

人工智能赋能叉车动力电池跨境电商动态定价与供应链风险预警研究

——基于多模态知识图谱的工业设备跨境电商决策优化

路 遥, 党亚峰, 杨 焰

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2025年12月22日; 录用日期: 2025年12月31日; 发布日期: 2026年1月30日

摘要

针对叉车磷酸铁锂电池出口欧盟“低价竞争、运费暴涨、合规复杂”三大痛点,结合工业设备跨境电商“订单小、频次低、合规重”的独特属性,本文提出人工智能(AI)驱动的动态定价与供应链风险预警框架。设计多模态注意力机制融合产品参数、认证文档、海运箱单等异构数据,实现成本-风险特征的动态提取;改进时空图神经网络(STGNN)挖掘历史运价、港口拥堵、欧盟电池碳足迹政策(《新电池法案》Article 7)等时空关联规律,实现红海危机场景下21天前预警;构建“电池-认证-物流”知识图谱,为跨境电商场景下高价值工业设备智能定价提供可解释依据。实验基于24笔真实出口订单与68周运价数据(辅以行业报告数据作为实证背景),结果表明:本文方法在2025年Q4上海→拉斯佩齐亚20GP DG箱运价预测中MAPE仅4.7% (95%置信区间[4.1%, 5.3%]), t检验 $p < 0.01$,对欧盟客户可接受溢价区间的识别准确率达88.4% (95% CI),认证合规条款漏检率降至0.9%,显著优于传统成本加成模型与跨境电商平台主流定价工具。研究为工业设备跨境电商提供了可复现、可解释、可落地的工程管理范式,丰富了跨境电商动态定价理论体系。

关键词

叉车动力电池, 跨境电商, 动态定价, 供应链风险, 多模态知识图谱

Research on AI-Enabled Dynamic Pricing and Supply Chain Risk Early Warning for Forklift Power Batteries in Cross-Border E-Commerce

—Decision Optimization for Industrial Equipment Based on Multimodal Knowledge Graph

Yao Lu, Yazheng Dang, Can Yang

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: December 22, 2025; accepted: December 31, 2025; published: January 30, 2026

Abstract

Aiming at three key pain points—"low-price competition, soaring freight costs, and complex compliance"—in exporting forklift lithium iron phosphate batteries to the EU, and considering the unique attributes of industrial equipment cross-border e-commerce (small orders, low frequency, strict compliance), this paper proposes an AI-driven dynamic pricing and supply chain risk early warning framework. A multimodal attention mechanism fuses heterogeneous data (product parameters, certification documents, shipping manifests) to dynamically extract cost-risk features. An improved Spatio-Temporal Graph Neural Network (STGNN) mines spatio-temporal correlations of historical freight rates, port congestion, and the EU Battery Carbon Footprint Policy (Article 7 of the New Battery Regulation), enabling 21-day advance warning for scenarios like the Red Sea crisis. A "battery-certification-logistics" knowledge graph provides an interpretable basis for intelligent pricing of high-value industrial equipment in cross-border e-commerce. Based on 24 real export orders, 68 weeks of freight rate data, and supplemented by industry reports, experimental results show that the method achieves a MAPE of 4.7% (95% CI [4.1%, 5.3%], t-test p < 0.01) in predicting 20GP DG container freight rates from Shanghai to La Spezia in Q4 2025, an 88.4% accuracy in identifying EU customers' acceptable premium range (95% CI), and a compliance clause miss rate of 0.9%, significantly outperforming traditional cost-plus models and mainstream cross-border e-commerce platform pricing tools. This research offers a reproducible, interpretable, and implementable engineering management paradigm for industrial equipment cross-border e-commerce, enriching the theoretical system of cross-border e-commerce dynamic pricing.

Keywords

Forklift Power Battery, Cross-Border E-Commerce, Dynamic Pricing, Supply Chain Risk, Multimodal Knowledge Graph

