.2760	0.2848	0.2825	0.2918	0.3033	0.3163	0.2968	0.2993
重庆市	0.2899	0.3095	0.3269	0.3376	0.3514	0.3837	0.4109	0.4337	0.3858	0.4127
四川省	0.3777	0.3947	0.4232	0.4343	0.4589	0.5050	0.5446	0.5913	0.5054	0.5154
贵州省	0.2784	0.2909	0.3108	0.3242	0.3388	0.3748	0.4130	0.4420	0.3585	0.3692
云南省	0.3133	0.3289	0.3472	0.3471	0.3653	0.3995	0.4395	0.4723	0.3844	0.3840
西藏藏族自治区	0.1855	0.2257	0.2509	0.2723	0.2528	0.2514	0.2582	0.2617	0.2522	0.2446
陕西省	0.3301	0.3466	0.3626	0.3761	0.3899	0.4285	0.4569	0.4780	0.4184	0.4273
甘肃省	0.2661	0.2784	0.2964	0.3064	0.3131	0.3425	0.3679	0.3844	0.3398	0.3403
青海省	0.1968	0.2150	0.2542	0.2653	0.2598	0.2731	0.2837	0.2945	0.2857	0.2880
宁夏回族自治区	0.2170	0.2441	0.2629	0.2714	0.2677	0.2832	0.2942	0.3034	0.2822	0.2826
新疆维吾尔自治区	0.2789	0.2913	0.3072	0.3050	0.3118	0.3360	0.3703	0.3995	0.3468	0.3556

从耦合协调度来看：我国数字经济与产业链韧性耦合协调度主要集中于中度失调、轻度失调、濒临失调、勉强协调几个状态。耦合协调度最大值出现在广东省，广东省从2013年的勉强协调不断发展到2020年耦合协调度达到0.9118，达到优质协调水平。此外，耦合协调度的较低的值普遍集中于天津市、内蒙古自治区、辽宁省、吉林省、黑龙江省、西藏自治区、宁夏回族自治区等省市。

(二) 耦合协调时空演化分析

1. 时间上的演化特征

根据我国按经济发展划分的四大经济发展区，将各省分区域进行对比分析，得到的变化图如图1所示。总体上看，东部地区的平均耦合协调度最优，2019年—2021年东部地区的平均耦合协调度达到勉强协调，而后的2022年也能接近该水平，其次平均协调度较好的是中部地区，最差的是东北地区，从2013年—2022年平均耦合协调度均未能超过0.4，该地区平均耦合协调度最高水平仅为轻度失调。2013年—2020年四大地区的平均耦合协调度均保持增长状态，但2020年—2021年有所下降，而随后2021年—2022年均有所回升。

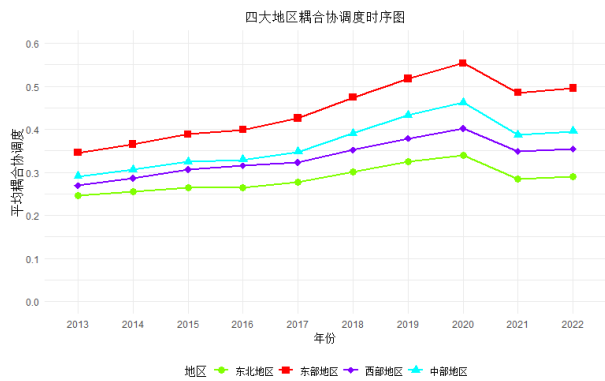


图1 四大地区耦合协调度时间序列图

2. 空间演变分析

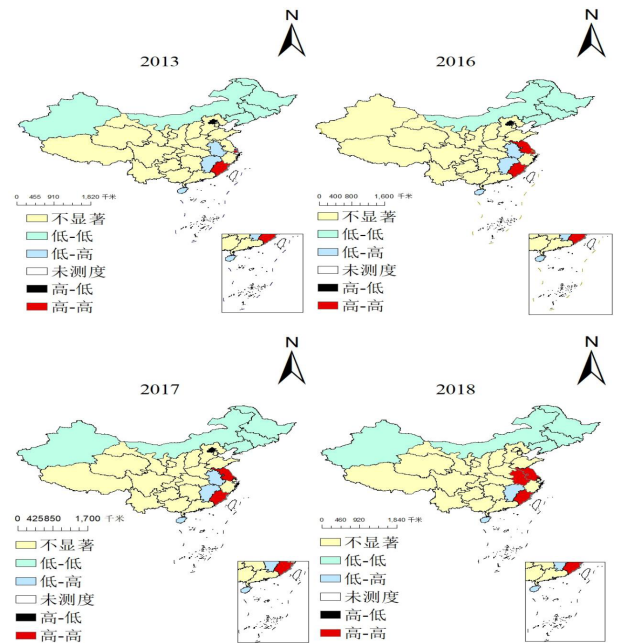
本文计算全局 Moran'I 指数探究各省市数字经济与产业链韧性的耦合协调度在空间上的整体相关性问题，结果如表4所示。

表4 耦合协调度全局 Moran's I 指数

年份	Moran's I	P 值	Z 值
2013	0.0984	0.129	1.1929
2014	0.1225	0.094	1.3883
2015	0.1323	0.085	1.1457
2016	0.1328	0.083	1.4667
2017	0.1313	0.080	1.4730
2018	0.1677	0.044	1.8190
2019	0.1856	0.030	1.9904
2020	0.1905	0.026	2.038
2021	0.1822	0.040	1.9223
2022	0.1931	0.033	2.0140

Moran's I 指数取值在 -1 到 1 之间，它为正数、负数时，分别存在正、负相关，且其值越接近于 0，越不存在空间相关性。2018 年—2022 年的莫兰指数的 p 值均小于 0.05，拒绝原假设，且莫兰指数分别为 0.1677、0.1856、0.1905、0.1822、0.1931，认为 2018 年—2022 年中国 31 省市数字经济与产业链韧性的耦合协调度在 0.05 的显著性水平下呈现出一定的空间正相关关系。

通过局部 Moran's I 指数生成 LISA 聚类地图，对局部空间的聚集性与相关性特征进行刻画分析。随着时间的发展，具有集聚特征的省市在 10 个 11 个左右波动，就具体省市地区而言：内蒙古、新疆、黑龙江地区、吉林、辽宁等地区 2013 年以来与周边地区形成低—低的集聚状态，说明这些地区及周边数字经济与产业链韧性耦合协调性较差，且随着时间变化这种情况并无太大变化。除了上述北方地区具有空间集聚特征外，东南地区也呈现出空间上的集聚特征。上海市 2013 年呈现出高一高集聚，到 2016 年仍为高一高集聚。而福建、江苏从 2016 年—2022 年均呈现出高一高集聚，这说明福建、江苏省数字经济与产业链韧性为高值且被高值包围，这说明福建江苏及其附近数字经济和产业链韧性的协同发展情况比较好。江西则一直为低—高型集聚，这说明尽管江西周围都被高值所包围，但江西的数字经济与产业链韧性协同发展程度依旧比较低，江西可以多参考周围地区协同发展的经验，借鉴周围城市的数字经济与产业链的发展，进一步提升协调水平。从变化上来看，安徽 2013 年—2017 年均为低—高型集聚，到 2018 年起转为高一高集聚，这体现了安徽周围省市对安徽数字经济与产业链韧性协调发展的带动作用。综合空间集聚性看出：我国数字经济与产业链韧性的耦合协调度在空间上存在着很大的不平衡，尤其是东南沿海与西北、东北地区之间的协调发展性差异较大。



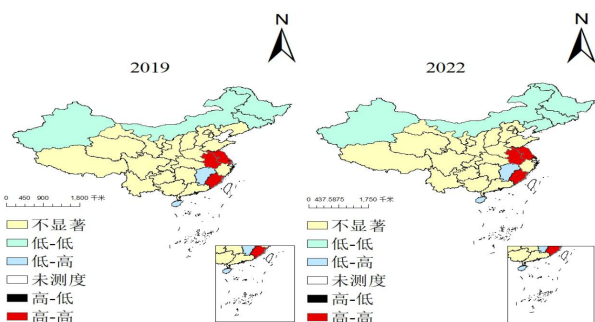


图2 耦合协调度 Lisa 集聚图

(三) 基于机器学习算法的耦合协调影响因素分析

1. 基于文本挖掘的影响因素设定

在影响因素的选择上，用文本挖掘对数字经济和产业链的相关政策报道进行爬取，通过词云图挖掘数字经济与产业链相关政策中的关注点，结合相关文献总结归纳出可能影响耦合协调系统的影响因素，在此基础上用机器学习算法对影响因素进行探究。通过 EasySpider 软件从中国政府网分别爬取到数字经济、产业链相关政策新闻 460 条、446 条，预处理（去除重复及与主题无关数据）后得到有效文本数据 435 条、433 条，运用微词云平台绘制词云图如图 3、4。

与数字经济政策密切相关的词汇可分为以下几个方面：经济发展、经济、GDP、经济总量等经济方面；创新、经济创新、科技、技术等创新方面；国际、世界、全球、经济合作、伙伴关系、开放、合作等合作方面；政务、部门、政策、地方等政府方面；产业、企业、企业、工业等产业方面。产业链相关政策涉及到的有：供应链、产业、产品、制造等产业方面；合作、全球、全球、外贸等合作方面；地方、政务、政策等政府方面；创新、升级、科技创新、技术等创新方面。



图 3 数字经济相关政策新闻词云图



图 4 产业链相关政策新闻词云图

数字经济与产业链韧性的耦合协调发展受多种因素影响，结合相关文献^[20]与上述词云图，将耦合协调度作为被解释变量，经济发展水平、技术创新水平、对外开放水平、政府能力、产业结构水平作为解释变量，运用机器学习算法探究各因素对数字经济

与产业链韧性协调发展的影响。

表 5 耦合协调度影响因素

变量名称	变量说明	符号	单位
经济发展水平	地方生产总值	Gdp	亿元
技术创新水平	规模以上工业企业专利申请数	Tec	件
对外开放水平	外商投资企业投资总额	Open	百万美元
政府能力	地方财政支出 / GDP	Gov	%
产业结构水平	第三产业增加值 / 第二产业增加值	Indu	—

2. 模型对比与选择

为探究耦合协调系统的影响因素，选取支持向量机算法、决策树模型、随机森林等几种算法，将数据以 7: 3 划分为训练集和测试集，采用 R 中的 caret 包实现多个机器学习算法，通过 R 方等指标比较几种算法的性能。模型 4（随机森林模型）的 MAE（0.0327）、RMSE（0.0437）最低，R 方（0.8781）最高，则说明随机森林模型对数据的拟合程度最高，故选取随机森林算法进行影响因素分析。

表 6 机器学习算法性能对比

算法 / 指标	MAE	RMSE	R 方
线性回归	0.0403	0.0513	0.8358
支持向量机	0.0407	0.0519	0.8502
决策树	0.053	0.0727	0.7171
随机森林	0.0327	0.0437	0.8781

3. 基于随机森林的影响因素分析

在随机森林模型训练中，本文对比 MSE 和 R 方对树的数量进行选择。当树的数量为 100 时 MSE 达到最小，R 方达到最小，故最终选取树数量为 100 进行训练。建立的模型均方误差为 0.002，模型可解释响应变量 86.02% 的总方差。通过 IncMSE 和 IncNodePurity 指标判断重要性，其数值越大，说明影响因子越重要。结果显示经济发展水平对耦合协调系统的影响作用最大，其次技术创新能力、产业结构水平、对外开放水平也有影响，政府能力的影响相对较小。

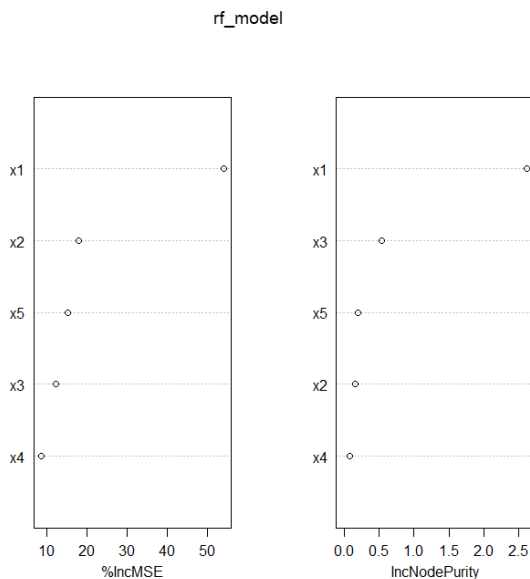


图 5 影响因素排序

三、结论与建议

（一）结论

本文通过对数字经济与产业链韧性的耦合协调进行分析，得到结论：第一，我国数字经济与产业链韧性耦合协调度主要集中于中度失调、轻度失调、濒临失调、勉强协调几个状态。耦合协调度最大值出现在广东省，耦合协调度的较低值集中于天津市、内蒙古自治区等省。东部地区的平均耦合协调度最优，其次是中部地区。各地区平均协调水平基本稳定于轻度失调状态，2013—2022年四大地区的平均耦合协调度呈现“增长——下降——回升”趋势。第二，耦合协调度在空间上存在着很大的不平衡，尤其是东南沿海与西北、东北地区之间的协调发展差异较大。第三，经济发展水平、产业结构水平与耦合协调水平呈现出非线性正相关关系。其中经济发展水平对耦合协调水平影响最大，政府能力的影响较小。

（二）建议

基于上述结论，本文提出建议：第一，根据不同地区耦合协调度，因地制宜、有针对性地采取措施。对于耦合协调度较好的广东省等省，可继续在之前策略的基础上不断提高与优化；对于耦合协调度较低的天津市等地区，可以在考虑地区主要产业、地区特色与优势的基础上，适当向耦合协调度高的城市学习。第二，可结合耦合协调度的空间关联作用和异质性，充分发挥核心省市对周边落后省市的产业和技术的溢出效应，进一步通过加强各区域之间技术、产业等方面的合作缩小区域差异。第三，充分发挥好经济发展、产业结构在耦合协调系统中的作用。可在发展数字经济和产业链韧性中注重经济水平的发展，进一步优化产业结构，结合当地产业及发展情况，推动数字经济与产业链韧性的协调发展。

参考文献

[1] Liu Y, Yang Y, Li H, et al. Digital Economy Development, Industrial Structure Upgrading and Green "Total Factor Productivity: Empirical Evidence from China's Cities[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(4): 2414.

[2] 李文龙, 梁帆, 魏曙光. 产业协同集聚、数字经济与产业链韧性提升研究——基于省级面板数据的实证检验[J]. 科学与管理, 1-17.

[3] 谷城, 张树山. 数字经济发展与产业链韧性提升[J]. 商业研究, 2023, (05): 1-11.

[4] 孙文远, 刘昊杰. 数字经济对工业产业链韧性的影响效应研究——兼论创新水平和市场分割的机制作用[J]. 金融经济, 2024(01): 86-97.

[5] 孙畅, 冯仁琼. 数字经济与产业耦合共生发展：以成渝地区双城经济圈为例[J]. 统计与决策, 2024, 40(03): 133-138.

[6] 黄敦平, 胡雨琦, 尹凯. 皖江城市带数字经济产业协同发展水平评价及障碍因子诊断[J]. 河北农业大学学报(社会科学版), 2024, 26(01): 29-41.

[7] 周德田, 冯超彩. 科技金融与经济高质量发展的耦合互动关系——基于耦合度与PVAR模型的实证分析[J]. 技术经济, 2020, 39(05): 107-115+141.

[8] 魏振香, 史相国. 生态可持续与经济高质量发展耦合关系分析——基于省际面板数据实证[J]. 华东经济管理, 2021, 35(04): 11-19.

[9] 高煜, 李佳余. 数字产业化和产业数字化的耦合协调度测度与分析[J]. 统计与决策, 2023, 39(18): 119-124.

[10] 杨梦洁. 中部地区数字产业化与产业数字化发展水平及耦合协调度评价分析[J]. 区域经济评论, 2023(02): 79-88.

[11] 魏长升, 周航宇. 数字经济与制造业产业链现代化耦合协调研究[J]. 工业技术经济, 2023, 42(04): 24-33.

[12] 程风雨. 推进数字经济与产业结构融合发展研究——以广州市为例[J]. 生产力研究, 2022(10): 36-40.

[13] 刘冰冰. 中国数字经济与工业绿色发展的耦合协调发展分析[J]. 经济论坛, 2024(04): 125-141.

[14] 李宜斌. 中国省域生态文明建设与绿色生产耦合协调发展的时空格局及影响因素[J]. 中国商论, 2023(20): 151-155.

[15] 杨志鹏. 黄河流域水-能源-粮食-经济系统耦合协调及其影响因素分析[D]. 西北农林科技大学, 2023.

[16] 胡德龙, 石满珍. 数字经济对企业全要素生产率的影响研究[J]. 当代财经, 2023, (12): 17-29.

[17] 李媛, 李妍. 黄河流域数字经济、生态保护与区域创新的耦合协调分析[J/OL]. 西北工业大学学报(社会科学版), 1-12.

[18] 陈悦, 周永新, 郑秀峰. 供应链金融生态赋能产业链韧性：内在机制与实证检验[J/OL]. 金融理论与实践, 2023, (11): 13-23.

[19] 于斌斌. 中国城市群产业集聚与效率差异的门槛效应研究[J]. 经济理论与经济管理, 2015, (03): 60-73.

[20] 张耀, 曹俊杰, 韩世东. 省域数字经济与新型城镇化耦合协调关系及影响因素[J]. 统计与决策, 2024, 40(06): 116-120.

数字化转型下企业财务风险管理体系优化研究

陈婕妍

广东外语外贸大学南国商学院, 广东 广州 510545

DOI:10.61369/ASDS.2025040004

摘要： 随着数字技术的飞速发展，企业纷纷迈入数字化转型的进程。财务管理作为企业经营管理的核心环节，其风险控制也面临前所未有的挑战与机遇。本文从数字化背景出发，探讨企业财务风险管理面临的新问题，并分析当前管理体系存在的不足，进而提出优化策略，旨在构建更加智能、全面、动态的财务风险管理体系，以提升企业在不确定环境下的抗风险能力和可持续发展水平。

关键词： 数字化转型；财务风险；风险管理体系；智能化；企业管理

Research on the Optimization of Enterprise Financial Risk Management System under Digital Transformation

Chen Jieyan

Nan Guo Business School, Guangdong University of Foreign Studies and Trade, Guangzhou, Guangdong 510545

Abstract： With the rapid development of digital technology, enterprises have entered the process of digital transformation one after another. Financial management, as the core link of enterprise operation and management, also faces unprecedented challenges and opportunities in risk control. Starting from the digital background, this paper explores the new problems faced by enterprise financial risk management, analyzes the deficiencies existing in the current management system, and then proposes optimization strategies, aiming to construct a more intelligent, comprehensive and dynamic financial risk management system to enhance the risk resistance ability and sustainable development level of enterprises in an uncertain environment.

Keywords： digital; transformation; financial risk; risk management system; intelligentization; enterprise management

引言

在全球经济不确定性增强与技术变革日新月异的背景下，企业的数字化转型进程不断加快。尤其是在财务管理领域，信息技术的应用不仅带来了效率的提升，也暴露了传统风险管理模式的滞后性和局限性。财务风险已不再仅限于账目失误和流动性问题，而是演化为多维度、动态化的系统性挑战。本文以数字化转型为切入点，探讨企业在新时代背景下财务风险管理体系的优化路径。

一、数字化转型对财务风险管理带来的变革

（一）数据驱动决策成为主流趋势

随着大数据、人工智能、物联网等技术的广泛应用，企业的决策过程正在经历从传统经验驱动到数据驱动的转变。在财务管理领域，数据的使用使得决策变得更加科学和精确^[1]。数字化转型使企业能够实时收集来自各个业务环节的数据，包括销售数据、客户行为数据、市场动态数据等。通过先进的分析工具和算法，企业可以对这些数据进行深度挖掘，发现潜在的财务风险并进行精准预测。与传统的财务决策依赖于定期的报表和审计不同，数

据驱动的决策能够实时反映市场和财务状况的变化。比如，企业可以通过实时数据分析预测现金流问题、识别潜在的坏账风险，甚至在风险爆发之前采取必要的对策。这种基于数据的决策方式，使得财务风险的识别和应对更加高效、及时^[2]。然而，这也对数据的质量、准确性和完整性提出了更高的要求，任何数据的偏差都可能导致决策错误，因此企业必须确保数据的有效性与一致性。总的来说，数据驱动决策正在成为企业财务风险管理的主流趋势，它能够提升财务决策的精确性和敏捷性，但同时 also 要求企业不断提高对数据的管理能力和技术应用水平^[3]。

作者简介：陈婕妍（2006-），女，汉族，本科，研究方向：财务管理。

（二）风险类型与风险来源更加复杂

数字化转型使得企业的财务风险不仅仅局限于传统的市场风险、信用风险和流动性风险，而是不断扩展至更多元化的领域。随着企业信息系统和数字平台的广泛应用，网络安全、数据隐私、技术故障等新型风险逐渐浮现。例如，企业在采用云计算和大数据分析时，可能面临信息泄露、数据篡改和系统崩溃等风险。与传统风险不同，这些技术性风险往往难以预测且具有较强的隐蔽性，且一旦发生，后果可能是巨大的^[4]。此外，随着全球化的进程加速，跨境交易和国际市场的波动也带来了新的风险。例如，汇率波动、国际市场的法规变动、政治不稳定等，都可能影响企业的财务状况。而数字化转型使得企业的运营更加依赖全球化的供应链和市场网络，这也使得外部环境对企业财务风险的影响更加复杂。为了应对这些复杂的风险，企业需要构建更加全面的风险识别和管理体系，不仅要评估传统的财务风险，还要考虑到由信息技术和全球化所带来的新型风险。企业还需加强对跨境数据流、国际合规性以及网络安全的管理，确保能够在复杂多变的外部环境中有效规避和应对风险^[5]。

（三）风险预警机制向智能化升级

数字化转型赋予了企业财务风险管理新的动能，尤其是在风险预警方面。传统的财务风险预警机制通常依赖于静态的财务报表和定期审计，这种方式虽然能发现一些潜在问题，但对迅速变化的市场和动态的企业经营环境反应较慢。随着人工智能、机器学习和大数据技术的发展，企业能够建立更加智能和动态的风险预警机制。通过数据挖掘和算法模型，智能化的风险预警系统能够实时监控企业的财务数据、外部经济环境及行业动态，自动识别潜在的财务风险。例如，利用机器学习模型，系统可以分析客户的支付行为、市场价格波动、财务报表中的异常数据等，并根据历史数据模式预测未来的风险趋势^[6]。对于现金流问题、信用风险、资金周转等领域，智能化的预警系统能够提前预警，帮助企业及时采取措施。与传统的预警机制相比，智能化系统不仅反应更为迅速，而且能够根据不同的风险类型和环境变化进行灵活调整，确保企业能在最短时间内应对可能发生的风险。此外，这种智能化的预警机制还能够通过不断的学习和优化，提升风险识别和应对能力，使企业财务风险管理的效能持续提升。智能化的风险预警系统使得财务管理更加精准、全面，也增强了企业对外部不确定因素的应变能力^[7]。

二、当前企业财务风险管理体系存在的问题

（一）风险识别机制不完善

尽管许多企业已开始建立基本的财务风险识别机制，但在数字化转型的背景下，传统的风险识别方法依然面临许多挑战。传统方法通常依赖人工审计和历史数据，缺乏对新兴风险的实时监控能力。在数字化环境中，企业不仅需要识别传统的市场风险、信用风险和流动性风险，还必须应对信息安全风险、系统崩溃风险和算法偏差等新型风险^[8]。这些新兴风险往往是难以预测的，且具有较强的隐蔽性。例如，财务数据可能因云平台或区块链系

统的安全漏洞而遭到篡改或泄露，导致企业面临严重的法律和合规风险。传统的风险识别方式在面对这些新兴风险时显得力不从心，往往只能识别出明显的财务失误或交易异常，而忽视了隐性的数据风险和技术故障^[9]。因此，企业需要加强风险识别机制的动态性和全面性。通过大数据分析、人工智能技术的应用，实时捕捉、处理来自不同渠道的数据，结合企业的业务运营特征，建立更加智能化和前瞻性的风险识别机制。

（二）风险评估方法缺乏动态性

目前，大多数企业的财务风险评估方法仍然停留在静态和周期性评估的阶段。传统的评估方法主要依靠定期的审计报告和固定的财务模型来衡量风险等级，然而这种方式往往难以应对快速变化的市场和技术环境。在数字化转型的时代，企业面临更加复杂的财务风险来源，例如外部经济环境的不确定性、技术创新带来的市场变化、以及全球化背景下的跨境交易风险等。因此，静态的评估方法无法及时反映这些快速变化的风险。传统评估方式通常基于历史数据和既定模型，在面对突发事件（如市场剧烈波动、突发政治事件或网络攻击）时，往往反应迟缓，无法做到及时调整和动态预警^[10]。为了提升风险评估的有效性，企业需要借助先进的技术手段，如机器学习、人工智能和大数据分析，构建动态的风险评估模型。这些模型可以实时获取和处理来自多个渠道的数据，如市场行情、行业动态、社交媒体情感分析等，结合数据挖掘和预测算法，精准识别财务风险并进行动态调整。此外，动态评估模型还可以通过模拟不同情景的风险情况，帮助企业提前进行风险预测和压力测试，从而为决策提供数据支持，降低企业在变动环境下的财务暴露风险。

（三）风险应对策略执行力度不足

尽管许多企业在理论上已经制定了详细的财务风险应对策略，但在实际操作中，执行力度往往不足，导致这些策略未能发挥应有的作用。风险应对策略的执行不力通常源自多个方面。首先，部门间的信息壁垒是一个主要原因。在大多数企业中，财务部门、IT部门以及其他业务部门之间缺乏足够的沟通与协作，导致当某一部门识别到风险时，信息未能及时传递至相关决策层或执行层，错失最佳应对时机。其次，责任划分不清也是一大问题。在一些企业中，财务风险的防范和应对往往由财务部门单独负责，而其他部门则较少参与，造成风险应对措施缺乏全局性和系统性。最后，资源配置不足也是导致执行力度不足的原因之一。企业在实施风险管理策略时，往往缺乏足够的预算和人员支持，导致应急响应能力受到限制。为了解决这一问题，企业应在建立跨部门协作机制的基础上，明确责任划分，确保各方能够协同工作。

三、数字化转型下财务风险管理体系优化路径

（一）建设以数据为核心的风险识别体系

数字化转型为财务风险管理提供了强有力的数据支持。为了更好地应对新型财务风险，企业应当把数据作为风险识别的核心，全面提升风险识别的精准度与时效性。首先，企业应当打破

部门间的数据壁垒，建立统一的数据平台，整合各部门及业务单元的实时数据。这些数据包括财务数据、市场数据、客户数据、供应链数据等，通过将各类数据源进行交叉比对与综合分析，可以更全面地识别潜在的财务风险。例如，通过分析供应链的信用风险，企业可以在早期发现可能影响资金流动的风险点，采取相应措施。此外，人工智能技术的引入也能够帮助企业通过模式识别与预测分析来识别风险。机器学习模型能够从历史数据中挖掘出复杂的规律，预测不同情况下的财务风险，并提供早期预警。这些数据分析技术能够提高企业对潜在风险的敏感度，确保企业能够在风险爆发前做出反应。此外，企业还应注重数据质量的管理，确保数据来源的可靠性与一致性，以防止由于数据错误导致风险识别失误。通过构建以数据为核心的风险识别体系，企业能够更快、更准地识别财务风险，并及时采取应对措施，从而有效降低财务风险的发生概率。

（二）构建动态化、智能化的风险评估模型

随着数字技术的不断发展，企业的风险评估方法需要从传统的静态模型向动态化、智能化转型。首先，企业应当引入实时数据流和大数据分析技术，利用市场、客户、竞争对手等多维数据，为财务风险评估提供全面支持。例如，结合实时的股市数据、商品价格波动、企业的现金流等信息，企业可以动态评估其财务健康状况。此外，智能化的风险评估模型可以通过机器学习等技术，对企业历史风险数据进行深度挖掘，识别潜在的风险模式，进而为未来的风险预测提供依据。动态化的评估模型能够随着环境变化自动调整，实时反映出企业当前的风险水平，避免了传统静态评估方法对外部变化反应迟缓的问题。为进一步提升评估模型的准确性，企业可以借助人工智能中的深度学习算法，进行复杂的情景分析与模拟预测，帮助企业预测不同经济环境下的风险影响。例如，通过模拟不同的市场波动、政策变化等情景，评估其对企业财务状况的影响，为企业决策提供科学依据。通过构建动态化、智能化的风险评估模型，企业不仅能够提高评估的

准确性和实时性，还能够增强对复杂风险情景的应对能力，从而更好地预防财务风险。

（三）优化风险响应机制与协同管理模式

在数字化转型过程中，企业必须优化其风险响应机制，特别是要建立更加高效、协同的应对模式。传统的风险响应机制通常依赖于单一部门的执行，而忽视了跨部门的协同作用，这在复杂的数字化环境中显得尤为不适用。企业应通过构建跨部门的风险响应团队，使财务、IT、安全、法律等多个部门能够协同工作，及时共享信息和资源，从而更迅速地应对突发的财务风险。例如，当企业面临数据泄露或系统故障时，IT 部门和财务部门应立即进行信息共享，并通过联合工作小组采取紧急处理措施。通过优化风险响应机制，企业可以在发现问题的第一时间采取行动，避免风险进一步扩大。与此同时，企业还应加大对员工的风险意识培训，确保所有员工都能在发生风险时迅速响应，采取正确的处理措施。此外，企业还应通过技术手段优化风险响应流程。例如，借助云计算和区块链技术，建立透明、高效的风险管理平台，实现信息的实时传递和处理，确保在风险发生时能够快速启动应急响应程序。通过强化协同管理模式和风险响应机制，企业能够更有效地应对各种突发风险，提高财务风险管理的应变能力。

四、结论

数字化转型为企业财务风险管理带来了前所未有的机遇与挑战。在这一背景下，传统的财务风险管理体系亟待革新，唯有以数据为核心、以智能技术为驱动、以协同为基础构建全新的风险管理架构，企业才能有效识别、评估和应对不断变化的风险。未来，企业还需持续深化数字化能力，强化制度建设与人才支撑，推动财务风险管理从“防守”走向“主动预警”，在复杂多变的经济环境中实现稳健发展。

参考文献

- [1] 张晶. 国有企业财务数字化转型对企业财务风险的影响效应实证研究 [J]. 全国流通经济, 2025, (06): 61-64.
- [2] 冯天楚. 数字化转型背景下企业财务风险管理创新研究 [J]. 中国农业会计, 2025, 35(06): 63-65.
- [3] 刘伟. 基于大数据的企业财务数字化转型与构建财务风险预警机制策略研究 [J]. 天津经济, 2025, (03): 36-38.
- [4] 赵宇. 数字化转型背景下企业财务风险管控新挑战与应对策略 [J]. 商业观察, 2025, 11(03): 52-55.
- [5] 孙蕾. 数字化转型对企业财务管理效率与风险管理的影响研究 [J]. 中小企业管理与科技, 2025, (02): 126-128.
- [6] 唐淑. 数字化转型背景下企业财务风险管理体系建设 [J]. 老字号品牌营销, 2025, (02): 133-135.
- [7] 周蓉. 数字化转型、全要素生产率与企业财务风险 [J]. 经济界, 2025, (01): 41-49.
- [8] 杨莎丽. 数字化转型背景下商贸企业财务风险防控体系优化研究 [J]. 老字号品牌营销, 2024, (24): 177-179.
- [9] 袁彩萍. 数字化转型背景下医疗器械企业财务风险预警研究 [J]. 老字号品牌营销, 2024, (23): 164-166.
- [10] 罗兰. 数字化转型下企业财务风险管理的新挑战与应对策略 [J]. 中小企业管理与科技, 2024, (23): 161-163.
- [11] 汤军蓉. 内部控制视角下数字化转型企业财务风险管理研究 [J]. 市场瞭望, 2024, (23): 154-156.

商业银行金融科技应用对风险承担的影响路径探究

方祺瑞

广东外语外贸大学南国商学院, 广东 广州 510545

DOI:10.61369/ASDS.2025040005

摘要： 随着金融科技的快速发展，商业银行面临着新的风险承担挑战。提高服务效率与创新能力，可以从金融科技运用对商业银行风险承受能力的影响入手，通过大数据、人工智能、区块链和云计算等技术对商业银行风险进行识别、评估和管理，重点探讨金融科技运用对商业银行的信用风险、市场风险、操作风险和流动性风险的影响。研究表明，随着金融科技的应用，银行风险管理流程得到了优化，也引入了新的风险，银行需要进一步完善风险防控机制，提高应对技术变革的能力，使风险管理和技术创新协调发展。

关键词： 金融科技；风险管理；商业银行；风险承担；技术应用

An Exploration of the Impact Path of Fintech Application in Commercial Banks on Risk-Taking

Fang Qirui

Nan Guo Business School, Guangdong University of Foreign Studies and Trade, Guangzhou, Guangdong 510545

Abstract： With the rapid development of financial technology, commercial banks are facing new challenges in risk tolerance, service efficiency and innovation capabilities. Starting from the impact of the application of financial technology on the risk tolerance of commercial banks, this paper uses big data, artificial intelligence, blockchain and cloud computing technologies to identify, assess and manage the risks of commercial banks, and focuses on discussing the impact of the application of financial technology on the credit risk, market risk, operational risk and liquidity risk of commercial banks. The research shows that with the application of financial technology, the risk management process of banks has been optimized, but new risks have also been introduced. Banks need to further improve their risk prevention and control mechanisms, enhance their ability to respond to technological changes, and promote the coordinated development of risk management and technological innovation.

Keywords： financial technology; risk management; commercial banks; risk-taking; technology application

引言

随着金融科技的快速发展，商业银行在数字化转型的同时，也加大了对新兴技术的运用。传统的风险管理模式在面对复杂多变的金融环境时，已逐渐显现出其局限性。银行业务流程的优化和服务效率对银行风险承担机制的影响也越来越大。银行的经营模式发生了巨大的变化，并加大了对市场风险、信贷风险和经营风险的管理难度。随着大数据、人工智能、区块链等技术的发展，银行在获取更准确的客户信息与风险信息的同时，还面临着数据隐私保护和系统安全性等新问题。深入探讨金融科技对商业银行风险承受及传导路径的影响，对完善我国商业银行风险管理体系，提高其应对复杂风险的能力具有重要的理论和现实意义。

一、金融科技的核心技术与应用领域

（一）大数据与人工智能（AI）

大数据和人工智能作为金融科技的两大核心技术，正日益深刻地影响着商业银行的风险管理。大数据技术使得银行可以对海

量的客户信息进行处理和分析，在信用评价、欺诈检测、客户需求预测等领域提供更准确的分析支撑。经过大数据分析，银行可以识别出潜在的风险，并及时调整信贷策略，降低不良资产。随着大数据的不断涌现，人工智能具有自主学习与优化决策算法的能力，提高了风险预警的精度和效率^[1]。人工智能还可以实现客户

基金项目：“2025年广东外语外贸大学南国商学院大学生创新创业训练计划”资助项目，序号 2025XJ50，项目名称“新质生产力发展背景下企业投资决策优化创新研究”。

作者简介：方祺瑞（2004—），男，汉族，本科，研究方向：金融学。

服务的智能化以及风险管理的自动化，帮助银行更快的对市场的变化做出反应。人工智能技术在提升商业效率的同时，也带来了算法偏差、数据安全性、隐私泄露等问题，这对银行在应用过程中的风险防控和合规管理提出了更高要求。

（二）区块链技术

区块链是一种新兴的金融技术，它将深刻地影响着商业银行的风险管理。拥有去中心化、透明性、不可篡改性等特性，在提高交易安全性和降低信用风险上有着明显的优势。在商业领域，区块链技术能够利用智能合约实现合同条款的自动履行，减少人为操作失误和欺诈行为^[2]。其分布式记账体系保证了交易的真实、完整，减少了中介机构的参与，降低了交易费用和风险。在跨境支付、证券交易、资产管理等方面，采用区块链技术可以有效提升企业资金流转的安全和透明性，有效规避因信息不对称带来的风险。但是该技术还面临着技术成熟度、法律法规以及产业标准化等方面的问题，阻碍了其在商业银行中的广泛应用。

（三）云计算与数字化平台

随着云计算和数字化技术的发展，商业银行面临着新的风险管理模式创新机遇，云计算允许银行通过向云服务提供外包计算和存储，以达到灵活可伸缩、降低成本的目的。通过云计算，银行业可以提升其运营柔性，实现全球范围的实时数据处理与风险监测，提升应对突发事件的能力。云计算技术为银行业提供了一个更加有效的数据共享和协同平台，特别在跨部门协同开展风险管理方面发挥着重要的作用。数字化平台为银行提供了更多的服务，使银行能够在这个平台上提供更多的金融产品和服务，突破了传统的业务界限，提高了客户的理财和风险管理水平^[3]。数据泄漏和网络攻击已对银行业提出了严峻的挑战，在使用云计算及数字平台的过程中，银行必须加强对信息的安全性和合规性的保证，以保证技术的使用不会产生新的风险。

二、金融科技在商业银行风险管理中的作用路径

（一）风险识别与评估的改进

随着大数据、人工智能等技术的发展，银行可以更加准确、实时地识别出潜在的风险。大数据可以从多个维度收集数据，将顾客的交易、行为、市场动态等信息融合在一起，为企业的风险辨识提供全方位的视角。相对于传统的手工审计，人工智能对数据的审计方法更加敏感和可预测。随着人工智能技术的发展，银行业可以借助机器学习、深度学习等方法，实现对海量数据的自动处理和分析，进而实现风险的快速识别和评估^[4]。人工智能能够自动识别出可能存在的危险类型，并对其进行早期预警，从而避免由于人为干扰而导致的重大风险信息缺失。在信用风险评估、市场波动预测等方面，利用金融科技可以快速、准确地识别风险，为其制定策略提供更精准的基础。

（二）风险防控机制的创新

随着金融科技的发展和应用，商业银行的风险防控机制也在不断地革新，结合大数据与人工智能技术，建立了一套智能化的风险管理体系。该系统利用算法模型，可以对客户行为、市场动态和外部环境进行自动分析，以便对潜在的风险进行预判和处理。智能化的风控体系，不但可以精确地评价客户的信用状况、还款能力，而且可以对交易中的异常行为进行及时的介入，防止

人为的过失或系统错误导致的风险暴露。区块链技术具有不可篡改和去中心化等特点，可以有效地防范数据篡改、身份欺诈等风险，保证交易的透明和安全。云计算技术的引入，也将极大地提高银行对风险的快速响应与资源配置能力。在云计算的帮助下，银行可以根据市场环境的变化，进行跨地域、跨平台的风险监测和紧急处置^[5]。

（三）风险分担与转移路径

随着我国商业银行的风险分担和转移得到了长久的发展，区块链是一种基于自动执行的智能合约，可以有效地减少买卖双方的信贷风险，实现风险的分散。在市场风险和信用风险管理方面，商业银行运用金融衍生品、风险对冲手段，借助金融科技平台，实时分析市场，调节风险暴露，实现全球性风险对冲^[6]。采用互联网技术，帮助银行更准确地对风险进行评估，并进行个性化的产品设计，以达到最优的风险分散策略。在流动性风险方面，云计算、大数据等技术的运用，提高了银行资金调度和管理的准确性，提高了流动性管理的柔性与高效性，保证了银行在面对突发风险时，可以快速有效地调配资本，实现业务的平稳运行。金融技术的运用，在提高银行风险辨识与防控能力的同时，也为复杂金融环境下的风险分担与转移提供了技术支撑，进而推动整个风险管理系统的完善。

三、金融科技对商业银行风险承担的具体影响分析

（一）信用风险

随着商业银行信贷风险管理的重要性日益凸显，大数据分析和人工智能的结合，使银行可以更加全面地了解客户的资信状况，并对其进行评价。通过综合利用历史交易数据、社会行为和支付习惯等多种数据，可以对借款人进行深入分析。通过对信贷风险的精确辨识，可以使银行在信贷投放时做出更为科学的决策。另外金融科技也会带来一定的风险，过分依赖于算法模型，容易忽视用户所处的社交环境、突发的金融危机等不可量化的问题。大数据与人工智能在提高信贷风险识别效率的同时，存在着数据安全性和隐私泄漏等问题。若在数据处理中存在缺陷或被人利用，则会造成信贷评价的失真，从而增加银行的信贷风险。

（二）市场风险

市场风险是指一家银行因市场价格变动而遭受的金融损失，随着经济的快速发展，我国银行业面临着越来越严峻的挑战。借助大数据与机器学习模型，银行可以准确地监控和预测金融市场的动态变化，及时掌握股价的变动趋势。这种信息化和智能化的市场分析方法，极大地提高了商业银行的风险预警能力。随着金融科技的发展，市场风险呈现动态化、复杂化特征。若过度依赖对金融产品风险的定量分析或进行不合理的风险组合管理，将对商业银行应对市场波动的能力构成严峻考验^[7]。当市场极度波动或突发性金融危机发生时，技术模型的失效风险会大大增加，造成银行对市场波动的响应延迟甚至决策失误，进而加大了市场风险。

（三）操作风险

操作风险是指由于人为失误、系统失效或缺乏内控等原因引起的损失，随着金融科技的发展，商业银行的业务风险管理面临着新的挑战。随着商业银行业务的不断发展，特别是智能交易平台、云服务等，在提高业务效率、降低成本的同时，存在着技术

失效、系统脆弱性等问题。系统故障会在短期内给银行业务带来巨大冲击，严重时甚至会引发金融不稳定问题。智能风险管理体系在对部分业务风险进行有效识别与控制时，也存在着一些新的风险点。由于自动算法本身存在的不足，会造成银行在风险控制方面的失误，将进一步加大操作风险^[8]。在人才管理中，若过度依赖科技手段，可能导致员工基础能力退化，或削弱其应对突发事件的快速响应能力，也会增加银行对科技公司、第三方服务商的依赖性，进而引发外部运营风险。

（四）流动性风险

流动性风险指的是当银行面临着突然增加的资本需求而不能以合理的成本筹集到足够资金时的一种风险。金融科技对于流动性风险的作用则更为复杂，采用金融科技提高了银行对现金流的实时监测能力，从大数据分析，商业银行可以对企业的资产负债情况以及客户资本的进出情况进行全面的了解，进而对资本的需求进行准确的预测，并对其进行防范。该系统还实现了资金的有效调配和最优配置。技术手段的运用也会加大流动性风险的产生，在数字经济时代，企业对信息的响应能力、资本的流动性等都有了更高的要求，如果银行不能对市场预期的变化或者资本的缺乏做出相应的反应，就有可能出现流动性危机。网络金融的出现，使得客户对资金的流动性有了更高的要求，这就要求银行在资源配置上做更多的准备。若银行不能及时发现资本需求的变动，或对它进行有效的配置，便会造成资本不足，从而影响经营的稳定。

四、金融科技带来的风险管理挑战与应对策略

（一）技术依赖与系统安全性

随着金融科技的普及，银行业对信息化的依赖程度越来越高。在科技能够提高操作效率、优化客户服务的同时，也对系统的安全提出了质疑。随着信息技术的不断发展和应用，银行面临着网络攻击、数据泄露、系统失效等多种风险。随着网络攻击方式的日益多样化，银行防御系统也随之发生了变化。越来越多的数据被采集、存储和处理，如何保证数据的安全和隐私就变得越来越重要。如果出现数据泄露、系统崩溃等情况，银行将面临的不仅仅是经济上的损失，还有信用上的风险。这就要求银行要加强 IT 系统的安全保护，实行多层次、多维度的安全保障，保证数据的安全传输和存储。经过定期的系统漏洞检查与安全演习，提高应急处理能力。构建完备的数据备份机制，保证系统在发生紧急事件时可以迅速恢复正常运行，降低服务中断给银行经营带来的冲击^[9]。

（二）合规与监管挑战

在金融科技快速发展的背景下，金融业的合规和监管问题变得越来越复杂，随着金融科技的发展，银行业也面临着新的监管需求和规范。在跨境交易、数据存储、隐私保护等方面，传统的监管制度已经很难满足新的需求。随着金融技术的发展，出现了一些新的商业模式和服务，由于缺乏清晰的法律认知和规范，极易产生合规风险。由于监管部门在金融技术方面的监管存在一定的滞后性，使得一些创新性的产品或服务没有被及时地纳入到监管体系中，这导致银行在规则遵守方面的复杂度增加。为了解决这一问题，我国银行业应该加强和监管机构的交流协作，促进金融科技的发展，保证每一笔交易都能符合本地和跨国的相关法律和规定，在数据保护、金融透明度，以及反洗钱方面，应加大对企

业内部人员的合规培训力度，提高企业内部的合规意识，提高企业的合规水平。

（三）伦理风险与社会责任

随着金融科技的发展，企业的经营过程不断优化，服务水平不断提高，对此引发的道德风险和社会责任问题也日益突出。随着人工智能、大数据、区块链等技术的普及，商业银行在采集、分析和利用客户数据时，会遇到诸如隐私泄露、数据滥用等伦理问题^[10]。在信贷审批和投资决策过程中，采用智能决策系统会产生算法偏向性，从而影响弱势群体的平等机会，引发道德风险，损害银行声誉，甚至招致法律诉讼或监管介入。面对新的挑战，银行业需要在保证科技应用的公平、透明、合规等方面承担更多的社会责任，提出一套完善的数据管理体系，制定相应的道德标准，以保障消费者的隐私安全，并严格遵循相关的法律法规，防止对某些特殊人群造成不公平的冲击。该研究还将确保人工智能算法的透明性，对算法决策进行回溯，以防范技术误用和偏见；同时定期检查其社会应用，确保运作符合社会责任，维护公共利益与行业信誉。

五、结语

随着金融科技在商业银行风险管理中的应用，可以提高风险辨识与防控的效能，改变其风险承受方式。金融科技在促进风险评估过程中发挥着重要作用，同时也面临着新的技术风险和监管问题。在未来，随着人工智能、区块链、大数据等科技的不断发展，商业银行应该进一步强化科技和风险管理的结合，推进风险管控的智能化和自动化，要充分考虑到金融科技可能引发的合规和道德风险，保证科技创新和金融产业健康发展齐头并进。随着金融科技的不断发展，银行业在应对风险方面的效率越来越高，这对整个金融市场的稳定提出了新要求。

参考文献

- [1] 郭宜淳, 贾骁骁, 马淑霞. 金融科技发展对商业银行风险承担的影响 [J]. 科技和产业, 2024, 24 (24): 94-102.
- [2] 韩喜昆, 何补江, 介鹏坤. 商业银行金融科技不平衡发展、资产规模异质性与个体风险承担 [J]. 华北金融, 2024, (09): 42-54.
- [3] 张晨笛, 张世花. 金融科技对大中商业银行风险承担的影响研究 [J]. 金融客, 2024, (07): 15-17.
- [4] 郑群峰. 金融科技对商业银行风险承担的影响 [J]. 金融科技时代, 2024, 32 (06): 13-20.
- [5] 王进. 金融科技发展对商业银行风险承担的影响研究 [J]. 现代商业, 2024, (07): 167-171.
- [6] 郑群峰. 金融科技对商业银行风险承担的影响研究: 研究综述与展望 [J]. 金融科技时代, 2024, 32 (03): 57-64.
- [7] 江世银, 李洁, 刘莹. 金融科技对商业银行风险承担的影响研究 [J]. 河北金融, 2024, (02): 15-20.
- [8] 祁林海. 探析金融科技应用对我国商业银行风险承担的影响 [J]. 金融文坛, 2023, (11): 94-96.
- [9] 刘刚领, 王超. 内外部金融科技发展对商业银行风险承担的影响 [J]. 中国集体经济, 2023, (27): 106-109.
- [10] 张雨, 吴倩. 金融科技可以降低商业银行承担的违约风险吗? [J]. 金融教育研究, 2023, 36 (05): 11-19.

