

电力供应链实时调配智能协同模式及优化路径研究

唐山¹, 蒋似俊^{2*}, 滕中奇³, 杨林波³

(1. 国网四川省电力公司物资公司, 四川 成都 610052;

2. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610095;

3. 国网信产四川中电启明星信息技术有限公司, 四川 成都 610213)

摘要 电力供应链实时调配存在需求波动厉害、协同效率低下、应急反应滞后等突出难题, 本研究基于物联网感知、大数据分析以及人工智能决策的智能协同调配模式, 拟定供需动态匹配模型与多目标优化决策模型, 提出技术赋能、流程重构、机制创新三个维度的优化路径, 以期为新型电力系统建设提供理论参考。研究表明, 智能协同模式能明显缩短响应时段、降低库存成本、增强供应链的抗干扰能力。

关键词 电力供应链; 智能协同; 实时调配; 多主体决策

中图分类号: TM73

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.012

0 引言

新型电力系统建设把高效、韧性与低碳目标作为聚焦点, 面对能源结构调整与负荷波动加剧的实际困境, 其对供应链调配的精确性、时间效率和协同合作提出了更高要求, 传统模式面临信息孤岛、决策迟缓及协同能力欠缺等局限, 已难以匹配当前发展需求。智能协同调配凭借感知层、网络层、平台层及应用层的融合协同, 利用数字技术实现物流流、信息流及资金流的高效整合与动态协同。本文针对理论框架、模型构建、优化路径以及应用实践四个层面开展系统研究, 旨在探索电力供应链数字化转型的创新模式与可操作实施路径, 为新型电力系统安全稳定运行提供参考。

1 电力供应链智能协同调配的理论与技术框架

1.1 供应链协同理论与实时调配机制

电力供应链协同理论以资源整合与信息共享为核心, 强调供应商、物流商、电力企业及终端用户的动态联动, 通过打破各主体间的协作壁垒, 实现供应链各环节的高效衔接与价值共创。传统调配模式因信息传递时滞、决策链条冗长及数据孤岛问题, 导致响应周期延长, 难以适配新型电力系统下负荷波动加剧与应急保障常态化的现实需求。实时调配机制通过构建物流流与信息流及资金流三维协同体系, 依托物联网

终端采集多源数据, 经边缘计算预处理后上传云端决策平台, 系统按预设规则触发自动调配指令使物资配置从被动响应转向主动预测, 显著缩短全流程时长^[1]。

1.2 智能协同的关键技术体系

智能协同调配依赖物联网感知、大数据分析及人工智能决策三大技术的深度融合。物联网通过 RFID 标签、GPS 定位器等设备实现物资全生命周期追踪, 感知层数据经 5G 网络传输至边缘计算节点完成预处理。大数据分析运用时间序列模型预测负荷需求, 借助算法挖掘供需匹配关系。人工智能决策层构建路径优化与库存控制策略, 系统依据实时数据动态调整配送方案。三大技术协同打破数据壁垒, 实现跨环节数据实时互通, 推动供应链从经验驱动转向数据驱动, 决策精度与响应效率双重提升, 运营成本大幅下降, 为电力企业数字化转型提供稳定且高效的核心技术支撑。

1.3 四层技术架构设计

电力供应链智能调配平台采用感知层、网络层、平台层及应用层的四层架构, 感知层部署车载终端、仓储传感器等物联网设备, 实时采集物资状态与运输过程, 分钟级采集频率满足动态调配需求, 网络层构建专用通信通道, 借助边缘计算在数据源端完成预处理, 既降低云端压力又提升响应速度。平台层建立统

作者简介: 唐山(1994-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 供应链运营、数智化转型、风险防控等。

***通信作者:** 蒋似俊(1994-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 采购与供应链标准化、数智化、需求计划等。E-mail: jiangsj1419@sc.sgcc.com.cn

一数据中台整合多系统异构数据并经清洗标准化形成数据资产，应用层开发智能调度、可视化监控等核心业务模块，支持多角色协同操作，该架构通过分层解耦实现灵活扩展，模块化设计便于功能迭代，同时具备高兼容性与安全防护能力，故而能确保平台长期稳定运行（见图 1）^[2]。