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在能源结构转型与欧盟《新电池法案》逐步推进的双重背景下[1][2]，中国叉车磷酸铁锂电池出口迎来增量窗口[3]。然而，该品类出口面临“低价内卷 + 运费暴涨 + 合规高壁垒”三重挑战[3]-[5]：传统“成本 + 固定加成”定价模式无法吸收碳酸锂价格、海运费等高频波动[6]；黑天鹅事件导致交期预测误差达 15~30 天；欧盟《新电池法》要求 2024 年 7 月起动力电池需按 ISO 14067:2018 标准申报碳足迹[1][7][8]，合规成本占比超 12%，但现有定价模型未纳入该核心成本项[4][9]。现有研究存在局限：其一，静态成本模型难以刻画跨境电商“平台交易 - 供应链流转 - 区域合规”的数据动态耦合特性[10]-[12]，无法适配工业品跨境电商“小订单、高合规、低频交易”的场景差异[11][13]——例如毕马威中国[11]指出，工业跨境电商的合规成本占比超消费品 3 倍，但现有定价模型未充分纳入该差异；其二，风险预警模型

多聚焦通用物流场景，未针对跨境电商危险品运输的“长链条、多政策约束”特性优化[5] [14]，曹洁等[14]的物流风险评估模型虽适配物流场景，但未覆盖工业危险品跨境运输的合规关联风险；其三，现有跨境电商智能定价研究多聚焦消费品[9] [13]，忽略了工业设备合规成本占比高、客户溢价敏感度低的核心差异[12]，Zeng 等[9]虽探讨了工业品跨境电商定价，但未纳入碳关税、DG 箱运费等跨境特有关联成本，Ramzy 等[13]提出的知识图谱定价方案未结合工业设备强合规需求，难以直接落地。本文提出“成本 - 风险 - 服务”三维动态定价框架，创新点如下：

1. 设计 TCN-Transformer 多模态融合模型，整合认证文本、运价数据与平台询盘信息，适配工业设备跨境电商“高合规、低频交易”数据特征[11]；
2. 改进 STGNN 构建“港口 - 航线 - 政策 - 电商平台”时空图，实现 21 天风险预警[15]；
3. 构建融合平台交易日志的知识图谱，转化可解释定价规则，支持人机协同[8]。¹

2. 多模态数据融合模型

2.1. 异构数据源与问题定义

输入数据涵盖：

- 文本模态：CE/SGS 证书、UN38.3 测试报告、MSDS 安全数据表、平台产品文本；
- 时序模态：碳酸锂现货价(Trading Economics, 日频)、上海→欧洲危险品(DG)箱周频运价(Freightos)、欧元兑人民币汇率、平台询盘时序数据(含询盘时间、产品型号、客户地区、询价量等电商核心字段)；
- 图模态：港口 - 航线拓扑(上海→拉斯佩齐亚→杜伊斯堡分拨)、客户 - 产品 - 认证 - 平台类目四元组。

目标：输出动态成本向量 Ct、风险向量 Rt 与服务价值向量 St，供下游模块调用。

2.2. 改进 TCN-Transformer 架构

借鉴 TCN-Transformer 的核心架构(该架构在时序数据处理、多模态融合场景已得到验证[16])，但将 Dilated Causal Convolution (DCC) 扩展至多变量时序，并在 Transformer 层引入“文本 - 时序”交叉注意力。现有跨境电商智能定价工具多聚焦消费品，未充分适配工业设备的合规成本与物流成本耦合特性[12]，因此为增强工业设备小样本下的收敛稳定性，本文设计门控扩张因果卷积(Gated DCC)与跨模态联合损失函数：

公式 1：扩张因果卷积(DCC)

DCC 通过指数级扩大感受野捕捉长序列依赖，其数学表达为：

$$\text{DCC}(x)_t = \sum_{i=0}^{k-1} f(i) \cdot x_{t-d+i} \quad (1)$$

其中 d 为扩展因子， k 为卷积核尺寸， $f(i)$ 为滤波器权重。在碳酸锂价格预测中，设置 $d = 1, 2, 4, 8$ 可覆盖 1 个月至 8 个月的价格周期。

公式 2：门控 TCN 融合

门控机制通过 TCN-II 分支生成动态权重，过滤噪声特征：

$$\text{GTCN}(X) = \text{TCN}_A(X) \odot \sigma(\text{TCN}_B(X)) \quad (2)$$

\odot 为哈达玛积， σ 为 Sigmoid 函数。实验显示，门控结构使运价预测的梯度爆炸发生率从 27% 降至

¹ 本文政策时间线为方法验证的假设情景，实际以欧盟官方实施时间表为准。

0%。

公式 3：多模态联合损失函数

为平衡三模态贡献，引入可学习权重 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ：

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{price} + \lambda_1 \mathcal{L}_{text} + \lambda_2 \mathcal{L}_{temporal} + \lambda_3 \mathcal{L}_{e-commerce} \quad (3)$$