中国创新创业大赛获奖项目动态演进、区域差异与经验启示——以苏浙沪粤为例

龚广祥¹, 梁一心², 林佳昕^{3*}, 林叶⁴

1. 广州大学创新创业学院, 广东 广州 510000

2. 广州大学管理学院, 广东 广州 510000

3. 广州华立学院新闻与智能传播学院, 广东 广州 510000

4. 淮阴工学院商学院, 江苏 淮安 223001

DOI:10.61369/ASDS.2025040006

摘 要： 中国创新创业大赛作为推动科技成果转化与产业升级的重要平台，其获奖项目的动态演进与区域差异反映了我国创新生态的演变趋势。本文以江苏、浙江、上海、广东四地为例，分析中国创新创业大赛获奖项目在技术领域、融资能力、产业化进程等方面动态特征，揭示区域创新资源的配置差异与政策驱动效应，并提出优化区域创新生态的启示。研究表明，苏浙沪粤获奖项目呈现“技术迭代加速、资本赋能强化、产业融合深化、区域协同融合化、政策工具精准化”的演进规律，区域分化显著，江苏以高端制造为核心，浙江聚焦消费科技，上海深耕生物医药，广东领跑电子信息。差异根源在于资源禀赋与政策工具的适配性——江苏依托高校与国企研发资源，浙江发挥民企市场灵敏度，上海借力国际化要素枢纽，广东强化政策响应速度。四地通过不同的政策工具和创新资源互动机制，推动了获奖项目的快速发展和区域创新生态的优化。其经验启示在于，优化全国创新生态需要政策精准滴灌、强化赛后服务链条、推动区域差异化发展，以激发全国创新潜能，促进科技成果转化与产业升级。

关 键 词： 创新创业大赛；动态演进；区域差异；经验启示

Dynamic evolution, Regional Differences and Experience Enlightenment of Award-Winning Projects in China Innovation and Entrepreneurship Competition — A Case Study of Jiangsu, Zhejiang, Shanghai and Guangdong

Gong Guangxiang¹, Liang Yixin², Lin Jiaxin^{3*}, Lin Ye⁴

1. Guangzhou University College of Innovation and Entrepreneurship, Guangzhou, Guangdong 510000

2. Guangzhou University School of Management, Guangzhou, Guangdong 510000

3. Guangzhou Huali University School of Journalism and Intelligent Communication, Guangzhou, Guangdong 510000

4. Huaiyin Institute of Technology Business School, Huai'an, Jiangsu 223001

Abstract： As an important platform for promoting the transformation of scientific and technological achievements and industrial upgrading, the dynamic evolution and regional differences of the award-winning projects in the China Innovation and Entrepreneurship Competition reflect the trend of the evolution of China's innovation ecology. This article takes Jiangsu, Zhejiang, Shanghai, and Guangdong as examples to analyze the dynamic characteristics of the award-winning projects of the China Innovation and Entrepreneurship Competition in terms of technology, financing capacity, and industrialization process. It reveals the differences in the allocation of regional innovation resources and policy driven effects, and proposes inspirations for optimizing the regional innovation ecology. Research has shown that the award-winning projects in Jiangsu, Zhejiang, Shanghai, and Guangdong exhibit an evolutionary pattern of "accelerated technological iteration, strengthened capital empowerment, deepening industrial integration, regional collaborative integration, and precise policy tools". Regional differentiation is significant, with Jiangsu focusing on high-end manufacturing, Zhejiang focusing on consumer

基金项目：

广东省软科学基金《广东省创新创业大赛优秀团队成长规律、培育机制与激励政策优化研究》（2024A010010017）；

国家社科基金，《多利益主体视角下土地要素市场化改革风险形成机理及预警防控研究》（24CJY096）。

作者简介：

龚广祥（1991—），男，博士，专业创新为创新创业。

梁一心（2000—），女，学士，专业方向为创新旅游管理；

林叶（2004—），女，学士，专业方向为经济与金融；

通讯作者：林佳昕（1996—），女，硕士，专业方向为新媒体传播。

technology, Shanghai deeply cultivating biomedicine, and Guangdong leading electronic information. The root of the difference lies in the adaptability of resource endowment and policy tools – Jiangsu relies on research and development resources from universities and state-owned enterprises, Zhejiang leverages the sensitivity of the private enterprise market, Shanghai leverages international factor hubs, and Guangdong strengthens policy response speed. The four regions have promoted the rapid development of award-winning projects and the optimization of regional innovation ecology through different policy tools and innovative resource interaction mechanisms. The lesson learned from this experience is that optimizing the national innovation ecosystem requires precise policy drip irrigation, strengthening post competition service chains, and promoting regional differentiated development to stimulate the country's innovation potential and promote the transformation of scientific and technological achievements and industrial upgrading.

Keywords : innovation and entrepreneurship competition; dynamic evolution; regional differences; experience insights

引言

中国创新创业大赛自2012年启动以来，已成为观察我国区域创新能力的重要窗口。截至2025年，大赛累计吸引超30万个项目参赛，其中苏浙沪粤四地获奖项目占比超过40%，形成了以长三角和珠三角为核心的创新集群。获奖项目不仅代表技术前沿，更折射出区域创新生态的竞争力。本文聚焦以下问题：获奖项目在技术领域、商业模式、融资能力上呈现何种动态演进趋势？苏浙沪粤四地获奖项目的区域差异如何形成？其政策工具与创新资源如何互动？四地经验对优化全国创新生态有何启示？

一、文献综述

创新创业大赛内涵研究。创新创业大赛是基于技术创新、产品创新、服务创新、商业模式创新等方面的一点或者多点进行的系统化的创新创业活动^[1]。创新创业大赛作为一个开放性的、显性化的知识创新载体，为中小企业、科技人员创新与实践能力的提升提供了良好的平台^[2]。创新创业大赛的内涵就是政府部门通过创建创新创业大赛这一服务平台，让更多拥有不同创业理论、知识、技术背景以及共同愿景的创业团队、创业投资资金机构等参与其中，通过政府部门的政策推进，充分发挥这一平台的融资推进机制、人才推进机制、服务推进机制，在创新创业者、投资人、政府三者之间的良性互动下，促进企业主体不断的开展创新创业活动。功能效应研究。创新创业大赛主要通过动力推进机制、融资推进机制、人才推进机制和服务推进机制促进创新创业企业发展^[3]。大赛不仅可以为创新创业企业发展提供多元化协同平台，而且为创新创业企业发展提供动力机制^[4]。影响因素研究。对企业创新活动影响最为深远的外部因素包括企业所处的宏观环境因素^[5]、市场因素^[6]和政府^[7]的政策因素等，而内部因素则包括企业本身所具有的社会资本多少^[8]、企业是否存在外部联盟和兼并^[9]以及企业领导力^[10]、管理能力^[11]的大小等。培育机制研究。分别是需求侧因素、供给侧因素和环境侧因素^[12-14]。

从现有文献看出，学者们围绕创新创业大赛主题进行了丰富、扎实且富有意义的研究，为本课题研究奠定了坚实的理论基

础，提供了科学的研究指引。但纵观已有文献，现有研究尚存在以下不足：其一，动态演进方面，缺乏对创新创业大赛技术领域迭代、商业模式创新、融资能力跃升等维度长期跟踪与系统性梳理，未能深入揭示其随时间推移的演化规律与阶段性特征；其二，区域差异方面，较少关注不同区域间创新创业大赛的差异，缺乏对区域资源禀赋、政策环境、产业基础等因素如何塑造团队发展路径的对比分析，也未充分探讨区域协同发展机制；其三，经验启示方面，现有研究对创新创业大赛实践经验总结不够，未能深入挖掘成功案例背后的共性规律与个性特色，也未提出具有普适性与针对性的政策建议与实践指导。

二、数据来源与研究方法

本研究数据主要来源于官方统计数据，包括中国创新创业大赛组委会发布的历年赛事报告、科技部火炬中心的技术合同登记数据，确保数据权威性。本研究采用混合研究方法，确保结论的科学性与实践性。文献分析法通过系统梳理国内外创新创业政策、区域创新理论及大赛相关文献，构建“政策工具—创新生态—区域协同”分析框架，为研究提供理论支撑。案例分析法选取苏浙沪粤四地具有代表性的获奖项目，通过深度剖析其技术路径、融资模式及区域联动机制，提炼共性规律与差异化特征。定量分析法基于大赛组委会公开数据进行描述性统计，揭示获奖项目数量、融资规模、技术领域等指标的区域分布规律与动态演进

趋势。对比分析法通过建立四地创新政策、产业基础、人才结构等维度的对比矩阵，结合熵值法计算区域创新能力综合得分，明确苏浙沪粤在创新创业生态构建中的优势短板与经验差异。

三、苏浙沪粤中国创新创业大赛获奖项目基本情况解析

从参加全国赛企业数量上看（见下图1），尽管广东总量领跑，但能够进入全国赛的企业数量有所减少，从2022年的207家减少到2024年的156家，年均降幅12.32%。

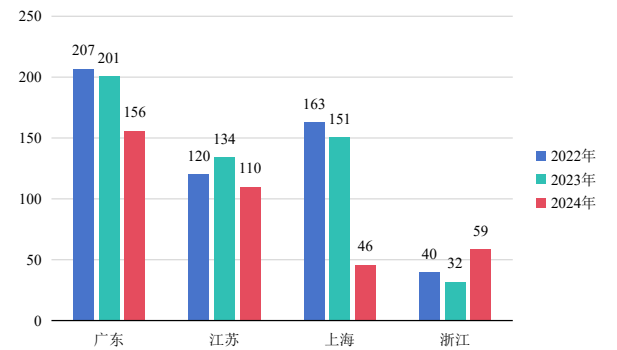


图1 近三年参加全国赛企业数量图

江苏进入国赛队伍波动幅度较小，基本在110家—135家之间，2023年比2022年增加14家企业进入国赛，2024年又比2023年少24项，但是总体来说相对比较平稳。上海需破局“国际化成本”瓶颈。上海2024年进入国赛参赛数由2022年的163家下降到2024年的46家，下滑了71.78%，或受跨境研发成本上升影响（如生物医药外籍人才流动限制），需强化人才绿卡配套与跨境数据便利化。浙江民企活力强劲。浙江2024年参赛数（59家）同比增84.38%（2023年32家），凸显民企生态网络+税收抵扣政策对消费科技企业的孵化效能（如阿里系生态赋能场景迭代）。

从近三年全国获奖企业总数量分布图（见下图2）可以看出，广东在近三年中获奖企业数量始终处于领先地位，但呈现逐年递减的趋势，从2022年的150家下降至2024年的109家。江苏获奖企业数量先增后减，2023年达到峰值101家后，2024年回落至76家。上海获奖企业数量在2022年和2023年相对稳定，分别为67家和68家，但2024年出现较大幅度下降至28家。浙江获奖企业数量最为稳定，近三年每年均为26家。整体来看，区域间获奖企业数量差异显著，广东优势明显，江苏次之，上海和浙江相对较少。

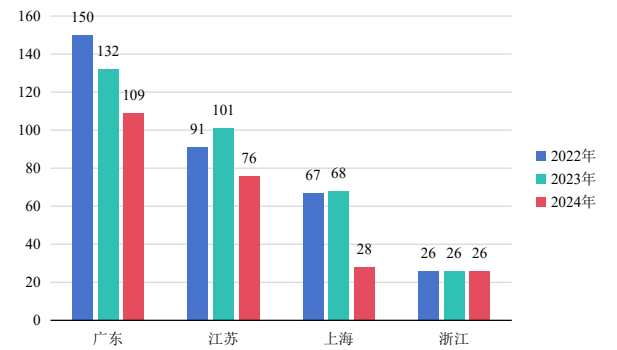


图2 近三年全国获奖企业总数量分布图

从中国创新创业大赛近三年获全国赛优秀企业数量分布图（见下图3）可以看出，广东在近三年中获奖企业数量始终处于领先地位，但呈现逐年递减的趋势，从2022年的145家下降至2024年的94家。江苏获奖企业数量先增后减，2023年达到峰值97家后，2024年回落至70家。上海获奖企业数量在2022年和2023年相对稳定，分别为63家和65家，但2024年出现较大幅度下降至26家。浙江获奖企业数量最为稳定，近三年每年在22家左右。整体来看，区域间获奖企业数量差异显著，广东优势明显，江苏次之，上海和浙江相对较少。

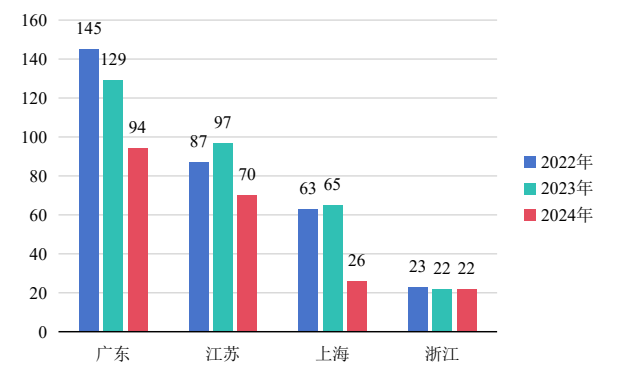


图3 近三年获全国赛优秀企业数量

从2024年全国各地区“一二三等奖”获奖企业数分布图（见下图4）可以看出，各地区在不同奖项上的获奖企业数量存在显著差异。其中，广东地区表现尤为突出，不仅在一等奖上斩获4个，二等奖也有2个，三等奖更是高达9个，全面领先于其他地区。江苏和浙江同样表现不俗，江苏在一等奖和二等奖上各有2个获奖企业，三等奖也有2个；浙江则在一、二、三等奖上各获2个，分布相对均衡。其他地区如四川、湖北、安徽、北京等地，各奖项获奖企业数量大多为1个，部分地区甚至在某些奖项上没有获奖企业。整体来看，2024年的获奖企业分布呈现出明显的区域差异，广东、江苏、浙江等沿海地区在创新创业方面表现出较强的实力。

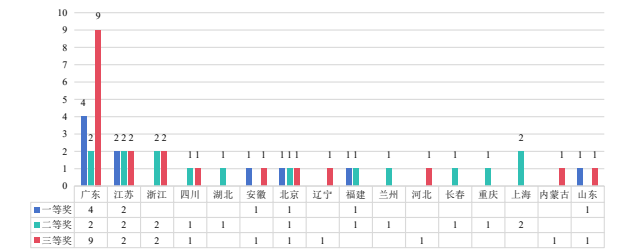


图4 2024年全国各地区“一二三等奖”获奖企业数

四、获奖项目动态演进特征

技术领域：从平台经济向硬科技与交叉融合跃迁。早期（2012–2016年）以消费互联网为主导，轻资产平台项目占比超60%，聚焦O2O服务与电商模式创新；中期（2017–2021年）硬科技崛起，生物医药、高端装备、新材料占比反超至58%，苏粤成为核心承载区；近期（2022–2025年）AI/新能源等交叉技术爆

发，如流程挖掘、合成生物学、复合集流体电池等领域年均增速300%，技术迭代呈现“消费互联网→硬科技→交叉融合”的阶梯式跃迁。

融资体系：从政府补贴到“三级资本闭环”。早期（2012–2015年）超70%项目依赖政府直接资助；2016–2020年风险资本深度介入，创投机构通过大赛挖掘项目；2021年后形成“赛事评审–政策性基金–产业链跟投”三级体系，例如珠海赛区撬动4亿元政府基金，广东政策资本化率达70%，资本支持从单向输血转向多元闭环。

产业融合：从技术展示到“需求牵引–场景验证”闭环。需求端通过龙头企业“揭榜挂帅”（如海尔、延长石油发布需求），驱动科研定向攻关；场景端依托大赛中试验证技术可行性，如滴翠智能农业AI平台降本80%；产业化加速显著，合成生物学、储能等项目赛后3年内实现量产（如百开盛生物示范工厂年产值4亿元），形成“实验室–生产线”无缝衔接。

区域协同：从单点突破到网络化生态。产业链分工深化（粤港澳大赛中深圳聚焦芯片设计、珠海发展低空医疗救援）；技术共享机制成熟化（长三角G60科创走廊共建专利池，43项技术交叉许可率提升50%）；中西部通过“飞地孵化”承接沿海技术溢出（如武汉光谷深圳离岸中心），区域协同从局部合作转向全域生态网络。

政策工具：从普适奖励到精准滴灌。赛制创新方面，上海推行“参赛–立项–拨款”当年闭环，审批周期压缩至5个月；分层激励上，中央财政“以奖代补”6.8亿元，地方配套超64亿元；区域适配性增强，江苏强化中试验证平台，浙江建立数据要素交易中心，避免“一刀切”政策，形成“赛事评审→政策匹配→动态评估”的反馈机制。

五、苏浙沪粤区域差异分析

整体差异格局。苏浙沪粤四省市在中国创新创业大赛中获奖项目占比超40%，形成长三角与珠三角两大创新集群，但区域分化显著：江苏以高端制造（占比38%）为核心，浙江聚焦消费科技（62%），上海深耕生物医药（54%），广东领跑电子信息（49%）。差异根源在于资源禀赋与政策工具的适配性——江苏依托高校与国企研发资源，浙江发挥民企市场灵敏度，上海借力国际化要素枢纽，广东强化政策响应速度。

江苏：高校牵引的硬科技策源地。江苏获奖项目集中于高端装备、新材料领域，依托高校与大企业协同孵化模式。政策上通过产业基金定向注资（如苏州纳米城10亿元专项基金）和中试验证平台，推动“需求牵引式创新”。典型案例如扬州锂电池复合集流体技术项目，填补国际空白并带动百亿级产业投资，凸显“技术研发–产业转化”闭环优势。

浙江：民企生态驱动的场景创新。浙江以消费科技为主导，依赖阿里系民企生态网络实现场景快速迭代。政策工具上采用民营孵化器税收抵扣（如杭州梦想小镇减免率35%），并联合沪苏皖共建长三角技术交易市场，2024年技术交易额超1000亿元。其

创新生态强调市场导向，如数字文化产业占GDP比重达28.1%，形成“技术–商业”高效转化路径。

上海：国际化要素赋能生物医药。上海依托国际化资源枢纽定位，吸引外资研发协同，生物医药项目占比54%。政策创新包括国际人才绿卡（张江药谷外籍研发人员占比40%）和“当年参赛–当年立项–当年拨款”高效机制，压缩审批周期至5个月。配套“湾区十条”提供最高1000万元落地补贴，加速科研成果跨境转化。

广东：政策资本化的电子信息高地。广东以“赛马制”政策响应资本偏好，形成“赛事评审–产业链投资”三级体系。政策资本化率超70%（珠海赛区撬动基金超4亿元），主导领域为电子信息与低空经济。

四地差异本质是“禀赋–政策–资本”适配模型的实践：江苏强研发、浙江活场景、上海聚国际、广东优资本。未来需以区域协同破除行政壁垒（如长三角G60专利池、粤港澳产业链联盟），推动全国创新生态从“单点突破”迈向“网络共生”。

表1 四地主导领域与政策工具对比

区域	主导领域（占比）	核心孵化主体	特色政策工具
江苏	高端装备（38%）	高校 / 国企研发	产业基金定向注资
浙江	消费科技（62%）	民企生态网络	孵化器税收抵扣
上海	生物医药（54%）	外资研发协同	国际人才绿卡
广东	电子信息（49%）	政策资本联动	“赛马制”

六、经验启示与政策建议

（一）经验启示

技术前沿性与产业应用结合的经验启示。技术前沿性与产业应用的深度融合是中国创新创业大赛的核心价值导向，其经验启示在于构建“技术突破–场景验证–产业转化”的闭环链条。需强化需求导向的技术研发机制，推动高校、科研机构与企业共建联合实验室，围绕产业痛点设立前瞻性课题，例如针对高端装备、生物医药等战略领域，通过“揭榜挂帅”制度集聚跨学科团队攻关。同时，建立技术成熟度评估体系，对实验室成果进行分级分类，配套差异化支持政策：对技术原型阶段项目提供中试基地和设备共享服务，对工程化阶段项目给予首台套认定、保险补偿等市场化扶持，对产业化阶段项目开放政府采购、场景示范等需求端支持。此外，需完善知识产权运营生态，通过设立专利池、技术交易中心等平台，降低技术转化过程中的信息不对称，推动前沿技术从“书架”走向“货架”。

跨区域协同创新的经验启示。跨区域协同创新是破解资源分布不均、提升整体创新效能的关键路径，其核心在于打破行政壁垒，构建“资源共享、优势互补、利益共赢”的创新共同体。需建立中央层面统筹的协同机制，例如设立跨省科技创新合作委员会，制定统一的技术标准、人才认定和财税分成规则，避免地方保护主义对要素流动的干扰。推动重大科技基础设施开放共享，通过“创新券”通用通兑、科研设备跨区域租赁等方式，降低中小微企业使用高端资源的成本。构建区域间产业梯度转移对接平台，鼓励东部地区向中西部输出技术、人才和管理经验，同时引

导中西部地区依托成本优势承接成果转化,形成“东部研发+中西部制造”的分工格局。此外,需探索跨区域利益分配机制,例如对技术输出方给予税收返还、GDP分成等激励,激发区域合作的内生动力。

政策精准滴灌的经验启示。政策精准滴灌是提升创新资源配置效率的核心要求,其关键在于构建“分类指导、动态调整、闭环反馈”的政策体系。需建立企业创新画像数据库,通过大数据分析企业技术领域、融资阶段、人才结构等维度特征,实施差异化政策匹配:对初创期企业侧重天使投资、创业孵化等“雪中送炭”型支持,对成长期企业强化知识产权质押融资、研发费用加计扣除等“助力成长”型政策,对成熟期企业提供并购重组、国际认证等“拓展空间”型服务。推动政策工具从“事后补贴”向“事前引导”转变,例如设立创新准备金制度,允许企业提前储备研发资金并享受税收抵扣;推广“科技创新券”模式,赋予企业自主选择服务机构的权限。同时,建立政策效果动态评估机制,通过第三方机构定期监测政策覆盖率、企业满意度等指标,及时清理低效政策,形成“需求识别—政策设计—效果评估—迭代优化”的闭环,避免政策资源错配与浪费。

综上,大赛的核心启示在于:以产业需求锚定技术前沿,以区域协同激活要素流通,以赛制创新驱动政策精准化,最终形成“赛场选骏马,生态育森林”的中国式创新范式。

（二）政策建议

优化政策工具组合。构建多层次、适配性政策体系是提升创新生态效能的核心。在金融支持维度,需建立“风险补偿—融资便利—退出保障”三级机制,通过财政资金的风险缓释作用降低早期投资不确定性,配套知识产权证券化、科技保险等工具拓宽融资渠道;同步发展区域性股权转让市场,完善风险资本退出路径。人才激励维度应实施“分类分级”政策,技术密集型区域强

化居留便利与跨境执业许可,制造业主导区侧重技术移民配额与子女教育保障,破除高端人才流动壁垒。同时建立政策动态评估模型,基于区域创新指数(如硬科技浓度、成果转化率)实时调校工具组合,避免资源错配。

强化全周期服务链条。需打通从赛事评审到产业化的服务闭环。前端构建“产融研”协同网络,整合大企业需求链、科研机构技术库与创投资本池,提供技术验证—商业模式迭代—供应链对接的一站式赋能。中端设立政策性风险缓释基金,通过“母基金跟投+劣后级担保”设计吸引社会资本覆盖创新“死亡谷”,重点支持概念验证与中试环节。后端完善知识产权再生机制,建立淘汰项目专利托管库与技术失败案例库,推动隐性经验跨域复用;配套建设全国性创业导师资源池,实现辅导服务的标准化流转。

推动区域差异化协同。基于地域禀赋实施“三维适配”战略。产业赛道适配,西部生态屏障区聚焦清洁能源技术(如光伏储能、碳捕集),配套绿色技术交易免税政策;东北老工业基地发展工业互联网与智能运维,设立传统产能数字化改造专项债;中部枢纽带布局智慧供应链技术,建设多式联运创新试验区;东部沿海突破前沿领域(量子计算、基因编辑),试点跨境研发用品免税清单。主体培育适配,高校密集区强化“概念验证中心—中试基地”链条,民企活跃带建设数据要素定价平台,外向型经济区探索国际专利速审机制。政策协同适配,建立跨域创新补偿基金(如东部技术转移税收抵扣反哺西部),推行“飞地孵化”考核双计机制(项目成果归属研发地、经济指标计入承接区),破除行政边界的资源流动壁垒。通过构建“全国—区域—集群”三级政策协调框架,在统一规则下释放差异化创新潜能,最终形成全域联动的创新共生网络。

参考文献

- [1] 陈邦平,李丽娜,陈佳琪.基于信息不对称理论的创新创业大赛作用机制及成效——以中国创新创业大赛(广东赛区)为例[J].科技管理研究,2022,42(06):236-242.
- [2] 陈邦平,李丽娜.中国创新创业大赛地方赛区的经验做法及其对广东的启示[J].广东科技,2023,32(05):60-63.
- [3] 徐军,刘立华.基于双创背景的创新创业大赛功能机制研究——以第五届中国创新创业大赛广东赛区为例[J].企业改革与管理,2018,(02):49-51.
- [4] 徐军,吴刚,刘立华.创新创业大赛的成效、预期与推进——基于中国双创大赛(广东赛区)数据与经验[J].广东经济,2016,(12):65-70.
- [5] 陈邦平.中国创新创业大赛(广东赛区)优秀参赛企业培养模式构建[J].科技创新发展战略研究,2018,2(06):38-43.
- [6] 樊敏,温欣言.基于中国创新创业大赛和中国创新挑战赛机制激发创新主体活力的研究[J].科技创新与生产力,2023,44(05):1-3.
- [7] 刘春娟.基于区位熵的省级创新创业大赛获奖企业特征研究——以中国创新创业大赛(陕西赛区)为例[J].新西部,2024,(05):177-183.
- [8] 刘春娟.省级创新创业大赛以赛代评政策效应——以中国创新创业大赛(陕西赛区)为例[J].陕西行政学院学报,2024,38(03):124-128.
- [9] 刘健.中国创新创业大赛促进科技型中小企业发展的对策[J].财务与金融,2018,(04):54-57.
- [10] 刘健.中国创新创业大赛优秀企业培育模式研究——基于2020年湖南赛区参赛企业信息数据的思考[J].湖南邮电职业技术学院学报,2021,20(02):109-112.
- [11] 刘立华,武勇,徐军.创新创业大赛获胜的影响因素分析——以第五届中国创新创业大赛广东赛区为例[J].企业改革与管理,2018,(08):46-49+81.
- [12] 刘杨,常进,易宏,等.创新创业比赛制度分析与评价方法研究——以中国创新创业大赛为例[J].云南科技管理,2018,31(02):10-14.
- [13] 同莹,鲍栢月,王仰东,等.中国创新创业大赛下的科技型中小企业融资问题[J].技术经济,2018,37(09):73-79.
- [14] 张晓南,王兆亮,安丙俭.打造山东特色赛事助力企业快速成长——中国创新创业大赛(山东赛区)回顾与展望[J].中国科技产业,2022,(10):26-28.

工商管理框架下供应链弹性构建与风险管控的协同机制研究

周正涛

西京学院, 陕西 西安 710100

DOI:10.61369/ASDS.2025040007

摘要： 目的：旨在构建企业管理框架下的供应链恢复力与风险管控的协同机理，探究信息共享和过程协同对供应链绩效的作用路径及交互效应，为提高供应链系统的韧性与风险应对能力提供理论支撑与实践指导。方法：在理论模型建构的基础上，提出供应链韧性与风险管控绩效的多元假设，即信息共享、过程协同以及它们之间的交互作用。收集来自制造业与物流业的有效样本数据，设计结构化问卷，收集有效样本数据，运用信效度检验、回归分析和结构方程模型等方法验证研究假说，深入剖析主效应、交互作用和中介调节作用。结果：信息共享与供应链弹性显著正相关（ $\beta=0.418$, $P<0.001$ ），流程协同与风险管控绩效显著相关（ $\beta=0.392$, $P<0.001$ ）。通过对过程协同效应和中介效应的分析，揭示了过程协同对信息共享和风险控制绩效的影响，从而增强了供应链系统的协同效应。结论：以数据标准化和信息透明为基础，构建跨组织信息共享平台，设计激励和信任机制是实现有效信息共享的关键。可为供应链管理实践提供系统协同机制的构建路径，促进企业在复杂环境中的韧性提升与风险有效管控。

关键词： 工商管理；供应链弹性；风险管控；协同机制

Research on the Collaborative Mechanism of Supply Chain Resilience Construction and Risk Control under the Framework of Business Administration

Zhou Zhengtao

Xijing University, Xi'an, Shanxi 710100

Abstract： Objective: The aim is to construct the collaborative mechanism of supply chain resilience and risk control under the enterprise management framework, explore the role paths and interaction effects of information sharing and process collaboration on supply chain performance, and provide theoretical support and practical guidance for improving the resilience and risk response capabilities of the supply chain system. Method: Based on the construction of the theoretical model, multiple hypotheses for supply chain resilience and risk control performance are proposed, namely information sharing, process collaboration, and their interactions. Collect valid sample data from the manufacturing and logistics industries, design structured questionnaires, collect valid sample data, verify the research hypotheses by using methods such as reliability and validity tests, regression analysis, and structural equation models, and deeply analyze the main effects, interactions, and mediating and moderating effects. Result: Information sharing was significantly positively correlated with supply chain resilience ($\beta=0.418$, $P<0.001$), and process collaboration was significantly correlated with risk control performance ($\beta=0.392$, $P<0.001$). Through the analysis of process synergy and mediating effects, the influence of process synergy on information sharing and risk control performance is revealed, thereby enhancing the synergy effect of the supply chain system. Conclusion: Based on data standardization and information transparency, constructing a cross-organizational information sharing platform and designing incentive and trust mechanisms are the keys to achieving effective information sharing. It can provide a construction path for the systematic collaboration mechanism of supply chain management practices, promoting the resilience improvement and effective risk control of enterprises in complex environments.

Keywords： business administration; supply chain resilience; risk management and control; collaborative mechanism

引言

随着供应链体系不断拓展、多元化，外部环境不确定、内部运营复杂等因素叠加，风险事件频繁发生，传递效应显著，传统风险管理模式已很难对其进行有效应对^[1]。供应链韧性既要考虑资源的柔性配置和快速反应能力，又要考虑系统整体的协同效应和动态自适应能力，这对供应链网络设计、信息共享机制和多利益主体协同提出了更高的要求^[2]。研究供应链弹性构建与风险管控的协同机制不仅可以丰富供应链管理的理论体系，而且可以为提高我国企业供应链恢复力与风险应对能力提供理论支持和实践指导。

一、模型构建及假设

（一）模型构建

本研究基于工商管理视角，构建供应链韧性 with 风险管控协同机理模型，揭示信息共享与过程协同对供应链绩效的作用路径^[3]。该模型的核心内容包括：信息共享、过程协同、供应链绩效（即供应链韧性与风险管控绩效）^[4]。其中，信息共享是供应链各成员间进行关键运作与风险信息传递的基础，也是实现柔性建设与风险响应的前提；过程协同体现了供应链内部和跨组织过程协同的效能，是提高企业风险控制与恢复力的核心动力^[5]。模型假设两个因素分别对供应链韧性与风险管控绩效有正向影响，且两者之间存在交互作用，协同提升供应链整体绩效。

（二）假设提出

- H1：信息共享对供应链弹性具有正向影响
H2：流程协同对风险管控绩效具有正向影响
H3：信息共享与流程协同的交互作用提升整体绩效

二、研究设计与方法

（一）研究思路与流程

本研究基于理论研究和实证分析，采用定量研究方法，系统地探索信息共享和过程协同对供应链恢复能力和风险管控绩效的作用机理。流程主要分为：理论建模、问卷设计与预测试、样本数据收集与处理、数据分析与模型检验。

（二）变量测量与问卷设计

研究核心变量包括信息共享、流程协同、供应链弹性和风险管控绩效。各变项都是在现有研究的基础上，根据实际情况加以调整，以保证内容的效度。采用5点 Likert 量表（1= 非常不同意，5= 非常同意）进行测量。问卷由基本资料、信息共享、流程协同和供应链绩效四部分组成，共计20个项目。通过网上平台和公司内部发放调查问卷，并结合预先调查的反馈意见对问卷进行了两次修改，以保证理解的一致性和条目的适切性^[6]。

表1 5点 Likert 量表信效度指标

变量	主要维度	代表性条目示例	Cronbach's α
信息共享	信息透明度、信息及时性	“供应链各成员间信息共享及时且准确”	0.88
流程协同	计划协同、执行协同	“供应链成员间流程协调性高，减少重复环节”	0.91

供应链弹性	响应速度、恢复能力	“供应链能快速响应外部冲击，迅速恢复正常运行”	0.89
风险管控绩效	风险识别、风险响应	“供应链能够有效识别并管控潜在风险”	0.87

（三）样本选取与数据收集

为了保证样本的代表性和数据质量，研究选择制造业和物流行业为主要调研对象，涵盖大型企业及中小企业，重点涉及供应链管理、采购、物流和风险控制岗位。采取便利抽样和目标抽样相结合的方法，发放500份调查问卷，有效回收率达92.44%。表2列出了样本的基本信息。

表2 样本基本特征统计

样本特征	分类	百分比 (%)
行业类别	制造业	58.4
	物流业	41.6
企业规模	大型企业 (≥ 500 人)	46.2
	中小企业 (<500 人)	53.8
职务	供应链管理岗	37.5
	风险管理岗	24.3
	采购 / 物流岗	38.2

（四）数据分析方法

采用 SPSS27 和 AMOS24 软件进行数据分析，按以下步骤进行：

描述性统计分析：统计样本的基本状况和变量的分布，保证数据不存在异常的偏态与峰度，变量的均值在2.8~4.2之间，满足正态分布的要求。

信度检验：用 Cronbach α 对量表的内部一致性进行评价，各变量的 α 值都在0.85以上，说明该量表具有良好的信度。

效度检验：采用验证性因子分析法对模型的结构效度进行检验，模型拟合良好， $\chi^2/df=2.15$ 、CFI=0.945、TLI=0.931、RMSEA=0.058，均符合可接受的标准，说明量表的结构是合理的。

通过回归分析，初步检验信息共享与过程协同对供应链韧性与风险管控绩效的影响方向与显著性。

采用极大似然估计法对模型进行拟合，路径系数都显著 ($P<0.01$)，支持 H1-H3 的假说。

三、实证分析

（一）样本统计与初步分析

共获得452份有效样本，采用 SPSS27 软件对样本数据进行描

述性统计分析。四项核心变量中，信息共享（均值 =3.87，标准差 =0.56）过程协同性（均值 =3.65，标准差 =0.61）供应链韧性（均值 =3.92，标准差 =0.59）风险管控绩效（均值 =3.58，标准差 =0.63），总体上反映了样本总体上处于中等偏上的水平。偏态系数为 -0.48~0.32，峰值状态系数为 -0.86~0.41，满足正态分布假定。两个变量的 Pearson 相关系数表明，信息共享对供应链弹性有显著的正向影响（ $r=0.467$, $P<0.001$ ），而过程协作与风险管控绩效的相关性则达到 0.512（ $P<0.001$ ），说明前期数据支持了理论假设。多重共线性检验结果显示，各变量之方差膨胀因子均在 2.5 以下，说明自变量间不存在严重的共线性问题。

表3 样本描述性统计分析

变量	均值	标准差	偏态	峰态	信息共享	流程协同	供应链弹性	风险管控绩效
信息共享	3.87	0.56	-0.31	-0.42	1	0.594**	0.467**	0.389**
流程协同	3.65	0.61	0.12	-0.15	0.594**	1	0.485**	0.512**
供应链弹性	3.92	0.59	-0.48	0.33	0.467**	0.485**	1	0.430**
风险管控绩效	3.58	0.63	0.32	-0.86	0.389**	0.512**	0.430**	1

注：** $p<0.01$ ；N=452

（二）信度与效度检验结果

运用 SPSS 软件及 AMOS 软件进行 Cronbach α 检验及验证性因子分析。四个变量的 Cronbach α 值分别为 0.88,0.91,0.89 和 0.87，都在 0.80 以上，说明量表内部一致性较好。经验证，模型拟合良好， $\chi^2=224.56$ 、 $df=104$ 、 $CFI=0.947$ 、 $TLI=0.934$ 、 $RMSEA=0.057$ 。标准化因素负荷值为 0.68~0.82，各项目的组合信度都在 0.80 以上，方差抽取均大于 0.50，说明本研究的测量模型具有较好的收敛效度及区分度效度。

表4 信度与效度检验

变量	Cronbach's α	CR	AVE	标准化因子负荷范围	拟合指标（部分）
信息共享	0.88	0.85	0.58	0.71-0.79	$\chi^2/df=2.16$, $CFI=0.947$
流程协同	0.91	0.88	0.62	0.75-0.82	$TLI=0.934$, $RMSEA=0.057$
供应链弹性	0.89	0.86	0.60	0.68-0.79	
风险管控绩效	0.87	0.83	0.57	0.69-0.77	

（三）假设检验

1. 主效应检验

研究发现，信息共享对于供应链弹性具有显著的正向影响（ $\beta=0.418$, $t=7.36$, $P<0.001$ ），支持假设 H1。过程协同显著影响风险管控绩效（ $\beta=0.473$, $t=8.12$, $P<0.001$ ），支持假设 H2。控制变量不具有显著性，排除了混淆效应。

表5 信息共享对供应链韧性和过程协同性的影响

自变量	因变量	标准化回归系数 (β)	t 值	p 值	备注
信息共享	供应链弹性	0.418	7.36	0.000	支持 H1
流程协同	风险管控绩效	0.473	8.12	0.000	支持 H2
企业规模	供应链弹性	0.034	0.61	0.541	不显著
行业类型	风险管控绩效	-0.021	-0.37	0.711	不显著

2. 交互效应检验

回归系数为 0.351, $t=5.84$, $P<0.001$ ，说明两个变量之间的交互作用对供应链绩效有显著的正向影响，支持假设 H3。模型的总体解释变量从 0.462 提高到 0.537，说明交互作用对绩效的解释能力有明显的提高。

表6 信息共享和过程协同两个变量的交互作用对供应链绩效的影响

模型阶段	自变量	标准化回归系数 (β)	t 值	p 值	R ²	ΔR^2
模型 1	信息共享	0.412	7.21	0.000	0.462	—
流程协同	0.458	7.89	0.000			
模型 2（加入交互）	信息共享 × 流程协同	0.351	5.84	0.000	0.537	0.075

3. 中介与调节效应分析

Bootstrapping 方法（5000 个样本）表明，其间接效应为 0.196,95% 置信区间 [0.113,0.289] 不含零，说明过程协作部分中介信息分享对供应链绩效有影响。同时，通过调节效应检验，发现信息共享程度越高，过程协作对风险管控绩效的影响越显著（ $t=4.21$, $P<0.001$ ）。

表7 过程协同对信息共享影响供应链绩效的影响

效应类型	路径	标准化系数	t 值	95% 置信区间	备注
直接效应	信息共享→供应链绩效	0.412	7.21	—	显著
中介效应	信息共享→流程协同→绩效	0.196	3.89	[0.113, 0.289]	显著
调节效应	信息共享 × 流程协同	0.351	5.84	—	显著

四、工商管理框架下供应链弹性构建与风险管控的协同机制设计优化

（一）数据标准化与信息透明化

实证结果表明，信息共享对供应链弹性有显著的正向影响（ $\beta=0.418$, $P<0.001$ ），暗示了供应链协作中信息质量与可用性是影响供应链协作恢复能力的重要因素。因此，建立统一的数据标准体系就成了设计信息共享机制的首要任务。这一体系包括数据定义，编码，接口，传输，元数据的描述等，以保证不同组织在信息处理时的语义一致性与结构兼容性。标准化不仅消除了信息误读和重复录入的风险，而且有效地打通了上下游系统之间的信息屏障，大大减少了“信息孤岛”^[7]。采用基于 API 的标准接口和数据自动获取机制，对供应链关键指标进行实时更新和动态监测，提高供应链信息的响应速度与精度，提升决策的时效性与前

瞻性。标准系统的实施需要不断地对其进行校验和优化，以保证系统能够适应实际业务的变化。在信息透明建设中，需要引入数据可视化工具，使决策者直观地把握供应链运行状况和潜在风险节点，为快速启动弹性策略提供数据支撑。

（二）建立跨组织信息共享平台

实证结果表明，信息共享和过程协同对供应链绩效有显著影响（ $\beta=0.351$, $P<0.001$ ），表明信息共享不能仅仅依赖于传统的被动传递机制，还需要构建动态整合的共享平台。这个平台应该打破组织的界限，将 ERP, WMS, CRM 等多个来源的系统进行整合，利用数据中台和一个统一的服务界面，让上、下游企业之间的核心业务数据能够实时地进行交互^[8]。平台的功能设计要围绕高可用、高安全和智能可控三个方面展开，尤其在权限控制方面，设计数据访问分级机制，保证敏感信息在法定授权下共享，避免信息泄露引发信任危机。还将集成风险模型和监测算法，实现物流中断、需求波动等异常情况的及时识别和预警，提高供应链应对不确定事件的能力。与此同时，平台数据同步机制要支持多源数据的动态更新，保证节点在突发事件中能够及时、一致地输入信息，支持协同决策和快速部署。利用平台对信息流进行统一调度，可以有效降低企业之间的交流成本和响应时间，构建高效的信息协作环境，显著提升供应链整体恢复力和风险防控能力。

（三）激励机制与信任建设

研究结果表明，过程协作不仅对信息共享和绩效有显著的影响，而且具有部分中介效应（间接效应=0.196, $CI[0.113,0.289]$ ），提示信息共享的效果不仅受技术因素的影响，而且受到成员行为动机和信任基础的影响。在建立协同机制时，

必须考虑到激励机制和信任构建两个方面的制度设计。将根据企业之间长期合作关系的特点，构建基于绩效的共享收入分配机制。比如，通过量化信息共享对库存周转率和订单响应速度等关键指标的改进，建立信息共享奖励机制，直接与绩效奖励或成本转移相关契约机制还可以约束信息分享的合规性，明确信息隐藏和扭曲造成的违约责任，从而减少机会主义行为的发生^[9]。信任的建立依赖于持续的互动和正反馈，企业之间可以建立常态化的交流机制和联合评价机制，通过第三方平台对共享行为进行记录，提高合作透明度和信用积累。通过技术支持和行为约束并重的设计路径，激发企业积极参与信息协作的内生动力，培育以信任为基础的协作文化，实现信息共享的深度和广度，从而促进整个供应链体系的协同有效性和韧性不断提升^[10]。

五、结语

本文系统地构建企业管理视角下的供应链韧性和风险管控协同机理，实证检验信息共享和过程协同及其交互效应对供应链绩效的显著影响，揭示过程协同在其中的中介效应。从数据标准化、跨组织信息平台、激励机制三个方面对供应链恢复力进行研究，并提出供应链恢复力优化、跨部门沟通与动态调整的优化路径，为提高供应链韧性提供理论和实践借鉴。深化人工智能和大数据技术在供应链协同机理研究中的应用，探索复杂供应链网络的多级协同效应，完善风险动态响应模型，促进供应链管理向智能化和柔性方向发展，提高供应链系统对不确定性环境的应对能力。

参考文献

- [1] 赵润之，孙凤芹. 基于 Citespace 可视化分析的国内外供应链弹性研究的现状与趋势 [J]. 华北理工大学学报（社会科学版），2024, 24(01): 26–32.
- [2] 陈会忠，孙竹，杨学民，等. 基于熵权法的中国进口原油供应链弹性评价及提升策略 [J]. 中国能源，2023, 45(10): 11–21.
- [3] Torrel L. 供应链弹性的竞赛 [J]. 汽车与配件，2023, (12): 26–27.
- [4] 贺睿. 供应链金融与供应链弹性的制造业实证分析 [J]. 互联网周刊，2023, (09): 37–39.
- [5] 贺睿. 汽车芯片行业供应链弹性评估 [J]. 中国物流与采购，2023, (06): 55–56.
- [6] 徐文平，岑亮. 中断风险下汽车企业供应链弹性影响因素研究 [J]. 物流工程与管理，2023, 45(02): 36–40.
- [7] 杨雪荣，李洛瑶，冯雪阳. 数字化能力对制造企业供应链弹性的实证研究 [J]. 现代工业经济和信息化，2023, 13(01): 229–230.
- [8] 姜婷，周伟良，孙家军. 面向供应链中断风险的应急能力提升路径研究 [J]. 安徽行政学院学报，2021, (03): 57–62.
- [9] 刘家国. 构建供应链弹性保障国民经济安全 [J]. 中国水运，2021, (07): 24–25.
- [10] 张学俊，尹训飞，马甜. 着力提升供应链弹性与产业链韧性 [J]. 中国经济评论，2021, (02): 46–49.