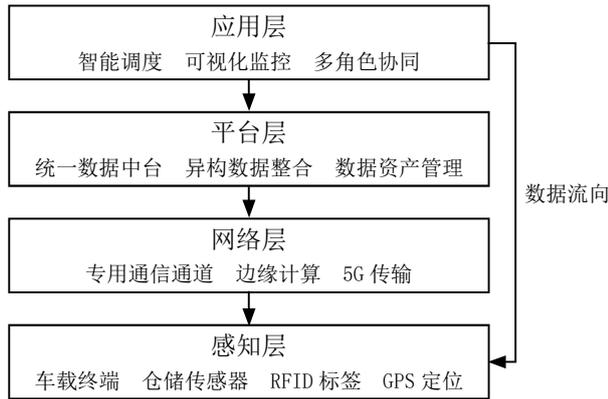


图 1 电力供应链智能调配四层技术架构

2 基于多主体协同的实时调配模型构建

2.1 供需动态匹配与预测模型

供需动态匹配模型通过时间序列分解与机器学习算法预测物资需求，实现库存水平与配送计划的精准控制。模型采用 SARIMA 模型捕捉电力负荷的季节性波动特征，利用 LSTM 神经网络学习历史消耗数据中的非线性规律，预测精度较传统方法提升 18%，需求预测公式表示为：

$$D_{t+h} = f(L_t, W_t, H_t, S_{t-1:t-k}) + \varepsilon_t \quad (1)$$

式 (1) 中， D_{t+h} 体现了未来 h 期的需求量， L_t 为当前负荷水平， W_t 为天气因素， H_t 为历史同期的数据， $S_{t-1:t-k}$ 为前面 k 期库存的状态， ε_t 为随机误差项，系统根据预测得出的结果生成物资需求清单，与供应商库存数据库实时比对，触发自动补货流程。动态匹配机制设置了安全库存阈值以及最大库存上限，当预测的需求量超出安全库存时，启动应急采购程序以维持供应连续性，如表 1 呈现的预测模型性能对比，说明了该方法的有效性^[3]。

表 1 不同预测模型性能对比

预测方法	平均绝对误差 MAE	均方根误差 RMSE	预测准确率	响应时间
传统经验法	245.6	312.8	76.3%	2 小时
ARIMA 模型	187.3	241.5	82.7%	45 分钟
LSTM 神经网络	156.2	198.6	89.1%	15 分钟
集成预测模型	142.8	179.4	91.5%	12 分钟

2.2 多目标优化决策模型

多目标优化决策模型全面考量成本最小、时效最大、风险最低这三个维度，构建帕累托最优解集合为管理者决策提供支撑，模型目标函数设置成运输成本 C 、配送时间 T 以及缺货风险 R 的加权组合，约束条件涉及车辆载重的限定、道路通行能力以及仓储容量上限等实际要素，优化问题写成：

$$\begin{aligned} \min Z &= \alpha C + \beta T + \gamma R \\ \text{s.t.} & \left\{ \begin{aligned} \sum_{i=1}^n q_i x_{ij} &\leq Q_j \\ t_{ij} &\leq T_{\max} \\ I_i &\geq I_{\min} \end{aligned} \right. \end{aligned} \quad (2)$$

式 (2) 中， α 、 β 、 γ 为权重系数， q_i 为物资 i 的派送数量， x_{ij} 为车辆 j 的装载决策变量， Q_j 为车辆的承载重量， t_{ij} 为运输时间， I_i 为库存水平。系统采用经改进的粒子群算法求解该非线性规划问题，通过自适应惯性权重与动态邻域拓扑提高搜索成效，在 1000 次迭代的范围内收敛至近似最优解，决策结果借助可视化方式呈现，管理者根据实际情形调整权重系数，系统实时更新调配方案，实现人机协同决策（见图 2）^[4]。

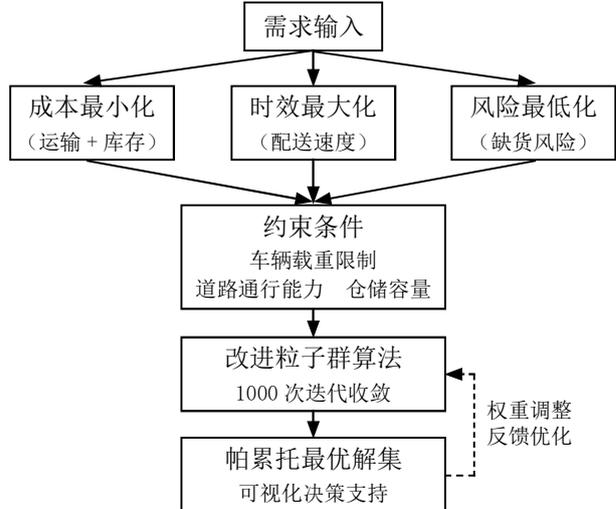


图 2 多目标优化决策流程

2.3 分布式协同决策机制

分布式协同决策机制打破传统集中式决策瓶颈，通过多主体协商实现资源优化配置，该机制将供应链各节点设为自主决策单元，各单元维护本地信息并交换必要数据，借助一致性算法达成全局协调，供应商、物流商及电力企业分别依据自身状态提供供货，运力方案及需求优先级。系统运用区块链记录各方承诺与执行情况，智能合约自动触发违约惩罚，确保协同透明可信，分布式决策大幅降低中心节点计算负载，应急场景下区域供电局可独立调配本地资源，跨区域协