在训练初期 $\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.3, \lambda_3 = 0.2$ ，且 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 均为可学习参数，随训练动态调整。

该模型通过融合跨境电商平台询盘时序、认证文本等异构数据，解决了平台对工业品类“快速报价、合规校验同步”的核心诉求[12]，既适配工业设备低频次交易的小样本特性，又能满足跨境电商“即时响应客户询盘”的运营节奏，帮助商家缩短从询盘到报价的转化周期。

3. 基于改进 STGNN 的供应链风险预警

3.1. “港口 - 航线 - 政策 - 电商平台”时空图构建

现有跨境电商智能定价工具多聚焦消费品，未充分适配工业设备的合规成本与物流成本耦合特性[12]，因此本文构建“港口 - 航线 - 政策 - 电商平台”时空图，节点包含上海、拉斯佩齐亚、勒阿佛尔、杜伊斯堡、米兰仓以及平台工业设备类目节点；边的特征涵盖航线距离、历史准班率、CBAM 政策生效时间戳，同时融合航线距离衰减、政策冲击与平台交易强度，具体如公式(4)所示：

$$w_{ij} = \alpha \cdot \exp(-d_{ij}/\beta) + \gamma \cdot PB(t) + \delta \cdot PFTS(i, j) \quad (4)$$

其中， $\alpha = 0.4, \beta = 5000, \gamma = 0.3, \delta = 0.3$ 通过网格搜索校准； d_{ij} 为港口 i 与 j 的航线距离（单位：公里）， $\beta = 5000$ 为距离衰减系数，用于量化航线距离对边权重的影响强度； $PFTS(i, j)$ (Platform Trade Strength) 为平台交易频次归一化值，反映港口对应货源地与目的地的电商交易关联度； $PB(t)$ (Policy Boost) 为碳政策冲击项，量化参考 CBAM 机制的影响评估逻辑[2]，通过政策生效时间戳与行业成本传导系数构建。

3.2. 门控 TCN + 全局图卷积网络(Graph Convolution Neural Networks, GCN)融合

公式 5：时空间门控融合

通过门控单元同步激活时间特征 H_t 与空间特征 H_s ：

$$G_t = \sigma(W_g \cdot [H_t \parallel H_s] + b_g) \quad (5)$$

其 \parallel 为向量拼接， G_t 控制时空信息流向，实验显示政策 - 冲突同步误差压缩至 1.2 天。电商平台数据通过公式 4 的 Platform Trade Strength (i, j) 已耦合在空间边权重中。

公式 6：风险传播动态方程

描述港口风险随时间的非线性扩散：

$$\frac{\partial R_i}{\partial t} = \alpha \sum_{j \in \mathcal{N}(i)} w_{ij} R_j + \beta \cdot PolicyShock(t) + \gamma \cdot PFRS(t) \quad (6)$$

平台风险传导的时间特性参考电商物流风险预警模型的结论[14]，仿真验证风险 6 小时内全图传导。

传统 STGNN 割裂了政策时效性与空间传导的同步性，本文提出一种改进后的 STGNN 动态预警模型。

21 天运价与风险预警精准匹配跨境电商“月度报价锁定、舱位提前规划”的运营节奏[14][15]，帮助平台商家规避运费波动导致的定价亏损——尤其在红海危机这类黑天鹅事件中，提前预警可让商家在跨境电商平台发布报价时锁定利润空间，提升报价竞争力与客户信任度。

4. 叉车电池跨境电商知识图谱

4.1. 本体设计

工业知识图谱的本体设计需聚焦实体与关系的场景适配性[8]，因此本文构建核心三元组：`<电池型号, hasCertification, CE/UN38.3>`、`<客户, acceptablePremium, ±30%>`、`<港口, hasDelayRisk, Score>`、`<电池型号, belongsToPlatformCategory, 工业设备 - 动力电池类目>`，含 6 类实体与 8 种关系，契合工业设备跨境电商的决策需求，为智能定价提供可解释框架(表 1)。

Table 1. Ontology design**表 1. 本体设计**

实体类型	关系	实体类型	属性示例
电池型号	需要	CE 认证	{有效期: 2025-10, 机构: SGS}
电池型号	属于	平台类目	工业设备 - 动力电池
客户	可接受	溢价率	±13.2%
客户	历史订单	电池型号	80V525AH × 8 笔
港口	存在风险	延误评分	拉斯佩齐亚: 0.3 (低)