基于多阶段动态规划的电子产品生产过程决策研究

刘盈颖, 叶敏怡*

广州大学数学与信息科学学院, 广东 广州 510006

DOI:10.61369/ASDS.2025040008

摘要 : 为推进电子产品生产过程的绿色低碳发展, 本文提出了基于二项分布正态近似的抽样检测方案, 此方法便于实际操作, 但考虑其缺乏灵活性且对样本的依赖性较强, 本文提出了基于序贯概率比检验的抽样检测, 并给出两种检测方法的优缺点比较。分析四个生产阶段在不同决策下企业可能面临的成本费用, 考虑到不同生产阶段之间相互影响, 选择构建基于动态规划方法的多阶段决策过程最优化模型。利用该模型的马尔可夫性质, 从阶段4到阶段1逐步递推, 分别定义各个阶段的状态转移方程、成本函数以及动态规划方程, 从而得到零配件检测决策、成品检测决策、不合格品的处理决策以及退回的不合格品的处理决策。将 m 道工序、 n 个零配件的生产过程视为一个多阶段的马尔可夫流程, 再采用强化学习算法中的 Q-learning 方法进行建立模型, 得到最优决策。

关键词 : 二项分布正态近似; 序贯检测; 多阶段动态规划; 马尔可夫; Q-learning

Research on Decision-making in the Production Process of Electronic Products Based on Multi-stage Dynamic Programming

Liu Yingying, Ye Minyi*

School of Mathematics and Information Science, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006

Abstract : In order to promote the green and low-carbon development of the production process of electronic products, this paper proposes a sampling detection scheme based on the normal approximation of binomial distribution, which is convenient for practical operation, but considering its lack of flexibility and strong dependence on samples, this paper proposes a sampling detection based on the sequential probability ratio test, and gives a comparison of the advantages and disadvantages of the two detection methods. Considering the mutual influence between different production stages, a multi-stage decision-making process optimization model based on dynamic programming method is selected to be constructed. Based on the Markov properties of the model, the state transition equation, cost function and dynamic programming equation of each stage are defined step by step from stage 4 to stage 1, so as to obtain the spare parts inspection decision, the finished product inspection decision, the processing decision of nonconforming products and the processing decision of returned nonconforming products. The production process of m process and n spare parts is regarded as a multi-stage Markov process, and then the Q-learning method in the reinforcement learning algorithm is used to establish the model to obtain the optimal decision.

Keywords : normal approximation of binomial distribution; sequential detection; multi-stage dynamic programming; Markov; Q-learning

引言

根据国务院于2025年5月23日召开的会议, 中国正在推进制造业的绿色低碳发展, 并审议通过了《制造业绿色低碳发展行动方案(2025 - 2027年)》。会议强调, 推动制造业的绿色转型是大势所趋, 必须加快绿色科技创新和先进绿色技术的推广应用, 以实现传统产业的深度绿色转型。

在制造业中, 电子信息制造业占据收入占比大, 因此电子信息制造业发展中可能造成的资源浪费、环境污染等问题不可忽视, 本文从电子产品生产过程入手, 建立对应数学模型, 既能保证企业利润, 又能在一定程度上减少资源的浪费, 实现绿色制造。

为简化研究, 本文将研究过程主要分为零件检测阶段和后续生产阶段, 其中零件检测部分只假设了零件1和零件2, 后续生产过程具

基金项目: 中华人民共和国教育部2025年广州大学大学生创新训练项目(202511078351)。

作者简介: 刘盈颖(2004-), 女, 广东潮州人, 广州大学数学与信息科学学院本科生在读, 研究方向: 数学与应用数学。

通讯作者: 叶敏怡(2004-), 女, 广东中山人, 广州大学数学与信息科学学院本科生在读, 研究方向: 数学与应用数学。

体划分为4个阶段：

1. 对零配件是否进行检测：

在这一阶段，企业需要决定是否对采购的零配件进行质量检测。如果对零配件进行检测，可以筛选出不合格的零配件并将其丢弃，降低产品不合格的风险，但这会增加生产成本。如果不进行检测，次品零配件将直接进入成品的装配环节，这可能会影响后续成品的质量并增加不合格品退回调换产生损失的风险。

2. 对装配好的每一件成品是否进行检测：

在成品装配完成后，企业可以选择对成品进行质量检测。检测后的合格成品可以直接进入市场销售，而不合格成品则需要进一步处理（如拆解或丢弃）。如果不进行检测，所有成品均直接进入市场，即不合格成品也流入市场，导致售后退回调换以及企业信誉的损失。

3. 对检测出的不合格成品是否进行拆解：

检测出的不合格成品可以选择进行拆解，重复使用其中的零配件。这一过程会产生拆解成本，但部分零配件可以重新利用，降低对新零配件的需求。若选择不拆解，则直接将不合格成品丢弃，已投入的装配和材料成本全部损失。

4. 对用户购买的不合格品的处理：

对于用户退回的不合格的成品，企业将无条件予以调换，但这会产生一定的损失，包括物流费用以及企业信誉等；对于退回的成品，企业可以选择将其拆解并重复前述步骤，或者直接丢弃。

四个阶段的具体流程如图 1 所示：

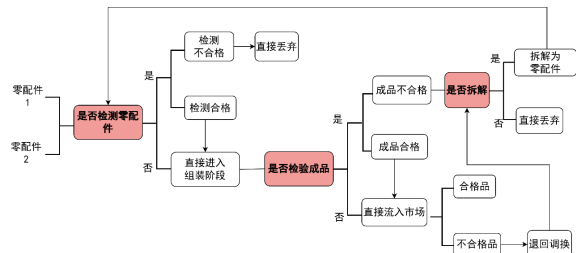


图 1 生产过程的具体流程图

一、模型假设与符号说明

（一）模型假设

1. 在装配过程中零配件无被损耗现象；
2. 企业准备检测的这批零配件样本量足够大；
3. 零件1和零件2相互独立，二者的合格与否互相不产生影响；
4. 企业将无条件予以调换的产品只限于不合格品；
5. 抽样检测过程中每个部件被抽到的概率相等，抽测具有随机性；
6. 合格的零配件在拆解后可以循环足够多次数使用；
7. 对于不合格产品，企业除了无条件予以退还外无其他经济补偿。

（二）符号说明

符号	含义
P	次品率
P_0	标称次品率
P_f	成品次品率
N	生产成品数
P_m	成品市场售价
A	成品的装配成本
T_f	成品检测成本
R	不合格品的拆解成本
D	调换损失（物流成本和企业信誉损失）
C_i	第 i 个零配件的购买单价
T_i	第 i 个零配件的检测费用

P_i	第 i 个零配件的次品率
x_i	第 i 个零配件是否检测的决策变量
x_i	第 i 个半成品是否检测的决策变量
y	成品是否检测的检测变量
zx	不合格成品是否拆解的决策变量
w	退回调换的产品是否拆解的决策变量

二、研究模型的建立

（一）基于二项分布^[1]正态近似的抽样检测方案

设零配件的次品率为 p ，标称次品率为 p_0 ，抽样的样本量为 n ，次品检测量为 x ，决策标准量为 c ，那么依据题目条件有假设检验：

$$\begin{aligned} H_0 &: p \leq p_0 \\ H_1 &: p > p_0 \end{aligned} \quad (1)$$

次品检测量服从二项分布，即：

$$x \sim \text{Binomial}(n, p) \quad (2)$$

在本题中，当样本量 n 较大时，二项分布可以用正态分布来近似，即：

$$x \sim N(np_0, np_0(1-p_0)) \quad (3)$$

标准化，得到标准检验统计量：

$$Z = \frac{\hat{p} - p_0}{\sqrt{\frac{p_0(1-p_0)}{n}}} \quad (4)$$

由此可以通过比较 Z 与标准正态分布表中的临界值来决定是

否拒绝 H_0 。

若直接基于置信水平确定样本量, 那么对于样本量的计算有:

$$n = \left(\frac{Z_{\alpha/2}}{E} \right)^2 p_0 (1 - p_0) n \quad (5)$$

其中, $Z_{\alpha/2}$ 是显著性水平 α 对应的正态分布临界值, E 是允许的最大误差。

本文假设允许最大误差为 0.05, 次品率 $p_0 = 0.1$ 。

1. 在 95% 置信水平下的检测样本量

此时 $\alpha = 0.05$, 因此 $Z_{0.025} \approx 1.96$, 代入公式取整可得 $n = 139$ 。为确定决策次品数阈值 c , 可以使用精确二项分布计算得到, 即有不等式:

$$P(X \geq c | p = 0.1) \leq 0.05 \quad (6)$$

2. 在 90% 置信水平下的检测样本量

此时 $\alpha = 0.1$, 因此 $Z_{0.05} \approx 1.64$, 代入公式整可得 $n = 98$ 。同样地, 对于决策次品数阈值, 有不等式:

$$P(X \geq c | p = 0.1) \leq 0.1 \quad (7)$$

(二) 基于序贯概率比检验的抽样检测^[2]

1. 拒收检测方案

针对情形一, 标称次品率为 $p_0 = 0.1$, 需要在 95% 的置信度下判断是否拒收。序贯检验步骤如下:

设定检验参数:

显著性水平 $\alpha = 0.05$; 检验功效 $\beta = 0.10$ 。

计算序贯检验^[3]的两个阈值:

上限阈值:

$$A_1 = \frac{1 - \beta}{\alpha} = \frac{1 - 0.10}{0.05} = 18 \quad (8)$$

下限阈值:

$$B_1 = \frac{\beta}{1 - \alpha} = \frac{0.10}{1 - 0.05} \approx 0.105 \quad (9)$$

构造序贯检验的似然比:

设 $p_1 = 15\%$, p_1 是设定的较高的次品率, 用于跟 p_0 进行比较。由此可以计算似然比函数为:

$$\Lambda_1 = \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^k \times \left(\frac{1 - p_1}{1 - p_0} \right)^{n-k} \quad (10)$$

2. 接收检测方案

针对情形二, 标称次品率为 $p_0 = 0.1$, 需要在 90% 的置信度下判断是否接收。序贯检验步骤如下:

设定检验参数:

显著性水平 $\alpha = 0.10$; 检验功效 $\beta = 0.05$ 。

计算序贯检验的两个阈值:

上限阈值:

$$A_2 = \frac{1 - \beta}{\alpha} = \frac{1 - 0.05}{0.10} = 9.5 \quad (11)$$

下限阈值:

$$B_2 = \frac{\beta}{1 - \alpha} = \frac{0.05}{1 - 0.10} \approx 0.0556 \quad (12)$$

构造序贯检验的似然比:

设 $p_2 = 5\%$, p_2 是设定的较低的次品率, 用于跟 p_0 进行比较。

因此可以计算似然比函数为:

$$\Lambda_2 = \left(\frac{p_2}{p_0} \right)^k \times \left(\frac{1 - p_2}{1 - p_0} \right)^{n-k} \quad (13)$$

其中 k 是检测中发现的不合格零配件数; n 是已检测的总样本数。

依据建立的抽样检测方案, 在实际生产过程中模型流程的实施步骤如下:

① 从零配件中逐个抽样, 每次检验一个零配件, 记录数据;

② 在每次抽样后, 更新似然比的值;

③ 根据决策规则做出决策。

具体流程图如图 2 所示:

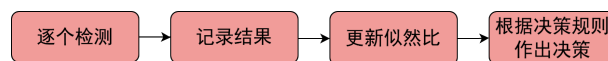


图 2 实际操作流程

(三) 基于动态规划^[4]方法的多阶段决策过程最优化模型

为求生产过程最佳决策路径, 本文使用动态规划模型解决该多阶段决策问题。多阶段决策过程最优化的目标是达到整个生产过程的总体效果最优。由于各阶段决策间存在有机的联系, 每个阶段决策的执行都将影响到下一阶段的决策, 从而对总体效果产生影响。因此在做出短阶段决策时不应仅考虑本阶段最优, 还应考虑其对最终目标的影响, 选择对整个过程而言最优的决策。

在解决多阶段决策^[5]动态规划模型时, 通常由后往前逐步计算, 这是利用了模型的马尔可夫性质: 不管前面阶段的状态和决策如何, 对前面阶段的决策所形成的状态来说后部分过程的策略必须构成最优策略, 因此, 可以将多阶段决策问题的求解过程看成是一个连续的递推过程。

在每个阶段中, 通过选择最优的检测、装配、拆解或丢弃策略, 使得动态规划递推的解能够最小化企业的总成本或最大化企业的收益。最终, 依据各阶段的最优决策路径, 企业可以制定零配件检测、成品检测及不合格品处理的综合策略, 从而实现成本优化。

对于每一个生产阶段, 可以描述其动态规划基本方程:

阶段 4 退回不合格品的处理决策

在阶段 4 中, 企业无条件予以调换不合格产品, 该过程中会产生退回调换损失 (包括物流成本以及企业信誉损失等), 针对退回的不合格产品, 企业可选择将其直接丢弃, 也可以选择拆解成成品, 使零部件重新回到阶段 1。

该阶段的状态转移方程为:

$$f_4(w) = \begin{cases} -D \times p_f \times N & w=0 \\ -(D+R) \times p_f \times N & w=1 \end{cases} \quad (14)$$

成本函数为:

$$C_4(w) = \begin{cases} D \times p_f \times N & w=0 \\ (D+R) \times p_f \times N & w=1 \end{cases} \quad (15)$$

动态规划方程为:

$$V_4(w) = -C_4(w) \quad (16)$$

阶段3 不合格成品的处理决策

在阶段3中, 成品装配后, 若成品被检测为不合格, 企业需决定是否进行拆解。如果拆解, 会产生一定的拆解成本, 拆解后的零配件将返回阶段1; 如果不拆解, 企业将产生丢弃成本, 直接造成损失。

该阶段的状态转移方程为:

$$f_3(z) = \begin{cases} -p_f \times (A + T_f) \times N + (1 - p_f) \times P_m \times N + f_4(0) & z=0 \\ -R \times N + f_4(1) & z=1 \end{cases} \quad (17)$$

成本函数为:

$$C_3(z) = \begin{cases} p_f \times (A + T_f) \times N & z=0 \\ R \times N & z=1 \end{cases} \quad (18)$$

动态规划方程为:

$$V_3(z) = -C_3(z) + \max_w V_4(w) \quad (19)$$

阶段2 成品的装配与检测决策

在阶段2中, 企业需决定是否对装配完成的成品进行检测。如果检测, 需要支付一定的检测费用, 如果不检测, 不合格成品直接流入市场销售会导致退回调换损失, 退回的不合格成品将进入阶段3进行处理。

该阶段的状态转移方程为:

$$f_2(y) = \begin{cases} -p_f \times D \times N + (1 - p_f) \times P_m \times N + f_3(0) & y=0 \\ -T_f \times N + (1 - p_f) \times P_m \times N + f_3(1) & y=1 \end{cases} \quad (20)$$

成本函数为:

$$C_2(y) = \begin{cases} p_f \times D \times N & y=0 \\ T_f \times N & y=1 \end{cases} \quad (21)$$

动态规划方程为:

$$V_2(y) = -C_2(y) + \max_z V_3(z) \quad (22)$$

阶段1 零配件的采购与检测决策

该阶段作为整个生产过程的起点, 如果未检测零配件, 使得不合格的零配件进入组装阶段, 后续的成品质量会受影响。由于检测需要一定的成本, 因此企业需要决定是否对采购的零配件进行检测。

该阶段的状态转移方程为:

$$f_1(x_1, x_2) = \begin{cases} -(\sum_{i=1}^2 T_i \times N + \sum_{i=1}^2 c_i \times N) + f_2(1) & (x_1 = 1, x_2 = 1) \\ -(T_1 \times N + \sum_{i=1}^2 c_i \times N + P_2 \times D \times N) + f_2(1) & (x_1 = 1, x_2 = 0) \\ -(\sum_{i=1}^2 c_i \times N + T_2 \times N + P_1 \times D \times N) + f_2(1) & (x_1 = 0, x_2 = 1) \\ -(\sum_{i=1}^2 c_i \times N + \sum_{i=1}^2 p_i \times D \times N) + f_2(1) & (x_1 = 0, x_2 = 0) \end{cases} \quad (23)$$

成本函数为:

$$C_1(x_1, x_2) = \begin{cases} \sum_{i=1}^2 T_i \times N + \sum_{i=1}^2 c_i \times N & (x_1 = 1, x_2 = 1) \\ T_1 \times N + \sum_{i=1}^2 c_i \times N + P_2 \times D \times N & (x_1 = 1, x_2 = 0) \\ \sum_{i=1}^2 c_i \times N + T_2 \times N + P_1 \times D \times N & (x_1 = 0, x_2 = 1) \\ \sum_{i=1}^2 c_i \times N + \sum_{i=1}^2 p_i \times D \times N & (x_1 = 0, x_2 = 0) \end{cases} \quad (24)$$

动态规划方程为:

$$V_1(x_1, x_2) = -C_1(x_1, x_2) + \max_y V_2(y) \quad (25)$$

(四) 基于 Q-learning 算法^[6]的生产过程决策方案

对于 m 道工序、n 个零配件的生产过程, 本文假设中间每一道工序生产出若干件半成品, 最后生产出一种成品。

这一生产决策问题可以视为一个多阶段、多决策的马尔可夫决策过程, 针对此类问题, 可以使用强化学习算法中的 Q-learning 方法解决。

Q-learning 是一种强化学习方法, 它允许智能体学习在一个环境中采取何种行动可以获得最大的奖励。该算法试图学习一个 Q 表, 该表记录了每个状态-动作对的 Q 值。算法通过迭代更新 Q 表, 使得对于每一个状态, 智能体能够选择具有最高预期奖励的动作。

Q-learning 算法模型^[7]建立如下:

1. 状态空间

状态 S 可以表示为当前生产阶段、零配件的状态、半成品的状态和成品的状态。状态可以表示为一个向量:

$$S = (s_1, s_2, s_3, \dots, s_n, s'_1, s'_2, \dots, s'_m, s_{fin}) \quad (26)$$

其中, s_{fin} 表示成品的检测决策。 s'_j 表示第 j 个半成品的检测决策; s_{fin} 表示成品的检测决策。以上决策变量取 0 时表示未检测, 取 1 时表示检测合格, 取 2 时表示检测不合格。

2. 动作空间

动作 A 可以表示对当前生产阶段的决策。可以表示为一个向量:

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_n, a'_1, a'_2, \dots, a'_m, a_{fin}) \quad (27)$$

其中, a_i 表示第 i 个零配件的决策; a'_i 表示第 j 个半成品的决策; a_{fin} 表示成品的决策。 a_i 取 0 时表示不检测, 1 表示检测, 2 表示检测后不合格丢弃; a_{fin} 和 a'_i 取 0 时表示不检测, 取 1 时表示检测, 取 2 时表示检测后不合格拆解, 3 表示检测后不合格丢弃。

3. 奖励

奖励 R 依据决策的成本和收益来定义, 表示为:

$$R = P_m - \sum_{i=1}^n [c_i(1 + p_i) + a_i T_i] - \sum_{j=1}^m [A_j + a'_j T_j + p_j(A_j + D_j)] - [A_f + a_f T_f + p_f(A_f + D_f)] - L_r \quad (28)$$

其中, P_m 表示成品的市场价格, C_i 表示第 i 个零配件的成本, T_i 表示第 i 个零配件的检测成本, A_j 表示第 j 个半成品的组装成本, T_j 表示第 j 个半成品的检测成本, D_j 表示第 j 个半成品的拆解成本, A_{fin} 表示成品的组装成本, T_{fin} 表示成品的检测成本, D_{fin} 表示成品的拆解成本, L_r 表示成品的替换损失。

奖励是成品的市场价格减去所有相关的成本, 包括零配件的成本、检测成本、组装成本、拆解成本和替换损失。

4. Q 值更新

Q-Learning 的核心是 Q 值的更新^[8]。Q 值表示在状态 S 下采取动作 A 的预期累积奖励。其更新规则为:

$$Q(S, A) \leftarrow Q(S, A) + \alpha[R + \gamma \max_{A'} Q(S', A') - Q(S, A)] \quad (29)$$

其中 α 为学习率, γ 是折扣因子, S' 是下一个状态, A' 是下一个动作。

通过对 Q-learning 算法模型^[9]的建立, 可以依据实际生产流

程情况对生产过程给出最优决策方案。

将上述模型应用于两道工序、八个零配件的情境中,可得具体的生产流程如图 3 所示:

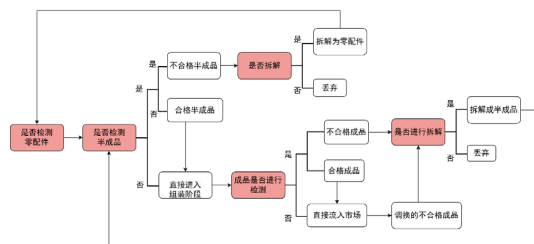


图3 生产流程图

三、实验结果与分析

(一) 零件检测阶段的决策求解结果

1. 基于正态分布的抽样检测方案

①在95%的置信水平下,检测139个零配件,若检测到20个次品,则拒收这批零配件;

②在90%的置信水平下,检测98个零配件,若最多检测到14个次品,则接收这批零配件。

2. 基于序贯概率比检验的抽样检测规则

(1) 拒收方案

①如果 $\Lambda_1 > 18$, 则认为次品率超过标称值, 拒收这批零配件;

②如果 $\Lambda_1 < 0.105$, 则认为次品率不超过标称值, 接收这批零配件;

③如果 $0.105 \leq \Lambda_1 \leq 18$, 则继续检测下一个零配件。

(2) 接收方案

①如果 $\Lambda_2 > 9.5$, 则认为次品率超过标称值, 不接受这批零配件;

②如果 $\Lambda_2 < 0.0556$, 则认为次品率不超过标称值, 接收这批零配件;

③如果 $0.0556 \leq \Lambda_j \leq 9.5$, 则继续检测下一个零配件。

为更好说明抽样检测方案,本文随机生成次品样本进行模拟。在每一步计算似然比。若似然比超过上限阈值,则拒收该批次产品;若低于下限阈值,则接收该批次产品;若似然比位于上下限之间,则继续检测。

某次随机模拟的结果如图 4、图 5 所示:

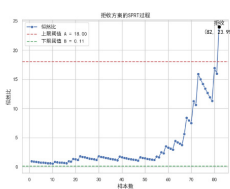


图 4 拒收方案的 SPRT 过程

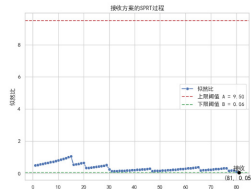


图 5 接收方案的 SPRT 过程

图 4 和图 5 分别展示了拒收和接收检测方案中的序贯概率比检验 (SPRT) 过程。图中的蓝色线条代表似然比随检测样本数量的变化过程, 红色虚线为拒收阈值, 绿色虚线为接收阈值。在每一步检测中, 似然比逐渐逼近上限或下限, 从而得出最终的决策。

3. 两种检测方法的比较

基于二项分布正态近似的抽样检测给出了确切的检测样本量以及最大可接受的次品量，在实际生产过程中更易理解且实施难度较小，但是此类方法通常需要在检测前确定一个固定的样本量，缺乏灵活性，一旦数据分布情况与预期存在较大差异，可能会导致资源浪费或结论不准确。

基于序贯概率比检验^[10]的抽样检测并未给出确切的检测样本量,而是给出了不同样本数量下的似然比,在实际操作中对检验人员的专业素养要求较高,操作过程较为繁琐。但是由于未固定确切检测值,而是在检测过程中动态调整检验策略,具有更强的灵活性,也使得检测的可靠性更强,同时可以避免不必要的检测,节省成本。

（二）基于动态规划的生产过程决策

针对零部件1、2, 成品和不合格成品, 本文设定了以下六种情况, 具体数据如表 1 所示:

表 1 六类假设情况

情况	零配件 1			零配件 2			成品				不合格成品	
	次品率	购买单价	检测成本	次品率	购买单价	检测成本	次品率	装配成本	检测成本	市场售价	调换损失	拆解费用
1	10%	4	2	10%	18	3	10%	6	3	56	6	5
2	20%	4	2	10%	18	3	20%	6	3	56	6	5
3	10%	4	2	10%	18	3	10%	6	3	56	30	5
4	20%	4	1	20%	18	1	20%	6	2	56	30	5
5	10%	4	8	20%	18	1	10%	6	2	56	10	5
6	5%	4	2	5%	18	3	5%	6	3	56	10	40

假定最后成品共有100件,按照上述设定的六类情况,可以计算出各自对应的最优效益,具体决策结果如表2所示:

表 2 各情况的决策情况

情况	最大平均 盈利(元)	零件1 是否检测	零件2 是否检测	成品 是否检测	不合格成品 是否拆解
1	25.34	是	否	否	否
2	24.5	是	否	否	是
3	25.34	是	否	否	否
4	25.76	是	否	否	否
5	25.23	否	否	否	否
6	26.6	否	否	否	是

由上述结果可发现, 仅检验零配件1且不拆解这一决策为选择最多的最优决策。由于零配件1的检测成本较低, 可以提前识别出一些次品, 从而避免将次品直接装配成成品, 降低次品率。选择该决策大部分原因是因为拆解费用较高且成品合格率较高, 检测零配件1后, 装配出的成品大概率是合格的, 则拆解并没有带来额外的收益反而增加了成本。因此, 检测零配件1可以有效控制成本, 而不进行拆解进一步减少了额外的处理费用, 从而在此策略下实现单件利润最大化。

不同的决策策略都是基于具体情况的次品率、检测成本、装

配成本和拆解费用进行的优化选择。关键在于在检测和拆解之间找到一个平衡，使得合格率提升的同时，整体成本得到控制，从而实现单件产品的利润最大化。

（三）基于 Q-learning 的生产决策

假定工序 $m=2$ 、零配件个数 $n=8$ ，可以从中抽取数据并投入到 Q-learning 算法的训练之中。得到最优生产决策方案如表 2 所示：

表 2 最优生产决策

8 个零配件	3 个半成品	成品	退回的不合格品
不检测	不检测	检测并拆解次品	不拆解

四、模型评价

（一）模型的优点

- 1. 模型的高效性：基于 SPRT 的抽样检测方案确保在较少的样本量下能够尽快做出可靠的拒收或接收决策，不仅降低了检测成本，还保证了较高的检验效率，具有高效性。
- 2. 模型的灵活性：SPRT 允许在数据的采集过程中动态地进行假设检验，而不需要预先确定固定样本量，根据样本结果计算似然比动态地调整抽样次数，具有较高的灵活性。
- 3. 模型的可行性：通过动态规划算法采取清晰的递归结构并写出状态转移方程，将复杂问题分解为一系列相对简单的子问题，并通过解决这些子问题来找到原问题的解，简化了复杂循环过程，使得整个求解过程更具可行性。

4. 模型的普适性：在制定 m 道工序， n 个零件决策方案模型时不确定具体生产流程如零件和半成品具体组装情况等，但 Q-learning 算法能够通过与环境交互来学习适应这种不确定性，并找到最优的策略。

（二）模型的缺点

问题二采用动态规划进行求解需要遍历 16 种可能状态找到最优解，倘若生产流程更加复杂、零配件数量增加，都有可能导致计算量急剧增加，算法运行时间非常长且状态空间爆炸。

五、结论

本文针对电子产品生产过程的决策问题，从零件的采购检测、成品的检测、不合格品的拆解以及退回不合格品的处理四个阶段入手，建立了基于动态规划的电子产品生产过程的决策模型，在降低企业成本的同时也降低电子产品生产过程中造成的资源浪费，符合绿色发展理念。主要成果如下：

- （一）序贯检验在电子产品零件检测中的应用
- （二）基于动态规划的多阶段决策过程最优化模型
- （三）基于 Q-learning 算法的生产过程决策模型

本研究为步骤相对简单的电子产品生产决策提供了理论支持，未来可进一步结合更加复杂的生产过程，完善模型，使得该模型适用于多样化的生产领域。

参考文献

[1] 张雪媛. 二项分布及其应用的历史研究 [D]. 天津财经大学, 2015.

[2] 崔岩, 崔迪. 计数序贯抽样检验方法在元器件验收中的应用 [J]. 长春光学精密机械学院学报, 1996, (04):68-72.

[3] 于超. 基于统计过程控制和序贯概率比检验的高速铁路轨道结构监测数据异常诊断 [D]. 北京交通大学, 2021.

[4] 宋焯, 崔梦天. 动态规划在企业生产与储存管理中的应用 [J]. 科技广场, 2006, (6):114-116.

[5] 沈建新, 周儒荣, 廖文和. 动态规划模型在生产库存优化中的应用研究 [J]. 机械设计与制造工程, 2002, 31(6):112-113.

[6] 张峰, 刘凌云, 郭欣欣. 基于改进 Q- 学习算法的多阶段群体决策模型 [J]. 控制与决策, 2019, 34(09):1917-1922.

[7]Lowe, R., Wu, Y., Tamar, A., Harb, J., Abbeel, P., & Mordatch, I. Multi-Agent Actor-Critic for Mixed Cooperative-Competitive Environments. Advances in Neural Information Processing Systems, 2017, 30: 6379-6390.

[8] 刘波. 一种基于强化学习的机械车间任务调度节能优化支持系统研究 [D]. 重庆大学, 2013.

[9] 星海. 面向复杂批次过程的强化学习控制方案 [D]. 厦门大学, 2021

[10]Wald, A. (1945) Sequential Tests of Statistical Hypotheses. The Annals of Mathematical Statistics, 16, 117-186.

项目驱动教学方法在本科留学生概率统计课程中的改革探索

冯峥晖, 林应臻, 黄子健*

哈尔滨工业大学(深圳), 前沿学部, 广东 深圳 518055

DOI:10.61369/ASDS.2025040009

摘要： 本文分析了针对本科留学生的《概率论与数理统计》课程教学中存在的难点，针对来华留学生群体中存在的文化背景差异大、数学基础薄弱等问题，提出了基于项目驱动的教学改革方案。方案涵盖了构建由真实行业案例组成的课程项目库，实施小组学习与分阶段任务布置，建立多元化评价体系等内容。在2024年秋季的首次授课中，该方案充分调动了留学生的学习积极性，班内跨文化交流活跃，课程最终及格率达到85%，授课效果得到了有力的统计支撑。改革不仅有效缓解了留学生因基础差异导致的学习困境，还通过实践导向的教学模式强化了留学生对统计工具的应用能力，为培养具有国际视野的应用型人才提供了可推广的经验，契合国家教育对外开放的需求。

关键词： 留学生；概率论与数理统计；项目驱动；教学改革

Exploring the Reform of Project-Driven Teaching Methods in Probability and Statistics Courses for International Undergraduate Students

Feng Zhenghui, Lin Yingzhen, Huang Zijian*

Faculty of Frontier Sciences, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen, Guangdong 518055

Abstract： This paper analyzes the key challenges in teaching the course Probability Theory and Mathematical Statistics to undergraduate international students. In response to common issues such as significant cultural differences and weak mathematical foundations among international students in China, a project-driven teaching reform is proposed. The proposed approach includes the development of a course project library based on real-world industry cases, the implementation of group-based learning with staged assignments, and the establishment of a diversified assessment system. When first implemented in the fall semester of 2024, the reform effectively motivated students, fostered active intercultural communication within the classroom, and resulted in a final pass rate of 85%. The teaching effect had been strongly supported by statistical results. The reform not only alleviated learning difficulties caused by varying academic backgrounds but also enhanced students' practical application of statistical tools through a practice-oriented teaching model. It offers replicable experience for cultivating application-driven talents with a global perspective and aligns well with the national strategy of educational openness.

Keywords： undergraduate students; probability theory and mathematical statistics course; project-driven; teaching reform

引言

《概率论与数理统计》是统计学和数据科学专业的基础课程，主要研究统计数据分析方法，并描述数据和事物的不确定性。随着信息技术的快速发展，数据生成速度和规模呈指数级增长，培养具备专业知识和技能的数据科学人才的需求也愈发强烈。《概率论与数理统计》课程与数据分析和大数据技术密切相关，已然成为此类专业和行业的基础必修课程。近年来，各大高校也不断地在传统的授课方

项目 / 基金信息：哈尔滨工业大学(深圳)高等教育教学改革项目数据科学与大数据技术专业及校区留学生统计方向课程教学改革(编号：HITSZUQP24023)，主持人：冯峥晖；广东省高等学校教学管理学会项目毕业论文(设计)管理与质量保障机制研究—以学生为中心的流程设计和质量保障机制(编号：BYLW2023025)，主持人：冯峥晖。

作者简介：

冯峥晖，哈尔滨工业大学(深圳)前沿学部副教授，博士生导师。研究方向为数理统计，混合模型，降维和变量选择；

林应臻，哈尔滨工业大学(深圳)前沿学部硕士研究生，研究方向为机器学习和时间序列分析。

通讯作者：黄子健，哈尔滨工业大学(深圳)前沿学部博士后，研究方向为统计建模，统计模型分析和预测，统计算法，混合效应模型和混合模型。邮箱：huangzijian@hit.edu.cn

式上推陈出新，如翻转课堂、知识图谱、OBE 教育等新思路陆续被纳入概率论与数理统计的课程设计之中^[1-4]，这些新模式进一步提升了学生的课堂参与度，能够更好地培养学生的综合能力。

2016年以来，随着“一带一路”教育行动的深入实施，我国与“一带一路”沿线国家的教育合作日趋紧密，越来越多的国际留学生选择到中国接受本科教育^[5]，且选择就读理工类专业的留学生占比逐年攀升^[6]。在这个过程中，《概率论与数理统计》作为一门重要的理科基础课程，承载着培养学生科学思维和数据分析能力的重任。然而，由于留学生群体中普遍存在的文化背景差异大、数学基础相对薄弱、语言障碍等问题，面向留学生的概率论与数理统计教学常常面临挑战。虽然国内现有的教学模式在近十年来不断发展，已经相当丰富，但其更适合中国大学生的学习习惯，对留学生群体来说，教学针对性不足，教学成果难以保证。

因此，面向本科留学生的《概率论与数理统计》课程的教学改革显得尤为紧迫。本文采用项目驱动式的教学方法对课程进行改革，以连贯的项目式学习吸引学生学习兴趣，提升学生学习热情，促成学生学习目标的达成。改革后的教学模式能更好地适应留学生的学习特点与需求，提升他们的学习效果和积极性，为他们未来在各自国家或地区从事相关工作奠定基础。同时也能更好地促进国际交流与合作，服务国家的战略需求。

一、留学生教学难点分析

（一）留学生背景差异较大

来华留学生的生源地分布十分广泛。我校于2023年9月开始招收本科留学生，生源地涵盖东欧、东南亚、南亚、中亚、非洲等诸多地区，就读专业包括计算机科学与技术、光电信息科学与工程、经济学、工商管理等多个领域。图1展示了2024年秋季学期选修我校《概率论与数理统计》课程的留学生的国籍分布。相比国内学生，留学生在文化背景、数学基础、语言水平、学习习惯等方面拥有更大的内部差异^[7]。例如，东欧和中亚地区继承了前苏联时期的基础教育风格，来自这些地区的留学生往往具有更扎实的数学功底。而更多的留学生来自于亚非拉发展中国家，数学教育较为重视日常应用，学生在心算能力、抽象思维等方面功底相对薄弱。此外，在语言方面，来自南亚和东南亚地区的学生通常拥有更高的英语水平。综上所述，面向留学生的概率论与数理统计教学需要综合考虑学生内部的背景差异，合理控制课程难度，并针对性地组织教学内容，通过项目驱动式的教学帮助留学生掌握课程的核心知识点。

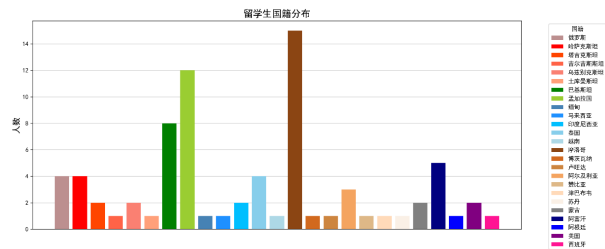


图1 2024年秋季学期我校《概率论与数理统计》课程留学生国籍分布

（二）留学生来华求学的普遍困境

中国高校的留学生教育方兴未艾，大部分国内高校的留学生招收规模不大。许多留学生独自一人来到中国求学，没有可以互相帮扶的乡邻，往往会在语言、气候饮食、人际交往、价值观等诸多方面感到不适应^[8]。留学生如果在课业上遭遇挫折，更容易存在产生畏难、自卑等心理问题的风险，从而进一步影响留学生的学习积极性，容易形成遇到疑难不主动寻求帮助，课后作业直接

照抄同学答案的恶性循环。因此，如何充分调动学生的学习积极性，鼓励班级内部形成互帮互助、合作共赢的良好氛围，就成了面向留学生的课程设计中必须考虑的问题。

（三）留学生应用能力的培养

我校多数留学生来自于一带一路沿线的发展中国家，这些国家对理论和应用型人才的需求非常迫切。同时，数字化时代中充满了纷繁复杂的数据，也进一步推动了概率统计课程解决现实问题的需求^[9]。目前，国内常用的中文概率论与数理统计教材一般以经典统计理论为核心，并辅以对应的应用案例。例如，在介绍假设检验时，现有教材常使用工厂产品质量变化的案例进行讲解^[10]。然而，这类案例与留学生的日常生活联系较小，难以调动留学生的学习兴趣，且无法较为准确地刻画当前业界所面对的数据的复杂性。因此，要更好地培养留学生应用所学统计知识的能力，让他们在面对现实问题时能够做到举一反三，就需要教学团队收集更新颖、更贴近留学生现实生活的实际案例，并通过课堂讨论、课后习题、上机实验等多种方式，实现理论与应用的有机结合，全面培养学生的综合能力。

二、教学改革方案

针对上述讨论的本科留学生在《概率论与数理统计》课程中面临的种种困境，本文提出了四项改革措施，分别是项目驱动教学、小组合作学习、多元化的评价指标和建立案例库。通过这四项措施的结合，课程的教学内容更具有针对性，留学生的学习积极性能够被更充分的调动，教师也能够从多个角度更加全面地地发掘和评估学生的能力。

（一）序贯的项目驱动形式的教学

在新的教学模式下，学生将在真实的数据分析项目中开展学习。具体来说，教学团队将设置多个基于真实案例的课程项目供学生选择。每个项目都具有阶段性的结构，涵盖数据收集、处理、分析和结果展示等多个环节，且与课程各章节的知识点相对应。教师会在课程进展到各个阶段时布置与项目相关的作业，促使学生在完成项目的同时进行更深入的思考和分析，这些作业包

括文献调研、数据分析报告撰写以及思考和讨论等。图2展示了课程项目的流程。

作业内容具备一定的选择性，基础较弱的学生可以选择较为简单的数据分析任务，而对统计方法有一定了解的学生则可以挑战更复杂的分析项目。这种以实践为导向的学习模式更加强调对学生应用能力的锻炼，让数学基础较为薄弱的留学生也能保持较高的课程参与度，学生能够及时巩固每一章的所学知识点，编程能力和项目管理经验也将得到提高。

在正式授课前，教学团队建设了一系列与课程内容和重难点配套的课程项目库。这些项目涵盖课程不同阶段的知识点，确保学生能够在学习过程中获得实践经验。同时，不同的项目在考察侧重点上也有所不同，主要分为以下四类：第一，案例研究项目，选择真实的行业案例，让学生应用统计方法进行数据分析，增强理论与实践的结合。第二，数据收集与处理项目，设计项目，要求学生收集和清理真实数据，以培养他们的数据处理能力和对数据质量的重视。第三，分析与可视化项目，鼓励学生使用现代数据可视化工具，展示他们的分析结果，提升信息传达能力。第四，跨学科项目（如经济学、计算机科学等），帮助学生理解统计在不同领域的应用。学生可以根据自身喜好选择合适的项目开展研究。随着课程的开展，项目库的内容也会逐年丰富。

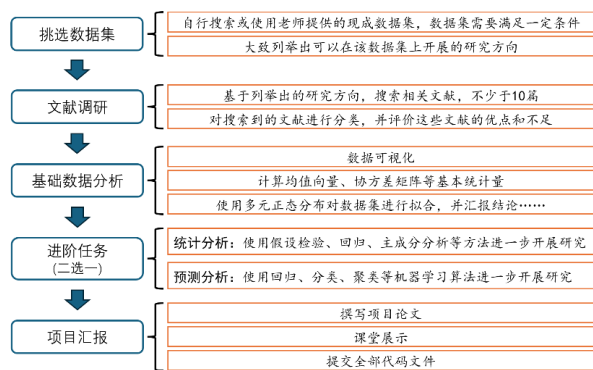


图2 课程项目流程演示

（二）小组学习模式

小组合作可以促进留学生之间的交流与学习，培养他们大项目分工、难度评估、项目流程管理的能力，鼓励他们以分工协作的形式解决课程中的难题。在授课过程中，学生将被分为2至4人的若干小组，每个小组自主选择一个课程项目开展合作研究。在合作过程中，学生将共同收集、处理和分析数据，运用所学的统计理论解决实际问题。在项目完成后，每个小组还需要在课堂上进行成果展示。这种合作学习方式不仅能够锻炼留学生应用所学理论的能力，培养他们的团队协作精神和项目管理技能，还能鼓励他们主动与同班同学交流学习中的心得体会，取长补短，帮助他们更好地找到学习状态。

（三）建立多元化评价体系

基于考试和作业的评价体系，难以对存在较大背景差异的留学生群体的学习成果形成有效反馈。因此本文提出设置多元化的成绩评价体系，在考察留学生理论知识的同时，兼顾对实操能力、团队协作能力、知识应用能力的培养和评估，更加全面地发

掘学生的特长与潜能，助力学生综合素质的提升。

改革后的评价体系将包括以下内容：a) 对学生在项目进行中的表现进行定期评估，包括参与度、团队合作、沟通能力等，确保学生在学习过程中得到及时反馈。这种评价方主要关注学生的进步情况，而不仅仅是最终结果。b) 项目成果评价。每个小组在完成项目后需要撰写项目报告。教学团队需要从数据分析的准确性、报告的清晰度、可视化效果等方面进行打分。c) 口头展示与答辩。在项目完成后，各小组需派代表进行口头展示和答辩，展示他们的分析结果和思考过程。评价将涵盖表达能力、逻辑性和应变能力等多个方面。d) 课后作业分数。每一章节的授课结束后，教师都会给学生布置对应的课后作业。作业中的习题均基于现实案例设计，在检测学生学习成果的同时培养理论结合实际的思维。e) 课堂参与和出勤情况。教师在授课过程中应该鼓励学生当堂提出自己的观点和疑问，同时每次授课都需要执行严格的点名签到，以此衡量留学生的学习态度。在课程结束后，将以上五项的打分与学生的考试成绩相结合，全面评估学生的学习成果。

（四）案例教学为主线

《概率论与数理统计》是一门应用性较强的理论学科，对具体案例的讲解能够有效地帮助留学生更直观地理解统计方法的原理和应用价值。教学团队在教学中引入一系列现实案例作为主线，且这些案例与当下的热门行业存在联系。通过鼓励学生对这些现实案例展开自主讨论，更好地激发留学生的学习兴趣，强化他们对各种统计工具的理解，提升他们的分析能力。案例讨论也能锻炼学生的批判性思维，培养他们从多个角度看待问题的习惯。

随着课程改革的推进，一个涵盖各类实际应用的优秀案例库也将逐渐被建立起来。授课团队需收集来自不同行业（如金融、医疗、市场营销、工程等）的数据分析案例，并确保案例的多样性和广泛性。每个案例包括背景介绍、数据描述、所需工具、分析过程、结果展示和结论等部分，以帮助学生系统地理解案例的整体结构和分析思路。这些案例经过适当的改编，可以被应用于课堂讲解、课程项目、课后作业等不同环节中。例如，在2024年秋季的首次授课中，教学团队基于热门国产游戏《黑神话：悟空》设计了一系列课后习题。在一定的假设前提下，教学团队通过统计模型模拟了校内玩过该游戏的学生比例以及玩家每次登陆的平均游玩时间，并在课后习题中引导学生对这些数据开展区间估计和假设检验。

随着课程的逐年迭代，案例库也将定期更新，纳入最新的行业案例和研究成果，以确保教学内容的前沿性和实用性，案例库内容不断丰富。

三、教学改革实施效果

教学团队在2024年秋季学期初次实施了改革方案。在课程项目方面，班内的留学生基于自愿原则组成了共24个小组，每个小组2至4人。我们按照世界各地的文化特点，将留学生的国籍划归到以下九个地理区域中：中亚及俄罗斯、蒙古、东南亚、南

亚、西亚、非洲、欧洲、北美、拉丁美洲，并分析了留学生在选择队友时的偏好。图3(a)表明，只有38%的小组完全由来自同一地理区域的学生组成，而54%的小组由来自至少两个不同地区的学生组成。这说明在本轮授课中，班内的留学生与来自不同文化背景的同学交流的积极性较高，班级氛围和学生的积极性得到了保证。

在2024年秋季授课中，课程项目方面，教学团队提供了10组数据集供每个小组自由选择。在每一组数据集下，助教进一步提供了两种不同的研究思路，给予各组最大程度的选择自由度。图3(b)展示了10组数据集的选择情况，可以看出 Tiktok 数据集对学生的吸引力最大，21%的小组都选择了这个数据集。Tiktok 作为风靡全球的社交软件，几乎所有留学生都在使用。这一统计结果表明与时俱进的研究案例确实更能激发留学生的学习兴趣。

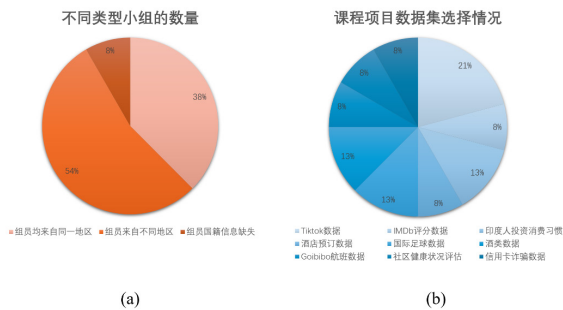


图3 (a) 小组人员构成情况; (b) 课程项目数据集选择情况

本轮授课采用了多元的评价体系，学生的总评成绩由课堂参与、作业、课程论文、期末考试四个部分构成。图4展示了本轮授课中全班留学生总评成绩的分布，可以看出成绩的分布情况接近于以70分为中心的正态分布。经统计，课程最终及格率为85%。

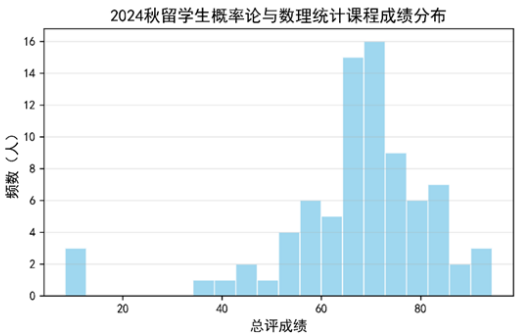


图4 总评成绩分布直方图

四、总结

随着我国国际影响力的日渐提高，招收和培养大学留学生也不断扩大我国的文化影响力。设计更加适合留学生的教学方式对于留学生教育尤为重要。本文对本科留学生《概率论与数理统计》课程进行了系统性改革。针对留学生背景差异大、教学内容与留学生的认知水平不匹配、评价体系单一等问题，设计了更具针对性的项目驱动教学模式。该模式能够更好地激发留学生的学习兴趣，促进跨文化交流与合作。同时，分阶段任务和差异化作业设计也更好地兼顾了不同基础学生的学习需求。第一轮授课的效果表明，改革后的课程不仅显著提升了学生的数据分析能力和理论应用水平（总评成绩分布合理，及格率达85%），更为留学生适应全球化背景下的职业需求奠定了基础。在未来的教学中，教学团队还将不断迭代授课经验，更新课程案例库，并对本校其他课程乃至全省的高校产生辐射作用，既服务了国家教育对外开放的需求，也为培养具有国际视野的应用型统计人才提供了宝贵经验。

参考文献

[1] 马永刚, 刘俊梅. 基于知识图谱的“概率论与数理统计”课程教学改革研究[J]. 科技风, 2025, (11): 86-89. DOI: 10.19392/j.cnki.1671-7341.202511029.