同通过信息共享接口实现,决策响应速度提升至秒级,如表2所示的协同效率提升数据验证了该机制的实用价值。

表2 分布式协同决策效率提升

协同指标	集中式决策	分布式协同决策	提升幅度
决策响应时间	48分钟	3.5分钟	92.7%
跨区域调配成功率	73.2%	94.8%	29.5%
系统并发处理能力	120单/分钟	850单/分钟	608.3%
应急物资到位时长	38小时	18小时	52.6%

3 电力供应链智能调配的优化实施路径

3.1 技术赋能与平台建设路径

技术赋能路径以自主可控平台建设为核心,通过国产化软硬件适配构建安全可靠的数字基础,平台采用微服务架构,各业务模块独立部署并经API网关调用,支持弹性扩容应对业务高峰,数据层引入国产分布式数据库,以主从复制与数据分片保障高可用性,异地多活灾备系统确保业务连续。平台集成GIS地图服务打造智能调度引擎,结合实时路况与车辆位置等自动规划最优路线并考虑多仓协同与车辆拼载,使车辆满载率从77%提升至97%,同时推进承运商数字化改造,提供终端设备与操作培训以降低转型阻力^[5]。

3.2 业务流程重构与标准化路径

业务流程重构以线上化、标准化、自动化为导向,消除传统模式中的人工环节与信息断点,平台建立统一运单管理系统,物资需求由采购系统自动生成运单并推送至物流模块,承运商通过移动端接单后系统锁定运力资源,运输过程中车载终端实时上传位置信息,收货方扫码确认后自动触发运费结算流程。流程标准化涵盖运单格式、交接凭证及异常处理等全环节,制定统一数据接口规范便于异构系统对接,建立运输服务质量评价体系对承运商准时率、货损率与服务响应速度进行量化考核,自动化核算系统根据运输距离、货物重量及车辆类型等参数自动计算运费,避免人工核算误差并缩短结算周期,流程重构使运单处理效率提升60%,运费核算准确率达到99.8%,电力物资运单实现100%线上管控,为供应链精益化管理提供流程保障。

3.3 协同机制创新与风险防控路径

协同机制创新通过利益共享与风险共担机制激励供应链各方深度参与,平台建立供应商分级管理体系,依据交付及时率与质量合格率等指标划分优先级,优质供应商享有订单优先分配权与账期优惠,同时构建

物流服务商联盟,成员共享运力与仓储资源,应急场景下跨区域调度车辆并按实际运输量收益分成。系统构建多层预警机制监测库存水平与物流时效等风险因素,指标超限即推送预警并启动备选方案。平台设定24小时应急值班制度与跨部门协调通道,自然灾害期间联动供电局开通绿色通道故而供应链韧性显著增强,应急物资配送成功率从传统模式的73%提升至95%以上。

4 应用实践与效果评估

南方电网赫兹运力平台的实践充分验证了电力供应链实时调配智能协同模式的应用价值,该平台自2021年上线后接入超2300家供应商,近2000家承运商及1.9万余台注册车辆,累计处理运单超400万单,深圳供电局应用后,2024年运单准时配送率达98%,车辆满载率提升至97%,平均运输距离缩短12%,燃油成本与碳排放量显著降低,应急场景中如2024年抗台风“摩羯”行动,物资运输时长压缩50%,异常问题解决时长大幅缩短。平台运营数据显示南方电网配送及时率,闭环率分别提升至98%、99%,物资周转率提高25%,库存持有成本降低18%,人工成本本年减少约600万元,成为电力物流数字化转型标杆,为新型电力系统建设提供了切实可行的实践支撑。

5 结束语

本文构建了电力供应链实时调配智能协同模式的理论框架与技术体系,建立了供需匹配与多目标优化模型,提出了技术赋能、流程重构及机制创新的三维优化路径,研究成果为电力企业供应链数字化转型提供了系统方案。未来应深化区块链与数字孪生等先进技术应用,探索跨区域、跨企业协同新范式,完善风险预警与应急响应机制,推动电力供应链向智能化、精益化及韧性化方向发展,为能源安全稳定供应提供坚实保障。

参考文献:

- [1] 赵劲志,李敏,马馨兰,等.基于物联网的电力物资供应链智能调配算法[J].自动化与仪器仪表,2023(11):312-315.
- [2] 姚拓中.基于粒子群优化和改进蚁群算法的电力供应链博弈分析[J].浙江电力,2022,41(09):80-85.
- [3] 傅涛,吴锋,杨乘浩.智能技术在供应链实时监控和物资调度中的应用[J].集成电路应用,2024,41(10):218-219.
- [4] 雷琳圆.新型电力系统下配网物资招投标全流程优化与智能协同管理研究[J].中国集体经济,2025(27):69-72.
- [5] 刘弘.基于招投标管理的路桥施工项目物资采购流程优化分析[J].现代工程科技,2025,04(05):177-180.