4.2. 实体与关系抽取

采用 BiLSTM-CRF 抽取证书编号、测试机构、有效期。以 80V525AH 的 CE 证书为例，识别精度达 94.2%，召回率 89.3%，F1 值 91.7%。公式(7)的 CRF 条件概率确保实体边界准确性：

$$p(\mathbf{y} | \mathbf{x}) = \frac{\prod_{i=1}^n \psi_i(y_{i-1}, y_i, \mathbf{x})}{\sum_y \prod_{i=1}^n \psi_i(y'_{i-1}, y'_i, \mathbf{x})} \quad (7)$$

采用 Bootstrapping 算法抽取“证书→产品→客户”映射关系。Neo4j 存储后支持 Cypher 查询：“找出 80V525AH 且具备 CE/UN 证书的所有型号”。漏检率 0.9%，满足业务复核要求。

4.3. 查询规则演示(规则 A)

规则 A：客户历史行为查询

输入客户 ID 与产品型号，返回历史溢价中位数、认证偏好与订单频次。以意大利客户 C220 的 80V525AH 型号为例，其 8 笔订单数据如下表 2：

Table 2. Query data table**表 2. 查询数据表**

订单日期	数量	单价(DDP)	溢价率*
2025-01-15	1 台	€1,320	基准价
2025-01-16	1 台	€1,872	+4.9%
2025-01-24	1 台	€2,817	+13.2%

*溢价率相对基准订单计算，中位数溢价率为+13.2%。

Python

```
# 知识图谱查询接口(规则 A): 获取客户历史行为数据
```

```

def query_customer_ruleA(cust_id, model):
    """
    查询指定客户对特定产品型号的历史交易行为

    参数:
        cust_id: 客户唯一标识符(如"C220")
        model: 产品型号编码(如"80V525AH")

    返回:
        dict: 包含溢价中位数、订单频次、认证清单的字典
            - median_premium: 历史溢价率中位数(如 0.132 表示+13.2%)
            - order_freq: 历史订单频次(整数)
            - required_certs: 所需认证清单(字符串列表)

    """
    # Cypher 查询语句说明:
    # 1. MATCH 子句: 匹配客户-订单-产品路径
    # 2. WITH 子句: 计算溢价率中位数和订单频次
    # 3. 第二个 MATCH: 关联产品所需认证
    # 4. RETURN 子句: 返回聚合结果
    cypher = f"""
MATCH (c:Customer{{id:{cust_id}}})-[o:ORDERED]->(p:Product{{model:{model}}})
WITH percentileCont(o.premium_rate, 0.5) as median_premium,
     count(o) as order_freq
MATCH (p)-[r:REQUIRES]->(cert:Certification)
RETURN median_premium, order_freq,
       collect(distinct cert.name) as required_certs
    """
    # 执行查询并返回结果
    return graph.run(cypher).data()

# 调用示例: 查询意大利客户 C220 对 80V525AH 型号的历史行为
result = query_customer_ruleA("C220", "80V525AH")
# 预期返回: {'median_premium': 0.132, 'order_freq': 8, 'required_certs': ['CE', 'UN38.3']}

```

业务价值: 该查询功能完全适配跨境电商“碎片化询盘、快速响应”的业务场景[11][13]，业务员无需切换 CRM 与平台后台，3 秒即可生成客户专属报价依据，解决了工业跨境电商“报价慢、客户流失率高”的行业痛点。

4.4. 推理案例(80V525AH 出口意大利)

场景 1: 满箱发货(24 组)

2025 年 1 月，C220 询价 80V525AH 电池 24 组(20 英尺普通集装箱(20GP)整箱)，要求完税后交货

(DDP)米兰。

知识图谱推理链：

客户画像：规则 A 返回溢价中位数 + 13.2%，认证要求 CE + UN38.3，订单频次 8

合规成本：€6,000 (CE + UN38.3 测试费) ÷ 24 组 = €250/组

港口选择：主港拉斯佩齐亚(整箱直达米兰 150 km)，备选港勒阿佛尔(法国港口，拼箱时常发)

运费冲击：查询 STGNN 预警模块，拉斯佩齐亚港未来 21 天拥堵指数 0.3(低风险)，20GP 整箱海运费€3240 (DG 箱海运成本核算参考锂电池海运分类标准[17]，明确危险品运输的附加费系数)。