[2] 黄敢基, 韦琳娜, 冯海珊. 以一流课程建设为导向的概率论与数理统计课程教学改革与实践[J]. 高教论坛, 2024, (11): 25-29.

[3] 王云, 王倩. “概率论与数理统计”混合式课堂教学改革研究[J]. 教育教学论坛, 2025, (04): 86-89. DOI: 10.20263/j.cnki.jyxxlt.2025.04.019.

[4] 程燕, 李国望, 王振伟. 基于 OBE 理念的“概率论与数理统计”模块化教学改革探新[J]. 应用型高等教育研究, 2024, 9(03): 64-69.

[5] 潇潇. 国际学生流动背景下“一带一路”来华留学教育发展及其启示[J]. 齐齐哈尔大学学报(哲学社会科学版), 2021, (10): 184-188. DOI: 10.13971/j.cnki.cn23-1435/c.2021.10.045.

[6] 翟雯. “一带一路”背景下高等院校工科专业来华留学生教学管理的问题和对策[J]. 中国多媒体与网络教学学报(上旬刊), 2021, (03): 73-75.

[7] 李刚. 高等数学中外学生混合编班同堂授课协同培养的全英文教学模式的探讨[J]. 教育现代化, 2019, 6(79): 17-20. DOI: 10.16541/j.cnki.2095-8420.2019.79.007.

[8] 毕慧颖, 陈华. 近十年来华留学生跨文化适应研究: 回顾与展望[J]. 文化创新比较研究, 2024, 8(36): 153-157.

[9] 高波. 大数据背景下基于问题驱动的统计学教学设计[J]. 大学, 2024, (35): 94-97.

[10] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计(第四版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.

数字教学新篇章，立体几何迷雾散——VR 技术支持下的高中数学立体几何直观教学思考与实践

李庭洲

汕头市新溪第一中学，广东 汕头 515000

DOI:10.61369/ASDS.2025040010

摘 要： 立体几何教学中空间思维能力的培养长期受限于传统教具的静态呈现与单向教学模式。研究聚焦虚拟现实技术（VR）与高中数学课程的融合路径，以“简单几何体的表面积与体积”为实践载体，通过构建虚实联动的分层教学场景，破解抽象公式推导与空间想象培养的双重困境。研究证实，VR 技术通过沉浸式交互重塑认知路径，其即时反馈机制使空间想象薄弱学生的公式自主推导成功率有效提升，为教育数字化转型提供实证支撑。

关 键 词： VR 技术；高中数学；立体几何；直观教学；教学效果

A New Chapter in Digital Teaching: Dispelling the Mysteries of Solid Geometry — Reflections and Practices on Intuitive Teaching of Senior High School Mathematics in Solid Geometry with the Support of VR Technology

Li Tingzhou

Shantou Xinxu No.1 Middle School, Shantou, Guangdong 515000

Abstract： In the teaching of solid geometry, the cultivation of spatial thinking ability has long been restricted by the static presentation of traditional teaching aids and the one-way teaching mode. This study focuses on the integration path of virtual reality technology (VR) and senior high school mathematics curriculum. Taking "The Surface Area and Volume of Simple Geometric Solids" as the practical carrier, by constructing a hierarchical teaching scenario with the linkage of virtual and real elements, it breaks through the dual dilemmas of the derivation of abstract formulas and the cultivation of spatial imagination. The research confirms that VR technology reshapes the cognitive path through immersive interaction, and its instant feedback mechanism effectively improves the success rate of students with weak spatial imagination in independently deriving formulas, providing empirical support for the digital transformation of education.

Keywords： VR technology; senior high school mathematics; solid geometry; intuitive teaching; teaching effect

一、VR 技术支持下的高中数学立体几何直观教学的理论基础

习近平总书记指出：“科技创新如同撬动地球的杠杆，总能创造令人意想不到的奇迹。”当前，教育数字化转型已成为全球共识，虚拟现实（VR）技术作为新一代信息革命的代表性成果，正深刻重构数学课堂的认知逻辑与实践路径。^[9]作为一种全新的交互式技术，虚拟仿真技术以其独特的沉浸式、交互式特性，被广泛应用于多个领域，如娱乐、医疗、教育等。在高中数学教学中，虚拟仿真技术的引入打破了传统的教学模式，为学生的学习提供了全新的体验。立体几何是高中数学中的重要内容，也是学生普遍认为较为困难的部分。传统的教学方式主要依赖于教师的讲解和教科书上的图形，但这种方式往往难以让学生直观地理解

立体几何的图形和概念。同时，立体几何作为培养学生空间想象与逻辑思维的核心领域，亟需突破传统教学瓶颈，而 VR 技术的沉浸性、交互性与构想性特征，为破解抽象知识的可视化难题提供了全新可能。

（一）虚实共生：VR 技术的内涵特征与教育潜能

1. 虚实融合：沉浸体验重构认知边界

虚拟仿真技术的优势在于能够创设情境，让学生身临其境地体验数学知识，从而激发学习兴趣。在高中数学教学中，教师可以利用虚拟仿真技术设计各种富有挑战性和趣味性的教学场景，引导学生主动探索、发现和解决问题。VR 技术通过三维建模与动态渲染，将抽象几何图形转化为可观察、可操作的虚拟对象。学生佩戴设备后，可自由旋转多面体、剖切截面，甚至“走入”立体结构内部观察点线面关系。这种沉浸式学习打破了二维平面

作者简介：李庭洲，汕头市新溪第一中学，高中数学一级教师。汕头市龙湖区优秀教师、教学改革先进教师、教育系统优秀共产党员、名师工作室成员。多个课例获教育部部级优课和省、市精品课。参与省、市、区课题多项，三十多篇论文获奖，并有六篇论文发表在不同刊物。

的思维局限，使空间概念的建构从被动想象转向主动探索，契合建构主义“情境－交互－意义生成”的认知规律。^[1]

2. 人机协同：交互反馈优化学习路径

VR 系统支持手势识别与实时反馈，学生可通过拖拽顶点改变几何体形态，或通过手势绘制辅助线验证定理。^[6]例如，在探究线面垂直判定时，系统可即时标注角度与距离数据，引导学生在动态操作中归纳规律。这种“做中学”模式不仅强化了操作技能，更将数学推理过程转化为可视化的思维轨迹。

（二）困局与突破：立体几何教学的现实挑战

1. 抽象壁垒：传统教具的效能局限

当前教学中，教师多依赖静态模型与板书绘图，学生难以理解三维图形的动态变换。例如，圆锥侧面积公式的推导依赖圆台展开过程，但传统教具无法直观展示其连续形变，导致学生仅能机械记忆结论，缺乏对公式本质的深度理解。

2. 技术缺位：师生互动的单向困境

部分课堂虽引入多媒体课件，但仍以单向演示为主。学生被动观看动画，缺乏自主探究机会，空间思维训练流于表面。^[5]同时，动态几何软件的操作门槛较高，教师常因技术整合能力不足而放弃深度应用，导致技术资源闲置。

（三）价值升华：VR 教学的学科意义与社会贡献

1. 素养导向：核心能力的多维培育

VR 教学通过亲身体验深化数学抽象与直观想象素养。例如，在棱柱体积公式探究中，学生可将虚拟棱柱切割重组为长方体，直观感知等积变换原理，从而建立“转化与化归”的数学思想。这种深度认知推动学生从解题技能向学科本质进阶。

2. 资源共享：教育公平的技术赋能

习近平总书记强调：“让亿万孩子同在蓝天下共享优质教育。”VR 技术可突破地域限制，使偏远地区学生同步体验优质教学场景。例如，共享虚拟实验室可让农村学生操作昂贵实体模型，缩小城乡教育资源鸿沟，为教育均衡发展提供技术支撑。

综上所述，“抓创新就是抓发展，谋创新就是谋未来。”VR 技术与立体几何教学的深度融合，不仅是教育手段的革新，更是育人理念的升华。^[10]通过虚实结合的场景建构、人机协同的认知交互、资源共享的公平实践，VR 教学为落实“立德树人”根本任务提供了可推广的智慧方案。

二、VR 技术支持下的高中数学立体几何直观教学的实施策略

习近平总书记指出：“发展新质生产力，教育是基础，科技是关键，人才是根本。”在立体几何教学中，VR 技术的深度应用需以系统性策略为支撑，既要解决教学痛点，又要兼顾技术特性与学科逻辑。通过分层递进的教学设计、动态生成的技术适配以及多维联动的评价体系，VR 技术才能真正成为撬动数学核心素养培育的“智慧杠杆”。

（一）分层递进：教学设计与技术适配的深度融合

1. 分层建模：学情导向的个性化资源开发

基于 TPACK 理论框架，教师需将学生认知水平与 VR 技术特性结合，构建阶梯式教学资源。^[2]例如，针对空间想象能力较弱的学生，设计可拆解的三维几何体交互模块，允许其通过逐层解

剖观察点线面关系；对于高阶思维学生，则开发动态参数调整功能，支持自主探究几何体变式与定理推导。例如，圆锥侧面积公式的探究可设计“动态展开－实时计算”双通道界面，让学生在虚拟操作中同步观察展开图与公式变量的关联性。

2. 动态生成：实时反馈支撑的弹性教学路径

VR 系统应嵌入智能诊断模块，通过手势轨迹捕捉与操作数据分析，即时生成学习反馈。例如，当学生尝试证明线面垂直定理时，系统可依据辅助线绘制角度自动触发错误提示或成功动画，并推送关联知识点微课。这种“操作－反馈－修正”的闭环机制，使教学过程从预设流程转向动态生成，契合“以学定教”的现代教育理念。

（二）立体共建：技术资源与教学场景的协同创新

1. 虚实联动：多模态资源的跨平台整合

开发“VR+ 传统教具”的混合教学模式，将虚拟操作与实体模型结合。例如，在探究棱柱体积公式时，学生可先在 VR 中将虚拟棱柱切割为长方体，再通过 3D 打印模型验证等积变换的物理可行性。^[7]同时，整合 GeoGebra 等动态几何软件，实现二维投影与三维模型的同步联动，帮助学生建立空间与平面的双向思维通道。

2. 云端共享：教育公平的数字化突围

构建区域级 VR 教学资源共享平台，采用“主课堂＋虚拟分课堂”的协同机制。偏远地区学生可通过云端接入重点学校的 VR 几何实验室，实时参与名师指导的协作探究。^[8]例如，在球体截面性质学习中，多地学生可同时操作虚拟解剖刀切割球体，平台自动汇总数据生成截面规律图谱，实现优质资源的无边界共享。

（三）多维联动：师生互动与评价体系的范式重构

1. 协作探究：跨时空的沉浸式学习共同体

设计多人协同 VR 任务，如“立体几何建模竞赛”。学生组队进入虚拟空间，通过手势交互共同搭建复杂几何体，系统实时记录协作轨迹与思维贡献度。例如，在正多面体构造任务中，组员需分工计算顶点坐标、调试旋转角度并验证对称性，教师则化身虚拟引导员，通过空间标注工具进行过程性指导。

2. 智能评价：数据驱动的素养发展图谱

依托 VR 系统采集的操作热力图、问题解决时长及错误类型等数据，构建“空间想象－逻辑推理－创新应用”三维评价模型。例如，系统可自动生成学生探究棱台体积时的思维路径图，标注其从“机械套用公式”到“自主推导转化”的能力跃迁节点，为个性化教学提供精准依据。

综上所述，“抓创新就是抓发展，谋创新就是谋未来。”VR 技术支持下的立体几何教学实施策略，需以“精准适配、协同创新、数据赋能”为核心，在虚实融合中重塑教学范式。通过分层递进的资源开发、立体联动的场景构建、智能驱动的评价革新，VR 技术不仅破解了空间思维的培养困局，更开辟了“五育融合”的数学育人新境界。

三、案例分析：实践探索与成效展示 —— 以“简单几何体的表面积与体积”教学为例

为了具体展示 VR 技术支持下的高中数学立体几何直观教学的过程和效果，本文选取了一个具体的案例进行分析，该案例是

笔者所在任教的高中数学课上进行的，案例主题是“数字教学新篇章，立体几何迷雾散”，以下是该案例的具体描述：

（一）案例背景：破解空间思维培养的现实困局

笔者所在高中数学教研组在教学中发现，传统立体几何课堂长期面临两大难题：其一，学生因缺乏空间动态感知能力，难以理解几何体展开与折叠的转化关系；其二，公式推导依赖抽象想象，导致学习兴趣衰减与思维固化。基于前文所述 VR 技术的虚实融合特性与分层教学策略，教研组以“简单几何体的表面积与体积”为突破口，尝试构建沉浸式、交互化的新型教学场景，旨在通过技术赋能突破认知壁垒，验证理论框架的实践可行性。

（二）案例目的：技术赋能与核心素养的双向提升

本次教学实践聚焦两大目标：一是通过 VR 技术将几何体动态变换具象化，帮助学生从“机械记忆公式”转向“理解数学本质”。^[3] 例如，圆锥侧面积公式的推导需同步观察圆台展开过程与母线长度变化，传统教学中这一过程往往被简化为静态图示。二是探索跨区域协作教学模式，利用云端共享机制打破资源壁垒，例如让城乡学生共同参与虚拟实验室的协作探究，践行“让每个孩子享有公平而有质量的教育”的理念。

（三）案例过程：分层递进的三阶教学探索

1. 虚实联动：动态建模激活空间想象

课前，教师依据学生空间想象能力的差异，开发分层 VR 学习模块。基础薄弱组通过虚拟手柄“解剖”圆柱体，逐层观察底面圆周展开为矩形的动态过程；能力进阶组则自主调整圆锥母线参数，实时对比不同角度展开图的弧长与扇形面积变化。例如，当学生拖动圆锥顶点时，VR 系统同步生成侧面积计算公式变量关系图，直观呈现半径、母线长与面积的比例关联。这种“操作即推导”的体验，使抽象公式转化为可触摸的数学关系。

2. 协作探究：跨空间思维碰撞与验证

课中，教师组织城乡学生通过云端平台进入同一虚拟实验室。任务要求两地学生协作完成棱柱体积公式探究：一组在 VR 中将六棱柱切割重组为长方体，另一组通过 3D 打印实体模型验证体积守恒。过程中，学生发现虚拟切割的精确度影响重组效果，进而理解“等积变换需保证截面平行且等高”的核心条件。系统实时记录操作轨迹并生成热力图，教师据此针对性指导，例如对频繁调整切割位置的小组推送祖暅原理微课，实现“学—做—思”闭环。

3. 智能评价：数据驱动的能力跃迁分析

课后，VR 系统自动生成学习报告。例如，某学生初探圆锥侧面积时反复尝试展开角度，系统判定其存在“扇形弧长与底面圆周等价关系”的理解盲区，随即推送圆台展开动画与阶梯式练习题。同时，平台对比城乡学生操作数据发现：乡村组在虚拟切割任务中表现出更强实操兴趣，但公式迁移能力较弱；城市组则更擅长抽象推理但缺乏耐心验证。教研组据此优化后续教学设计，例如为乡村学生增加公式变式训练模块，为城市学生设计实体模型制作任务，促进能力互补。

（四）案例结果：教学范式重构的多维成效

实践表明，VR 技术支持的教学模式显著提升了学生的参与深度。例如，在圆锥侧面积公式测试中，超八成学生能自主描述展开图与立体间的变量关系，而传统教学模式下该比例不足半数。^[4] 更具突破性的是，一名曾因空间想象薄弱排斥几何学习的学生，在虚拟解剖三棱柱任务中首次完整推导出体积公式，并在学习报告中写道：“原来公式不是魔法咒语，而是立体拆解时的自然发现。”

四、结论

研究表明，VR 技术支持下的立体几何教学通过三重机制实现突破：动态建模系统将圆锥侧面积公式推导过程分解为可视化步骤，使抽象变量关系具象化；云端协作平台构建的跨区域学习共同体，促成城乡学生在棱柱切割任务中形成能力互补；学习行为分析模块建立的“操作轨迹—思维品质”映射模型，为学生提供个性化改进方案。这些发现印证了虚实融合教学环境对空间思维培养的有效性，尤其使传统课堂中的“几何学习困难生”实现认知跃迁。

未来研究需着重解决三大问题：开发轻量化 VR 教学系统以适应县域学校硬件条件，构建“虚拟实验—数学表达”双通道任务防止思维碎片化，建立教师技术素养分级培养体系。正如智能教育发展趋势所示，VR 技术将从教学手段进化为认知中介，其终极价值不在于炫酷体验，而在于通过“感知—操作—反思”的认知闭环，培育具有空间建模能力的数字化人才。教育工作者需把握技术创新与学科本质的平衡点，让虚实融合真正服务于数学核心素养的深层建构。

参考文献

- [1] 朱丽莎.VR 技术在高中数学立体几何教学中的应用研究[J]. 数学教育学报, 2025(01):59–60.
- [2] 秦立川. 虚拟现实技术助力高中数学立体几何直观教学[J]. 现代教育技术, 2024(12):19–20.
- [3] 尤宪超. 基于 VR 技术的高中数学立体几何教学模式创新[J]. 中国教育月刊, 2024(10):33–34.
- [4] 许佳琪.VR 技术支持下的高中数学立体几何教学效果分析[J]. 数学教学研究, 2023(11):45–46.
- [5] 陈枢凌. 基于虚拟现实技术的立体几何教学模式的探究[J]. 基础教育论坛: 综合版, 2019.DOI:10.3969/j.issn.1674–6023.2019.12.068.
- [6] 陈倩. 运用虚拟现实技术辅助高中生学习立体几何研究[J]. 中国教育技术装备, 2022(1):41–44.
- [7] 魏玉蒙. 基于 Unity3D 和 3D Max 的 IVR 系统的设计与开发——以高中立体几何为例[J]. 中小学电教: 综合, 2021(11):3.
- [8] 韩广欣, 吴华君, 周彦伟. 融合学科教学的“VR+ 翻转课堂”教学模式设计研究[J]. 中国医学教育技术, 2021.DOI:10.13566/j.cnki.cmet.cn61–1317/g4.202102015.
- [9] 翁浩彬. 信息技术与高中数学课程深度融合研究[J]. 2024.
- [10] 黄文彬. 信息技术与高中数学课堂教学融合的思考与创新[C]// 第二届教育教学与实践研究论坛. 中国智慧工程研究会智慧教育专业委员会, 2022.

基于 OBE 理念的高级语言程序设计课程教学改革与实践

刘淼, 王海荣, 徐东燕

北方民族大学计算机科学与工程学院, 宁夏 银川 750021

DOI:10.61369/ASDS.2025040011

摘 要 : 《高级语言程序设计》是为计算机学院大一学生开设的一门学科基础课, 旨在通过 C 语言程序设计教学培养学生的计算思维、科学思维、创新思维以及解决具有一定复杂度实际问题的能力, 为后续很多专业课打下坚实基础。课程团队经过多年教学改革实践, 基于 OBE 理念开创并践行了“以思维训练和编程解决复杂问题能力为目标, 工程实践案例为核心、问题链驱动下的教、学、做一体化”的教学模式。针对课程内容与工程应用场景脱节的问题, 在教学内容中分模块递进式融入以专业为背景, 以解决实际问题为导向的工程案例以提升课程内涵; 针对从课程基础知识学习到项目创新实践进阶过程挑战性的问题, 构建问题导向、全案例驱动下的六阶段混合式教学循序渐进地推动学生不断深度学习、强化能力。课程经过了多年改革创新, 较好地解决了教学痛点问题, 学生的思维和能力水平、课程教学目标达成度得以显著提升。

关 键 词 : 高级语言程序设计; 工程实践案例; 问题导向; 混合式教学

OBE-Based Teaching Reform and Practice in Advanced Language Programming

Liu Miao, Wang Hairong, Xu Dongyan

North Minzu University, School of Computer Science and Engineering, Yinchuan, Ningxia 750021

Abstract : Advanced Language Programming is a foundational course for freshmen in the School of Computer Science, aiming to cultivate students' computational thinking, scientific reasoning, innovative mindset, and problem-solving capabilities for complex real-world challenges through C language programming Learning. This course lays a solid foundation for subsequent major courses. Through years of teaching reform practices, the course team has pioneered and implemented a teaching model grounded in the Outcome-Based Education (OBE) concept, characterized by "goals of cultivating thinking skills and programming capabilities for solving complex problems, engineering practice cases as the core, and problem chain-driven integration of teaching, learning, and practice." To bridge the gap between course content and engineering applications, they've incorporated engineering cases linked to majors and real - problem - solving into the curriculum in a modular and progressive way. To ease the challenging transition from basic knowledge learning to project innovation practice, they've built a six - stage blended teaching system driven by problems and full - case methods, enabling students to deepen their learning and enhance their abilities step by step. After years of reform and innovation, the course has effectively solved teaching pain points, significantly improving students' thinking and ability levels, and the achievement of teaching objectives.

Keywords : advanced language programming; engineering practice cases; problem-oriented; blended learning

引言

随着新工科建设的深入推进, 成果导向教育 (Outcome-Based Education, OBE) 理念逐渐成为高等教育改革的重要指导原则。OBE 强调以学生能力达成为核心, 反向设计课程体系与教学环节, 这一理念与教育部《关于加快建设高水平本科教育全面提高人才培养能力的意见》中“强化能力培养, 突出实践导向”的要求高度契合^[1]。然而, 传统《高级语言程序设计》课程因过度聚焦语法细节, 导致学生难以建立系统化的计算思维, 且教学内容与工程实践脱节, 难以满足新工科对复合型人才的需求。为此, 本研究基于 OBE 理念重构课程体系, 以工程案例为驱动, 结合混合式教学模式, 探索从知识传授到能力培养的路径, 旨在破解学生“学用分离”的痛点, 提升其解决复杂工程问题的综合素养^{[2][3]}。

项目 / 基金信息:

1. 2021–2023 年度宁夏回族自治区本科教育教学改革项目, 项目名称: 新工科背景下基于 OBE 理念的计算机类基础课程的教学改革研究与实践, 项目编号: bjg2021056。

2. 2024 年度北方民族大学校级虚拟教研室“高级语言程序设计课程虚拟教研室”。

作者简介: 刘淼 (1983.09–), 副教授, 汉族, 中共党员, 北方民族大学计算机科学与工程学院教师; 研究方向: 计算机应用技术; 邮箱: lm_email@foxmail.com。

一、高级语言程序设计课程教学改革的必要性

高级语言程序设计（C语言）是计算机相关专业大一学生重要的学科基础课，是后面多门专业课的前导课，C语言本身也是一门非常重要的编程语言，是学生后续学习其他编程语言的基石。长期以来，传统讲授型为主的教学模式下，课程教学面临一些亟待解决的实际问题和改革挑战：

（一）课程内容缺乏与专业领域工程应用场景建立联系

本课程内容具有严密的逻辑性和较高抽象性，原有的以大量琐碎语法为主的教学不仅导致效果流于浅表化，更重要的是，从理论知识学习到虚拟例题应用的教学形态，导致学生非常迷茫，所学知识既无法与自己过去的经验世界相连接，又无法与未来专业领域建立紧密联系，难以调动学习和深入钻研的兴趣。

（二）从课程基础知识学习到项目创新实践，学生面临较大的能力进阶挑战

本课程是学生的第一门编程基础课，要较好的达到教学目标，从语法学习—阅读程序—模仿编程—编程解决简单问题—编程解决复杂问题—项目创新实践，过程中需要能力的逐步进阶，学生面对较大的挑战，需要教师在教学设计中巧设脚手架，从问题出发推动学生大量动手实践，循序渐进实现能力提升^[3]。

二、新工科背景下基于 OBE 理念的线上线下混合式教学实践

针对教学中存在的严峻问题，结合人才培养目标以及课程目标，以学生发展为中心，以工程实践案例为载体，案例内容侧重解决专业领域的问题，以真实情境下的“问题链”和“任务链”为主线，构建模块化内容逐层递进、能力与思政相融合、支撑计算机行业高级应用型人才培养的教学内容体系，通过搭建理论世界（传统课程内容）与经验世界（工程案例）和未来世界（项目开发）的教学链接，激发学生的学习热情，培养学生的专业志趣与探索精神；通过创新重构六阶段步进式混合式教学，为引导学生逐步深度思考、探究质疑，培养学生创新性解决复杂问题的能力提供多层支架，通过精确分类学习内容、科学设置学习路径，对不同水平的学习者提供差异化、个性化学习支持^{[4][5]}。教学改革思路见下图1所示。

（一）针对复杂工程问题，基于真实应用场景，重塑教学内容

团队基于多年教学改革实践，以学习科学领域对深度学习相关研究为基础，在教学体系中分模块融入工程实践案例及项目教学，激发学生的探索欲和对专业的兴趣，培养学生在真实情境下深度思考、团队协作、创新性地解决复杂问题的能力以适应新时代国家、社会对计算机行业领域对人才的要求。

内容组织上，为避免学生过度陷入语法细节的学习而无法真正建立程序设计的系统观与整体观，进而无法推演解决复杂问题，团队打破原有多年按照教学单元贯穿知识的方式，将工程案例作为教学核心，围绕案例，知识点“化零为整”，将原有内容（视频、习题、测验等）进行相应地再造、替换或重组，设计了一条与学生思维认知能力进阶过程相对应的“例题奠基—案例核心—项目升华”内容进阶路线。

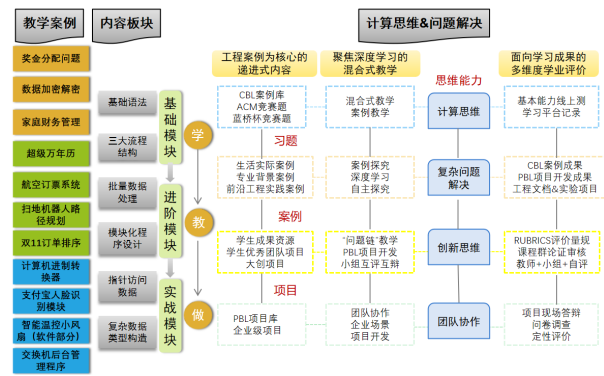


图1 教学改革思路

1. 例题。是对知识点的简单运用，主要是假设情境下的编程题，用于知识巩固和训练基本编程能力及规范。题库的例题按照难度分为一星级、二星级、三星级，供不同水平的学习者从不同起点开始训练。例题并不单独按照知识单元呈现给学生，而是与案例对应的教学视频相配套，用于学习之后的及时巩固及应用训练，最大程度减少学生选择上的盲目性，避免学生陷入重复简单编程训练而无法腾出时间深入钻研挑战性案例任务。

2. 案例。案例是整个教学的核心。包括线上内容的安排、线上线下的衔接、课堂探究的重点、实验任务的安排都是以案例作驱动开展。不同于例题解决单一问题，教学案例综合性、难度较高，要解决的问题是多层次递进的，要求学生深度思考、整合所学知识、不断探索实践，并且结果要求指向一个相对“完美”的解决方案。课程的典型教学案例有三类：（1）解决生活实际问题的案例；（2）解决专业领域问题的案例；（3）工程实践中的案例。如下图2。

整个案例教学的过程是以问题为导向不断推进多个任务达成，直至给出完整程序解决方案，并最终推演出一般性问题的解决方法。在每个内容板块的前面都采用了“真实问题情境导入”形式，引导学生站在开发者角度以问题视角去深入思考、主动探索。多个问题之间环环相扣，逐步深入，形成逻辑密切相关的“问题链”，通过问题链不断给学生“挖坑”并和学生一起“填坑”，螺旋式引导学生深层次的理解问题、分析问题、探究问题和解决问题，进一步从某一案例的分析与解决问题的过程中推演到一般性问题的分析建模，最终达到知识的整合、迁移和创新^[6]。

模块	主要工程案例	映射知识板块	周次	思维与能力
基础模块	奖金分配问题 L	C语言基础语法	1	理解“程序”、计算思维
	数据加密解密 M	复杂数据类型、输入输出格式控制	2	调试与优化
	家庭财务管理小程序 L	三大流程控制结构	3	问题分析与解决
进阶模块	超级万年历 L	数组批量处理数据	4	数据存储
	教务成绩管理系统开发 M	模块化程序设计-1	5	模块化思想
	航空订票系统 E	模块化程序设计-2	6	穷举与迭代
	扫地机器人路径规划 E	指针访问各类数据	7	问题建模
实战模块	双十一订单排序 L	排序算法专题	8	时空效率分析
	计算机进制转换器实现 M	递归算法专题	9	多算法分析类比
	支付人脸识别系统 E	学科前沿-AI专题	10	创新思维
	智能温控小风扇（软件部分）E	学科前沿-AI专题	11	工程思维
	交换机后台管理程序 M	复杂算法分析与设计	12	架构、策略优化

L：解决生活实际问题的案例 M：解决专业领域问题的案例 E：工程实践中的案例

图2 主要教学案例

例题和案例映射的内容全覆盖了整个课程知识体系，案例对

应的全部目标也覆盖了整个课程目标要求的能力点和素养目标。案例与案例之间在一些难点板块上有很多交叉重复，一方面确保学生多次运用真正攻克难关，另一方面训练学生在不同问题场景下能综合运用所学知识给出解决方案，如图3。

3. 项目。所有案例教学结束之后，留有三周时间课程设计，学生以原有小组形式进行各组自主选题，在团队教师指导下开发具有一定复杂度的可以推广应用的综合项目。

从例题到案例最后到团队合作完成项目，以学生发展为中心，引领学生逐步构建程序设计的系统观与整体观，建立计算思维，提升解决复杂问题的能力、创新能力以及团队合作能力。

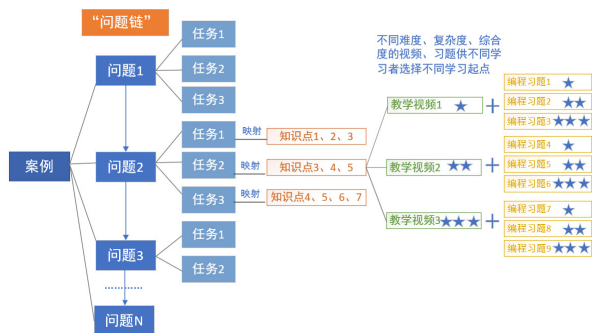


图3 问题链、任务链驱动下的案例线上资源组织形式

（二）聚焦深度学习，实践案例驱动，重构教学过程

教学团队聚焦学生深度学习，以培养学生计算思维、创新精神和团队协作能力以及提升深度思考的能力和解决复杂问题的能力为目的，构建问题导向、全案例驱动下的六阶段混合式教学，实施从习题到案例最后到项目开发的多层次递进式教学实践，循序渐进推动学生不断深度学习、举一反三、由现象及本质，将所学知识逐步转化为计算思维和解决问题的能力。

以布鲁姆认知规律和建构主义为理论依据，重构了包括：从线下案例引入与问题提出、线上在线学习与储备知识，到线下案例探究与问题分析、线上巩固拓展与强化概念，再到线下实践应用与问题解决，最后到知识迁移与升华创新的六阶段混合式教学模式，如图4。

1. 案例引入、问题提出。从专业相关背景、科研工程实践或生活实际引出案例，交代相应背景，提出真实要解决的问题，根据问题拆解工作任务，阐述工作（教学）目标，并说明涉及的知识、概念以及学习路线。

2. 在线学习、储备知识。学生线上学习该案例对应的教学资源，包括观看教学视频和编程习题巩固训练，按照综合程度、知识密度、复杂度分类，教学视频和对应习题都有一、二、三星之分，不同能力学习者可以选择不同的学习起点和不同学习路径，基础水平学习者从最简单逐步到难去学习，花更多时间在基础认知及巩固上，学霸则可以直接从综合应用编程学起，逐步深入，时间更多花在思考和解决挑战性任务群上。

3. 案例探究、问题分析。围绕案例，教师不断提出层层深入的问题，以启发式引领学生深入探索，推动小组探究，过程中互相交流碰撞、互评互辩，设计出初步算法。

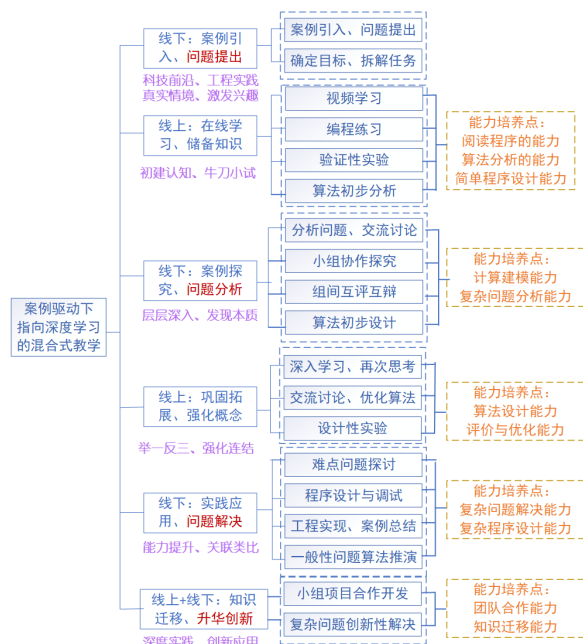


图4 案例驱动下指向深度学习的混合式教学

4. 巩固拓展、强化概念。该案例第二阶段线上学习，学生进一步深入钻研，尝试对本知识模块复杂问题求解，并进一步优化前阶段初步设计出来的算法。

5. 实践应用、问题解决。依据上一阶段得出的最优算法进行程序设计实现、调优，突破难点。进行案例总结评价、举一反三，进行一般性问题推演。

6. 知识迁移、升华创新。学生小组在整学期多个案例的分析问题、解决问题的教学实践中思维和能力得到了较大提升，最后课程设计阶段，自主选题、团队协作，进行综合项目开发。这一阶段，不仅仅需要灵活综合运用前面所学知识，更需要自主学习课外知识，创新性地解决项目中遇到的问题，在整个小组项目开发过程中，团队教师全程技术指导、进度监督、并进行过程性记录与评价。小组项目的开展如下图5。



图5 项目开发全过程

三、线上线下混合式教学改革效果

近五年教学团队深入调研学情、分析问题，进行了系统的教学内容、方法与评价上的联动改革，成效较为显著。

（一）学生的思维能力水平显著提升

下图6为课程近五年课程考核情况统计，课程自2018年纳入我院工程教育认证专业核心课建设系列，按照新工科对人才要求，课程突出学生能力的培养与考核评价，学生在学期内对十多个工程案例给出完整解决方案，从案例分析报告到算法分析设计、再到编程实现以及测试调优，从案例过渡到课程设计阶段开发规模较大具有推广应用价值的项目，能力提升显著。依据我专业工程教育认证自评报告中对近五年课程目标达成度分析数据显

示, 学生解决复杂问题的能力目标达成度逐年提升^[7]。(课程目标简要: CO1: 基础认知与能力 CO2: 计算思维与解决复杂问题的能力 CO3: 团队协作及创新精神, 目标达成度 = 该目标实际平均分 / 目标分值)

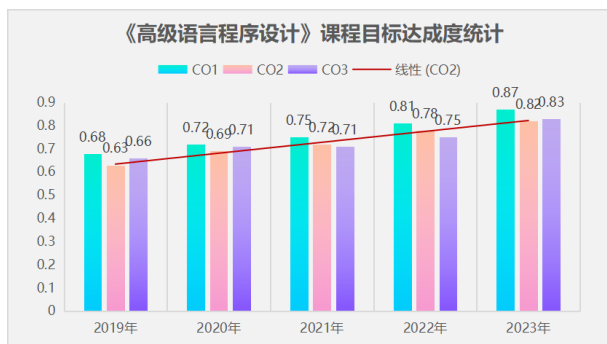


图6 课程目标达成度

（二）课程学习为学生和教师发展赋能

自课程教学改革创新以来, 学生在参加程序类学科竞赛中, 表现优异。特别是在蓝桥杯全国软件和信息技术专业人才大赛、ACM 国际大学生程序设计竞赛、宁夏工业 APP 创新应用大赛以及全国“互联网+”创新创业大赛等这类跟课程直接相关的赛事上, 参赛人数以及逐年上升, 越来越多的学生对自己的程序设计能力提升自信, 在后续的课程学习中表现卓越, 从教务处评教数据显示出, 学生对该门课的获得感、满意度大大增强。依据学院

计算机科学与技术专业工程教育认证自评报告统计显示, 学科竞赛参加人数以及获奖人数逐年走高, 近五年教学团队获优秀指导教师奖励共六十余项。

团队在课程内容中融入学科前沿知识, 鼓励学生加入教师指导的创新创业团队, 参与教师科研创新, 并引导学生组建团队申报创新创业项目、尝试解决实际企业问题, 促进产学研相结合。近年来, 在团队教师引导下, 学生在本课程学习基础上, 申报立项相关创新创业项目、申请专业、软件著作权登记数逐年增多。

（三）课程满意度及教学质量评价高、学生获得感强

学生对课程的满意度认可度较高, 知识能力获得感强。学校领导、督导、同行以及学生给课程的教学质量评价分值在全学院排名多年来维持在前三名。

四、结束语

本研究基于 OBE 理念构建的“案例驱动、问题导向”混合式教学模式, 显著提升了学生的计算思维与工程实践能力。通过分阶段递进的案例设计与多元评价体系, 学生不仅能够灵活运用 C 语言解决复杂问题, 还在学科竞赛和创新创业项目中取得突破性成果。未来将进一步优化案例库的跨学科融合度, 探索人工智能技术辅助下的个性化学习路径, 推动课程改革向更深层次发展, 为新工科人才培养提供可复制的实践经验。

参考文献

- [1] 教育部高等教育司. 关于加快建设高水平本科教育全面提高人才培养能力的意见 [J]. 中国高等教育, 2018(24): 45-46.
- [2] 吴秋凤, 李洪侠, 沈杨. 基于 OBE 视角的高等工程类专业教学改革研究 [J]. 教育探索, 2016, (05): 97-100.
- [3] 李美珊, 张宏, 于莉莉, 等. OBE 理念下 C 语言程序设计一流课程建设实践研究 [J]. 电脑知识与技术, 2023(12): 136-138, 142.
- [4] 黄炳超. 基于能力培养的应用型本科实践教学体系构建 [J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(5): 164-168.
- [5] 谢红梅, 周勇, 陆荣. 工程化课程教学探索研究——以“C 语言程序设计”课程为例 [J]. 工业和信息化教育, 2021(1): 48-52, 57.
- [6] 周晓清, 李宏, 叶安胜. 任务驱动式项目案例教学法在课程教学改革中的探索与实践 [J]. 实验科学与技术, 2018, 16(4): 101-106.
- [7] 吴家洲, 张胜, 刘君. 基于 OBE+PDCA 的 C 语言课程教学改革 [J]. 计算机教育, 2023(2): 192-197.

数据整合驱动的极大似然估计教学改革探索 ——以转录动力学建模为例

杨喜艳¹, 王子豪², 吴亚豪¹

1. 广东金融学院金融数学与统计学院, 广东 广州 510521

2. 中山大学数学学院, 广东 广州 510275

DOI:10.61369/ASDS.2025040012

摘 要 : 极大似然估计 (MLE) 是统计推断中的核心方法, 广泛应用于生命科学数据建模。随着现代生物技术的发展, 实验数据呈现多样化特征, 如何有效整合不同类型的数据以提高 MLE 准确性, 已成为统计建模与生命科学交叉研究中的重要问题。本文以转录动力学为例, 探讨如何通过整合 nascent RNA 表达数据与转录启动时间数据, 精确估计随机动力学模型中的关键参数, 以增强学生对数据驱动建模的理解, 为相关课程的教学改革提供思路。

关 键 词 : 数据整合; 极大似然估计; 转录动力学建模

Exploring of Teaching Reform of Maximum Likelihood Estimation Driven by Data Integration: A Case Study in Transcription Dynamics Modeling

Yang Xiyan¹, Wang Zihao², Wu Yahao¹

1. School of Financial Mathematics and Statistics, Guangdong University of Finance, Guangzhou, Guangdong 510521

2. School of Mathematics, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275

Abstract : Maximum likelihood estimation (MLE) is a fundamental method in statistical inference and is widely used in life science data modeling. With the advancement of modern biological technologies, experimental data increasingly exhibit diverse characteristics. Effectively integrating different types of data to improve the accuracy of MLE has become an important issue in the interdisciplinary research combining statistical modeling and life sciences. This paper uses transcription dynamics as a case study to explore how the integration of nascent RNA expression data and transcription initiation timing data can enable precise estimation of key parameters in stochastic dynamical models. The approach enhances students' understanding of data-driven modeling and provides new perspectives for teaching reform in related courses.