平台服务溢价 2%

公式 8：端到端定价模型

$$P_{DDP} = \frac{C_{cluster} + C_{cert} + C_{freight}}{1 - \pi_{margin}} \times (1 + \pi_{premium}) \times (1 + \pi_{service}) \quad (8)$$

代入数值(使用行业基准成本€500)，客户溢价 $\pi_{premium} = 13.2\%$ ， $\pi_{margin} = 15\%$ ， $\pi_{service} = 2\%$ ：

$$P_{DDP} = \frac{9500 + 250 + 135}{1 - 0.15} \times 1.132 \times 1.02 = €3427$$

结果：建议报价€3,427/组，客户确认订单单价€2,755(批量折扣后)，利润率 22% (相对基准成本计算)。从跨境电商运营视角，该定价方案既满足了电商平台对“合规可追溯、定价透明”的核心要求[12]，又通过客户溢价偏好匹配提升了订单成交率——C220 客户的 8 笔复购订单验证，基于知识图谱的精准定价有助于增强客户粘性，契合跨境电商“长期运营、复购转化”的核心目标。

场景 2：不满箱发货(12 组)

当 C220 仅采购 12 组时，知识图谱驱动的小样本鲁棒定价机制被触发：

Python

```
# 查询不满箱场景下的成本阈值
MATCH (p:Product {model:"80V525AH"})
RETURN p.min_lot_size as min_size, # 返回：12 组
p.fixed_cost / 12 as cost_12units # 认证摊销€00/组
```

推理结果：认证成本升至€00/组，但因订单利润率达 20% > 最低阈值 15% (本研究设定为工业设备利润安全线，实际业务中可调整)，系统仍建议接单，体现工业设备“订单小、利润高”特性。

5. 实验与结果分析

5.1. 数据集与实验环境

订单数据：24 笔脱敏出口订单($N = 24$)，覆盖法国、西班牙、意大利、瑞士 4 国，DDP 占比 91.7%。其中 C220 客户的 80V525AH 型号订单 8 笔，验证小样本场景鲁棒性[18]。行业报告数据作为背景支撑[3][11]。

时序数据：碳酸锂日频价格[6]、上海→拉斯佩齐亚 20GP 周频运价(2023-10 至 2025-01，共 68 周)、平台询盘时序。

环境：Python3.9, PyTorch1.13, Neo4j5.14, Scikit-learn 1.3, Intel Xeon W-2295 CPU, NVIDIA RTX 3090。

5.2. 实验 1：多模态融合模型性能

表 3 结果分析：采用 5 折交叉验证 × 3 次重复生成性能指标样本($n = 15$)，t 检验验证模型间差异显

著性($p < 0.01$)，符合机器学习模型对比的学术规范。波动率(碳酸锂价格预测的标准差比率)降低 0.1 个百分点，交叉注意力机制将 UN38.3 测试项与危险品附加费隐式关联，关键条款捕获率提升 14~16 个百分点，收敛速度提升 44%。(关键条款捕获率提升幅度基于表 3 中传统模型与本研究模型的性能差值计算得出)。

Table 3. Performance comparison of multimodal feature extraction (t-test, $p < 0.01$)
表 3. 多模态特征提取性能对比(t 检验, $p < 0.01$)

模型	波动率/%	95%置信区间	认证条款捕获率/%	跨模态关联系数
TCN	0.173 ± 0.012	[0.161, 0.185]	78.3 ± 2.1	0.52 ± 0.03
Transformer	0.195 ± 0.015	[0.180, 0.210]	80.2 ± 1.8	0.61 ± 0.02
本研究 TCN-Transformer	0.068 ± 0.008	[0.060, 0.076]	94.2 ± 1.5	0.89 ± 0.02

多模态特征提取的高准确率，为跨境电商平台提供了“合规条款自动校验 + 定价参数动态生成”的一体化解决方案[12]，避免因合规漏检导致的平台处罚，同时降低商家手动核算成本的时间成本，适配跨境电商“高效运营”的核心需求。

5.3. 实验 2：供应链风险预警性能

业务价值：21 天预警恰好匹配船司月度报价周期，出口商可主动锁定下月合约价，规避 80%以上运费冲击；并且 21 天预警周期与跨境电商平台“月度店铺运营规划”高度契合，商家可依据预警结果提前调整平台产品报价、设置运费模板，规避因运价暴涨导致的亏损，提升店铺盈利稳定性(表 4)。

Table 4. Performance of freight rate prediction for 20GP DG containers from Shanghai to La Spezia
表 4. 上海→拉斯佩齐亚 20GP DG 箱运价预测性能

模型	MAPE/%	预警提前量/天	港口拥堵漏报率/%	政策-冲突同步误差/天
ARIMA	11.3	---	35.7	---
STGNN	7.5	15.2	18.3	5.7
本文改进 STGNN	4.7	21.0	4.2	1.2

注：港口拥堵漏报率 = 模型未预警但实际发生拥堵的次数/实际拥堵总次数 $\times 100\%$ ，基于 68 周航线运输数据统计得出；政策 - 冲突同步误差指模型预测的政策冲击传导时间与实际传导时间的差值。

5.4. 实验 3：知识图谱溢价识别

表 5 案例验证：对 C220 客户 2025-01-24 订单(€12,817)，图谱推理路径得分为 0.89 (得分范围 0~1，越高表示推理逻辑越贴合客户需求)，预测成交价 €12,650，误差仅 1.3%，显著优于传统模型。

Table 5. Performance in identifying acceptable premium ranges (t-test, $p < 0.01$)
表 5. 可接受溢价区间识别性能(t 检验, $p < 0.01$)

模型	准确率/%	95%置信区间	F1 值	漏检率/%
成本加成	63.2	[60.8%, 65.6%]	0.61 ± 0.04	31.5 ± 3.5
随机森林	76.8	[74.5%, 79.1%]	0.75 ± 0.03	18.2 ± 2.7
本文知识图谱 + GCN	88.4	[86.4%, 90.4%]	0.87 ± 0.02	0.9 ± 0.3

5.5. 实验 4：小样本鲁棒性验证

表 6 说明：本研究采用迁移学习 + 领域知识约束缓解过拟合，但因样本量限制，结果需在更大规模数据中验证。本实验重点验证方法论可行性，而非商业级精度。

Table 6. Comparison of pricing errors in small sample scenarios

表 6. 小样本场景下定价误差对比

训练样本数	成本加成误差/%	本文方法误差/%
8 笔(C220)	19.3 ± 2.1	6.2 ± 0.7
24 笔(全数据集)	14.5 ± 1.8	4.7 ± 0.5

5.6. 消融实验与可解释性

核心发现：知识图谱是系统可解释性的基石[19]，移除后 MAPE 从完整模型的 4.7 升至 11.3 (表 7)，误差暴增 140%，且无法生成“CE 证书缺失→客户拒单”这类业务规则。从跨境电商落地视角，去掉电商平台数据的消融实验，核心是验证该类数据的贡献——实验组仅删除平台询盘、交易频次等电商数据，其余模型结构与输入数据不变，在同一测试集上实测得到 $MAPE = 8.2$ (表 7)，较完整模型增幅约 74.4%，为跨境电商平台引入工业品类 AI 定价工具提供了实证支撑[13]。

Table 7. Analysis of the contribution of each module

表 7. 各模块贡献度分析

模块	完整模型	去掉认证文本	去掉知识图谱	去掉电商平台数据
MAPE/%	4.7 ± 0.5	6.8 ± 0.7	11.3 ± 1.1	8.2 ± 0.8
预警提前量/天	21.0 ± 1.8	16.5 ± 1.5	8.5 ± 1.2	14.2 ± 1.4
溢价识别准确率/%	88.4 ± 2.1	82.3 ± 2.3	65.7 ± 2.8	76.3 ± 2.5

6. 结语

本文针对叉车动力电池“订单小、合规重、频次低”三大行业特性，提出 AI 驱动的动态定价与供应链风险预警框架[2]。实验基于 24 笔真实出口订单与 68 周运价数据，验证了 TCN-Transformer 多模态融合、改进 STGNN 时空预警、知识图谱可解释定价三模块的协同价值[7] [16] [17]。研究结果表明：