Keywords : data integration; maximum likelihood estimation; transcriptional dynamics modeling

引言

随着现代生物技术的发展, 尤其是在分子水平上的基因表达研究中, 实验数据的复杂性和多样性呈现出前所未有的挑战^[1,2]。在转录动力学研究中, 传统的基于稳态基因表达数据单一数据的建模方式已经无法全面捕捉真实的转录过程^[3]。随着单分子成像技术的发展, 从影像数据中能够获得表征动态转录过程的时间序列数据, 这为深入分析转录调控机制提供了新机遇。然而, 如何从时间序列数据中提取并有效整合不同类型的数据, 提升极大似然估计的准确性和模型的识性, 仍然是当前统计建模中的重要难题。在传统的 MLE 教学中, 学生通常仅通过单一数据来推断模型参数, 缺乏对数据整合与模型复杂性关系的深入理解。因此, 本文提出将数据整合的理念引入统计推断课程的教学改革与实践中, 利用转录动力学作为真实科研案例, 让学生理解不同类型的数据在模型构建中的作用, 并掌握如何通过联合似然函数精确推断转录动力学模型中的关键参数。此举不仅帮助学生提高统计推断能力, 更通过案例教学引导学生理解科研创

基金项目:

2022年度广东金融学院校级教学质量与教学改革工程项目: 课程思政理念下概率论与数理统计的教学改革与实践 (项目编号: 23);

广东省教育科学规划课题 (高等教育专题): OBE 理念下“大学数学”问题驱动下的启发式教学模式实践研究 (项目编号: 2024GXJK590)。

作者简介:

杨喜艳 (1983—), 女, 湖南邵阳人, 副教授, 研究方向: 计算生物学与生物统计;

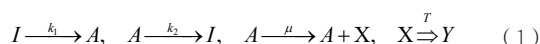
王子豪 (1993—), 男, 山西晋城人, 副教授, 研究方向: 计算生物学与生物信息学;

吴亚豪 (1978—), 男, 湖北黄冈人, 讲师, 研究方向: 动力系统。

新与学科交叉的重要性,从而实现课程思政与专业知识教学的有机结合。同时,结合启发式教学模式,通过引导式问题设计与学生自主探索,激发其对统计推断背后逻辑的深入思考。通过这种方式,学生不仅能够掌握数据整合下 MLE 的基本原理与方法,更能树立科学探索的责任感和使命感,培养其对多学科交叉学科问题的理解与解决能力。这种教学模式为大数据时代下的教学改革提供了新的思路,推动学生综合能力的提升。

一、研究背景与方法

为了说明极大似然估计在生命科学中建模的应用,这里我们考虑分子水平上的基因转录。转录是一个复杂的过程,其中涉及到两个关键的阶段:启动和延伸,每一个阶段在基因表达的研究中起着非常重要的作用^[4,5]。数学建模为理解基因表达的统计特征如何从转录的分子机制中产生,提供了一种潜在的途径。目前已经发展出许多的随机基因表达的模型,其中应用最为广泛的是两状态电报模型,该模型用生化反应描述如下:



在方程(1)中, I 和 A 分别表示基因启动子非活性态和活性态, X 表示 nascent RNA, Y 表示 mature RNA。其中第一个反应描述了基因启动子以速率 k_1 从非活性态 I 切换到活性态 A , 第二个反应描述了基因启动子以速率 k_2 从活性态 A 切换到非活性态 I , 第三个反应表示在活性态时以速率 μ 合成 nascent RNA, 最后一个反应表示 nascent RNA 以时间 T 延伸变为 mature RNA。注意到(1)中每一个反应的发生都是随机的。

为了从时间序列数据中分析转录启动事件,首先需要确定启动时间分布。记 $P_1(t)$ 和 $P_2(t)$ 表示 t 时刻启动子驻留在非活性态和活性态的概率,并且记 $\mathbf{P}(t) = (P_1(t), P_2(t))^T$ 表示列向量。此外,定义启动矩阵 $\mathbf{A}_{ini} = (A_i)$, 其中 $A_{11} = -k_1$, $A_{12} = k_2$, $A_{21} = k_1$, $A_{22} = -(k_2 + \mu)$, 则我们可以写出如下的主方程

$$\frac{d\mathbf{P}(t)}{dt} = \mathbf{A}_{ini} \mathbf{P}(t), \quad (2)$$

其中初值 $\mathbf{P}(0) = (P_1(0), P_2(0))^T$ 。则方程(2)的解可表示为 $\mathbf{P}(t) = e^{\mathbf{A}_{ini}t} \mathbf{P}(0)$, 则可得启动时间分布的概率密度函数

$$f_{ini}(t) = \mathbf{u}_{ini} \mathbf{P}(t) = \mathbf{u}_{ini} e^{\mathbf{A}_{ini}t} \mathbf{P}(0), \quad (3)$$

其中 $\mathbf{u}_{ini} = (0, \mu)$ 。为了求得 $f_{ini}(t)$ 的显示表达, 对方程(3)两边取拉普拉斯变换

$$\tilde{f}_{ini}(s) = \mathbf{u}_{ini} (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_{ini})^{-1} \mathbf{P}(0). \quad (4)$$

通过代入已知量, 可得模型(1)的拉普拉斯变换的显示表达

$$\tilde{f}_{ini}(s) = \frac{\mu s + k_1 \mu}{s^2 + (k_1 + k_2 + \mu)s + k_1 \mu}, \quad (5)$$

则特征方程 $s^2 + (k_1 + k_2 + \mu)s + k_1 \mu = 0$ 的根

$$\begin{aligned} -\lambda_1 &= \frac{-(k_1 + k_2 + \mu) - \sqrt{(k_1 + k_2 + \mu)^2 - 4k_1 \mu}}{2}, \\ -\lambda_2 &= \frac{-(k_1 + k_2 + \mu) + \sqrt{(k_1 + k_2 + \mu)^2 - 4k_1 \mu}}{2}. \end{aligned} \quad (6)$$

对方程(5)两边求逆拉普拉斯变换, 得启动时间分布

$$f_{ini}(t) = c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t}, \quad (7)$$

其中系数

$$c_1 = \frac{\lambda_1(\mu - \lambda_2)}{\lambda_1 - \lambda_2}, \quad c_2 = \frac{\lambda_2(\lambda_1 - \mu)}{\lambda_1 - \lambda_2}. \quad (8)$$

接下来我们给出模型(1)中 nascent RNA 稳态分布的计数分布, 具有如下形式

$$P(M=m) = \begin{cases} C_{1,1,m} e^{-\lambda_1 T} + C_{2,1,m} e^{-\lambda_2 T} & m=0 \\ \sum_{k=0}^m \frac{T^{m-k} (C_{1,k,m} e^{-\lambda_1 T} + C_{2,k,m} e^{-\lambda_2 T})}{(m-k)!}, & m \geq 1 \end{cases} \quad (9)$$

(9)的具体计算过程, 可参考文献^[6]。

二、基于数据整合的极大似然推断

(一) 模拟数据产生

为了探讨数据整合的方法在极大似然估计中的有效性, 我们使用模拟数据验证。假设模型(1)中生化反应的参数从一个大的参数空间产生

$$(k_1, k_2, \mu, T) \in [U(0.01, 10), U(0.01, 10), U(0.01, 50), U(1, 500)] = \Theta, \quad (10)$$

其中 U 表示均匀分布的随机变量。一旦参数被选中, 我们利用随机模拟算法产生一条长 10^6 s 的时间序列^[7], 通过记录相邻两次连续启动事件发生的时间间隔来收集启动时间的数据; 以及通过均匀采样收集 nascent RNA 的数据。

(二) 算法步骤

记 $P(\tau, m; \theta)$ 表示启动时间数据和 nascent RNA 数据的联合分布, 其中 $\theta = (k_1, k_2, \mu, T)$ 表示要估计的参数向量。为了方便, 我们限制最优参数的搜寻区域与(10)中相同。接下来, 我们定义联合似然函数 $L(\theta) = \prod_{i,j} P(\tau_i, m_j; \theta)$, 其中 τ_i 表示第 i 个启动时间数据, m_j 表示第 j 个 nascent RNA 计数的数据。我们采用无梯度优化算法寻找极大似然估计的参数^[8]

$$\theta^* = \arg \min_{\theta \in \Theta} \left(-\sum_{i,j} \ln P(\tau_i, m_j; \theta) \right) \quad (11)$$

这里负对数似然的最小化等价于似然的最大化。假设模型(2)中转录启动事件和延伸事件的相互独立, 相应地, 联合分布可假设为两个边缘分布的乘积, 即 $P(\tau, m; \theta) = f_{ini}(\tau; \theta) P(m; \theta)$ 。则优化问题变为

$$\theta^* = \arg \min_{\theta \in \Theta} \left(-\left(\sum_i \ln f_{ini}(\tau_i; \theta) + \sum_j \ln P(m_j; \theta) \right) \right), \quad (12)$$

其中 $f_{ini}(\tau; \theta)$ 和 $P(m; \theta)$ 分别由方程和给出。

为了比较, 我们也给出仅采用 nascent RNA 数据推断方法,

此时优化问题变为

$$\theta^* = \arg \min_{\theta \in \Theta} \left(-\sum_j \ln P(m_j; \theta) \right), \quad (13)$$

为了方便, 我们把(12)和(13)中的方法分别称为整合数据推

断方法和单一数据推断方法。在每一次推断中，当似然值收敛到某个最大值时，优化算法终止。在本文中，我们约定当迭代次数超过5000次时，算法将被停止运行。

(三) 推断结果

下面比较两种方法的推断效果。根据 (10) 中参数 k_1, k_2, μ, T 的取值空间，我们选取两组代表性的参数：第一组参数中，模型 (1) 的 nascent RNA 的稳态分布呈单峰分布；第二组参数中，模型 (1) 的 nascent RNA 的稳态分布呈双峰分布。图 1 展示了两种方法的推断结果。从图 1A 与 C 中可以看到，在这两组参数下，两种推断方法均能很好地拟合模拟数据的 nascent RNA 的稳态分布。然而，两种推断方法中启动时间的分布的推断有着明显的差异。从图 1B 与 D 中可以看到，数据整合的推断方法中的启动时间分布能够很好地拟合模拟数据的结果，而单一数据的推断方法中的启动时间分布极大地偏离了模拟数据的结果。此外，表 1 列出了模型的真实参数值，以及两种方法估计得到的参数值。可以看到，仅在采用数据整合方法时，推断出的参数与真实值高度一致；而用单一数据方法时，参数的估计值与真实值能够达到数量级的差异。总的来说，图 1 和表 1 说明，基于单一的 nascent RNA 计数数据推断时，会造成模型参数的不可识别，而用整合数据推断时，显著提升了模型参数的可识别性和推断的准确性。

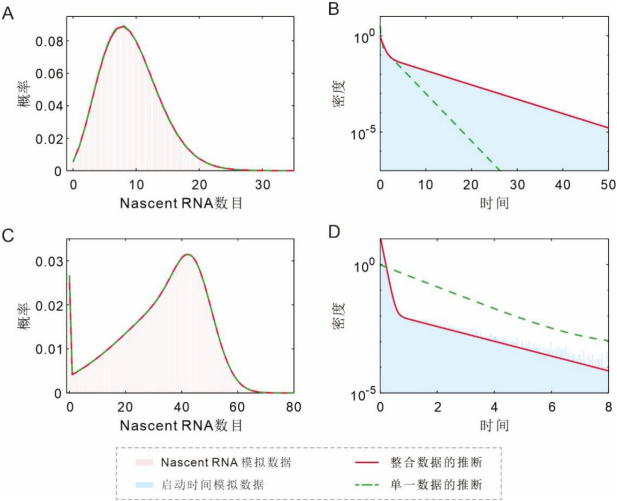


图 1 两种推断方法在 nascent RNA 稳态分布和启动时间分布推断中的对比结果

表 1 模型真实参数与两种推断方法估计值的对比

图 A-B	参数		k_1	k_2	μ	T
	模型使用参数		0.315	0.626	0.918	29.5
	模型 估计 参数	整合数据推断	0.31390	0.62072	0.91762	29.532
		单一数据推断	1.06876	2.29408	3.17266	9.0585
图 C-D	参数		k_1	k_2	μ	T
	模型使用参数		0.673	0.247	12.5	3.65
	模型 估计 参数	整合数据推断	0.67565	0.24905	12.4557	3.67277
		单一数据推断	0.052418	0.019282	0.97211	47.4379

三、结论与展望

本研究以转录动力学建模为例，展示了在极大似然估计中引入数据整合的优势。通过将 nascent RNA 表达数据与转录启动时间数据联合建模，显著提高了参数估计的准确性。这一结果不仅在研究上验证了数据整合的有效性，也在教学上为极大似然估计方法的教学改革提供了新的视角。传统极大似然估计教学中，往往侧重于基于单一类型数据进行参数估计，忽视了现实中数据的多样性与复杂性。本文中图 A 与图 B 所示结果清楚表明，仅依赖 nascent RNA 数据会导致严重的偏差。相比之下，整合 nascent RNA 数据和启动时间数据显著改善了模型参数的可识别性。因此，在教学中应引导学生理解数据多样性对建模结果的重要影响。

通过对科学研究问题的探讨，学生能够理解如何从不同类型的数据中构建联合似然函数，以及如何整合不同类型的数据进行推断，这种教学方式将比单纯公式推导更贴近科学研究实际，能够提高学生的数据驱动建模能力的培养。在教学过程中，结合科研实例引导学生思考生命科学背后的社会价值，如基因调控研究对于疾病理解、治疗策略设计的意义，有助于增强学生的科学责任感和社会使命感。这也为实现“课程思政”提供了自然融入的切入口，让学生在掌握专业知识的同时树立正确的科学观与价值观。该教学改革实践亦体现了 OBE 理念中“以学为中心”的启发式教学思路，通过具体问题引导学生主动思考与探索，在理解知识的同时提升其建模能力与综合素养。

参考文献

[1] Pichon X, Lagha M, Mueller F, Bertrand E. A growing toolbox to image gene expression in single cells: Sensitive approaches for demanding challenges. Mol Cell. 2018;71(3):468 - 480.

[2] Acosta J N, Falcone G J, Rajpurkar P, et al. Multimodal biomedical AI. Nature Medicine, 2022, 28(9): 1773-1784.

[3] Nicoll A G, Szavits-Nossan J, Evans M R, et al. Transient power-law behaviour following induction distinguishes between competing models of stochastic gene expression[J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 2833.

[4] Haberle V, Stark A. Eukaryotic core promoters and the functional basis of transcription initiation. Nat Rev Mol Cell Biol. 2018;19(10):621 - 637.

[5] Aoi Y, Shilatifard A. Transcriptional elongation control in developmental gene expression, aging, and disease. Mol Cell. 2023;83(22):3972 - 3999.

[6] Yang X, Wang, Z, Shi C, Zhou T, Zhang J. Deciphering HIV-1 transcription initiation and elongation from single-molecule imaging data. Research. 2025; 8: 0645.

[7] Fu X, Zhou X, Gu D, Cao Z, Grima R. DelaySSAToolkit.jl: Stochastic simulation of reaction systems with time delays in Julia. Bioinformatics. 2022;38(17):4243 - 4245.

[8] Feldt R. BlackBoxOptim.jl. GitHub. 2019. [accessed 20 Dec 2023] <https://github.com/robertfeldt/BlackBoxOptim.jl>

统计学课程中“数据－政策－价值观”思政教学模式的创新实践研究

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.2025040013

摘要： 本文针对应用型本科高校统计学课程思政建设中存在的“技术工具”与“价值引领”脱节问题，提出了一个“数据驱动决策—政策逻辑阐释—价值观内化践行”三位一体的教学模式。该模式通过线上资源支持与线下高阶训练相结合的混合式教学设计，以及量化验证与质性评估相结合的多元化评价体系，实现了经济数据与政策案例的深度融合，并解析了“有效市场与有为政府”政策协同的内在逻辑。实践结果表明，学生在高阶任务的完成率由10%显著提升至89%，在课后反思中，“国家战略”政策关键词的提及频率增加了3.2倍。此外，学生基于课堂内容撰写的两篇经济类实证论文已在期刊上公开发表，从而形成了“课堂建模—政策优化—社会反馈”的良性循环。该模式为经济管理类课程思政建设提供可复制的实践范式。

关键词： 统计学；课程思政；数据驱动决策

Research on the Innovative Practice of "Data-Policy-Values" Ideological And Political Teaching Mode In Statistics Courses

Chen Xiqiang, Ouyang Qin*

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

Abstract： This paper addresses the issue of disconnection between "technical tools" and "value guidance" in the ideological and political education (IPE) of statistics courses at applied undergraduate universities. It proposes a three-pronged teaching model: "data-driven decision-making, policy logic explanation, and value internalization and practice." This model combines online resource support with offline advanced training, and integrates a diversified evaluation system that combines quantitative verification with qualitative assessment. It achieves a deep integration of economic data and policy cases, and elucidates the intrinsic logic of the synergy between "efficient markets and a proactive government" policies. Empirical research shows that the completion rate of high-level tasks has significantly increased from 10% to 89%. In post-class reflections, the frequency of mentioning "national strategy" policy keywords has increased by 3.2 times. Additionally, two empirical papers on economics written by students based on classroom content have been published in journals, forming a positive cycle of "classroom modeling, policy optimization, and social feedback." This model provides a replicable practical paradigm for IPE in economic management courses.

Keywords： statistics; ideological and political education in courses; data-driven decision making

引言

党的二十大报告将“实施科教兴国战略，强化现代化建设人才支撑”确立为重要战略部署，提出坚持教育优先发展、科技自立自强、人才引领驱动，加快建设教育强国、科技强国、人才强国，坚持为党育人、为国育才，全面提高人才自主培养质量。在此战略指引下，中共中央、国务院于2025年1月印发了《教育强国建设规划纲要（2024—2035年）》，进一步强调“加强和改进新时代学校思想

基金项目：

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》（BYZY202404）；

广东白云学院课程思政示范课程培育项目《统计学》（BYSZ202407）；

广东白云学院“应用经济学”重点学科建设的阶段性研究成果。

广东省教育评估协会课题《应用型本科高校实践教学质量体系研究》（BDPG23111）。

作者简介：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、区域经济、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。

政治教育”。2025年2月广东省教育工作会议进一步部署“将新时代伟大变革案例深度融入思政教育，推动知识传授与价值引领的有机统一”的实践方案。政策体系的持续完善为深化教育改革提供了坚实的制度保障。作为一门集方法论与实践性于一体的学科，统计学的课程思政改革是教育现代化进程中的必然要求，同时也是响应国家战略需求的重要抓手。

然而，当前应用型本科高校统计学课程思政建设面临严峻挑战：一方面，数字经济时代对数据分析人才的需求激增，要求学生不仅掌握统计工具，还需具备“用数据服务国家战略”的使命感；另一方面，传统教学模式主要局限于“技术训练”阶段，难以有效地将“创新驱动发展”“全国统一大市场”等国家战略融入教学内容。探讨统计学课程中思政教育的“技术工具”与“价值引领”之间的断裂问题，并寻求有效的解决策略，已成为当前亟需解决的关键议题。

一、研究现状与存在问题

在经济管理领域，统计学课程思政的现有研究文献，主要关注于“技术伦理化”和“案例价值化”的构建。学者们从理论构建、模式创新到技术融合等多维度进行探索。赵庆华^[1]等提出应强化跨学科协同，培养专业技能与价值担当的人才；饶欣等^[2]强调应围绕“知中国、爱中国”的育人目标，嵌入国家战略案例。潘欣欣^[3]和王丽敏等^[4]提出通过将“教”“学”“做”环节有机结合促进知识、能力与价值观的融合；郭泽英等^[5]设计了“混合式教学+课程思政”模式，推动统计学课程的技术性与价值性的深度融合。黄思博雅等^[6]指出应在统计调查与数据分析环节挖掘思政元素；鄂慧芳^[7]主张利用科学知识图谱优化教学设计。张娟^[8]以“卡方检验”为切入点，验证课程思政的育人成效；王丽敏等^[9]、冯可可^[10]和闫兰香^[11]构建“三位一体”思政课程体系，将思政考核融入过程性评价。然而，现有研究存在局限：一是“数据—政策”逻辑链断裂，缺乏政策效能量化设计；二是价值观内化路径单一，依赖教师单向输出；三是评价维度失衡，忽视对思政目标的量化评估。

这一研究不足直接导致教学实践陷入三重困境：

（一）技术性与价值性脱节

学生在掌握 SPSS 等分析工具进行描述性统计、方差分析、回归分析（例如斜率的计算）方面表现出熟练性，然而，他们往往无法将这些技能与“创新驱动发展战略”的政策逻辑相结合，从而导致了和技术理解深刻而对使命认识不足的认知偏差。

（二）实证性与导向性失衡

当前，教学案例研究主要集中在医学、教育等学科的应用领域，对于“共同富裕”“科技自立自强”等国家战略议题的探讨相对不足，这在一定程度上限制了对学生家国情怀的培养和激发。

（三）评价体系单一化

课程考核侧重统计学知识点、计算能力、实操方面，忽视对学生“政策解读能力”“战略建言意识”的评估，导致思政目标流于形式。本文以统计学课程一元线性回归章节调研为例，共发放问题87份，回收87份，根据数据结果显示，75%的学生能正确构建一元线性回归模型，但仅10%能结合区域经济数据提出撰写《区域创新效能诊断报告》；80%的作业未提及“有为政府”“有效市场”等国家治理关键词。这一现状暴露了统计学课程思政问题的本质在于：经济管理类统计学课程尚未构建“数据—政策—

价值”的闭环逻辑，工具理性挤压价值理性，致使“数据有结论、政策无回声、使命难落地”。

针对上述这些问题，本文提出“数据—政策—价值观”三位一体的统计学思政教学创新模式，探讨以统计方法论为桥梁，将国家战略具体化为“可操作、可量化、可迁移”的教学内容，是破解“工具理性挤压价值理性”困境的关键所在。

二、“三位一体”课程思政设计与实践

（一）思政育人目标融入统计学课程教学模式

针对上述统计学课程思政的“两张皮”困境，本文构建“数据驱动决策—政策逻辑阐释—价值观内化践行”三位一体的统计学课程思政创新模式（见图1）。

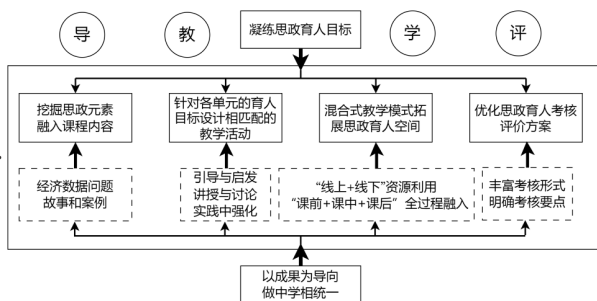


图1 “三位一体”的统计学课程思政创新模式

其设计逻辑在于：以经济数据与政策案例的双向嵌入重构教学内容，例如通过基尼系数分析区域差异、结合碳排放强度评估“双碳”政策成效，实现统计学方法与思政元素的有机融合；在此基础上，创新构建“线上资源支撑—线下高阶训练”的混合式教学模式，利用国家统计局数据库、政策白皮书等线上资源夯实数据基础，依托“战略诊断报告”“大学生创新训练项目”等线下实践深化价值认同，拓展思政育人的时空维度；最终，通过“量化验证技术能力—质性评估价值内化”的多元评价体系破解传统考核困境，将模型准确性、政策报告质量等量化指标与使命感自评量表、课堂讨论深度等质性标准相结合，形成知识传授、能力培养与价值引领的闭环反馈机制。

（二）“课前—课中—课后”三阶段递进教学流程设计

本研究以某应用型本科高校统计学课程为实践载体，围绕“数据驱动决策—政策逻辑阐释—价值观内化践行”的育人逻辑，构建“课前数据锚定—课中战略解码—课后使命延伸”的闭环教

学流程（见图2）。

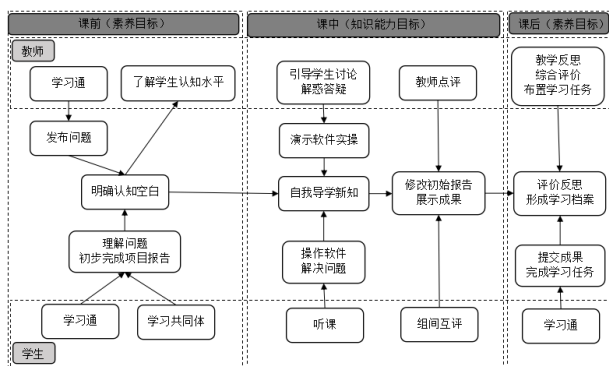


图2 “三位一体”模式的教学流程图

该流程依托混合式教学模式，通过“素养目标（课前）→知识能力目标（课中）→素养目标（课后）”的螺旋递进路径，驱动学生从数据工具使用者向战略建言者角色进阶。以一元线性回归单元为例：

1. 课前：数据驱动与政策场景锚定

课前阶段聚焦数据驱动与政策关联的初步构建。教师端通过“学习通”平台发布预习任务，例如要求学生清洗“2022年各省研发经费与研发经费（X）与高新技术产业产值（Y）”数据，并基于学生提交的初始报告识别认知盲区，以了解学生对“政策敏感度”的理解偏差。同时整合国家统计局数据库、政策文件等资源，构建“数据-政策”对应关系匹配任务，例如，通过数据标注技术揭示历届三中全会政策节点与相关事件的对应关系，以深化对国家战略政策的理解。学生端则以学习共同体形式，运用一元线性回归方程，协作完成“区域创新效率预测模型”，提交包含数据可视化（如散点图）与政策背景分析的初始报告，同时，在讨论区凝练核心问题，比如“西部研发投入产出弹性显著低于东部的制度性成因”的主题，为课堂深度讨论奠定基础。学生应具备数据清洗与基础建模的能力，例如通过分析研发经费与高新技术产业产值的散点图，直观感知变量间相关性，初步构建“数据波动映射政策迭代”的认知框架。

2. 课中：政策逻辑阐释与能力进阶

课堂环节通过问题导向与协作实践深化政策逻辑理解。教师端围绕课前凝练的问题（如区域斜率差异），指导学生运用方差分析（ANOVA）揭示不同区域经济差异的显著性（例如，东部地区系数 $b=12.227$ ，西部地区系数 $b=7.099$ ），并将其与“全国统一大市场”政策的内涵相结合；利用 SPSS 软件演示面板数据建模过程，强调共线性等统计陷阱在政策评估中可能造成的误导，并及时纠正学生在操作过程中出现的错误。在学生端，通过小组合作的方式完成《区域创新效能诊断报告》，并依据回归分析结果提出相应的政策建议。在组间互评环节，重点考察“政策逻辑的严谨性”，例如，斜率差异是否揭示了制度性壁垒，以及“战略建议的可行性”。学生应熟练掌握回归分析、假设检验等统计工具，深入理解“有效市场与有为政府”之间的协同作用逻辑，并

通过批判性地反思模型的局限性（例如，线性假设简化了政策的复杂性），从而培养批判性思维能力。

3. 课后：价值观内化与行动延伸

课后阶段通过多元评价与社会实践推动价值观践行。在教师端，采用了综合“量化+质性”评价方案。量化维度主要对模型的准确性进行考核，同时对研究报告的质量进行评估。质性维度则通过使命感自评量表以及课堂讨论中国家战略关键词的引用频次来评估价值内化的深度。此外，还布置了“数字经济政策获得感调研”的延伸任务，旨在形成详尽的《调研报告》。学生端根据反馈修订报告并归档至学习档案，标注“数据分析-政策诊断-建议生成”全流程思维路径；同时，参与乡村振兴数据监测的“产教融合”项目，将课堂理论成果转化为实际操作。

三、实践成效

（一）学生能力的提升：从技术操作层面到战略诊断能力的跃迁

根据课前测验结果，75%的学生能够准确地构建一元线性回归模型（例如 $y=747.059+13.281x$ ），然而，仅有10%的学生能够将区域经济数据与之结合，提出相应的政策建议。这一现象揭示了在教学过程中存在“重视技术技能培养，忽视应用能力提升”的问题。在实施“数据-政策-价值观”教学模式后，通过课后评估发现，高阶任务（例如《区域创新效能诊断报告》的撰写）的完成率显著提升，从原先的10%提升至89%。此外，72%的小组在进行斜率差异分析（东部 $b=12.227$ 对比西部 $b=7.099$ ）后，能够提出像“构建跨区域技术转移平台”以及“对西部地区实施更为优惠的税收政策”等具有针对性的建议。这一转变表明，学生不仅掌握了统计工具的操作逻辑，更实现了从“数据计算者”向“政策建言者”的角色进阶。

（二）价值观内化：从知识认知到使命认同的深化

在课前评估中，80%的作业未能涉及“有为政府”、“有效市场”等国家治理核心概念，反映出价值观念渗透过程中的表层化问题。课后评估结果表明，学生在反思文本中对“国家战略”和“青年责任”等关键词的提及频率显著提升，增幅达到3.2倍。此外，65%的学生在自我评估量表中明确表示认同“运用数据分析支持中国现代化进程是新时代青年肩负的使命”。

（三）社会效应：从课堂成果到政策实践的转化

教学实践推动学生成果突破课堂边界，实现学术价值与社会效益的双向促进。学术创新层面：2篇学生撰写的经济类实证论文在期刊公开发表；竞赛实践层面：在大学生市场调查与分析大赛、全国大学生统计建模竞赛等重要赛事中，学生团队曾获多项国家级奖项和省级奖项；科研育人层面：2项大学生创新训练项目获省级立项，7项获校级立项，聚焦“数字经济与共同富裕协同路径”“乡村振兴政策效能诊断”等前沿命题。这些成果通过政校合

作渠道反馈至地方政府，形成了“课堂建模－政策优化－社会反馈”的良性循环，彰显了统计学课程思政的实践生命力。

四、结论

本文通过构建“数据－政策－价值观”三位一体的统计学课程思政教学模式，有效破解了传统教学中“技术性与价值性脱节”的难题。在教学实践中，学生不仅掌握了统计工具的操作逻

辑，更通过政策敏感度、斜率差异等量化指标，深入理解国家战略内涵。数据显示，学生高阶任务完成率从10%跃升至89%，“国家战略”“青年责任”等关键词在反思文本中出现频次显著增加，印证了价值观内化的深度。此外，学生成果突破课堂边界，其中两篇实证性论文已公开发表，多项竞赛中获奖，并催生了“数字技术＋产业数字化”等创新研究课题，充分体现了学术价值与社会效益的相互促进。

参考文献

[1] 赵庆华, 刘江涛, 王海燕. 新文科视域下经管类课程思政教学改革与实践路径研究——以“统计学”为例 [J]. 特区经济, 2025, (03): 123-126.

[2] 饶欣, 袁媛. 新文科建设中“统计学”课程思政的实施路径探索 [J]. 教育教学论坛, 2025, (03): 113-116. DOI: 10.20263/j.cnki.jyxt.2025.03.005.

[3] 潘欣欣. 统计学课程思政“三位一体”教学路径分析 [J]. 科学咨询, 2024, (24): 165-168.

[4] 王丽敏, 石淑娜. 经管类专业统计学课程思政实施策略研究 [J]. 牡丹江教育学院学报, 2023, (03): 92-95.

[5] 郭泽英, 邵秀军. 统计学混合式教学融入课程思政的改革实践 [J]. 黑龙江教师发展学院学报, 2023, 42(12): 60-62.

[6] 黄思博雅, 杨娇, 刘敬伟. 大数据背景下统计学课程思政建设模式与实现路径 [J]. 大学, 2024, (03): 67-70.

[7] 郭慧芳. 基于多重教学背景及研究热点的统计学课程教学改革研究 [J]. 内蒙古财经大学学报, 2023, 21(02): 23-28. DOI: 10.13895/j.cnki.jimufe.2023.02.029.

[8] 张娟. 校企合作专业统计学导论课程思政改革探索 [J]. 呼伦贝尔学院学报, 2024, 32(04): 135-138.

[9] 王丽敏, 周家文, 段瑞婕. 以思政育人为引领的经管类专业统计学金课建设研究 [J]. 中原工学院学报, 2024, 35(04): 80-83.

[10] 冯可. 大数据视阈下统计学课程思政育人效果现状及提升策略 [J]. 河南教育学院学报 (自然科学版), 2023, 32(03): 32-40.

[11] 闫兰香. 统计学课程思政教学改革探索与实践 [J]. 邢台职业技术学院学报, 2022, 39(06): 20-22+62.

立德树人背景下多元统计分析课程实践教学探索

王纯杰, 李晶, 袁晓惠*

长春工业大学数学与统计学院, 吉林 长春 130012

DOI:10.61369/ASDS.2025040014

摘 要 : 本文基于立德树人教育理念, 探索多元统计分析课程实践教学模式创新。通过构建课前知识奠基、课中能力内化、课后价值升华的三维教学框架, 依托知识图谱系统整合学科脉络, 设计递进式实践任务链, 结合协作式场景演练与复杂案例创新, 能够形成价值引领与技能培养的双向育人机制。本研究创新性地将思政元素融入教学各环节, 通过过程化考核评价学生的数据分析能力、团队合作意识及创新思维。实践表明, 该模式通过将实际案例与思政教育结合, 显著增强了学生的实践应用能力和责任感, 为统计学课程教学改革提供了新思路, 具有可推广的实践价值。

关 键 词 : 立德树人; 实践教学; 多元统计分析

Research on Practical Teaching of the Course "Multiple Statistical Analysis" under the Background of Cultivating Virtue and Cultivating Talents

Wang Chunjie, Li Jing, Yuan Xiaohui*

School of Mathematics and Statistics, Changchun University of Technology, Changchun, Jilin 130012

Abstract : Based on the educational philosophy of fostering virtue and cultivating talents, this paper explores innovative approaches to practical teaching in multivariate statistical analysis courses. By constructing a three-dimensional teaching framework—laying the knowledge foundation before class, internalizing abilities during class, and elevating values after class—the study systematically integrates disciplinary knowledge using a knowledge graph system, designs a progressive task chain for practical learning, and combines collaborative scenario simulations with complex case studies to establish a dual educational mechanism that fosters both value guidance and skill development. This research innovatively incorporates ideological and political elements into all teaching stages, assessing students' data analysis skills, teamwork awareness, and innovative thinking through process-oriented evaluation. Practical results demonstrate that this model, by combining real-world cases with ideological education, significantly enhances students' practical application abilities and social responsibility, providing new insights for the reform of statistics education and offering scalable practical value.

Keywords : cultivating virtue and cultivating talents; practical teaching; multivariate statistical analysis

引言

2012年11月, 党的十八大报告提出: “全面贯彻党的教育方针, 坚持教育为社会主义现代化建设服务、为人民服务, 把立德树人作为教育的根本任务, 培养德智体美全面发展的社会主义建设者和接班人。”^[1] 此后, 习近平总书记多次在重要会议中提及“立德树人”一词, 并在2016年的全国高校思想政治工作会议上强调: “教师要围绕这个目标来教, 学生要围绕这个目标来学。凡是不利于实现这个目标的做法都要坚决改过来。”^[2] 习总书记的指示为新时期的高等教育课程改革指明了方向, 如何把立德树人理念恰当地落实到高等教育领域, 尤其是被普遍认为人文性不突出的高校理科的教学中, 这是当前高等教育改革的一个重要课题。本文立足于统计专业多元统计分析课程的实践教学改革, 探讨如何在提升学生实践能力的同时, 落实立德树人的理念。

基金项目: 吉林省高等教育教学改革研究课题: 立德树人背景下统计专业实验课程教学改革研究与实践 (20224BRW2A70048)。

作者简介:

王纯杰 (1978-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为生物统计;

李晶 (1984-), 女, 博士研究生, 研究方向为生物统计。

通讯作者: 袁晓惠 (1983-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为生物统计。

一、立德树人的内涵解析与教学改革导向

（一）立德树人的内涵

“立德树人”这一育人理念可以追溯到我国先秦时代。“立德”一词出自《左传·襄公二十四年》：“太上有立德，其次有立功，其次有立言，虽久不废，此之谓不朽。”^[3]这里的“立德”就是为世人树立道德模范的意思。“树人”的概念源自《管子·权修》：“一年之计，莫如树谷。十年之计，莫如树木。终身之计，莫如树人。”^[4]这里所说的“树人”从语境看具体是指培养国民的礼义廉耻之心，为国家提供稳定的人力资源。

在新时代语境下，“立德”不仅指向传统道德伦理的传承，更包含培育公民向善的价值追求、服务社会的公德意识以及契合时代要求的政治素养三重维度^[5]，这种道德养成突破了单纯知识传授的局限，强调通过浸润式教育实现价值引领与人格塑造的有机统一。与中国古代的“树人”观重视为帝王家培养人才不同，当代“树人”则更多了一种对人本身的关注。^[6]“树人”作为教育目标的价值旨归，聚焦于培育兼具专业能力、良好的思维品质与家国情怀的复合型人才，既要求受教育者具备扎实的学科知识体系与创新能力，更需要形成服务国家战略发展的使命担当，这种人才培养观突破了工具理性的桎梏，实现了知识传授与价值引领的辩证统一。

（二）立德树人对实践教学改革的指导意义

“多元统计分析是运用数理统计的方法来研究多变量（多指标）问题的理论和方法，它是一元统计学的推广。”^[7]立德树人的理念为多元统计分析课程实践教学改革指明了方向。在立德树人根本任务引领下，多元统计分析实践教学改革应遵循教育规律与人才成长规律，以社会主义核心价值观为价值坐标构建理论框架。课程改革需立足“三全育人”理念，“坚持把立德树人作为中心环节，把思想政治工作贯穿教育教学全过程，实现全程育人、全方位育人。”^[8]将知识传授、能力培养与价值塑造深度融合，形成“三位一体”的教学范式。从认识论层面要确立“价值引领、知识建构、实践创新”的递进式教学目标，强调在统计学方法论教育中渗透辩证唯物主义思想，引导学生理解数据科学的社会责任与伦理边界。在方法论层面当构建从问题导向到理论再到实践验证的螺旋上升式教学模型，注重培养学生运用统计思维解决复杂社会问题的能力，强化求真务实的科学精神与严谨审慎的职业操守。然后，在教学过程中还应贯彻“以学生发展为中心”的教育理念，通过创设真实问题情境激发创新思维，在算法实现与模型优化中培养工匠精神。最后，要构建“过程性评价与价值导向评价相结合”的考核体系，以科学的评价体系，来全面促进学生德与才的全面提升。

二、立德树人背景下多元统计分析实践教学模式的变革

为了落实立德树人的理念，在实践教学改革进程中，我们构建了“三阶段两平台”（课前、课中、课后三阶段，线上线下两平

台）的创新教学模式，通过系统性设计来实现对学生理论认知、实践应用与价值塑造的三位一体式训练。该模式以数字化资源为支撑，以混合式教学为载体，以实践育人为延伸，实现了全链条人才培养的闭环。下面，笔者来谈谈我们的具体做法——

（一）课前阶段：知识图谱赋能的实践奠基

1. 知识图谱的系统构建

课前阶段，我们以知识图谱为依托开展实践教学。我们以超星学习通平台为载体，构建了多元统计分析的知识图谱，这一知识图谱由“知识点阵”“问题链条”和“资源仓库”三模块组成。我们通过结构化梳理课程核心内容，构建知识网络与实际问题解决映射关系：知识点阵层整合数据分析的基础理论与技术要点，形成概念间的逻辑关联；问题链条层将知识点转化为具体的问题与阶梯式实践任务，串联从基础数据处理到复杂模型构建的能力进阶路径；资源仓库层为每个实践环节配置行业真实数据、操作指导工具及价值观讨论素材，形成立体化学习支撑体系。

2. 递进式实践任务设计

依托该系统的智能适配功能，我们设计了三类实践训练任务：（1）数据治理训练：学生直接处理未经加工的行业数据，在清理冗余、提炼特征的过程中，系统根据操作轨迹动态调整数据复杂度，培养严谨的数据处理态度；（2）算法应用训练：通过可视化操作指导工具展示数学原理到代码的转化路径，学生在编程中验证模型可行性，系统实时反馈技术偏差并关联知识点生成改进建议（3）决策思维训练：在关键操作节点设置伦理评估环节，要求结合行业规范说明选择依据，系统生成责任意识分析报告，引导技术应用的道德自觉。

3. 价值渗透的初步实现

在价值渗透层面，课前设计着重培育三重意识：通过处理真实行业数据理解技术方案的社会影响，在数据清洗环节强化隐私保护的职业准则，在复杂数据环境中建立全局分析的系统思维。这种将价值观培养前置嵌入实践环节的设计，使学生在接触专业技术之初即建立起“能力发展”与“价值成长”的共生关系，为课堂教学中的深度融合奠定认知基础。

（二）课中阶段：实践能力深化与价值内化融合

1. 教学模式构建

课中阶段，我们采用线上线下融合的OMO（Online-Merge-Offline）教学模式，实施“双线并行”教学策略。技术能力培养线采用“三环六步”教学法：首先通过知识图谱节点测试诊断预习成效，针对群体性认知盲区开展重难点精讲，教师结合真实业务数据全流程演示统计建模过程，重点解析代码实现逻辑与结果解释要点；继而组织4-5人协作小组运用协同分析工具完成多源数据挖掘任务，在SPSS Modeler可视化建模环境中进行仿真训练；最终围绕“用户画像算法伦理边界”等议题开展辩论式研讨，采用师生共评与智能系统相结合的多元评价机制。

2. 能力深化的阶梯式训练路径

相较于课前阶段的技能奠基，课中阶段我们聚焦系统性技术整合能力的培育，教学全过程通过三层任务实现学生能力跃升：

（1）第一层次：基础理论转化

聚焦知识向工程能力的初步转化，通过全流程建模演示将抽象理论具象为可操作的技术路径。教师系统解构统计模型的核心逻辑，剖析数学原理与代码实现的映射关系，重点突破算法参数调优、结果解释规范等技术盲区，搭建理论认知向工程思维的转化桥梁。

（2）第二层次：协作系统整合

在个体技能基础上，强化多源数据治理与复杂问题协作攻关能力。我们通过课堂小组协作，学生跨角色任务分工，实践数据清洗规则设计、模型参数协同调试、可视化结果联合阐释等全流程环节，培养从单一技术应用向系统性解决方案设计的思维转型。

（3）第三层次：复杂场景创新

在仿真训练环节，我们引入高噪声、多维度缺失的真实业务场景，要求学生在不确定性环境中进行模型鲁棒性优化与解释性重构。通过动态调整数据特征、模拟业务需求变化等干扰因素，训练学生应对非常规问题的创新思维与自适应技术调优能力，实现从标准化操作向创造性应用的质态跃迁。

3. 价值内化的融合渗透机制

价值塑造深度融入技术实践全流程，通过以下路径实现价值观的隐性内化：

（1）伦理决策嵌入：在算法实现环节设置冲突场景，如处理金融风控数据时，要求平衡模型精度与用户隐私保护，系统调用行业规范库生成合规性评估报告；

（2）价值观念引导：通过“中国改革开放经济成就”“吉林老工业基地转型案例”等教学模块，引导学生理解统计分析技术在强国建设中的战略价值，培养学生的国家自豪感和历史使命感。^[9]

（3）社会责任具象化：通过分析公共政策数据集（如教育资源分配效果），在模型优化环节讨论基尼系数调整对社会公平的影响权重；

（4）职业信念培育：引入企业项目管理流程，模拟数据分析师角色分工，在协同建模中理解技术方案的商业价值与道德边界。

（5）方法论的融入：如运用唯物辩证法解构主成分分析的本质特征——通过矛盾转化实现维度降维，使学生领会统计方法与哲学思维的深层关联。^[10]

（三）课后阶段：实践能力迁移与价值认知升华

在课后阶段，我们通过真实项目驱动实现能力转化与价值观的持续强化。学生团队对接企业需求，完成从需求分析、模型构建到成果交付的全流程项目实践，如市场趋势预测、社会问题诊断等开放性任务。在技术创新挑战中，鼓励基于统计模型开发环保监测、医疗健康等领域的优化方案，培养解决复杂社会问题的创新能力。社会服务实践环节组织学生参与公共服务数据分析，在助农扶贫、社区治理等项目中切身感受技术的社会价值，强化“科技报国”的使命担当。

价值认知的升华通过三重机制实现：撰写项目伦理评估报

告，系统分析技术方案的社会影响与潜在风险；通过企业导师访谈、行业规范研读，内化数据分析人员的职业责任；建立个人能力发展档案，制定持续学习计划，培养适应技术变革的成长型思维。教学闭环的构建体现为“学习－实践－产出”的良性循环：优秀项目方案推荐至企业应用，实现知识成果的社会转化；平台持续跟踪毕业生技术应用情况，收集伦理决策案例反哺课程建设；通过公益数据分析服务延伸课程的社会影响力，践行高校服务社会的责任使命。

我们采用这一教学模式，实现了统计技术训练与核心素质培育的深度融合，为立德树人背景下统计人才培养提供了可资借鉴的范例。

三、以多元性、过程性考核方式评价实践教学成果

在教育教学质量监测体系中，评价机制发挥着核心作用。我们基于成果导向理念构建的“三维五度”过程性评价框架，有机整合了CIPP模型要素，形成涵盖知识建构、价值塑造与社会贡献的立体化评估系统。该体系通过五个渐进式观测维度（课前准备度、课中参与度、课后拓展度、实践创新度、伦理敏感度），构建起贯穿教学全周期的动态监测网络。

在知识建构评价层面，我们采用多模态数据融合分析技术：通过SPSS软件操作行为轨迹分析，精确捕捉特征值提取等关键技能点的掌握情况；运用自然语言处理算法对实验报告中的成分命名规范性进行智能判别，确保统计术语的准确应用。例如在因子分析报告中，系统可自动识别“KMO检验”“因子载荷矩阵”等专业表述的完整性，实现知识应用能力的量化评估。这种技术赋能的评价方式既提升了评估效度，又通过即时反馈机制增强学习者的自我改进动力。

在价值塑造评价层面，我们聚焦伦理意识与职业素养培育，为之创新设计了情境化考核模块。在社区养老服务数据分析项目中，通过文本挖掘技术测量学生报告中的伦理认知水平，重点考察弱势群体指标保留率等关键论述的论证深度。开发“医疗数据隐私保护决策模拟”评估系统，要求学习者扮演医疗机构数据分析师，在“研究效率与患者隐私权”的伦理困境中制定数据脱敏方案——系统从匿名化技术合规性、知情同意书完备性等12个维度进行综合评价，引导其深入理解《个人信息保护法》在统计实务中的具体应用。该评估机制已形成可量化的道德决策能力发展曲线，为职业伦理教育提供实证依据。

对社会贡献的评价与学生的实践成果转化紧密相连，我们通过追踪学生主成分分析报告在政府养老服务政策优化中的实际应用效果，构建包含政策影响力系数、社会效益转化率等指标的评价模型。同时建立毕业生职业发展追踪监测机制，重点考察统计伦理准则在职场情境中的实践情况。数据显示，近三年参与校企合作项目的学生中，83.6%能够自觉执行数据匿名化规范，较传统教学模式提升29个百分点。

为保障评价体系实施，我们研发了智能化监测平台——依托超星学习通构建的“数据驾驶舱系统”。它集成Tableau可视化

引擎与分布式计算框架,实现教学全流程数据的深度挖掘。系统核心功能包括:实时生成预习任务完成度热力图,动态监测群体性知识盲点;运用关联规则算法分析小组协作建模中的知识传递路径;通过区块链技术存证社会实践成果。系统内置的预警模块可自动识别特征值提取等技能薄弱群体,推送个性化强化训练方案。平台累计处理23万条过程性数据,构建起覆盖输入、过程、输出的全维度质量监测网络。

在实施动态化考核反馈机制方面,我们采用了三阶改进法,将考核数据作为教学优化依据。先通过聚类分析识别能力短板群体、关联规则挖掘德育薄弱环节等诊断分析手段,我们能够精准定位学生的问题和需求。在此基础上,我们为不同群体推送个性化的学习资源和实践任务,如为知识技能薄弱组推送交互式特征值计算器,对伦理敏感度不足者开展沉浸式VR训练等。最后,我们通过双重差分法评估干预措施的有效性,并通过结构方程模型验证“价值塑造→社会贡献”路径系数,持续为我们的教学改革

提供指引。通过建立“考核-改进”动态关联模型,我们实现了教学质量的螺旋式提升。

四、结语

本研究基于立德树人根本任务,构建了知识奠基、能力深化、价值升华的三维协同育人体系,通过知识图谱构建、阶梯式训练路径和过程性考核机制,实现了统计技能培养与价值引领的有机融合。教学实践表明,该模式通过递进式实践任务设计、复杂场景创新训练及多元化评价方式,有效提升了学生的数据分析能力和学科核心素养,同时强化了社会责任意识与创新精神。但是研究在思政元素融入方式、实践场景真实性等方面仍存在优化空间,未来需持续完善课程思政资源库建设,深化校企合作数据平台开发,构建更具时代特征的统计育人体系。

参考文献

- [1] 坚定不移沿着中国特色社会主义道路前进为全面建成小康社会而奋斗[N].人民日报,2012-11-09.
- [2] 习近平.在全国高校思想政治工作会议上的讲话[N].人民日报,2016-12-09.
- [3] 侯光复.春秋左传[M].大连:大连出版社,1998:497.
- [4] 黎翔凤.管子校注[M].北京:中华书局出版社,2005:55.
- [5] 冯建军.立德树人的时代内涵与实施路径[J].人民教育,2019,(18):40-41.
- [6] 刘会强.新时代高校立德树人的实践路径研究[D].西北工业大学,2021.
- [7] 高惠璇.应用多元统计分析[M].北京:北京大学出版社,2005:1.
- [8] 新华社.习近平:把思想政治工作贯穿教育教学全过程[EB/OL][2016-12-08].http://www.xinhuanet.com/politics/2016-12/08/c_1120082577.htm.
- [9] 李春娥,崔广庆.案例式教学在多元统计分析“课程思政”中的实践[J].产业与科技论坛,2020,19(08):129.
- [10] 关静.多元统计分析课程思政建设方法的研究[J].大学教育,2023,(12):115.

基于校园学习行为与主观感知数据的学生画像分析

纪志荣, 路春燕, 胡洁莹

福建农林大学 计算机与信息学院, 福建 福州 350002

DOI:10.61369/ASDS.2025040015

摘要： 学生校园行为数据日益成为刻画学习过程与评估学业成效的重要依据，本文基于“以学生为中心”的教育理念，以某高校在读学生为研究对象，借助社会认知理论与教育数据挖掘方法，从手机使用与网络依赖，心理健康与压力感知，学习投入与自我效能三个核心维度进行问卷设计与调查，采集其客观行为数据与主观感知数据，基于K-mode聚类算法识别学生群体行为特征，构建多维学生画像体系；并引入决策树分类模型，以综合测评成绩排名为标签变量，挖掘行为特征与学业表现之间的路径关联。研究有助于推动高校学生管理由“被动风险识别”向“主动成长引导”转型，对提升高等教育质量具有重要应用价值。

关键词： K-mode 聚类；学习投入；画像分析；决策树；主观感知数据

Student Profiling Analysis Based on Campus Learning Behaviors and Subjective Perception Data

Ji Zhirong, Lu Chunyan, Hu Jieying

College of Computer and Information Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002

Abstract： With the growing importance of behavioral data in educational contexts, campus behavior has emerged as a critical indicator for understanding learning processes and evaluating academic performance. Anchored in the "student-centered" educational paradigm, this study investigates undergraduate students at a Chinese university by integrating Social Cognitive Theory with educational data mining techniques. A multidimensional survey instrument was developed around three core domains—mobile phone usage and internet dependence, mental health and perceived stress, and learning engagement and self-efficacy—capturing both objective behavioral metrics and subjective self-reported perceptions. Utilizing the K-modes clustering algorithm, the research identifies distinct student behavioral typologies and constructs a comprehensive multidimensional student profiling framework. Additionally, a decision tree classification model is employed, using comprehensive academic evaluation rankings as the outcome variable, to uncover the associative pathways between behavioral features and academic achievement. The result provides empirical support for transitioning student management in higher education from reactive risk identification to proactive developmental guidance, offering significant implications for the enhancement of educational quality and student support systems.

Keywords： K-mode clustering; learning engagement; profile analysis; decision tree; subjective perception data

引言

在推进教育高质量发展的背景下，我国高等教育人才培养正由“规模扩张”转向“内涵提升”，教育质量评价体系逐步从结果导向向过程导向转型。如何精准识别大学生学习状态并提供动态支持，已成为当前高等教育改革的关键议题。

传统学生管理主要依赖成绩、课程完成等静态指标，难以及时发现学生在学习过程中的心理波动和行为偏差，导致干预滞后、效果有限。随着学习分析（Learning Analytics）和教育数据挖掘（Educational Data Mining）技术的发展，数据驱动的“教育画像”（Educational Profiling）成为高校实现学生精细化管理与个性化支持的重要工具，为教育治理从“静态评估”向“动态识别”转型提供

基金项目：

2020年度福建省教育科学“十三五”规划课题“基于教育大数据的学习分析与干预机制的实证研究——以X大学为例”（FJJKCG20-217）；

2022年福建农林大学本科教育教学改革项目：“专业思政”视阈下统计类核心课程思政改革与建设研究”（111422140）。

作者简介：纪志荣（1979-），女，汉族，河北石家庄人，硕士，讲师，研究方向：应用统计学。

支撑。

当前教育画像研究多聚焦于客观行为数据建模，如签到、图书借阅、学习轨迹和消费记录，借助聚类、分类、预测等算法识别学生群体特征和学业风险^[1-3]。如翟鸣宇^[4]等基于学生基本信息与消费数据构建聚类标签，万安庆^[5]通过成绩、一卡通数据等建立学生亚健康画像。但多数研究偏重量化行为，忽视学生学习过程中的主观感知，缺乏对学习动机、自我效能、压力感知和网络依赖等心理维度的整合。

教育心理学研究表明，学习动机、情绪状态、自主感和网络使用体验等主观变量，深刻影响学生的行为选择与学业持续性。相关实证也表明，压力升高、幸福感下降和网络依赖，往往先于成绩滑坡，构成重要预警信号^[8-9]。如吴绮琳等^[10]发现高频手机使用会削弱注意力，引发焦虑，彭静雯^[11]强调感知自主性对学习内驱力的重要性，姚丽^[12]借助网络行为日志预测学业表现，王媛^[13]从目标设定与自我适应角度探讨学习机制。

因此，亟需构建融合主观感知与行为特征的教育画像，全面反映大学生学习生态与发展潜力，推动学生管理从“事后处理”向“过程干预”转变，为高校构建支持性、发展型培养机制提供理论基础与实践路径。

一、研究设计

（一）分析框架

基于“以学生为中心”的教育理念为指导，融合社会认知理论与教育数据挖掘方法，以在读大学生为研究对象，采集其校园行为数据与主观感知问卷数据，聚焦学习投入、网络依赖、心理压力与自我效能等核心变量，采用K-mode聚类算法对学生群体进行分类，构建多维度的学生画像体系。并进一步引入决策树分类模型，学业表现以学生综合测评成绩排名作为标签变量，挖掘学生不同行为一感知特征与学业表现之间的路径关系，构建具备可解释性的行为一成绩关联规则模型。最终提出基于学生行为特征的差异化干预策略，推动高校学生管理工作由“被动风险识别”向“主动成长引导”转型，为高等教育质量提升提供实证基础与政策参考。

（二）研究对象

为了了解大学生校园行为特征，选取A高校理工科统计学专业在读学生为调查对象，通过课堂问卷发放方式，共回收有效问卷508份，有效回收率为95.13%。其中，男生183人（36.02%），女生325人（63.98%）；农村生源348人（68.50%），城市生源160人（31.50%）；独生子女134人（26.38%），非独生子女374人（73.62%）；大一至大四学生分别为89人（17.52%）、194人（38.19%）、152人（29.92%）、73人（14.37%）；担任学生干部的有233人（45.87%）。

（三）研究工具

本研究基于文献综述与理论框架，自编调查问卷，采用李克特五点量表评分法，题项分为有利项与不利项，按“完全不同意”至“完全同意”赋值1-5分。问卷包括个人信息采集及课程体验、学习投入和学习收获三大量表，围绕“手机使用与网络依”“心理健康与压力感知”“学习投入与自我效能”三个核心维度展开，旨在全面刻画学生的心理、行为与认知状态。数据分析采用SPSS 26.0，首先对各子量表和维度进行信效度检验，随后采用主成分分析和最大方差旋转法进行探索性因子分析，以特征值大于1为因子提取标准，剔除因子负荷低于0.5的题项，确保量表

结构的科学性与信效度。

1. 手机使用与网络依赖量表

参考文献^[13-14]本量表围绕开始使用手机的年龄、平均每月手机娱乐消费、平均每天手机使用时长、手机依赖程度、短视频依赖程度以及网络使用情境（如上课、寝室、夜间）六个维度设计，共包含15道题目。信度分析结果显示，量表的Cronbach's α 系数为0.804，表明量表具有良好的内部一致性。因子分析结果表明，KMO值为0.895，Bartlett球形检验的p值小于0.001，总方差解释率为81.23%。结果说明该量表各部分题项设计合理，结构效度良好，整体信效度达到较高水平。

2. 心理健康与压力感知量表

参考文献^[7]，量表从睡眠行为、未来焦虑情绪状态、人际关系与社会支持、学业压力及就业压力五个方面构建，共包含18道题目。信度检验显示，量表Cronbach's α 系数为0.882，KMO值为0.895，Bartlett球形检验p值小于0.001，累计解释总方差变异率为82.19%。结果表明，本量表设计合理，具有较好的结构效度和内部一致性，能够有效测量大学生的心理健康与压力感知水平。

3. 学习投入与自我效能量表

参考文献^[7, 9]，量表依据课堂投入、课外投入、学习计划、学习交流、学习动力及学习反思六个维度设计，共计20道题目。经信度检验，Cronbach's α 系数为0.794，KMO值为0.864，Bartlett球形检验结果p值小于0.001，总方差解释率达到81.23%。结果表明，量表具有良好的内部一致性与结构效度，能够较为准确地评估学生的学习投入水平与自我效能感。

二、学生教育画像分析

（一）k-modes 聚类理论

Huang等人^[15]提出了适用于分类数据的k-modes聚类，该聚类采用SMD（Simple Matching Distance）方法实现对分类变量的处理，用众数代替均值，用Hamming距离计算两个样本点之间的距离，其目标函数定义为样本数据点与其对应聚类中心的距

离总和。

设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为样本点集合, 样本 $x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}\}$ 的属性为 $\{A_1, A_2, \dots, A_m\}$, 对于属性 A_i 的取值为 $Dom(A_i) = \{a'_i, a''_i, \dots, a''_i\}$ ($l > 2$), 任意两个样本点 x_i 和 x_j 的 k-modes 距离为:

$$D(X_i, X_j) = \sum_{l=1}^m d(X_{il}, X_{jl}), \text{ 其中, } d(X_{il}, X_{jl}) = \begin{cases} 0, & X_{il} = X_{jl} \\ 1, & X_{il} \neq X_{jl} \end{cases}$$

根据轮廓系数选择合适的类数, 聚类簇数的选择关系到聚类结果的优劣, 轮廓系数结合了凝聚度和分离度, 适合用于评估聚类效果的好坏, 轮廓系数定义为:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{b_i - a_i}{\max\{b_i, a_i\}}}{n}$$

其中, a_i 表示第 i 个样本与其同一簇群中所有其他数据之间的平均距离, 即量化簇内的凝聚度; b_i 表示其与最近一个聚簇的平均距离, 用于量化簇内的分离度; S 表示全部样本轮廓系数的平均值; 当 S 小于 0 时, 表示 S 与其簇内元素的平均距离大于最近的其他簇, 聚类效果不好; 反之, 当 S 越趋近于 1 时, 表示聚类效果越好。

(二) 学生画像分析

对问卷数据进行聚类分析, 当聚类个数 $K=6$ 时, 如图 1 所示, 聚类效果最佳。通过对六类学生群体的特征标签进行标注和分析, 揭示各类群体在性别、年级分布、学习行为及心理状态等方面的典型特征, 并绘制词云图 (1-6)。

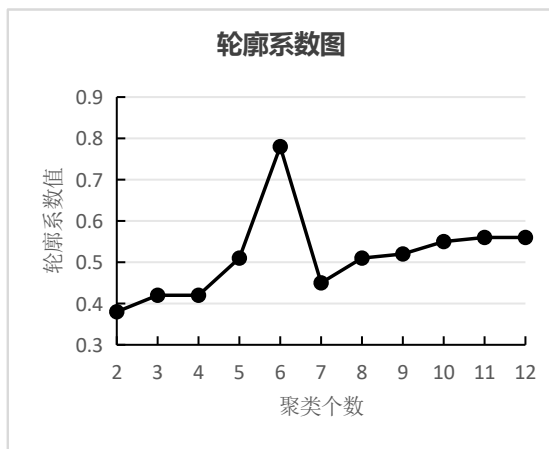


图 1

第一类: “自律高效型学生” (词云图 1), 共 56 人, 男生人数为女生的四倍, 主要集中在大二和大三年级。该群体以农村男生为主, 多担任班干部, 手机依赖度低, 学业及就业压力较小。学习动力强, 能严格执行学习计划, 每周去图书馆 1 至 3 次, 课堂专注时间超过 30 分钟, 晚间 11 点至 12 点入睡, 保证 7 至 8 小时睡眠。该群体几乎无挂科或重修记录, 表现出较高的自律性和学习效率。

第二类: “积极进取型学生” (词云图 2), 共 197 人, 女生占 76%, 涵盖大一至大四学生, 以大二大三为主。大部分来自农村, 非独生子女。作息较晚, 通常在午夜至凌晨 1 点入睡, 睡眠时长 6 至 7 小时。每周图书馆或自习室学习 1 至 3 次, 与师生交流频

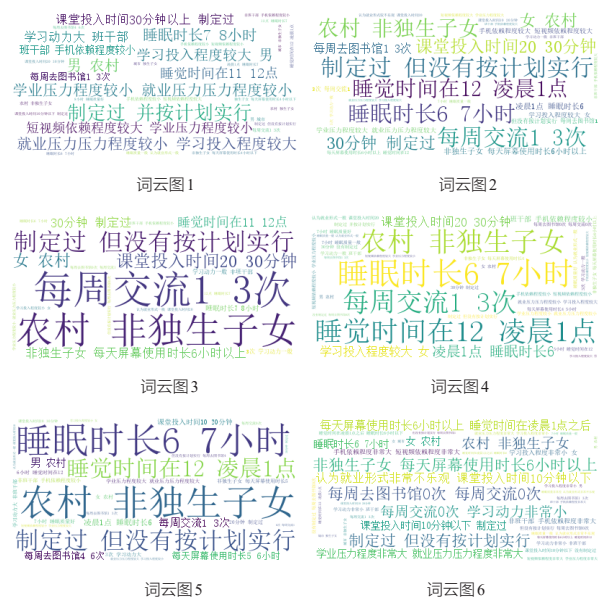
率为 1 至 3 次。课堂集中时间约 20 至 30 分钟, 虽有学习计划但执行不完全。该群体学业表现中上, 学习积极性较强。

第三类: “学习投入不足型学生” (词云图 3), 共 69 人, 男女比例约 1:3, 集中在大二二年级, 上一学年挂科率达 25%。以农村非独生子女为主, 每周与师生交流 1 至 3 次, 课堂投入 20 至 30 分钟。虽有学习计划, 但执行力较弱。睡眠时间在 11 点至 12 点, 日均屏幕使用超过 6 小时。该群体自我管理较弱, 学习投入不足。

第四类: “晚睡克制型学生” (词云图 4), 共 63 人, 性别均衡, 大三学生占比最高, 上一学年挂科率高达 48%。主要为农村非独生子女, 作息较晚 (12 点至凌晨 1 点), 睡眠 6 至 7 小时。每周与师生交流 1 至 3 次, 图书馆或自习室学习频次最高, 达 4 至 6 次, 手机使用较克制, 日均 5 至 6 小时。该群体虽晚睡, 但学习行为较为有序。

第五类: “晚睡低效型学生” (词云图 5), 共 77 人, 男女比例约 1:2, 大二人数最多。挂科或重修三科以上人数较多。该群体晚间 12 点至凌晨 1 点入睡, 睡眠 6 至 7 小时, 课堂投入时间较多 (20 至 30 分钟), 但学习效果不佳, 成绩不理想, 表现为学习效率低下。

第六类 “焦虑放任型学生” (词云图 6), 共 46 人, 女生占多数, 未涵盖大四学生。每学期挂科 1 至 2 门, 几乎不去图书馆, 与师生无交流, 课堂投入不足 10 分钟。尽管设有学习计划, 但未能执行。该群体感受较大学业和就业压力, 对未来悲观, 手机及短视频依赖严重, 缺乏自我调节能力, 学习状态较差。



三、学生校园行为与学业表现的关联性分析

综合测评作为衡量学生综合素质的重要方式, 其结果不仅反映学生在德、智、体等方面的真实表现, 也对学生学业发展产生导向作用。基于决策树算法原理, 通过信息增益 (Information Gain) 与基尼指数 (Gini Index) 评估特征变量的重要性, 并筛选关键行为指标。综合测评排名被划分为四个等级: “高水平 (前 25%)” “中上水平 (25% - 50%)” “中下水平 (50% - 75%)”

和“低水平（后25%）”，作为分类标签训练模型。选取样本量不少于10的主要分类路径，提取并分析对应的行为分类规则。结果显示，除入睡时间、睡眠质量、就业压力程度与每周图书馆使用频率外，其他行为变量与综测成绩存在较强相关性（表1），具体分类规则：

（一）学习投入 \in [3,4]，学习计划 \in [1]，学习动力 \in [3,5] \rightarrow 综测排名小于25%；

（二）学习投入 \in [3,4]，学习计划 \in [2,3]，工作预测 \in [1,3] \rightarrow 综测排名小于25%；

（三）学习投入 \in [1,2]，每天手机使用时间 \in [2,4]，每周交流学习次数 \in [2,4] \rightarrow 综测排名在25%–50%之间；

（四）学习投入 \in [1,2]，每天手机使用时间 \in [2,4]，每周交流学习次数 \in [1]，学业压力程度 \in [2,4] \rightarrow 综测排名在50%–75%之间；

（五）学习投入 \in [1,2]，每天手机使用时间 \in [2,4]，每周交流学习次数 \in [1]，学业压力程度 \in [1] \rightarrow 综测排名大于75%。

表1 校园行为特征与成绩关联系数

特征名	系数	特征名	系数
手机使用时长	0.0814	课堂投入	0.2241
手机依赖程度	0.0415	学习计划	0.0976
短视频依赖程度	0.0403	每周图书馆次数	0.0596
入睡时间	0.0865	每周交流学习次数	0.0905
就业形式预测	0.0611	学习动力	0.1517
学业压力程度	0.0667		

四、结论与建议

本文基于 K-mode 聚类与决策树分类方法，实证分析了大学生校园行为数据与综合测评成绩的关联，识别出六类典型学生群体：自律高效型、积极进取型、学习投入不足型、晚睡克制型、晚睡低效型和焦虑放任型。研究发现，学生在学习投入、交流互动、作息规律及手机使用等行为维度存在显著差异，且与学业成绩紧密相关。

针对不同类型学生，提出差异化干预建议：对自律高效型学生，鼓励其强化自主学习与目标导向，提供科研、竞赛等高阶成长平台，发挥其榜样作用，促进良性学习氛围；对积极进取型学生，强化时间管理与计划执行能力，推动学术交流与阶段性激励，提升持续学习动力；对学习投入不足型学生，注重行为认知与时间管理训练，实施结构化辅导与朋辈支持，促进行为改善；对晚睡克制型学生，帮助调整学习时间分布，强化学习策略反思，配合导师指导，实现努力与成果有效衔接；对晚睡低效型学生，开展学习策略与效率提升辅导，加强睡眠教育，通过榜样激励促使习惯转变；对焦虑放任型学生，则优先开展心理支持与个别干预，辅以行为分解与数字戒断训练，重建学习信心与行动力。

综上，大学生校园行为不仅反映其学习态度与生活习惯，更与学业成绩密切相关。通过典型行为画像的识别与针对性干预，有助高校实现从经验驱动向数据驱动的精准管理与帮扶。未来建议结合行为时序与心理测评数据，构建动态预警机制，推动形成“识别—干预—反馈”闭环式育人体系，从而更好地服务于学生全面发展与高质量成长。

参考文献

[1] 余明华, 张治, 祝智庭. 基于可视化学习分析的研究性学习学生画像构建研究 [J]. 中国电化教育, 2020, (12): 36–43.

[2] 张紫微, 林子涵, 廖会心, 等. 面向学习成功的非认知能力学生画像可视化 [J]. 现代教育技术, 2021, 31(12): 94–102.

[3] 王惠惠, 董永权, 和文斌, 等. 基于聚类集成的学生群体画像构建 [J]. 江苏师范大学学报 (自然科学版), 2022, 40(03): 46–50.

[4] 翟鸣宇, 程建, 王苏桐, 等. 基于 K-prototype 聚类的大学生教育画像分析 [J]. 大连理工大学学报 (社会科学版), 2021, 42(06): 22–31.

[5] 万安庆. 智慧校园环境大学生亚健康数据挖掘方法应用研究 [D]. 南京: 南京中医药大学, 2017.

[6] 刘智, 康令云, 刘三女牙, 等. 学习者社会网络交互、情绪表征与学习成效的关系研究 [J]. 中国远程教育, 2020, (06): 31–39+59+77.

[7] 刘佳. 大学生学业压力、学业自我效能感和学业拖延的关系及干预研究 [D]. 云南师范大学, 2024.

[8] 张旭东, 马塘生, 李清. 大学生网络成瘾对学业挫折感的影响: 心理生活质量的中介作用 [J]. 心理学探新, 2022, 42(04): 356–361.

[9] 于倩, 刘金兰, 赵远. 大学生学习动机对学习参与及学业成就的影响研究 [J]. 大连理工大学学报 (社会科学版), 2018, 39(06): 100–106.

[10] 吴绮琳, 刘世超, 黄时华, 等. 特质性心流与网络游戏成瘾: 学业自我效能感的中介作用 [J]. 中国健康心理学杂志, 2023, 31(09): 1407–1412.

[11] 彭静雯. 大学生学习内驱力影响因素及其作用机制——基于扎根理论的分析 [J]. 现代大学教育, 2023, 39(02): 93–102.

[12] 姚丽, 崔超然, 马乐乐, 等. 基于校园上网行为感知的学生成绩预测方法 [J]. 计算机研究与发展, 2022, 59(08): 1770–1781.

[13] 王媛, 刘阳. 自我选择与环境塑造: 本科生学习投入的养成逻辑——基于 H 区高校本科生的实证考察 [J]. 当代教育与文化, 2020, 12(05): 106–116.

[14] 荣婷. 手机依赖度对大学生身心健康、人际关系、学习状态的影响研究——基于全国 2240 所高校调查的实证分析 [J]. 黑龙江高教研究, 2018, 36(06): 114–118.

[15] Zhexue H. Extensions to the k-Means Algorithm for Clustering Large Data Sets with Categorical Values.[J]. Data Min. Knowl. Discov. 1998, 2(3): 283–304.

生产装置仪表数据采集系统搭建与智能运维技术研究

董永才^{1*}, 陈飞², 梁留法¹, 王灵飞¹

1. 浙江石油化工有限公司, 浙江 舟山 316100

2. 物产中大(桐乡)水处理有限公司, 浙江 嘉兴 314500

DOI:10.61369/ASDS.2025040016

摘 要 : 随着工业自动化和智能化技术的深入发展, 生产装置仪表数据采集系统和智能运维系统已经成为保障工业安全和提质增效的核心支撑。本研究针对工业生产场景下仪表数据获取系统的体系结构设计和实现方法展开研究。针对智能运维领域, 深入研究基于多源传感的仪表状态监控技术、融合深度学习的故障诊断模型, 以及面向设备维修的最优决策算法。研究内容包括构建面向全生命周期的岗位作业过程模型; 明确系统规划、部署执行和维护管理的协同机理; 提出跨部门协同框架和动态优化策略。本文旨在为工业企业实现设备全链路数字化管控提供理论指导和实践范例, 有效提高设备可靠性评价的准确性和维护响应效率, 促进工业制造向智能化和精密化方向发展。

关 键 词 : 生产装置仪表; 数据采集系统; 智能运维技术; 工作流程

Research on the Construction of Instrument Data Acquisition System for Production Facilities and Intelligent Operation and Maintenance Technology

Dong Yongcai^{1*}, Chen Fei², Liang Liufa¹, Wang Lingfei¹

1. Zhejiang Petrochemical Co., LTD., Zhoushan, Zhejiang 316100

2. Wuzhan Zhongda (Tongxiang) Water Treatment Co., LTD., Jiaxing, Zhejiang 314500

Abstract : With the in-depth development of industrial automation and intelligent technologies, the instrument data acquisition system and intelligent operation and maintenance system of production facilities have become the core support for ensuring industrial safety and improving quality and efficiency. This research focuses on the architecture design and implementation methods of the instrument data acquisition system in industrial production scenarios. For the field of intelligent operation and maintenance, in-depth research is conducted on the instrument status monitoring technology based on multi-source sensing, the fault diagnosis model integrating deep learning, and the optimal decision-making algorithm for equipment maintenance. The research contents include constructing a job operation process model for the entire life cycle; Clarify the collaborative mechanism of system planning, deployment execution and maintenance management; Propose the cross-departmental collaboration framework and dynamic optimization strategies. This article aims to provide theoretical guidance and practical examples for industrial enterprises to achieve full-chain digital control and management of equipment, effectively improve the accuracy of equipment reliability evaluation and the efficiency of maintenance response, and promote the development of industrial manufacturing towards intelligence and precision.

Keywords : instruments of production facilities; data acquisition system; intelligent operation and maintenance technology; work process

引言

在现代工业生产中, 生产装置仪表是获取生产过程关键参数的关键设备, 其工作状态的准确和稳定直接影响生产的安全、效率和产品质量。随着工业自动化和智能化水平的不断提高, 建立高效率、高可靠性的生产设备仪表数据采集系统, 采用先进的智能运行维护技术, 是提高工业生产竞争力的重要措施。生产装置仪器数据采集系统建设和智能运维技术研究岗的主要任务是建立完善的数据采集系统, 研发和应用智能运维技术, 保证生产装置设备的稳定运行。深入研究该系统的建设要点和智能维护技术, 可以有效地提升生产过程的可视化和可控化水平, 及时发现和解决设备运行中的隐患, 减少设备的故障率, 延长设备的使用寿命, 从而促进工业生产向智能化和精细化方向发展。

作者简介:

陈飞, 男, 汉族, 浙江桐乡, 大专, 研究方向: 机械;

梁留法, 浙江石油化工有限公司, 本科, 助理工程师, 电气工程及其自动化专业, 研究方向: 仪表维护;

王灵飞, 浙江石油化工有限公司, 大专, 研究方向: 仪控仪表。

通讯作者: 董永才(1975-), 男, 汉, 河北沧州, 本科, 中级工程师, 研究方向: 化工技术。

一、生产装置仪表数据采集系统搭建工作要点

（一）系统需求分析职责

生产装置仪表数据采集系统的需求分析是整个项目实施的基础，需要从多个方面进行全面和深入地考虑。在生产过程层次上，要准确地掌握各生产过程中仪表数据的种类、精度和采集频率的要求。例如，在化工生产过程中，要求反应器内的温度、压力数据的准确度分别达到 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 0.01\text{ MPa}$ ，采集频率要根据反应过程实时调节，可能在反应初期为每分钟一次，剧烈反应阶段则提升至每秒一次^[1]。在钢铁冶炼等复杂流程中，需要对多维数据进行分析，如多原料配比、炉内温度控制、产品质量检验等，需要对数据进行整理。同时，要与企业现有的信息化结构相结合，保证新型数据采集系统能够与更高层次的企业资源计划（ERP）和制造执行系统（MES）无缝对接。这就要求对已有的系统进行数据接口规范、数据传输协议和数据存储格式的分析。在安全需求分析方面，采用 SSL/TLS 的加密协议，以防止数据被窃取和篡改。在数据存储方面，应制定备份策略，采取异地备份等措施，以应对可能发生的硬件故障和自然灾害，保证数据的完整性和可用性^[2]。另外，还需要对系统未来可扩充性进行预测，以备将来可能扩大生产规模、引入新的生产流程时，预留数据采集接口和处理能力。

（二）系统架构设计工作

在硬件架构上，根据仪表类型和工作环境，选择前端数据采集装置；对于分布在恶劣环境中的温压计，可以选择工业级的传感器，具有防爆、防尘和防水的功能，并通过 RS485、CAN 等现场总线向数据采集网关传送数据。数据采集网关作为数据汇聚节点，需要有较强的数据处理能力和协议转换能力，可以采用嵌入式 Linux 操作系统，支持多种通信协议之间的转换，如 Modbus 协议到 TCP/IP 协议的转换等^[3]。服务器端体系结构采用分布式体系结构，通过负载均衡技术将数据处理任务分配到多个服务器节点上，以提升并发处理能力。在软件架构方面，采取了一种分层的体系结构。数据采集层主要负责和前端仪器进行通信，对数据进行实时采集和缓存，利用多线程技术提高了采集效率。数据传输层使用 MQTT 等可靠数据传输协议，保证网络不稳定时数据的可靠传输。在数据处理层面，利用 Hadoop、Spark 等大数据处理技术，对收集来的海量数据进行清洗、转化和存储。数据显示层通过网络或者移动应用程序，为用户提供可视化的数据接口。

（三）系统实施与调试工作

在系统的实施阶段，设备的安装和软件的部署都要严格按照设计的要求进行。在安装设备时，要保证传感器的安装位置准确，满足工艺要求。例如，温度传感器要安装在能够准确反映被测介质温度的地方，不能将其安装在死角和干扰区。布线工作要严格按照电气安装规范进行，屏蔽现场总线，以降低电磁干扰，保证数据的准确传输。在软件部署上，首先要建立服务器的运行环境，并安装操作系统，数据库管理系统以及相关的中间件^[4]。将所研制的数据采集软件、数据处理软件和数据展示软件配置到相应的服务器节点上，调整配置参数，保证各个软件模块之间的

通信正常。系统调试也是保证系统正常运行的一个重要环节。首先，对各个传感器、数据采集网关和服务节点分别进行单独的调试，确保设备的硬件功能正常，软件模块能够对数据进行采集、传输和处理。最后，通过系统的联调，模拟真实的生产场景，检验整个系统的数据采集、传输、处理和显示的完整性和准确性。在调试过程中，可能会出现数据丢包、通信中断等情况，需要使用网络检测工具和日志分析等方法来查找问题的根本原因，比如网络布线问题、软件参数配置不合理或者硬件兼容性有问题等。根据具体的情况，对其作出相应的调整和优化，直到系统能够稳定地运行。

二、生产装置仪表智能运维技术研究工作要点

（一）仪表运行状态监测技术研究

仪表运行状态监测是实现智能化运行的基础，它利用各种技术手段实时获取仪表运行参数，并对其健康状况进行评估^[5]。基于传感技术，在仪表关键部位加装振动、温度和压力传感器，实现了仪表工作状态下各种物性参数的实时采集。在温度监测方面，利用红外测温技术，对仪器壳体和关键零部件进行非接触测量，并与热像技术相结合，实现仪器温度分布的可视化显示，建立温度模型，设置正常温度阈值，当温度超过临界值时发出警报^[6]。另外，利用数据挖掘技术，分析历史数据，建立仪表正常工作模式。通过聚类分析方法，对相似工况数据进行聚类，确定每一类数据的特征参数范围，并将其与正常工况进行比较，若偏差范围内，则提示仪器可能存在工作状态异常，从而为后续故障诊断提供依据。

（二）仪表故障诊断技术研究

仪表故障诊断技术就是为了快速、准确地确定仪表的故障类型和位置。以卷积神经网络（CNN）、循环神经网络（RNN）为代表的深度学习算法近年来得到了广泛的应用。针对智能电表显示屏上出现的缺字、花屏等图像特征的仪表故障，采用卷积神经网络对采集到的仪表显示图像进行特征提取和分类，并利用大量的故障样本对模型进行训练，实现对不同类型图像故障的精确识别^[7]。针对压力仪表的压力波动等具有时序特性的仪表数据，利用循环神经网络的长短期记忆网络对其进行建模。LSTM 可以有效地处理时间序列中的长时相依关系，通过对历史数据变化趋势的学习，预测未来压力值，当实际测量值与预测值之间的偏差超出设定阈值时，判断仪表可能出现故障，并对故障原因进行分析，如压力传感器失效、管路堵塞等。此外，还可结合专家系统进行故障诊断，该方法将领域专家的经验知识以规则的形式存储在知识库中，当仪表发生异常情况时，由推理引擎根据实时监控数据与知识库规则进行匹配，得到诊断结论，为维修人员提供维护建议。

（三）仪表智能运维决策技术研究

基于设备运行状态监测和故障诊断结果，制定合理的维护策略，优化维护资源配置。在运维计划的制定上，应用可靠性中心维修（RCM）理论，依据设备失效模式、故障后果和故障概率，

对设备的重要程度进行分级^[8]。对涉及生产安全的关键设备，如压力连锁仪等，采取预防性维护策略，依据运行状态监控数据，提前安排维护计划，更换易损部件，防止突发故障造成生产中断。对于非关键设备，可以采取事后维护的策略，以减少运行维护费用。在资源调度方面，采用遗传算法、粒子群等运筹学优化算法，综合考虑设备维护人员技术水平、设备配置、维护时间和维护费用等因素，对维护任务进行优化配置。例如，当多台仪器同时发生故障时，根据维护人员的专业技能和当前的工作任务，对维修任务进行合理地分配，以最小的维修时间或最小的维护成本。

三、生产装置仪表数据采集系统搭建与智能运维技术研究岗工作流程

（一）项目启动阶段工作流程

如图1所示，在项目启动阶段，这一岗位人员首先要参加到项目需求调研会议中，与生产、工艺、设备管理等相关人员进行深入交流，充分认识到企业对于生产装置仪表数据采集系统和智能运维技术的期望和要求。收集现有生产装置仪表的详细信息，包括仪表的仪表类型、品牌、型号、安装位置、运行参数范围等，并对企业现有的信息系统结构和数据管理进行调查^[9]。基于这些调研结果，对该项目进行了详细的可行性研究，并从技术上、经济上和時間上的可行性进行了分析和论证。在技术可行性上，对市场上现有的数据采集技术、智能运维技术等进行评估，评估其是否能满足企业的需要，以及企业内部的技术团队有没有能力实现和维护。经济可行性分析包括对建设成本、运维成本和预期效益的测算。时间可行性分析要求编制工程中期计划，确定各个阶段的关键节点。项目可行性报告经企业高层领导审批后，成立项目组，对项目组成员进行职责划分，制定项目章程，明确项目目标、范围、预算和沟通机制等关键因素，为项目顺利实施打下基础。

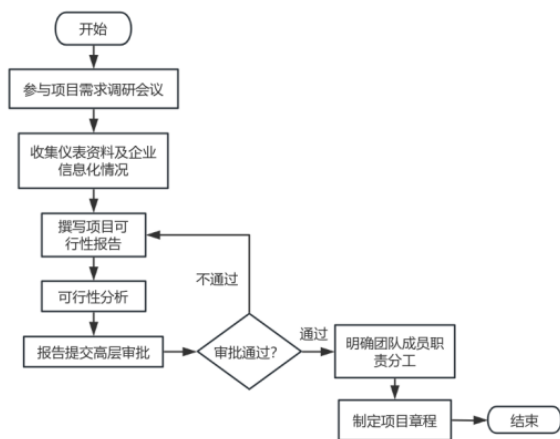


图1 项目启动阶段工作流程图

（二）系统搭建阶段工作流程

如图2所示，在系统搭建阶段，该岗位人员根据需求分析和体系结构设计，负责采购项目所需要的物资，如数据采集设备、

服务器、软件工具等。设备到货后，检查设备规格、型号、数量与采购合同是否相符，检查其外观有无破损，随机附送的技术文件是否完整。配合施工队伍做好设备的安装和布线工作，监督施工进度达到设计要求和相应的规范要求^[10]。软件方面，主要负责数据采集、处理和显示等软件的开发和测试。与软件开发团队紧密合作，根据业务需求，完成软件功能的细化设计，编写软件需求规范。在软件开发过程中，我们要对代码进行周期性地检查，以保证代码的质量达到标准。在软件测试阶段，编制完整的测试计划，包括功能测试，性能测试，兼容性测试，安全测试等。功能测试主要是对所开发的软件进行需求分析，并对其功能进行验证；在高并发性和海量数据环境下，性能测试对软件运行效率进行评价；兼容性测试是为了保证软件能够在不同的操作系统和浏览器中正常工作；安全测试主要是检查软件中是否有数据泄露和非法访问等安全缺陷。在测试过程中发现的问题，及时反馈给开发团队，使其能够顺利完成测试。

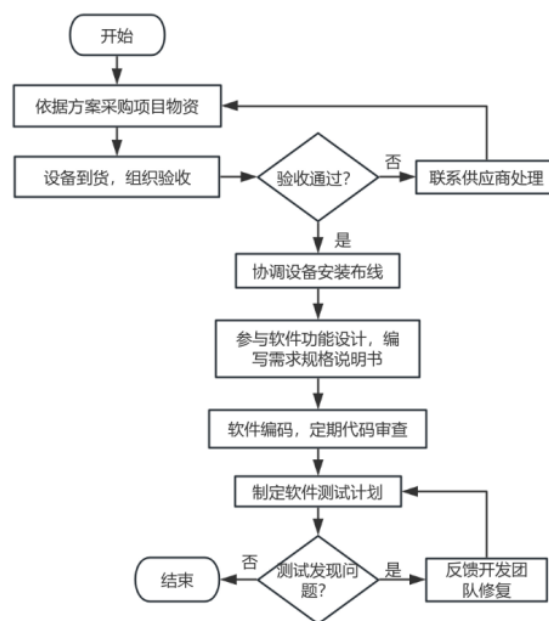


图2 系统搭建阶段工作流程图

（三）系统运行与维护阶段工作流程

如图3所示，在该系统投入运行之后，这个岗位的工作人员负责制定系统的运行监测机制，系统内自带的监测工具和第三方监测软件可以对数据采集系统的运行状况进行实时监控，包括设备的工作状态、数据传输的稳定性、服务器负载等。设置合理的监测门限，当监测指标超过阈值时，及时报警。与此同时，还要定期对系统进行巡视，检查设备的硬件有没有出现问题，如硬件出现故障，及时与设备供应商联系维修或更换；针对软件出现的问题，采用日志分析的方法查找问题的根本原因，并对软件进行更新和修补。在系统维护上，定期备份和恢复数据，以保证数据的安全性。通过提高数据收集频率，优化数据处理算法，更新数据显示界面，提升系统性能和用户体验，保证系统持续稳定运行，为生产装置仪表智能化维护提供可靠数据支撑。

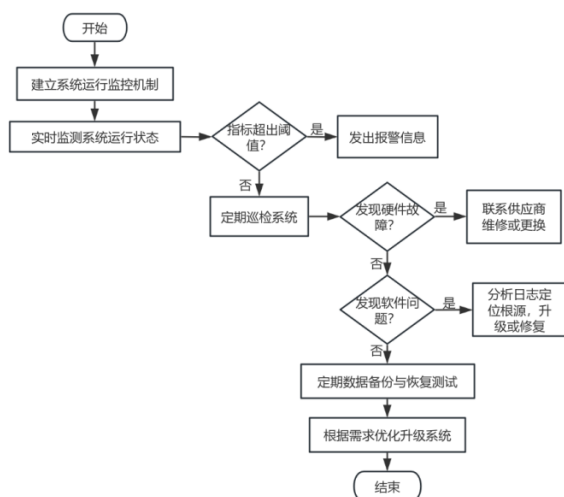


图3 系统运行与维护阶段工作流程图

（四）跨部门协作机制

生产装置仪表数据采集系统的构建和智能维护技术的研究涉及多个部门，如何建立有效的跨部门协同机制是关键。与生产部门保持紧密的联系，根据生产工艺的调整和生产任务的变化，对数据采集系统进行参数设置和智能运维策略的优化。生产部门在生产过程中，如发现仪表数据异常、系统运行出现问题，可以及时向岗位人员提供方便的交流渠道。在设备管理部门的配合下，一起制订仪器设备的维修计划，由设备管理部门进行日常的巡

检、维护等工作。与信息技术部门一起工作，信息技术部门负责维护和管理企业的整体信息化基础设施，为数据采集系统网络部署、服务器维护、信息安全保障等提供技术保障，该岗位人员将重点放在数据采集系统和智能运维技术的专业方面，双方一起保证该系统在企业信息化环境中的稳定运行。定期召开跨部门协调会，及时解决项目中遇到的问题，促进部门之间信息共享和协作，保证项目目标的实现。

四、结论

生产装置仪表数据采集系统建设及智能运维技术研究是现代工业生产中一个非常重要的环节。通过对系统进行深入地建设，从准确的需求分析到合理地架构设计，再到严谨的实现和调试，建立起一套高效、可靠的数据收集系统，为生产过程提供丰富而精确的数据支撑。在智能运维技术方面，利用先进的监测、诊断和决策技术，实时监控生产设备的运行状态，快速诊断故障。同时，通过标准化的工作流程和有效的跨部门协作机制，保证了项目从开工到运行维护各个阶段的顺利进行。但是，随着工业技术的不断发展，这一岗位还面临着新仪表技术的应用、大数据和人工智能的深度融合等诸多挑战。因此，要不断地学习和创新，提高自己的专业能力，将生产装置仪表系统推向一个更高层次的智能化水平。

参考文献

- [1] 黄国星. 大型化工装置仪表自控系统的故障处理方法研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43 (14): 25-27.
- [2] 杨力. 自控仪表设备的安装与调试 [J]. 化工管理, 2023, (12): 126-129.
- [3] 杨优才. 化工装置设备分级分类管理的探索研究 [J]. 化纤与纺织技术, 2023, 52 (04): 100-102.
- [4] 赵生春. 化工生产装置现场仪表的管理与维护 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42 (18): 79-81.
- [5] 王永江. 提高化工生产装置仪表自控率的措施 [J]. 化学工程与装备, 2022, (08): 178-179+183.
- [6] 王立建. 化工生产装置现场仪表的管理与维护研究 [J]. 中国设备工程, 2022, (14): 64-66.
- [7] 李栋, 马永洁. 化工生产装置现场仪表的管理与维护分析 [J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12 (03): 290-292.
- [8] 张洪涛. 如何加强仪器仪表及自动化装置维护检修 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41 (18): 11-12.
- [9] 张泽. 石油化工生产装置中仪表维护的常见问题及应对措施 [J]. 中国设备工程, 2021, (06): 59-60.
- [10] 张春严, 王冰亚, 张东东. 氯碱生产装置中安全仪表系统的设计 [J]. 氯碱工业, 2020, 56 (09): 35-38.

大数据驱动的企业精准营销模式构建与实践

孙玥

广东外语外贸大学南国商学院, 广东 广州 510545

DOI:10.613869/ASDS.2025040017

摘要：在信息科技飞速发展的今天，大数据已逐渐成为企业运作的一项重要内容。大数据可以帮助企业提高生产效率，优化流程，降低成本，并在市场营销中发挥着不可替代的作用。在大数据时代，精准营销是一个非常重要的研究方向，它对企业的市场战略产生了深远的影响。通过阐述企业精准营销模式，分析大数据驱动的精准营销模式对企业的影响，发现大数据背景下企业精准营销模式构建面临的数据收集困难、数据分析复杂、精准度不高、隐私保护要求高等挑战，提出数据整合和清洗、引入先进的数据分析技术、建立精准营销模型、保护消费者隐私等实践策略，促进企业发展。

关键词：大数据；企业；精准营销；构建

Construction and Practice of Precision Marketing Model for Enterprises Driven by Big Data

Sun Yue

Nan Guo Business School, Guangdong University of Foreign Studies and Trade, Guangzhou, Guangdong 510545

Abstract： With the rapid development of information technology today, big data has gradually become an important part of enterprise operations. Big data can help enterprises improve production efficiency, optimize processes, reduce costs, and play an irreplaceable role in marketing. In the era of big data, precision marketing is a very important research direction, which has a profound impact on the market strategy of enterprises. By elaborating on the precision marketing model of enterprises and analyzing the impact of big data-driven precision marketing models on enterprises, it is found that the construction of precision marketing models in enterprises under the background of big data faces challenges such as difficult data collection, complex data analysis, low accuracy, and high privacy protection requirements. Practical strategies such as data integration and cleaning, introduction of advanced data analysis technology, establishment of precision marketing models, and protection of consumer privacy are proposed to promote enterprise development.