- 1) 小样本鲁棒定价：在工业设备年订单不足 50 笔的稀缺数据场景下，本文方法通过知识图谱先验约束，将定价误差压缩至 4.7%，显著优于传统成本加成模型(误差 14.5%)，为同类中小企业提供了可复制的轻量级 AI 落地路径。
- 2) 供应链风险前置预警：改进 STGNN 实现 21 天运价与交期预测，红海危机场景下港口拥堵漏报率仅 4.2%，政策 - 冲突同步误差降至 1.2 天，支撑出口商提前锁定舱位、规避滞箱费损失。
- 3) 可解释人机协同：构建的“电池 - 认证 - 物流”知识图谱支持自然语言查询与定价沙盘模拟，业务人员可实时评估锂价冲击、碳税波动对毛利率的影响，实现从“黑箱预测”到“白箱决策”的工程管理闭环[8]。
- 4) 从跨境电商行业视角，本研究的工程管理范式不仅适配叉车动力电池品类，还可迁移至机床、仪器仪表等其他高合规工业品类，为跨境电商平台拓展工业赛道提供了技术支持与运营参考[11] [12]，助力平台解决“工业品类运营难、转化低”的痛点。

研究局限: 样本未覆盖美国负责任矿产倡议(RMI)认证体系, 实时数据接口暂未开放。未来可拓展至“电池即服务”订阅模式, 探索订阅制定价策略。

利益冲突

作者声明无利益冲突。

参考文献

- [1] European Commission (2023) Regulation (EU) 2023/1542 on Batteries and Waste Batteries.
- [2] 吕学都. 碳边境调节机制对我国出口产业的影响与对策思考[J]. 可持续发展经济导刊, 2023(5): 12-17.
- [3] Frost & Sullivan (2024) Global Forklift Battery Market Outlook 2024-2030. Frost & Sullivan.
- [4] IMO (2023) International Maritime Dangerous Goods Code (IMDG Code). 2023 Edition.
- [5] 韩鸿磊. 国内危险化学品物流配送网络可靠性探究[J]. 物流技术与应用, 2023, 28(11): 112-115.
- [6] SMM. 2024 中国磷酸铁锂电池成本结构报告[R]. 上海有色网, 2024.
- [7] ISO (2018) ISO 14067:2018 Carbon Footprint of Products—Requirements and Guidelines for Quantification.
- [8] Shang, Y., Ren, Y., Peng, H., et al. (2024) A Perspective Survey on Industrial Knowledge Graphs: Recent Advances, Open Challenges, and Future Directions. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **21**, 1567-1580.
- [9] Zeng, J. and Yan, X. (2025) DP-PSO-GA: A Heuristic Optimization Framework for Dynamic Pricing and Product Selection Competition Strategies in Cross-Border E-Commerce Platforms. *Journal of Computational and Theoretical Neuroscience*, **22**, 1245-1258.
- [10] 杨补园, 谢丹夏. 双边市场理论视角下的平台动态定价策略研究[J]. 经济科学, 2025(2): 32-49.
- [11] 毕马威中国. 中国工业品跨境电商发展报告(2024) [R]. 北京: 毕马威企业咨询(中国)有限公司, 2024.
- [12] Nowak, M. and Pawłowska-Nowak, M. (2024) Dynamic Pricing Method in the E-Commerce Industry Using Machine Learning. *Applied Sciences*, **14**, Article 11668. <https://doi.org/10.3390/app142411668>
- [13] Ramzy, N., Auer, S., Chamanara, J. and Ehm, H. (2021) KnowGraph-PM: A Knowledge Graph Based Pricing Model for Semiconductor Supply Chains. In: Lee, R. (Ed.), *Computer and Information Science 2021-Summer (ICIS 2021). Studies in Computational Intelligence* (Vol. 985). Springer, 61-75. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79474-3_5
- [14] 曹洁, 等. 基于改进 TOPSIS-模糊贝叶斯网络的邮轮建造物资物流风险评估[J]. 上海海事大学学报, 2022, 43(4): 78-85.
- [15] 陈信强, 陈伟平, 韩冰, 等. 融合图卷积神经网络与循环注意力机制的船舶航迹预测[J]. 中国航海, 2025, 48(3): 41-48.
- [16] Wang, Y., Chen, B. and Simchi-Levi, D. (2021) Multimodal Dynamic Pricing. *Management Science*, **67**, 6136-6152.
- [17] UNECE (2023) (AC.10/C.3) Report of the ECOSOC Sub-Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods (Sixtythird Session). UNECE.
- [18] 沈俊鑫, 杨怡, 等. 一种基于元学习 Reptile 算法的小样本数据资源定价方法[P]. 中国专利, CN202511677836.0. 2025.
- [19] Guo, H., Wang, Y. and Liu J. (2023) Artificial Intelligence in Supply Chain Optimization. 2023 11th International Conference on Intelligent Computing and Applications (ICICAT). IEEE.