Keywords： big data; enterprise; precision marketing; construct

引言

在大数据时代，传统的营销理念已不能满足新的形势与要求。大量的广告与信息将消费者团团围住，企业要想在激烈的市场中出人头地非常困难。在这种情况下，精准营销的理念应运而生，并逐步成为企业进行有效沟通、精准触达的有力武器。基于大数据的精准营销研究，将对营销理论的创新与发展起到一定的促进作用，对企业制定更加科学有效的营销战略具有重要意义^[1]。通过对大数据的精准营销研究，企业能够更好的理解客户的需要，从而提升产品的品质与服务的效率，提升企业的竞争力与可持续发展能力。运用大数据开展精准营销，既能提升企业经济效益，又能推动新营销理念与战略的创新发展，促进经济的发展与繁荣^[2]。

一、企业精准营销模式概述

精准营销是企业通过深入理解和分析消费者的需求、兴趣和行为，结合先进的技术手段和数据分析方法，对目标受众进行精准定位和个性化传播的过程。其核心在于确保广告和信息能够准确无误地传达给真正感兴趣的消费者，从而提升传播效果和转

化率。

精准营销的特点包括个性化定位、精准传播以及数据驱动。个性化定位通过大数据分析和人工智能技术实现，确保目标受众的精确划分。精准传播则侧重于选择合适的传播渠道和方式，以最大化广告和信息的传播效果；而数据驱动则依赖于深入的数据分析和挖掘，从海量数据中洞悉消费者的行为模式和偏好，为营

销决策提供科学支撑^[9]。企业需要通过数据分析和市场调研等手段，对消费者进行深入洞察，并构建出鲜明的消费者画像，为后续的精准传播奠定基础。数据分析与挖掘是精准营销不可或缺的一环，它能够帮助企业发现消费者的行为模式和偏好，从而为精准定位和个性化传播提供有力支持。企业需要创作和传播个性化的内容，以满足消费者的需求和偏好，提高用户的参与度和购买意愿。

二、大数据驱动的精准营销模式对企业的影响

（一）提高营销效率

通过大数据分析，精准营销能够识别出大量的用户群中具有购买意向的潜在客户，从而实现有效的营销。通过对大数据的分析，企业能够对客户的行为、消费习惯和需要进行准确的了解，并据此对营销战略进行相应的调整，保证广告的投放以及营销资源的高效使用，实现对目标的准确定位，提升销售的效率。在此基础上，针对不同的用户群，分别制定出个性化推荐内容、个性化广告、个性化客服等不同的营销策略。这种以客户为导向的市场营销方法，不但可以满足客户的个性化需要，而且可以增加客户的粘性，提高客户的总体满意度^[4]。

（二）提高客户满意度

精准营销不仅是针对客户行为的标识，而且要以客户的实际需要为基础进行有效的市场营销。利用大数据对客户信息进行分析，企业能够准确地掌握客户的需要，在与客户的产品、服务、营销、促销等各个环节进行交互的同时，不断地优化客户的体验，提升客户的忠诚与满意度。大数据的精准营销可以通过对客户购物记录、浏览记录、社会化媒体交互等进行深度分析，进而对客户的喜好和需要进行精确的识别。通过对大数据的分析，可以为企业制定合理的营销战略提供科学依据^[5]。企业可以不断地对营销行为进行追踪与分析，并对目标客户群、营销渠道以及创新内容进行调整，从而不断提高转化率。这一动态的适应保证了市场推广的效果和目标，并因此增强了客户的满意度。

（三）提升企业竞争力

传统的批量营销成本很高，但效果不佳，而精准营销则是根据客户的需要来进行有针对性的投放，这样每次营销活动都能更好地贴近目标客户，降低营销成本，提升营销效果。大数据的精准营销，既能有效地提升企业本身的运作与营销效能，又能更好地对市场动向进行影响与掌握，作出迅速的回应，增强企业的真正竞争力。企业能够在行业内更优秀地进行市场营销，将获得更多的优势。通过精准营销，企业可以更好地掌握客户的需要，更高效地开展产品和服务更好地满足客户的需要，提升企业的市场份额，从而获得可持续发展^[6]。

三、大数据背景下企业精准营销模式构建面临的挑战

（一）数据收集困难

在大数据背景下，企业能够从多个途径获得用户数据，其中包括社交媒体、手机应用、网站浏览记录等。但是，由于这些数据分布于不同的渠道，且格式不统一，质量参差不齐，给企业带来了很大的困难。数据的数量是如此之多，客户的信息，竞争对手的信息等，哪些是有用的信息，什么是最有价值的，可以为自

己所用，这一切都需要企业在搜集和整理的时候，用自己的“火眼金睛”来进行分析和控制。准确的数据来源可以让市场营销计划给企业带来收入，而不准确甚至是错误的数据来源，不但会让企业不能增加收入，还会对企业的品牌形象造成负面影响，让企业在客户心中的位置变得不那么重要，还会给企业带来经营风险^[7]。

（二）数据分析复杂

面对海量、结构复杂的数据，企业往往要耗费大量的人力、物力和财力去进行分析，同时，传统的数据分析方法已不能满足大数据的要求，迫切需要引进更多的数据处理技术与工具。企业面临着海量的数据需求，对计算资源的需求也越来越大，对技术水平的要求也越来越高。另一方面，由于多处来源的存在，使得数据具有很强的无序性，因此必须对其进行集成与转化，以保证数据的一致性。信息来源可以是各种渠道与形式，包括结构性与非结构性信息。对于文本、图像、视频等非结构性信息，必须加以特别的处理。另外，由于各个部门所采用的信息格式与纪录方法也各不相同，这就更增添了数据的复杂度。

（三）精准度不高

许多企业在进行精准营销时，因数据采集与分析的难度较大，常常会遇到准确性不足、不能准确地将商品或服务推送给目标客户等问题，从而造成营销成效低下。随着大数据时代的到来，传统的数据分析手段已不能满足大数据时代的要求，企业迫切需要引进更多更先进的技术工具。由于对数据的分析与应用相分离，使得企业在进行精准营销时很难取得预期的效果。很多企业在进行数字化营销时，对目标受众的特征与需要并不能很好地把握，从而不能准确地到达目标人群。劣质的内容不但不能引起使用者的关注，反而会引起使用者的厌恶，从而降低市场的有效性^[8]。

（四）隐私保护要求高

在实施精准营销的过程中，企业经常会对用户的姓名、年龄、性别、地址、联系方式、消费习惯、兴趣爱好等进行过多的采集，而这些信息的采集过程中，有可能是在消费者不知道的时候完成的，也有可能是得到了消费者的同意，但是同意的范围和方式并不清楚、透明。有些企业获取了用户的个人信息，却不按协议目的加以利用，反而拿去作其它非法市场行为，甚至卖给了第三方。这样做既侵害了消费者的合法权利，又会使消费者接收到许多不相关的市场信息，从而产生纠纷。由于技术上的缺陷，黑客攻击，内部人员的违规行为，都有可能导致企业用户的个人信息泄露。数据泄露不仅会使用户的信用卡信息、身份证号码等信息暴露出来，而且还会对用户造成财产损失和人身安全风险。此外，企业在利用大数据进行市场营销时，由于数据分析上的偏差或者算法上的不公平，会对特定的用户群体产生歧视。比如，对消费者的信用等级、消费能力等进行不同的定价和服务，这样的数据歧视违反公平原则。

四、大数据驱动的企业精准营销模式实践策略

（一）数据整合和清洗

企业可通过数据集成与清洗等手段，对不同渠道的数据进行集成、清洗和标准化，以获取高质量的数据。同时，通过构建一个统一的数据平台，对数据进行有效的管理与分析，从而提升了数据的有效性与准确性。数据清洗是大数据分析必不可少的一

环,掌握高效的数据清洗技术,并在实际应用中持续积累,是实现高质量数据分析的重要前提。不管是在商业决策,科研或其它方面,清理后的纯净数据,才是最有价值的。在对数据进行清理之后,再次分析用户的购买行为。

利用数据分析工具,可以直观地显示出消费者所购物品的类别分布、购买时间规则、不同支付模式的使用率。在清理后的精确数据基础上,企业可以对用户的购物喜好有一个更加明确的认识,并据此制订更加精确的营销战略,比如在购物高峰时段进行促销,为不同支付习惯的客户提供个性化支付折扣等,从而使营销效果和客户满意度得到有效的提高^[9]。

（二）引入先进的数据分析技术

企业应该将内部系统数据、合作伙伴数据、共享数据、运营数据等相关数据进行集成,从而达到对数据的充分融合与深度挖掘。通过这些数据的汇聚和集成,企业能够获取更为全面的消费信息,进而做出更加准确的市场决策。利用云计算技术实现数据的高效存储和快速计算,保证数据的质量与安全性。通过有效的存储与运算,企业能够更好地对大量数据进行处理与分析,提高其分析精度与效率。

将人工智能引入到数据分析中,提高数据的智能程度,并与GIS相结合,提高了数据的空间分析能力。借助人工智能、地理信息系统等技术,企业能够更加精确地了解消费者的消费行为与需求,从而更好地进行市场营销。为了保证数据的安全传输与储存,我们使用了区块链这样的技术。在保证数据安全的前提下,企业能够在保证数据可靠的情况下,保护用户的隐私。多源信息融合,为企业提供更全方位商业视野,对市场变化做出迅速反应,实现准确的需求预测。通过需求分析和数据整合,企业可以更好地理解市场需求,制定符合市场需求的营销策略。构建业务模型,对决策过程进行优化,并针对企业的需要进行个性化的数据应用^[10]。

（三）建立精准营销模型

要提高准确性,企业可以构建一个精确的营销模式,通过对客户数据的深入分析与挖掘,发现目标客户的特点与需要,进而制订出准确的营销战略,使营销效率得到有效的提升。利用K-Means等聚类方法,通过用户属性(年龄、性别、地域)、行为(购买频次、金额)、兴趣爱好(浏览内容、关键词)等多维信息,对用户进行分类。每一类客户群都有其共同的特点和需要,因此,企业可以根据这一特点,制订出不同的市场营销战略。例如,将高消费、高频购买的用户归为“核心价值用户”,

为其提供专属的会员权益和优先服务。

利用 Logistic 回归和决策树等算法建立用户的购买量预测模型。通过对用户历史消费数据、行为数据和外部市场环境等数据的分析,对未来某一时期消费者购买某一商品或服务的可能性进行预测。企业能够依据预测的结果,准确地将有关商品的信息及促销活动推送给具有较高购买可能性的消费者,从而提升市场的针对性与转化率。

结合协同过滤和内容过滤等技术,构建基于协同过滤的推荐系统模型。协同过滤是一种通过对具有相同行为、喜好的用户群进行分类的方法,向其推荐其感兴趣的商品。内容过滤算法则根据产品的属性和用户的兴趣标签进行匹配推荐。比如,电商企业通过内容过滤算法,通过对已购买的图书进行内容筛选,向用户推荐同类图书,从而达到更好的服务效果。

（四）保护消费者隐私

为满足用户隐私保护的需要,企业应制定一套完善的数据安全与隐私保护机制,并通过合理的数据采集与使用来保护用户的隐私。用户的私人信息加密,是保障信息安全性的一项重要措施。在存储和传送两个阶段,都需要对数据进行加密。对用户信息的存取有严格的限制。只有被授权的员工可以存取具体信息,而存取层级是基于员工的工作责任而设定的。

企业在搜集信息时,必须遵守“最小必要”的原则,并保证仅对完成某一特定职能的必要信息进行采集。比如,社交媒体平台仅需要采集用户的姓名、邮箱等基本数据,并不需要对用户的地理位置等敏感信息进行强制采集。在数据的处理中,可以使用匿名与非匿名两种方法,通过删除或替代可标识的信息,降低相关的风险。例如,将用户的姓名替换为匿名标识符,确保即使数据被泄露,也无法直接关联到具体个人。

五、结论

总之,随着大数据时代的到来,传统的营销模式也在不断地改变,大数据与营销的深度结合给企业带来了巨大的冲击。大数据的精准营销战略对企业产生了多方面的影响,其所产生的利益与机遇既可以帮助企业提升营销效率与成效,又可以为企业创造更多的市场机遇,从而促进企业的可持续发展与创新。为此,企业应主动利用大数据,制定准确有效的营销策略,持续提高自己的竞争力。

参考文献

- [1] 汪玥. 5G 背景下新媒体营销对饲料企业发展的影响分析 [J]. 中国饲料, 2025, (08): 153-156.
- [2] 陈泰山. 磁电科技企业经济管理中的市场细分与精准营销策略 [J]. 老字号品牌营销, 2025, (05): 16-18.
- [3] 李家伟. 大数据如何驱动企业精准营销 [J]. 投资北京, 2025, (03): 85-86.
- [4] 冯俊峰. 大数据驱动的企业精准营销策略对经营业绩的影响研究 [J]. 营销界, 2025, (03): 55-57.
- [5] 冯振宇. 大数据驱动精准营销策略重塑消费者行为分析 [J]. 商业文化, 2024, (20): 116-118.
- [6] 王璟璟. 互联网时代下数据驱动市场营销决策研究 [J]. 商场现代化, 2024, (22): 59-61.
- [7] 王苗, 李啸驰, 张伟. 大数据背景下企业品牌营销策略研究 [J]. 现代营销 (上旬刊), 2024, (10): 166-168.
- [8] 苏路明. 基于数据驱动的电商企业精准营销: 影响因素与策略选择 [J]. 老字号品牌营销, 2024, (11): 24-26.
- [9] 王娅. 数据驱动的精准营销模型构建探索 [J]. 老字号品牌营销, 2024, (05): 13-15.
- [10] 郝艳东. 基于大数据的卷烟精准营销研究 [J]. 中国产经, 2024, (04): 122-124.

面向无人机的电池智能均衡调控与能效优化 技术应用研究

李文昊*, 刘佰易, 张路坛, 洪镇峰
广东南华工商职业学院, 广东 广州 510507
DOI:10.61369/ASDS.2025040018

摘要： 针对无人机在复杂任务环境下对电池系统高性能与高安全性的双重需求, 本文围绕电池智能均衡调控与能效优化技术展开系统研究。通过分析电池系统的电化学性能与动态负载适应特性, 提出基于多模态感知的状态耦合估计模型, 构建自适应滞回区间动态均衡控制策略, 并引入热-电协同机制以强化系统运行安全。在此基础上, 深入探讨电池材料与结构优化路径, 创新智能均衡调控机制, 并构建热-电一体化能效强化体系。结合工程实测数据验证所提方法在典型工况下的适应性与实效性。

关键词： 无人机电池系统; 智能均衡调控; 热-电协同管理; 能效优化

Research on Intelligent Battery Balancing Control and Energy Efficiency Optimization Technology for Unmanned Aerial Vehicles

Li Wenhao*, Liu Baiyi, Zhang Lutan, Hong Zhenfeng
Guangdong Nanhua Vocational College of Industry And Commerce, Guangzhou, Guangdong 510507

Abstract : In response to the dual demands of high performance and high safety for battery systems in complex mission environments for unmanned aerial vehicles (UAVs), this paper conducts a systematic study on intelligent battery balancing regulation and energy efficiency optimization technologies. By analyzing the electrochemical performance and dynamic load adaptation characteristics of battery systems, a state coupling estimation model based on multi-modal perception is proposed, an adaptive hysteresis interval dynamic balancing control strategy is constructed, and a thermal-electrical collaborative mechanism is introduced to enhance system operation safety. On this basis, the optimization paths of battery materials and structures are deeply explored, an intelligent balancing regulation mechanism is innovated, and a thermal-electrical integrated energy efficiency enhancement system is established. The adaptability and effectiveness of the proposed methods under typical working conditions are verified through engineering measurement data.

Keywords : UAV battery system; intelligent balancing regulation; thermal-electrical collaborative management; energy efficiency optimization

引言

无人机是现代航空技术与智能控制技术相结合的产物, 在军事侦察、后勤保障、农业监控、环保等方面有着广泛的应用, 其续航能力直接关系到任务完成效率与安全。电池是无人机的核心能量源, 其性能稳定与能源利用率已成为制约无人机长时间续航的重要因素。传统电池管理系统在多电池组环境下存在充放电不平衡、能量浪费及使用寿命短等问题, 严重影响系统的可靠性与经济性。智能均衡控制技术通过实时监测单体电池运行状态, 对充放电策略进行动态调整, 有效地缓解了电池之间的失衡, 提高了电池的能量利用率, 延长了电池的使用寿命。该研究不仅可以提高无人飞行器的续航能力, 还可以为电池管理系统的智能化开发提供理论支持与技术途径, 促进无人飞行器技术向更高效率、更可靠的方向发展, 具有重要的科学意义与应用前景。

作者简介:

刘佰易, 广东南华工商职业学院在校生;

张路坛, 广东南华工商职业学院在校生;

洪镇峰, 广东南华工商职业学院在校生。

通讯作者: 李文昊, 广东南华工商职业学院在校生。

一、无人机电池系统工作特性分析

（一）电池系统的电化性能特性分析

无人机电池系统的电化性能由其核心电芯的氧化还原动力学特性决定，主要体现为能量密度、放电倍率、电压平台稳定性及循环寿命等关键参数。如锂聚合物电池，其能量密度一般在200–300 Wh/kg左右，放电平台电压在3.7 V左右，放电结束时会出现明显的电压骤降（ $\Delta V \geq 0.5V$ ），该特性直接影响到无人机的续航能力和任务可靠性。电池内部阻（DCIR）是决定电池瞬时功率输出的关键参数，其典型值要求为5–10 $\mu\Omega$ 。充放电过程中（ $\geq 5C$ ）电极极化效应加剧，限制了锂离子在石墨负极中的嵌脱率，引发浓差极化和欧姆极化，导致电池温升（ $\Delta T \geq 8^\circ C / \text{min}$ ）。此外，固体电解质界面（SEI）的稳定性直接影响其循环寿命，电解液分解副反应加速 SEI 膜厚度（>100nm），导致容量衰减大于0.5%/循环。采用准二维电化学模型定量研究电极孔隙结构、活性物质粒度分布等因素对锂离子扩散系数（ $D_{Li^+} \approx 10^{-10} \text{cm}^2/\text{s}$ ）的影响规律，优化电极微结构设计。热管理系统的设计需要充分考虑其电化性能特性。比如，通过相变材料（PCM）和液冷（液态冷却）来降低电池的工作温度（Arrhenius 方程计算的温度系数 $\alpha = 0.03\text{--}0.05/^\circ C$ ），同时抑制锂枝晶生长（临界电流密度大于2 mA/cm²）。此外，多电芯串并联拓扑需匹配均衡电路（被动均衡精度 $\pm 20\text{mV}$ ，主动均衡效率 > 85%），以消除单体 SOC 差异导致的木桶效应^[1]。

（二）电池系统的动态负载适应特性

电池系统动态阻抗谱具有双容抗弧特性，高频（>1 kHz）表征膜阻抗，低频（<100 Hz）表征电荷转移阻抗（ $R_{ct} > 10\text{--}30 \text{m}\Omega$ ）。利用动态阻抗参数在线辨识，实时修正电池等效电路模型 Rint 或 Thevenin 参数，提高 SOC/SOH 估算精度（误差 <3%）。脉冲放电时（脉冲宽度 <10 秒，峰值电流 $\geq 3C$ ），要求电池保持电压下降 ΔV 小于10% 额定值。实验数据显示，锂离子扩散弛豫时间（ $\tau \approx 30\text{--}60\text{s}$ ）是制约其瞬态响应的主要瓶颈。为此，采用梯度多孔电极（表层为45%，下层为30%）来缩短离子传导路径，并利用硅–碳复合体（ $S/C \geq 5\text{wt}\%$ ）提高负极比容量（>1000 mAh/g）。电池管理系统需要具有毫秒级的动态补偿功能。比如，基于模型预测控制闭环控制策略，在电压崩溃时触发降额保护（3.2V/cell）；利用卡尔曼滤波将开路电压和库仑计数数据进行融合，实现 SOC 估算均方根误差（RMSE）<1.5%。

二、面向无人机的电池智能均衡调控机制设计

（一）基于多模态感知的电池状态耦合估计模型

传统的电压、电流等单一参数检测方法难以满足复杂工况条件下的动态均衡需求，需要建立多模态感知融合的耦合估计模型。该模型通过同步采集电池组内各单体电芯的电压梯度、温度

分布、内阻变化及历史循环数据，结合电化学阻抗谱特征提取，实现荷电状态（SOC）与健康状态（SOH）的协同辨识。在电压梯度分析方面，重点研究串联电池端电压的离散性问题，并利用滑模观测器消除测量噪声的影响，提取出真实的极化压差。利用分布式光纤传感阵列，实时构建0.1 $^\circ C$ 分辨率的三维温度场，并结合热电偶模型，解析温度对欧姆极化效应的影响权重^[2]。针对电池老化导致的容量衰减问题，引入容量增量分析方法（ICA）对充电/放电曲线进行微分，并用特征峰位偏移量化 SOH 的衰减速率。利用扩展卡尔曼滤波（EKF）对多源异构数据进行融合，实现 SOC 估计误差 $\leq 1.5\%$ 和 SOH 预报精度 $\geq 95\%$ 的闭环估计系统，为均衡策略提供动态参考。

（二）自适应滞回区间动态均衡控制

无人机电池组在飞行过程中产生的能量差异，除了电池本体自身的差异外，还受到飞行工况动态载荷的显著影响。传统的定门限无源均衡方式存在响应滞后和能量损失过大等缺点，需要设计具有自适应迟滞特性的动态均衡控制策略。其核心是构建双层滞回层：底层滞回层根据电池 SOC 差设置动态触发阈值（初始阈值 $\pm 3\%$ ）；高级滞回层根据实际飞行载荷（如爬升功耗、悬停时间等）和环境参数（海拔气压、环境温度等）对滞回层进行动态修正。在能量转移路径优化方面，采用分级式主动均衡拓扑结构。一级均衡解决了模块之间的能量差问题，利用双向直流/直流变换器实现跨模块间的能量传递，转换效率最高 $\geq 92\%$ ；二级均衡是在模块内引入开关电容阵列，利用谐振电荷泵技术在核心级进行能量再分配，使电压差减小到5毫伏以下。针对突然加载引起的暂态不平衡问题，引入前馈–反馈复合控制机制，前馈通道根据飞行控制指令对负荷变化趋势进行预测，提前进行预均衡运算；反馈通道采用李雅普诺夫稳定性理论设计非线性均衡控制器，保证强干扰下系统收敛性。

（三）热–电协同管理下的均衡安全强化机制

电池均衡过程伴随能量转移与焦耳热效应，会导致电池局部过热，甚至出现热失控。需要构建热力耦合深度协同的均衡安全强化系统，并基于热力学约束对均衡参数进行动态优化。首先，建立电池产热模型，利用伯纳迪方程计算电池产热速率，并结合计算流体力学（CFD）模拟计算电池温度场演化趋势。当电池温度超过安全阈值时，系统会自动启动均衡电流降额模式，并采用可调脉宽调制技术实现电池能量传输速率和散热能力的动态匹配。在散热结构设计方面，采用相变材料（PCM）和微热管（Micro 热管）的复合散热方案。将相变材料包覆在电池表面，利用潜热吸收来抑制平衡时的瞬态温升；将微热管网络嵌入蓄电池组件中，利用毛细力驱动气液两相流动，达到快速散热的目的。在检测到局部热点（温度梯度 $\geq 8^\circ C$ ）时，优先启动有源均衡，将高 SOC 电池的能量传输至低温区，并提高相应区域的散热风扇转速，形成冷热双向负反馈调控。此外，针对高海拔低气压环境导致的散热效率下降问题，设计气压自适应均衡保护算法。利用气

压传感器实时测量周围空气压力，对允许的最大均衡电流进行动态修正^[3]。

三、面向无人机的电池能效优化技术路径研究

（一）电池材料与结构的深度优化

在材料选择方面，突破传统锂-聚合物电池的局限，探索新的电极材料和电解质体系。采用高比容量硅-碳复合体替代部分石墨型负极材料，充分发挥硅材料理论比容量高的优点，提高电池的能量密度。设计合适的电解液添加剂，提高电极/电解质界面相容性，抑制副反应，减少自放电和能量损失。电池的结构设计摒弃了传统的同质结构，采用了梯度的设计策略。例如，设计具有梯度孔隙的电极，调控电极各部分的孔隙结构，优化锂离子传输路径，降低离子扩散阻力，提高充放电速率。在电池内部构筑三维立体导电网络，提高电子输运效率，降低内阻，降低电池运行时的欧姆热损失。此外，对多电芯串并联拓扑进行创新，通过模块化和可重构设计，灵活调整电池组的串并联方式以满足不同飞行任务的需要，保证电池组始终处于高效工作状态。

（二）智能动态均衡调控机制创新

构建多模态感知融合体系，突破单参数检测的局限性，实现电池组各单体电池电压、温度、内阻等多维数据的同步采集，结合电化学阻抗谱特征分析，实现电池荷电状态和健康状态的精准协同识别。采用自适应滤波等先进信号处理算法，有效地消除了数据采集过程中的噪声干扰，提高了数据的精度。建立双层滞回层模型，底层滞回层根据电池 SOC 差异设置初始触发阈值，并结合实际飞行载荷和环境参数动态修正阈值，实现均衡策略与实际工况深度匹配。采用分层有源均衡拓扑，在模块间与模块内分别采用高效的能量转移技术，如双向 DC/DC 变换器与开关电容阵列相结合的方式，提高均衡效率，减少能量损耗。采用前馈-反馈复合控制机制，前馈通道根据飞行控制指令对负荷的变化进行预均衡；反馈通道基于稳定性理论设计非线性均衡控制器，确保电池系统在各种工况下的稳定性与高效性。

（三）热-电协同与安全强化体系构建

构建热-电深度协同管理机制，建立电芯产热模型，结合散热特性分析，动态优化电池工作参数。采用可变脉冲宽度调制技术，实现能量传输速度与散热能力的匹配，避免因过热累积引起的电池性能退化和安全隐患。在散热结构设计方面，利用相变材料（PCM）和微热管（Micro 热管）进行复合散热。利用潜热吸收原理，有效地抑制了电池工作时的瞬态温升；微热管网络利用良好的导热性能，将电池内部热量快速排出，保证电池堆内温度分布均匀。同时，研究热-电双向负反馈调控机制，使热管理控制器和电池均衡系统实时共享数据，在检测到局部热点时，优先启动有源均衡，实现高 SOC 电池能量向低温区传输，并强化相应

区域的散热能力^[4]。针对高海拔、低压等不同环境条件，设计自适应安全防护算法，根据环境参数动态调整电池运行边界条件，以保证电池在复杂环境中的稳定、高效运行，实现电池能量效率和安全双重提升。

四、工程应用与实测案例分析

（一）工程概况

某大型无人机制造企业在其新型行业级无人机系统研发中，针对高原巡检、电力巡线及应急物资投送等复杂场景，开展了电池能效优化技术的工程化应用。该项目选用锂聚合物电池体系为基础，融合硅碳复合负极材料与梯度孔隙率电极结构设计，构建了具备自适应均衡调控与热-电协同管理的智能电池系统。电池组额定容量 5800mAh，能量密度达 260Wh/kg，采用 12S2P 串并联结构，集成多模态传感器，实现 DC/DC 双向能量流动和毫秒级动态响应控制。该系统采用微热管和相变材料复合散热技术，在 -20℃ -50℃ 环境温度范围内实现电芯温度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 的精确控制。该系统与自主研发的六旋翼无人机平台相匹配，采用 850mm 机身，起飞重量为 12kg，设计载荷为 3kg，目标是在复杂环境下续航超过 20%，使用寿命超过 800 次。

（二）典型任务工况下性能表现分析

在高原电力巡检工况中，无人机需在海拔 4000m 以上区域执行长航时飞行，面临低气压散热效率下降与高频次变载需求。实测显示，电池系统在爬升至目标高度时，由空气压力自适应均衡算法自动调节到 0.6C，并结合前馈控制，提前对负载突变引起的电压波动进行补偿，使得电池端电压的离散度保持在 5mV 以内，避免了传统系统因局部过放电引起的容量衰减。在运行过程中，利用微热管实现电池组温差小于 1.5℃，利用相变材料有效抑制瞬态温升，达到 $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ ，比传统方案降低 8℃。在城市物流配送工况下，无人机需要频繁的起降和起降，其脉冲放电峰值可达 8C。梯度多孔电极结构可有效提高锂离子输运效率，将电压下降幅度控制在额定值 8% 以内，满足瞬时功率输出要求。BMS 根据多模态传感数据实时修正等效电路模型参数，估算 SOC 均方根值误差不超过 1.2%；结合再生制动能量回收算法，实现单次配送任务能量回收率达到 15%，较传统系统提高 50% 以上。针对高温环境应急投送工况（环境温度为 45℃），采用可变脉冲宽度调制技术，动态调节散热风扇转速，并结合主动均衡技术，实现高 SOC 电池组能量向低温区传输，达到 42℃，低于传统系统 55℃ 的临界温度，在保证均衡效率的前提下，避免热失控风险^[5]。

（三）效果分析

工程应用实测表明，优化后的电池系统在多场景任务中展现出显著能效优势。与企业前代产品相比，在复杂工作状态下，续航时间由 55 分钟延长到 67 分钟，满足远距离巡检和超视距作业的

要求；电池电压离散度降低60%，均衡时间缩短40%，能量传输效率提高93%，有效缓解串并联结构的木桶效应。通过热-电协同管理，将电池组运行温度的标准差降低至1.8℃，循环寿命试验表明，充放电循环后，电池容量保持率达到85%，比传统方案提高15%，显著降低了运营成本。同时，将-10℃低温环境中启动时间缩短至30秒，高原功率衰减率控制至10%以内，全面提升无人机在极端环境中的工作可靠性。项目成果将为无人机产业级动力电池系统设计提供可复制的工程化范例，促进无人机从民用到专业应用的效能突破。

五、结语

面向无人机复杂运行需求，本文构建了融合多模态感知、动态均衡控制与热-电协同管理的电池智能调控体系，有效提升了电池系统的能效水平与运行安全性。通过工程实测试验，所提技术路径在典型任务工况下表现出良好的适应性与应用价值。未来研究可进一步拓展面向多类型无人系统的电池协同管理机制，结合人工智能算法实现更高精度的状态估计与负载预测。

参考文献

- [1] 任东哲, 邵帅, 王剑峰, 等. 分布式无人机蜂群电池性能综合管理和预测方法 [J]. 今日制造与升级, 2024, (07): 10-12.
- [2] 宇文璞玉, 徐狄柯, 肖振华, 等. 光伏电站智能运维无人机技术研究 [J]. 电子元件与信息技术, 2023, 7(07): 191-194.
- [3] 蓝誉鑫, 刘奕麟, 尹胜立, 等. 无人机电池充电管理系统的优化与应用 [J]. 集成电路应用, 2023, 40(04): 380-381.
- [4] 王星, 杜春平, 夏腾辉, 等. 无人机电池智能维护系统设计 [J]. 装备制造技术, 2021, (11): 116-120+128.
- [5] 郭凯, 王亚晓, 张文辉. 无人机电源的智能充电器系统研究 [J]. 现代电子技术, 2021, 44(14): 60-64.

基于 LightGBM 模型的信贷违约概率预测研究

黄乐乐, 陈林

暨南大学管理学院, 广东 广州 510632

DOI:10.61369/ASDS.2025040019

摘 要 : 信用评级是信贷业务的核心, 为此各种统计建模方法应运而生。随着大数据时代的到来, 收集数据的范围显著扩大, 可用于信用评级的特征数量也随之增加。这些带来了特征冗余的风险, 因此特征选择是建模过程中至关重要的一步。本文提出了一种两阶段信用评分建模方法。首先对全部特征进行基于 Mean Variance 的独立性检验, 进行初步筛选, 然后采用基于 LightGBM 的分类模型得到最终的违约概率预测模型。此外, 我们构建了一个虚拟特征, 用于检测模型中是否仍然存在冗余特征。最后, 将该方法应用于实际的在线信贷业务数据, 以评估该方法的有效性。

关 键 词 : 信用评级; 特征冗余; 独立性检验; LightGBM

Research on Credit Default Probability Prediction Based on LightGBM Model

Huang Lele, Chen Lin

School of Management, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632

Abstract : Credit scoring is central to the credit loan business, and various statistical modeling methods have been developed for this purpose. With the advent of the big data era, the scope of collected data has expanded significantly, leading to an increase in the number of features available for credit scoring. However, this also introduces the risk of redundant features, making feature selection a crucial step in the modeling process. This paper presents a two-stage credit scoring modeling method. In the first stage, an independence test based on mean variance is performed on the entire set of features for preliminary screening. In the second stage, classification models based on LightGBM are employed, with further feature selection carried out to refine the final model. In addition, we constructed a virtual feature to help detect whether there are still redundant features in the model. Finally, the proposed method was also applied to real-world online lending data, which yielded promising results to evaluate the effectiveness of the model.

Keywords : credit scoring; redundant features; independence test; LightGBM

引言

随着互联网金融的快速发展, 个人消费信贷也变得更加快捷便利。基于信用的网贷业务蓬勃发展, 主要的产品形态包括现金贷、现金分期、消费分期、虚拟信用卡等。尽管产品形态各异, 但其背后风险管理的核心逻辑依然是对借款人风险的精准评估。目前, 业界最常用的信用评估工具是各种信用模型。模型的效果取决于模型的输入, 即输入的各种特征变量, 以及具体的模型算法, 例如逻辑回归模型、决策树模型、随机森林模型、GBDT、XGBOOST、LightGBM^[1]等。

首先, 我们关注信用风险模型可用的特征。传统金融机构通常能够获取央行信用报告及相关信用报告产品。从这些报告中提取的各种特征对于逾期付款预测非常有效。由于这些特征是可靠的预测指标, 对模型的要求相对较低, 使得常用的评分模型能够取得良好的效果。在线贷款平台通过互联网广告吸引客户, 鼓励用户下载安装其应用, 并完成注册流程。在此过程中, 在用户同意的情况下, 平台可以访问用户设备中的各种数据, 包括手机型号、品牌、内存大小、电池状态、已安装的应用列表以及短信内容等。这些数据与传统金融机构收集的数据存在显著差异。通常, 单一的设备信息特征无法有效预测逾期付款。传统模型基于这些特征评估信用风险时, 结果往往不尽如人意。因此, 这促使我们寻找更合适的模型, 将现有特征应用于新的在线业务场景。

接下来, 我们将回顾信用评分中特征筛选和主要信用模型的发展历程。首先, 我们关注信用模型。50年代, Bill Fair 和 Earl Isaac 提出基于 Logistic 回归模型的 FICO 信用评分体系, 成为业界应用最成熟的信用风险模型。Crook 和 Banasik 等 (2004)^[2] 对拒绝推断

作者简介:

黄乐乐 (1986-), 男, 河南济源人, 博士后;

陈林 (1981-), 男, 广东河源人, 教授。

方法是否能提高信用风险评估模型的预测效果进行了研究，在重加权方法、插值方法和二元 probit 方法情形下比较了拒绝推断的结果。Chen 和 Åstebro (2012)^[3] 考虑了非随机缺失情形下信用风险评估中的拒绝推断问题，并引入了贝叶斯方法。Feng 等 (2018)^[4] 考虑了在信用风险评估中第一类错误和第二类错误的相对损失，基于柔性概率给出了一种动态集成方法。Dirick 等 (2019)^[5] 在信用评估中引入了宏观经济相关变量，使用 mixture cure 模型预测借贷者的违约概率。Fang 和 Chen (2019)^[6] 指出在建模过程中将目标函数设定为 KS 取到最大值，在综合考虑模型表现、计算复杂度和模型可解释性方面具有明显的优势。Shen 等 (2020)^[7] 提出一种基于迁移学习的三阶段拒绝推断框架用于信用评分，有效地解决了负迁移问题。Nikita 等 (2022)^[8] 为 GBDT 引入了逐步特征增强机制，基于树的嵌入技术简化了特征增强的过程。Mushava 和 Michael (2022)^[9] 基于 XGBoost 提出使用广义极值 (GEV) 分布的分位数函数作为链接函数来增强对罕见情况的检测。He 等 (2023)^[10] 为了解决利用多源信息进行信用评分的这些挑战，提出了一种基于逻辑回归的去中心化多方方法，使用垂直联邦学习范式制定逻辑回归模型。Chatterjee 等 (2023)^[11] 从宏观视角对信用评级在信贷市场中的作用进行了研究。此外，关于信用模型的研究成果还有很多，在此无法一一列举。

现在我们来回顾一下特征筛选方面的研究进展。在高维数据集中，预测因子 (自变量) 的数量巨大，多重共线性、过拟合和计算效率低下会显著影响预测模型的稳定性和可解释性。为了应对这些挑战，特征筛选方法被用作预处理步骤，以识别和消除不相关或冗余变量。通过降低输入空间的维数，这些方法不仅增强了模型性能，还提高了计算效率和可解释性。特征筛选在信用风险建模、基因组学和图像处理等场景中尤为重要，因为这些场景中潜在预测因子的数量通常远远超过观测值的数量。常用的筛选技术包括 LASSO^[12]，SCAD^[13] 等，以及很多基于独立性检验的统计量用于特征筛选，如 Cui 等^[14] 提出的 Mean Variance (MV) 统计量。陈等^[15] 使用均值方差指数 (MV) 和卡方独立性检验进行变量选择并进行违约概率预测，取得了良好的结果。王等^[16] 使用 MV 统计量对员工离职的影响因素进行了分析，取得了不错效果。

本文探讨了一种两阶段信用评分建模方法，并将其应用于个人消费信贷的真实数据集。本文的其余部分结构如下：第一部分介绍了所使用的变量选择方法、分类器和评估指标。第二部分将分析个人消费信贷相关数据，基于真实数据展示如何使用本文提出的方法建立信用风险评估模型。最后，第三部分将介绍主要结论和讨论。

一、主要模型及方法

(一) MV 方法

MV(mean of variance) 指标是 Cui 等^[14] 提出的一种非参数检验统计量，可用于度量连续型变量和分类变量之间的独立性。设 X 为连续随机变量， Y 为 R 分类的分类变量，记作 (y_1, y_2, \dots, y_R) ，则 $MV(X|Y)$ 指标定义为

$$MV(X|Y) = E_X(Var_Y(F(X|Y))),$$

其中 $F(X|Y) = P(X \leq x|Y)$ 表示给定 Y 时 X 的条件分布函数。 $MV(X|Y) = 0$ 等价于 X 与 Y 相互独立。样本形式的 MV 检验统计量为：

$$\hat{MV}(X|Y) = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^n \hat{p}_r \left(\hat{F}_r(X_i) - \hat{F}(X_i) \right)^2,$$

其中 $\hat{F}_r(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I(X_i \leq x, Y_i = y_r)$ ，是给定 $Y = y_r$ 条件下 X 的经验条件分布函数， $\hat{F}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I(X_i \leq x)$ 是 X 的无条件经验分布函数， $p_r = \frac{1}{n}$ 为第 r 类的样本比例， $I(\cdot)$ 为示性函数。

(二) LightGBM 模型

LightGBM (Light Gradient Boosting Machine) 是一种基于决策树算法的梯度提升模型，通过集成多个弱分类器来提升预测效果，特别适用于大规模和高维度的数据集。与传统的梯度提升方法不同，LightGBM 采用基于叶子的树生长策略，并通过限制树的深度来控制复杂度。此外，LightGBM 还引入了多种优化技术，如基于直方图的决策树学习、基于梯度的一侧采样 (GOSS) 等，使其在性能和速度上具有显著优势。凭借其高效性和准确

性，LightGBM 已被广泛应用于学术研究和工业实践中。

假设训练数据为：

$$D = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^n,$$

模型预测值为：

$$\hat{y}_i^{(t)} = \sum_{k=1}^t f_k(x_i),$$

其中 $f_k \in F$ 是第 k 棵树， F 是 CART 树的函数空间。

每一轮迭代的目标是最小化损失函数的泰勒展开 (通常使用二阶展开)：

$$L^{(t)} \approx \sum_{i=1}^n \left[g_i f_i(x_i) + \frac{1}{2} h_i f_i(x_i)^2 \right] + \Omega(f_i)$$

其中：

$$g_i = \frac{\partial L(y_i, \hat{y}_i^{(t-1)})}{\partial \hat{y}_i} \text{ 为一阶导 (梯度)}$$

$$h_i = \frac{\partial^2 L(y_i, \hat{y}_i^{(t-1)})}{\partial \hat{y}_i^2} \text{ 为二阶导 (Hessian)}$$

$\Omega(f)$ 是树结构的正则项，用于防止过拟合

二、实证分析及结果

我们使用某在线借贷平台的实际业务数据进行建模。每一笔借款订单为一个样本，我们观察到期日后 30 天内用户是否还款，

还款则为好客户，不还则为坏客户。

该批数据共有18444个样本，我们根据时间选择申请时间距今最近的2770个样本作为 OOT 数据集。使用的特征共1433个，主要分为三大类：用户输入的个人相关信息（如性别、年龄）、从用户手机采集的信息以及借贷 app 的埋点信息。其中，以“app_”开头的特征为基于手机安装的 app 列表衍生得到的特征，如“app_up_FINANCE_3d”表示3天内更新过的金融类 app 的数量。以“tag_”开头的特征为基于短信记录衍生得到的特征，如“tag_1_num_60d”表示60天内收取的类别为1的短信的数量。其他特征则为关键字正则匹配得到的相关统计特征，如“bank_num_20d”表示20天内收到的含有银行相关关键字的短信数量。

首先使用 MV 指标对全量特征进行扫描，在99%置信水平下，有277个特征显著地与因变量不独立，可以作为后续建模的备选特征。经过特征初筛，我们将原始的1433个特征减少到277个特征，在尽可能不损失信息情况下降低了后续模型的复杂度。

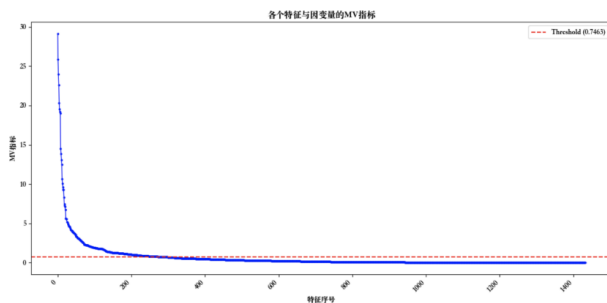


图1. 各个特征与因变量的 MV 指标取值

接着，我们使用277个特征作为备选特征，并引入一个虚拟特征（服从标准正态分布的随机数），共计278个特征，进行 LightGBM 建模。将数据集随机划分为训练集和测试集，并调整参数，得到最终模型。在参数调整过程中，关注虚拟特征是否入选模型。如果虚拟特征入选模型，则继续对参数进行微调，尤其是 L1 惩罚参数。经过多次随机划分训练集和测试集，我们发现经过 MV 指标初筛后再进行建模，虚拟特征基本不会入选模型。经过参数调整及虚拟特征验证我们得到了最终的模型，有181个特征入选模型，图2展示了前25个重要特征的名称及 gain 取值。模型在 OOT 数据集上具有良好的效果，KS 达到0.34以上（图3）。模型在训练集和测试集上的 KS 均为0.36，整体模型表现平稳。

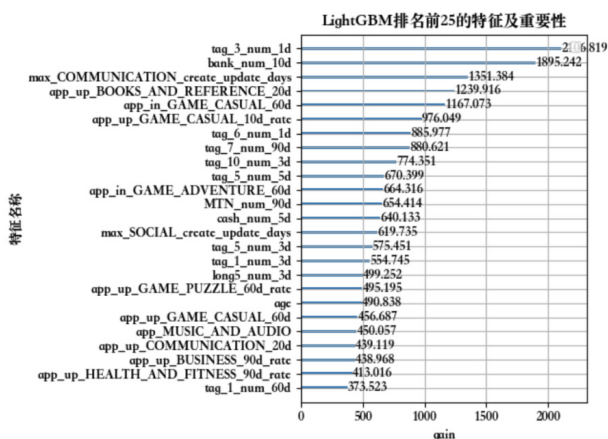


图2. 模型排名前25的重要特征

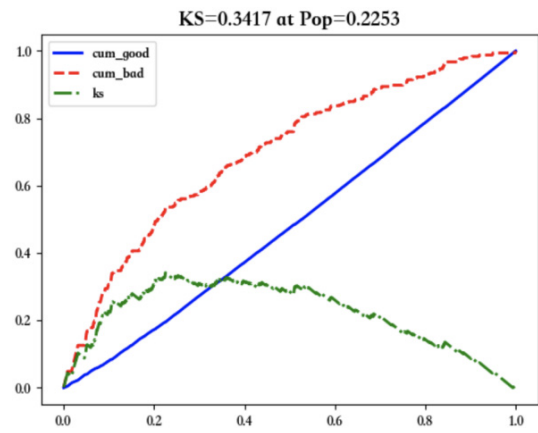


图3. 模型在 OOT 数据集上的效果

三、结束语

本文提出的两阶段信用评分建模方法，通过 Mean Variance 独立性检验的初步特征筛选和 LightGBM 分类模型的精准预测，有效解决了高维特征环境下构建信贷模型的特征冗余问题。此外，创新性地引入虚拟特征检测机制，进一步确保了模型的精简性与可靠性。实际业务数据的验证结果表明，该方法不仅显著提升了信用评分的准确性，同时增强了模型的稳定性，为大数据时代的信贷风险管理提供了切实可行的解决方案。未来研究可进一步探索动态特征更新机制，以适应不断变化的信用风险环境。

参考文献

- [1] KE G, MENG Q, FINLEY T, et al. LightGBM: A highly efficient gradient boosting decision tree[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2017, 30: 3146–3154.
- [2] BANASIK J, CROOK J, THOMAS L. Sample selection bias in credit scoring models[J]. Journal of the Operational Research Society, 2003, 54(8): 822–832.
- [3] CHEN G G, ASTEBRO T. Bound and collapse Bayesian reject inference for credit scoring[J]. Journal of the Operational Research Society, 2012, 63(10): 1374–1387.
- [4] FENG X, XIAO Z, ZHONG B, et al. Dynamic ensemble classification for credit scoring using soft probability[J]. Applied Soft Computing, 2018, 65: 139–151.
- [5] DIRICK L, CLAESKENS G, JERUSALEM G, et al. Macro-economic factors in credit risk calculations: including time-varying covariates in mixture cure models[J]. Journal of Business & Economic Statistics, 2019, 37(1): 40–53.
- [6] FANG F, CHEN Y. A new approach for credit scoring by directly maximizing the Kolmogorov-Smirnov statistic[J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2019, 133: 180–194.
- [7] SHEN F, ZHAO X, KOU G. Three-stage reject inference learning framework for credit scoring using unsupervised transfer learning and three-way decision theory[J]. Decision Support Systems, 2020, 137: 113366.
- [8] KOZODOI N, JACOB J, LESSMANN S. Fairness in credit scoring: Assessment, implementation and profit implications[J]. European Journal of Operational Research, 2022, 297(3): 1083–1094.
- [9] MUSHAVA J, MURRAY M. A novel XGBoost extension for credit scoring class-imbalanced data combining a generalized extreme value link and a modified focal loss function[J]. Expert Systems with Applications, 2022, 202: 117233.
- [10] HE H, ZHANG S, SHEN F, et al. A privacy-preserving decentralized credit scoring method based on multi-party information[J]. Decision Support Systems, 2023, 166: 113910.
- [11] CHATTERJEE S, CORBAE D, NAKAJIMA M, et al. A quantitative theory of the credit score[J]. Econometrica, 2023, 91(5): 1803–1840.
- [12] TIBSHIRANI R. Regression shrinkage and selection via the lasso[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology), 1996, 58(1): 267–288.
- [13] FAN J, LI R. Variable selection via nonconcave penalized likelihood and its oracle properties[J]. Journal of the American Statistical Association, 2001, 96(456): 1348–1360.
- [14] CUI H, LI R, ZHONG W. Model-free feature screening for ultrahigh dimensional discriminant analysis[J]. Journal of the American Statistical Association, 2015, 110(510): 630–641.
- [15] 陈秋华, 杨慧荣, 崔恒建. 变量筛选后的个人信贷评分模型与统计学习[J]. 数理统计与管理, 2020, 39(2): 13.
- [16] 王冠鹏, 秦双燕, 崔恒建. 员工流失的影响因素分析与预测[J]. 系统科学与数学, 2022, 42(6): 1616–1632.

基于 BIM 技术的电力工程全生命周期管理优化研究

章斌

浙江省电力建设有限公司, 浙江 宁波 315000

DOI:10.61369/ASDS.2025040020

摘要： 随着 BIM 技术在电力工程建设中的广泛应用，对电力工程全生命周期管理提出了更高的要求。BIM 技术以其强大的数据集成、可视化及协同能力，为电力工程提供了新的全生命周期管理方案。本文旨在探讨 BIM 技术在电力工程全生命周期管理中的应用，分析其在项目规划、设计、施工、运营及维护等各个阶段的优化作用。系统集成 BIM 技术可以有效地提高项目管理的透明度、协同效率和辅助决策能力，从而实现资源优化配置，降低成本，提升工程质量与安全水平。BIM 技术的引入为电力工程的全生命周期管理提供了新的思路和解决方案，具有广阔的应用前景和深远的影响。

关键词： BIM 技术；电力工程；全生命周期管理；项目优化；资源配置

Research on Optimization of Full Life Cycle Management of Power Engineering Based on BIM Technology

Zhang Bin

Zhejiang Electric Power Construction Co., LTD, Ningbo, Zhejiang 315000

Abstract： With the wide application of BIM technology in power engineering construction, higher requirements have been put forward for the full life cycle management of power engineering. BIM technology, with its powerful capabilities of data integration, visualization and collaboration, provides a new full life cycle management solution for power engineering. This paper aims to explore the application of BIM technology in the full life cycle management of power engineering and analyze its optimization role in various stages such as project planning, design, construction, operation and maintenance. System integration BIM technology can effectively enhance the transparency, collaborative efficiency and auxiliary decision-making ability of project management, thereby achieving optimal resource allocation, cost reduction, and improving the quality and safety level of the project. The introduction of BIM technology provides new ideas and solutions for the full life cycle management of power engineering, and has broad application prospects and profound influence.

Keywords： BIM Technology; electric power engineering; full life cycle management; project optimization; resource allocation

随着电力行业的迅速发展，电力系统日趋复杂，对电力工程的施工、运行、维护提出了更高的要求。如何在全生命周期内实现各个阶段的有效衔接和优化，是提高电力工程整体效益的关键。近年来，随着建筑信息模型技术的逐渐成熟与应用，为电力工程项目管理带来了新的契机。BIM 技术以其强大的数据集成、可视化、协同能力，为电力工程全生命周期管理提供了一种全新的思路。基于 BIM 的电力工程全生命周期管理优化研究，是电力行业亟待解决的重要课题。

一、BIM 技术概述

建筑信息模型（BIM，Building Information Modeling）作为一种以数字手段整合建设项目各阶段信息的创新方法，在建筑业的各个阶段得到了广泛应用。自 20 世纪 70 年代 Eastman 首次提出 BIM 技术以来，BIM 技术在建筑工程领域得到了越来越广泛的应用，并已成为建筑工程生命周期管理的核心工具^[1]。BIM 技

术不只是一个几何模型，它还包含了多个维度的信息，如功能需求、时间进度、成本控制、运营维护等。该方法的实质就是通过建立虚拟数字模型，将项目各要素的物理特性与功能特性整合到一个共享平台上，从而实现项目各方的协同工作。

BIM 技术最大的优点就是可以为建设项目各个阶段的信息共享和协同管理提供一个综合性的信息平台。该平台使各参与方能够在一个统一的信息环境中完成设计、建设、运行和维护，从而

避免出现“信息孤岛”的现象。随着科技的进步，BIM 已从传统的建筑业，逐渐延伸到电力、基础设施等行业，为项目管理的优化和创新提供了有力的技术支撑。因此，以 BIM 技术为核心的电力工程设计、施工和运营管理正发生着深刻的变革。

二、BIM 技术在电力工程各阶段的应用

（一）决策阶段

在电力工程项目决策阶段引入 BIM 技术，可以为项目前期提供更准确的数据支撑。通过建立电力工程三维数字模型，使相关决策者能够在虚拟环境中对项目进行全面的了解。BIM 技术是一种能够在项目前期快速识别潜在风险和障碍的有效方法。BIM 技术可以有效地预测项目进度、成本和资源变化趋势，为决策者提供科学依据，对工程计划进行优化。BIM 技术的应用，降低了决策过程中的信息孤岛，保证了项目团队间的信息共享和协作，提高了决策的质量与效率。

（二）设计阶段

BIM 技术应用于设计阶段，主要是通过构建三维数字模型，实现设计信息的全面集成。通过 BIM 平台，工程师可以将各种设计需求转化成三维模型，既提高了设计可视化的程度，又保证了设计方案在实施之前经过充分地检验和优化^[2]。在设计阶段，利用 BIM 技术可以对设计方案的可行性、成本控制、资源需求等进行实时评估，并避免可能出现的冲突和错误。设计者可以在设计阶段对施工过程、运行效果和系统功能进行模拟，提前识别和解决可能出现的问题。BIM 技术在工程设计中的应用，可以有效地降低设计阶段的返工与修改，保证项目实施方案的准确性和经济性，为以后的建设、招标等工作打下坚实的基础。

（三）招投标阶段

BIM 技术在电力工程招投标中的应用，极大地提高了招投标工作的透明度和效率。在 BIM 平台上，招标方能够提供详细的工程模型及相关数据，从而为潜在投标方提供准确的报价和资源分配预测。BIM 可视化的特点使投标者对项目规模、建设难度、资源需求等有了直观的认识，避免了由于数据错误和信息不对称所带来的成本偏差或工期延误。BIM 模型在招投标过程中的应用，可以帮助评标专家更准确的比较各种投标方案的优劣，保证招标过程的公平和公正。同时，BIM 技术还可以通过对历史数据和现有数据的对比分析，帮助各方做出科学的决策，提高招投标的准确性，降低工程成本的不确定性。

（四）施工阶段

BIM 技术在施工阶段的应用，可以实现对施工过程的实时监测和数据分析，对施工管理进行优化。借助三维数字化转型，施工队伍可以准确掌握每个施工任务的进度，并与设计方案相对照，保证施工过程的精准执行。BIM 技术可以为施工单位提供工程量清单、工程进度、材料需求和人员安排等详细信息，使施工队伍能够更好地安排施工任务。通过将施工现场的数据与 BIM 模型进行关联，施工管理人员能够实时掌握施工进度和质量情况，及时发现和解决施工过程中出现的问题，防止工程成本出现偏差。BIM 技术还可以

对施工过程中可能出现的风险进行预测，提前采取预防措施，降低工程造价和工期延误，提高项目的总体效率和质量。

（五）竣工阶段

竣工阶段是电力工程项目生命周期的最后环节，BIM 技术的应用可以极大地提高工程竣工验收与结算的准确性。通过 BIM 模型，建设单位可直观地看到整个建设过程及最后的成果，保证各项施工标准及技术规范的执行。在竣工验收阶段，BIM 技术不仅能提供详尽的工程量数据，而且有助于评审人员全面评价项目质量。同时，BIM 技术还可以使工程结算更加精确，保证成本管理数据的准确完整。通过对各项施工流程的精确数据提取与分析，BIM 技术可以细化竣工阶段成本计算，有助于项目团队发现、总结项目中可能存在的浪费与管理漏洞，为后续项目提供有价值的经验和数据支撑。

（六）运行维护阶段

在电力工程运行维护阶段，BIM 技术为项目后期运营管理提供了强有力的数据支撑与管理手段。BIM 技术是一种将维护数据、设备信息集成到数字化转型中的技术，可以在设备发生故障后快速定位故障，从而实现设备维修和更换的目的。同时，基于 BIM 的数字平台还可以对设备进行健康监控和维护预警，提前预知设备可能发生的故障及维护需求，从而避免因设备故障造成的停机或安全事故。借助 BIM 技术，运维人员可以直观地了解设备的运行状况、维护历史和相关参数，从而提高运维管理的效率。同时，BIM 技术还可以将运行过程数据与工程设计、施工数据相比较，对后期设备管理和维护决策进行优化，提升电力工程生命周期管理效益和经济效益。

三、传统的电力工程项目管理模式的缺陷分析

（一）进度管理粗放

在传统的电力工程项目管理模式，施工进度管理多采用线性或者简单的分段方式进行，缺乏精细的衔接和协调。这样的管理模式往往会造成项目实施过程中的进度安排不够精准，特别是当多个环节并行推进的情况下，往往会造成项目的延误和资源的浪费。如图 1 为电网企业现行的工程建设管理组织模式图，因为各个部门都有明确的职责划分，所以进度管理大部分都是由各个部门独立完成的，缺少一个统一的调度和信息共享机制，所以信息流通相对滞后，很难实时掌握和调整进度^[3]。此外，传统的项目进度控制主要依靠经验判断与人工监测，缺乏有效的数据支撑与智能手段，难以对突发事件进行快速响应，增加了项目延期风险。

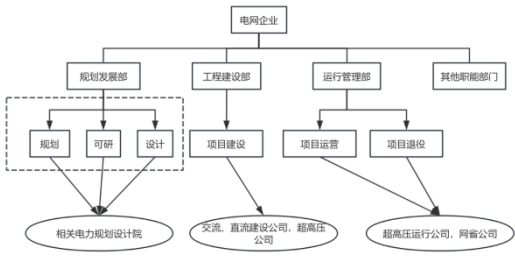


图1 电网企业现行的工程建设管理组织模式图

（二）质量追溯困难

传统管理方式下，质量控制工作分散于各个管理阶段、不同部门，造成了信息传递上的滞后与不连贯。电力工程质量管理在设计、采购、施工和运行各阶段的责任划分不清，不同部门之间的质量意识标准也不一样。质量问题一旦产生，往往难以溯源，使得工程管理人员只能依靠表面检验和验收结果来应对，难以对过程进行有效地控制与预防。传统的质量管理模式缺少有效的质量信息记录体系，在出现问题时很难追溯过去的工作数据，增加了错误更正的成本。此外，质量管理的结果往往是局部的，难以系统性地覆盖整个项目生命周期，难以形成闭环管理。

（三）人员协同效率低

传统的电力工程项目管理模式存在着部门壁垒，各管理部门之间虽然分工明确，但是很难实现跨部门协同工作，特别是在信息交换、资源调度等方面。由于各部门侧重于自己的工作内容和短期目标，缺乏系统的认识和协调，导致信息滞后或错误。项目组成员间缺乏有效的沟通机制，导致决策效率不高，工作重复与冲突现象时有发生。此外，各阶段的人员调度与资源配置都有很大难度，尤其在突发事件中，当跨部门协作需求强烈时，往往会出现信息不对称、管理层级过多等问题，导致项目整体执行效率下降。

（四）电力工程全生命周期的绿色管理不足

传统的电力工程管理模式没有将环境保护和可持续发展的理念贯穿于整个项目生命周期的每一个阶段。传统绿色管理模式仅限于施工阶段的环保措施，缺少从规划到设计、建设、运营、退役等全过程的绿色管理。由于各阶段管理功能相对独立，缺乏协同效应，使得环境保护措施不能有效地融入项目实施全过程。尤其是在资产退役、设备更新等后阶段，电力工程绿色管理意识薄弱，资源循环利用、废物处理与能耗问题没有引起足够的关注。另外，传统电力工程项目缺乏全生命周期绿色评估机制，无法对工程全生命周期环境影响进行有效监测与控制。

四、基于 BIM 技术的电力工程全生命周期管理优化策略

（一）构建一体化信息共享平台

构建一体化信息共享平台是实现电力工程全生命周期管理优化的核心要素之一。通过 BIM 技术，各参与方可在一个统一的信息环境下协同工作，保证数据的一致性与实时性。该平台可实现对多源数据（如设计图、施工进度、材料规格、造价估算等）的有效整合，同时支持多种格式文档的输入和输出，为工程建设的各个阶段提供全方位的信息支持。

在规划和设计阶段，设计师能够利用 BIM 模型中的三维可视化功能，更直观地呈现设计方案，促进各学科团队间的交流与沟通。同时，该平台还可以对设计变更进行实时更新，保证各利益

相关者能够及时了解项目的最新情况，降低由于信息不对称而引起的错误决策。另外，对于大型复杂的工程项目，平台还可以设定权限控制，保证敏感数据的安全，只允许被授权的用户访问特定的信息。

（二）完善全过程质量追溯体系

完善全过程质量追溯系统的目的就是要保证电力工程项目从设计到交付，再到后期运营的各个阶段都能达到预期的质量标准。以 BIM 技术为基础构建的质量追溯系统，覆盖工程全过程，从规划构思到最终拆除处置，每一步都有详细记载，并与相关责任主体相关联。

在施工阶段，以 BIM 为基础的质量可追溯系统要求施工单位严格遵循设计图纸和规范进行施工，每一道工序都要进行严格的自检、互检和专检。验收合格后，有关资料将及时上传至 BIM 平台，包括验货日期、验货结果、验货签字等。对于发现的问题，本平台设置了问题追踪模块，能够清楚地指出问题所在的位置、性质和解决方法，直到问题完全解决为止。同时，该平台还支持对质量问题进行统计分析，帮助管理人员识别常见的问题类型和产生原因，并采取针对性的改善措施，使工程总体质量得到根本性的提高。在运维阶段，基于 BIM 技术的质量追溯系统可以对每一次维护的时间、维护内容、使用的材料、工具等进行详细地维护记录，从而制定出科学且合理的维护方案。

（三）搭建基于 BIM 的云协同平台

为满足现代电力工程项目高效协同工作的需要，构建基于 BIM 的云协作平台。云平台突破传统工作模式的地域限制，使分散于不同地域的项目参与方可以实现 BIM 模型的实时共享与编辑，提高信息交流与决策速度。云平台采用分布式存储结构，保证数据安全可靠，支持多种终端设备访问，用户可在办公计算机、平板电脑或智能手机上对 BIM 模型及其文档进行实时浏览与操作。

施工期间，施工单位可通过手机上传施工现场照片和视频，对施工进度进行实时反馈。通过该平台，监理人员可直接对施工质量进行检查，并对存在问题的区域进行标注，提出整改意见。这一系列的操作过程中都会留下电子证据，从而形成一份完整的质量监管文件，为后续的审计、问责等工作提供了可靠的基础。此外，云平台还具有预警功能，当某项指标超过预定值时，系统会自动报警，提醒相关人员采取相应措施，避免小问题演变成大事件。

（四）融入能源分析功能模块

电力工程的一个重要特性是对能源的有效利用和管理。在 BIM 平台上引入能源分析功能模块，可为电力系统能效评价与优化提供更深层次的建议。能源分析模块首先要综合分析电力系统的总体结构。其中包括对关键部件如电源接入点、输电线路、变压器、配电柜等进行了详细的建模。对各部件进行仿真计算，可预测电网各种运行状态下的能量流向。如夏季高温天气，空调负

荷大幅增加，此时能量分析模型可模拟电网负荷最大值及存在的瓶颈，提前进行扩容准备。在冬季取暖的季节，热电联产系统在冬季供暖时的性能也是人们关注的焦点，该模块能够帮助用户确定最佳的发电与供热比例，保证能源供应的经济性与可靠性。

能源分析模块除进行静态能耗分析外，还具有动态响应功能。该系统能够实时监控电力设施的运行状况，并根据实际用电情况和电价波动情况对负荷分配策略进行调整。例如，在电价高峰时段，模块可建议启动备用电源或启动储能系统，以减少电费支出；在低谷时，可将部分非关键用电设备进行充电或预热，以实现低成本电能的有效利用。另外，能源分析模块还能与气象数据相结合，对未来数日内的用能趋势进行预测，以便于企业提前

规划生产，避免不必要的能源浪费。

五、结论

本文通过对 BIM 技术在电力工程全生命周期管理中的应用进行系统研究，发现 BIM 技术能够有效优化电力项目的规划、设计、施工及运维各阶段的管理。未来，随着技术水平的不断提高，行业标准的不断完善，BIM 技术将成为电力工程全生命周期管理的重要组成部分，为电力行业的智能化和绿色化发展提供强有力的支持。

参考文献

-
- [1] 徐小峰. BIM 技术应用于电力工程全生命周期造价管理中的对策探讨 [J]. 科技创新导报, 2020, 17(06): 147-148.
 - [2] 邱波, 石隆吉. BIM 技术应用于电力工程全生命周期造价管理中的研究 [J]. 江西电力职业技术学院学报, 2022, 35(10): 15-17.
 - [3] 李鸿, 思文东. 电力工程全生命周期成本最优管理研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2023, (22): 70-72.

基于多模型对比的中国宠物行业发展的预测与决策分析

苑孟理想, 赵娜娜^{*}, 吴嘉润, 周梦雪, 孙可欣, 刘新红

北京石油化工学院, 北京 102617

DOI:10.61369/ASDS.2025040021

摘 要 : 在全球宠物行业蓬勃发展的当下, 准确预测其发展趋势对相关各方意义重大, 本研究以中国宠物市场为切入点, 采集了2019–2023年的相关数据, 先后运用线性插值法填补数据缺失值、借助 Z-score 标准化方法消除数据量纲影响、利用 Pearson 相关性分析筛选关键变量, 对数据进行了系统预处理, 在此基础上, 构建了多元线性回归、多项式回归、指数回归、支持向量机回归、随机森林回归等多种预测模型, 并运用粒子群算法对加权预测模型的参数进行优化, 通过网格搜索对部分模型的超参数进行调优。同时, 通过多模型比对, 证明加权预测模型在众多模型中表现卓越, 预测精度更高。

此外, 本研究还借助 Holt 线性趋势模型、多元线性回归模型和 Spearman 相关性检验, 深入分析外国关税政策对中国宠物食品出口额的影响。结果清晰显示, 美国关税变化与中国宠物食品出口额之间存在显著的负相关关系。这意味着, 美国关税的提升将对中国宠物食品出口产生抑制作用。

综上所述, 本研究通过多模型对比充分验证了加权预测模型在宠物行业预测中的可行性, 并精准量化了外国关税变化的影响, 为宠物行业的从业者和决策者提供了极具价值的参考依据, 有助于推动中国宠物行业的稳健发展。

关 键 词 : 宠物行业发展预测; 粒子群算法; 加权模型; Holt 线性趋势模型; 关税变化

Forecasting and Decision-making Analysis of China's Pet Industry Development Based on Multi-model Comparison

Yuan Menglixiang, Zhao Nana^{*}, Wu Jiarun, Zhou Mengxue, Sun Kexin, Liu Xinhong

Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617

Abstract : At a time when the global pet industry is booming, accurate prediction of its development trend is of great significance to all parties concerned. Taking the Chinese pet market as an entry point, this study collected relevant data from 2019–2023, successively applied linear interpolation to fill in the missing values of the data, eliminated the influence of the data scale with the help of Z-score standardization method, and screened the key variables by using Pearson correlation analysis, and carried out systematic pre-processing of the data, on the basis of which multivariate linear regression, polynomial regression, and multiple forecasting models such as exponential regression, support vector machine regression, random forest regression, etc., were constructed, exponential regression, support vector machine regression, random forest regression and other prediction models, and used PSO to optimize the parameters of the weighted prediction model, and tuned the hyperparameters of some models by grid search. At the same time, the weighted prediction model is proved to be superior among many models with higher prediction accuracy through multi-model comparison addition.

This study also analyzes in depth the impact of foreign tariff policies on China's pet food export value with the help of Holt's linear trend model, multiple linear regression model and Spearman's correlation test. The results clearly show that there is a significant negative correlation between U.S. tariff changes and China's pet food export value. This means that the increase of U.S. tariffs will have a dampening effect on China's pet food exports summary.

This study fully verifies the feasibility of the weighted forecasting model in pet industry forecasting through multi-model comparison, and accurately quantifies the impact of foreign tariff changes, which provides a highly valuable reference basis for pet industry practitioners and policymakers, and helps to promote the sound development of China's pet industry.

Keywords : prediction of the pet industry's development; PSO; weighted model; tariff changes

项目 / 基金信息:

国家级大学生创新创业训练计划 (2025J00124) ;

北京市教委科研计划一般项目 (KM202410017004) ;

北京石油化工学院致远基金 (2024212)。

通讯作者: 赵娜娜, 北京石油化工学院讲师, 博士, 专业: 概率论与数理统计。

引言

近年来，全球经济蓬勃发展，人们消费理念发生变革，宠物行业作为新兴朝阳产业迅速崛起。猫和狗作为主流宠物，其数量增长迅速，宠物行业的繁荣带动了宠物食品、医疗、美容等相关产业的发展，在社会经济结构中的地位日益重要。准确预测宠物行业未来发展趋势，对于企业制定战略决策、政府出台相关政策以及投资者把握市场机遇至关重要。

数学模型作为科学有效的预测工具，能挖掘数据规律，为宠物行业发展提供精准预测和指导。目前，针对宠物产业全面、系统的预测分析较少，预测方法的综合运用和模型优化还有提升空间。因此，本文旨在运用多种数学模型深入分析和预测我国宠物产业发展，为宠物行业预测寻找最优模型，以宠物猫数量为例，并探讨国外经济政策对我国宠物食品行业的影响，为相关从业者和决策者提供参考。

一、数据预处理

（一）数据收集

本研究采集了2020-2024年的五年期基础数据，针对2025-2027年中国宠物市场关键指标开展预测研究，具体涵盖总宠物数量、猫狗核心宠物数量。研究涉及的核心解释变量包括人均GDP、宠物家庭渗透率、人口增长率及人口数量等。

数据主要源自国家统计局公开统计年鉴及艾瑞咨询、欧睿国际等权威机构发布的行业白皮书，构建了多维度的数据采集体系。

（二）线性插值^[1]

针对连续型变量（以宠物医疗市场规模为例）当两个有效时间点中出现缺失时我们采用线性插值填补。

设 x_t 表示宠物医疗市场规模，在时间区间 $[t_1, t_2]$ 上，若仅在 $t \in (t_1, t_2)$ 存在缺失值，则其估计值为：

$$x_t = x_{t_1} + \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} \cdot (x_{t_2} - x_{t_1})$$

其中 t_1, t_2 为相邻时间点。

通过线性插值补全原始数据中的缺失值，可以使得各项指标在时间序列上更加连续，为后续数据预测提供了稳健的数据基础。

（三）Z-score 标准化

接下来我们将针对使用线性插值填充后的数据进行 Z-score 标准化，使其去量纲化与一致化，消除其由于量纲不同对数据分析带来的影响，使其具有可比性，使标准化后的数值围绕0上下波动，公式如下：

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

其中， X 表示要进行标准化处理的原始数据， μ 是数据所在总体的均值， σ 是总体的标准差。

（四）Pearson 相关性分析^[2]

最后我们针对标准化完成后数据进行 Pearson 相关性分析，从而找出对于与中国宠物市场发展最相关的几个关键变量。

Pearson 系数常用 r 来表示，对于两组数据 $X (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 和 $Y (y_1, y_2, \dots, y_n)$ 的计算公式如下：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

其中 \bar{x} 是 x 的均值， \bar{y} 是数据 Y 的均值， n 为数据的个数。

以下是对数据进行 Pearson 相关性分析后得到的热力图，从中选出与宠物数量变化最相关的变量作为指标。

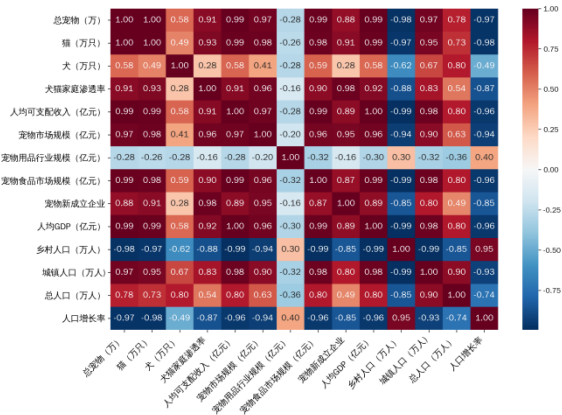


图1 宠物市场影响因素相关性热力图

如图所示，人均 GDP 与总宠物数量、猫数量、狗数量均呈现显著正相关关系。这表明随着人均 GDP 增长，居民经济实力提升，在满足基本生活需求后，更有能力为宠物提供食品、用品、医疗等方面的支出，从而推动总宠物数量及猫狗数量增长。

人口增长率与总宠物数量、猫数量、犬数量均呈负相关，且与总宠物及猫数量的负相关性极强。这表明人口增长率越高，总宠物数量及猫的数量越可能减少，犬数量也受一定负面影响。

基于以上分析，我们选择了对于总宠物数量与宠物猫狗数量最相关的人口增长率与人均 GDP 作为关键影响因素。

二、宠物行业预测模型

（一）多元线性回归模型

多元线性模型一般用于研究一个因变量与多个自变量之间的线性关系。

我们将中国人口增长率与人均 GDP 作为自变量，构建多元线性回归模型如下：

$$\hat{y}_{linear} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2$$

其中, \hat{y}_{linear} 代表因变量, X_1 代表人口增长率, X_2 代表人均 GDP, β_0 代表截距项, β_1 与 β_2 代表相应自变量的回归系数。

(二) 多项式回归模型

多项式回归模型用于描述因变量与自变量之间的非线性关系。

我们将年份作为自变量, 宠物猫数量作为因变量, 构建二阶多项式回归模型如下:

$$\hat{y}_{polynomial} = \gamma_0 + \gamma_1 t + \gamma_2 t^2$$

其中, $\hat{y}_{polynomial}$ 代表因变量, t 代表年份, 代表 γ_0 截距项, γ_1 与 γ_2 代表相应自变量的回归系数。

(三) 指数回归模型

指数回归模型用于描述因变量随自变量呈现指数增长或衰减趋势的现象。

构建指数回归模型如下:

$$\hat{y}_{exponential} = a \cdot e^{bt}$$

对于此类模型通常两边取自然对数, 将其转化为线性形式, 便于后续估计参数。

其中 a 和 b 是拟合参数, t 代表年份。

(四) 支持向量机回归模型

支持向量回归 (Support Vector Regression, SVR) 是一种基于支持向量机 (SVM) 原理的回归分析方法。^[3]

它旨在找到一个最优超平面, 使得尽可能多的训练数据点落在该超平面周围的特定区域 (称为“间隔带”) 内, 通过核函数将低维空间数据映射到高维空间, 以更好地处理非线性关系, 其基础公式如下:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x) + b$$

(五) 随机森林回归模型^[4]

该模型是一种基于集成学习思想的回归算法, 由多棵决策树组成, 通过对训练数据集进行有放回抽样 (自助采样法) 构建每棵决策树, 并且在构建树的节点分裂时, 从全部特征中随机选取部分特征来寻找最优划分特征。在预测阶段, 将多棵决策树的预测结果进行综合, 以此得到最终的回归预测值, 公式如下:

$$\hat{y} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T f_t(x)$$

其中因变量 \hat{y} 表示宠物猫数量的预测值, T 表示决策树变量, 表示在第 t 棵树对 x 的预测。

(六) 加权预测模型

为了提高预测精准度, 我们将对以上模型的预测结果进行加权组合。

加权预测模型是一种考虑不同因素重要性差异进行预测的模型。

该模型会给不同的数据或影响因素赋予相应的权重, 权重体

现了各因素对预测结果影响力的大小, 然后依据这些带有权重的数据或因素来综合计算得出预测值。

构建加权预测模型如下 (以线性, 多项式, 指数为例):

$$\begin{aligned} \hat{y}_{weighted} &= \omega_1 \hat{y}_{linear} \\ &+ \omega_2 \hat{y}_{polynomial} + \omega_3 \hat{y}_{exponential} \end{aligned}$$

其中 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 为加权系数, 满足以下条件:

$$\begin{cases} \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1 \\ \omega_1, \omega_2, \omega_3 \geq 0 \end{cases}$$

我们将使用加权平均的方式, 使得模型得出的均方误差 (MSE) 最小, 最优权重如下 (以线性, 多项式, 指数为例):

$$\omega_{max} = \operatorname{argmin}$$

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\omega_1 \hat{y}_{linear} + \omega_2 \hat{y}_{polynomial} + \omega_3 \hat{y}_{exponential} - y_i)^2$$

其中 y_i 为真实值。

三、模型求解

(一) 优化模型参数

为了避免过拟合, 提高模型的准确性和泛化能力, 我们将使用粒子群算法来在寻找最优权重 ω_{max} (以线性, 多项式, 指数为例)。

1. 粒子群算法^[5]

粒子群算法 (Particle Swarm Optimization) 是一种基于群体智能的优化算法, 受鸟群觅食行为启发, 把优化问题的解空间看作是鸟群的飞行空间, 每个解当作一只“粒子”。粒子有自己的位置 (代表可能的解) 和速度, 在迭代过程中, 粒子会根据自身的历史最优位置以及群体的历史最优位置来动态调整速度与位置, 不断搜索更优的解, 直至满足停止条件。

以下是使用粒子群算法用于寻找最优权重的具体步骤:

(1) 初始化粒子群

首先初始化 50 个离子的位置与速度, 其次确定离子的维度, 每个粒子将有 3 个维度, 分别是 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$, 接着随机将每个粒子的速度与位置初始化, 将权重的初始化范围定义在 [0,1] 中, 最后设定粒子的约束条件, 通过归一化处理, 使每个粒子的权重满足 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ 且位置的上下界位于 [0,1] 之间。

(2) 定义自适应函数

使用 objective 函数将自适应函数定义为均方误差如下:

$$MSE =$$

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\omega_1 \hat{y}_{linear,i} + \omega_2 \hat{y}_{polynomial,i} + \omega_3 \hat{y}_{exponential,i} - y_{t,i})^2$$

每个粒子的适应度值是该粒子对应权重组合下的相应误差, 为了最小化自适应函数, 将 objective 函数被传递给 minimize 函数作为优化的目标, minimize 函数会尝试找到一组最优的权重, 使得 objective 的返回值最小。

(3) 迭代过程

①粒子速度与位置更新

速度更新公式如下：

$$v_{i,d}^{k+1} = \omega v_{i,d}^k + c_1 r_1 (p_{i,d}^k - x_{i,d}^k) + c_2 r_2 (p_{g,d}^k - x_{i,d}^k)$$

其中 $v_{i,d}^{k+1}$ 表示 i 个粒子在第 $k+1$ 次迭代时维度 d 上的速度，则是第 i 个粒子在第 k 次迭代时维度 d 上的速度。

ω 是惯性权重，用于平衡粒子先前的速度，控制全局和局部搜索的平衡。

c_1 和 c_2 是学习因子，也叫加速常数，取值在 $[0, 2]$ 。

r_1 和 r_2 是两个在 0 到 1 之间均匀分布的随机数，为算法引入随机性，使粒子搜索更具多样性。

$p_{i,d}^k$ 是示 i 个粒子在第 k 次迭代时维度 d 上的个体最优位置， $p_{g,d}^k$ 是群体在第 k 次迭代时维度 d 上的群体最优位置，是 $x_{i,d}^k$ 第 i 个粒子在第 k 次迭代时维度 d 上的当前位置。^[6]

位置更新公式如下：

$$x_{i,d}^{k+1} = x_{i,d}^k + v_{i,d}^{k+1}$$

即粒子以当前迭代的位置为基础，按照刚更新好的速度向量进行位移，进入下一轮迭代时所在的新位置，在这个新位置上再去评估其适应度等情况，进而继续后续的搜索最优解过程，使整个粒子群在解空间中逐步逼近最优解所在区域。

②归一化处理^[7]

接下来我们将对更新后的数据进行归一化处理，确保 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ 。

$$\omega_i = \frac{\omega_i}{\omega_1 + \omega_2 + \omega_3} \quad (for i = 1, 2, 3)$$

再使用适应度函数计算每个粒子的适应度值，并更新个体最优位置与群体最优位置^[8]，若是个体最优位置比群体最优位置更好，再次对群体最优位置进行迭代，如果达到迭代上限或群体最优位置误差小于设定的误差阈值，停止迭代。

迭代过程如下图所示：

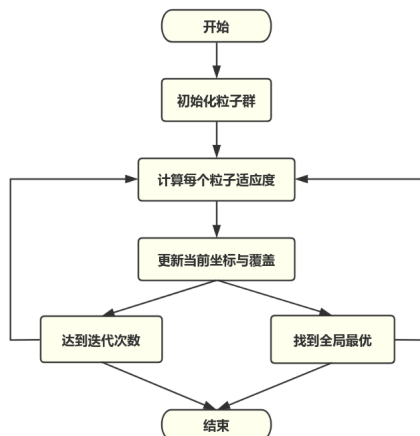


图2 粒子群算法迭代过程可视化

在找到最优权重后，对未来三年的宠物猫数量进行预测。

2. 网格搜索

对于机器学习的模型超参数优化，我们将使用网格搜索进行调优。

网格搜索是一种超参数调优的方法，它会在指定的参数空间内对所有可能的参数组合进行遍历，然后使用交叉验证来评估每个组合的性能，最终找出性能最优的参数组合，提升拟合效果。

(1) 支持向量机回归模型参数调优

搜索空间设置如下：

kernel: [linear, rbf, poly]

C: [0.1, 1, 10]

epsilon: [0.1, 0.01, 0.001]

其中 kernel 是核函数的类型，C 是惩罚系数，epsilon 是误差范围。

(2) 随机森林回归模型参数调优^[9]

搜索空间设置如下：

n_estimators: [50, 100, 200]

max_depth: [None, 10, 20, 30]

其中 n_estimators 表示随机森林中决策树的数量，max_depth 表示决策树的最大深度。

(二) 结果展示与分析

预测结果如下图所示：

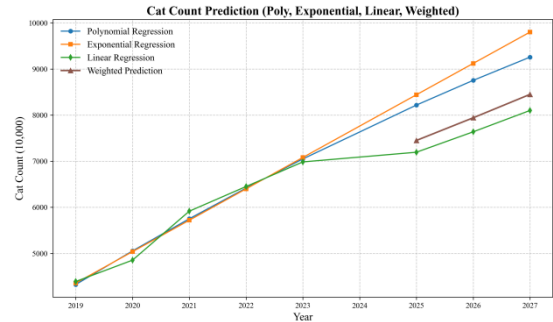


图3 宠物猫数量预测结果图

接下来使用平均绝对百分比误差与均方根误差来评估各模型的误差。

平均绝对百分比误差：

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

其中 n 为样本数量， y_i 表示真实值， \hat{y}_i 表示预测值，MAPE 用于衡量预测值与真实值之间的相对误差情况，数值越小，说明预测的准确性越高。

均方根误差：

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

其中， n 是样本数量， y_i 表示真实值， \hat{y}_i 表示预测值。RMSE 常用来衡量预测值与真实值之间的偏差程度，值越小代表预测效果越好。

各模型误差计算如下图所示：

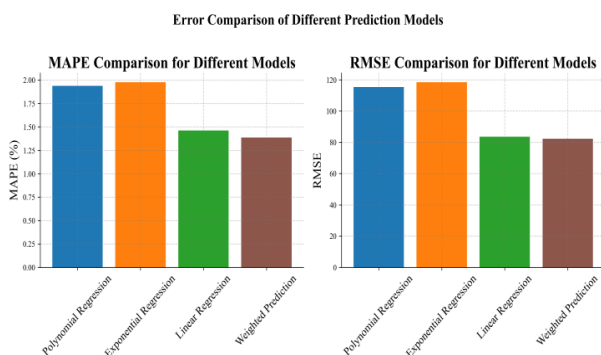


图4 宠物猫数量预测误差比较图

如图中所示,通过比较,加权预测模型的误差最小,说明在结合多元线性回归模型,多项式回归模型与指数回归模型后,可以更准确地预测未来三年中宠物猫数量的增长。

(三) 模型对比分析

为了对宠物行业进行多视角分析和对比,我们将引进机器学习与上述模型进行分析和对比,并通过粒子群算法计算加权模型权重,确保模型的准确性与稳定性,具体与预测如下图所示:

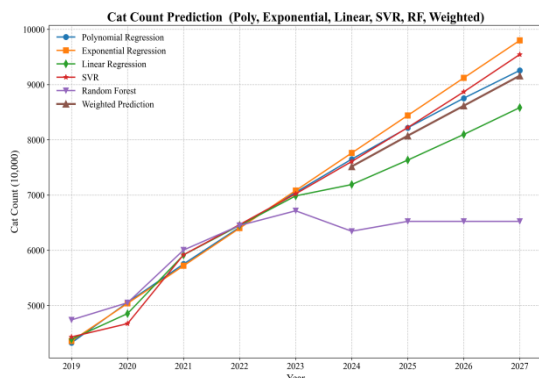


图5 宠物猫数量多模型预测结果图

如图所示,线性,多项式,指数回归模型,很好捕捉到了宠物猫数量随时间上升的趋势,支持向量机回归模型预测波动较大,说明其随数据中的噪声敏感,随机森林模型预测结果则较平稳,可能因为他的集成方法倾向于降低预测的不确定性。

各模型误差计算如下图所示:

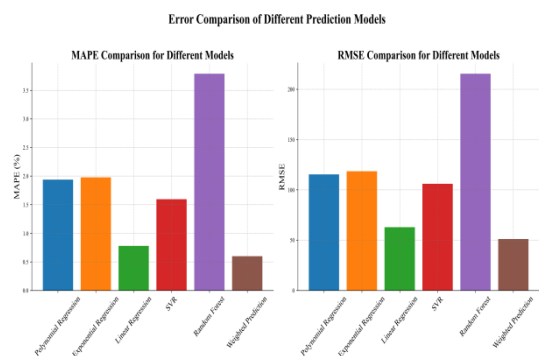


图6 宠物猫数量多模型预测误差比较图

由此可见,通过多模型比较,验证了加权预测模型对宠物行业预测的可行性,说明采用该方法可以提高预测精度。

四、关税影响量化分析

(一) 数据预处理

我们收集了2002–2018年期间中国宠物食品出口额数据。经分析发现,2013–2017年数据呈现U形变化。进一步调查表明,2013年美国发生宠物食品安全事件,致使消费者对包括中国在内的部分进口宠物食品产生信任危机,进而导致中国对美宠物食品出口量大幅下滑,最终影响了整体出口额。

鉴于上述情况,我们决定剔除2014–2015年的数据。此外,2019年国外经济政策出现变动,为考量该变动对中国宠物食品出口额的影响,我们运用时间序列分析中的Holt线性趋势模型,对2019–2023年的出口额数据进行了预测。

(二) Holt 线性趋势模型

Holt指数平滑法是一种高级的线性指数平滑方法,该方法的优点是可以利用不同的平滑参数对原序列的两种因素进行平滑^[10],具有很大的灵活性

1. 水平成分公式如下:

$$L_t = aY_t + (1-a)(L_{t-1} + T_{t-1})Y_t$$

Y_t 其中代表时间 t 的实际值, a 为水平平滑系数, L_{t-1} 是上一时刻的水平估计值, T_{t-1} 是上一时刻的趋势估计值,该公式表示,当前时刻的水平估计值是当前观测值,与依据上一时刻水平和趋势所预测得到的当前时刻预估值的加权平均。

2. 趋势成分公式如下:

$$T_t = \beta Y_t + (1-\beta)(L_{t-1} + T_{t-1})$$

其中 β 为趋势平滑系数,该公式表示,当前时刻的趋势估计值是由当前实际值与上一时刻水平估计值的变化量,和上一时刻趋势估计值进行加权平均而得。

3. 预测值公式如下:

$$F_{t+h} = L_t + hT_t$$

其中 h 为预测的期数。这说明预测值是由当前时刻的水平估计值,加上未来期数与当前时刻趋势估计值的乘积。

我们将预测值与真实值进行比对得到下图,并计算误差评估指标。

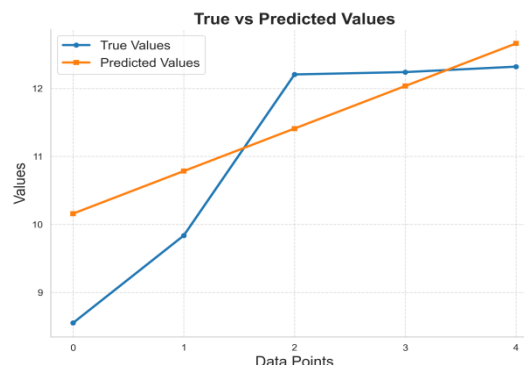


图7 预测值与真实值比较图

均方误差（MSE）为0.85405，说明预测值与真实值的偏差总体相对较小，相关系数达到0.90452，表明预测值与真实值之间有较强的线性相关程度；平均绝对误差（MAE）为0.77894，数值也较小，这些指标一定程度上说明预测模型能较好拟合实际数据，预测数据具备一定可靠性。

(三) 多元线性回归模型

获取预测数据后，我们运用多元线性回归模型，探究多个自变量与一个因变量之间的线性关联，旨在通过拟合线性方程，阐释因变量的变化规律。

预测结果如下图所示：

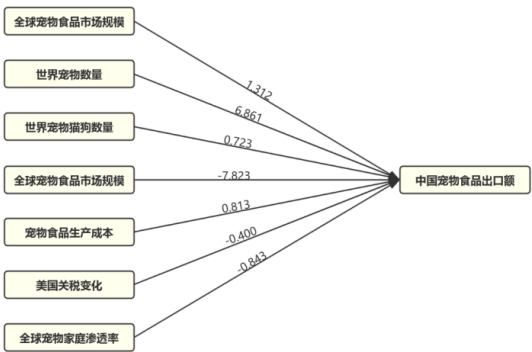


图8 中国宠物食品出口额影响因素系数图

如图所示，将美国关税变化与其他因素对中国宠物食品出口额的影响进行对比。结果显示，美国关税变化与中国宠物食品出口额呈现出一定程度的负相关关系，即美国关税提升会对中国宠物食品出口额产生抑制作用。该研究结果可用于量化评估关税政策调整对中国宠物食品出口额的负面冲击程度。

(四) Spearman 相关性检验

我们对结果开展 Spearman 相关性检验，并以热力图进行可视化呈现：

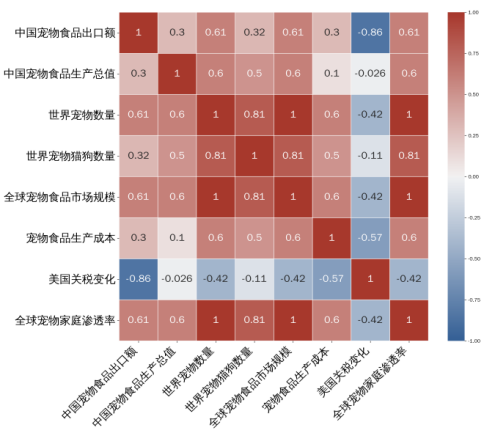


图9 Spearman 相关性检验热力图

结果表明，该检验结果与多元线性回归模型结果高度契合。

五、结束语

本研究综合运用多种数据预处理方法、构建多种预测模型并进行优化，对中国宠物市场发展趋势及国外经济政策对中国宠物食品行业的影响进行了深入分析。通过模型对比发现加权预测模型在预测宠物猫数量增长方面误差最小，准确性更高；在关税影响量化分析中，证实了美国关税变化与中国宠物食品出口额的负相关关系。然而，本研究可能存在对一些复杂市场因素考虑不足的问题，如宠物行业内的竞争格局变化、消费者偏好的快速转变等。未来研究可进一步拓展数据维度，纳入更多影响宠物行业发展的因素，探索更先进的模型和算法，提升预测的准确性和全面性，为全球宠物行业的持续发展提供更有力的支持。

参考文献

[1] 杨靖宝. 基于经纬度线性插值的雷达试验数据处理方法 [J]. 舰船电子工程, 2024, 44(11): 101–105+127.

[2] 黄德星, 沈瑜伟, 郑红燕, 等. 太湖水质变化分析及相关性研究——以长兴段为例 [J]. 浙江水利水电学院学报, 2024, 36(05): 60–66.

[3] 王连生, 高峰, 谢金熹, 等. 基于 DBO–SVR 算法的爆破振动预测比较研究 [J]. 中国矿山工程, 2024, 53(04): 1–5.DOI:10.19607/j.cnki.cn11–5068/tf.2024.04.012.

[4] 李想, 王可, 张高山, 等. 基于随机森林回归模型的台区负荷不平衡控制方法 [J]. 自动化与仪器仪表, 2025, (03): 325–328+334.DOI:10.14016/j.cnki.1001–9227.2025.03.325.

[5] 杜莹, 程振豪, 孙丹丹. 一种基于 PSO 参数优化的指纹定位算法 [J/OL]. 测绘科学, 1–11[2025–05–25].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4415.p.20250509.1448.002.html.

[6] 别晓婷. 基于无人机遥感与 DSSAT 模型同化的夏玉米估产研究 [D]. 山东理工大学, 2023.DOI:10.27276/d.cnki.gsdgc.2023.001267.

[7] 曾昭汰, 石晴, 余国宽, 等. 基于归一化流退火重要性抽样的安全关键场景生成 [J/OL]. 计算机工程与应用, 1–10[2025–05–25].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20250523.1540.010.html.

[8] 朱晗, 游凌, 杨宇翔. 基于粒子群算法的空天链路地面干扰站选址问题 [J]. 信息工程大学学报, 2025, 26(02): 127–133.

[9] 周古辛, 胡桂开. 基于网格算法和粒子群算法的随机森林参数优化 [J]. 安徽大学学报 (自然科学版), 2025, 49(03): 27–34.

[10] 乐德林. 整车物流公铁联运网络模型优化研究 [D]. 华南理工大学, 2022.DOI:10.27151/d.cnki.ghnlu.2022.005764.

