

Deep application and optimization strategy of demand response lean management based on verifiable benefits in the supply chain

Yingjie Xiong

State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd. Shangrao Power Supply Branch, Shangrao, Jiangxi, 334000, China

Abstract

A lean supply chain management model is built on dynamic demand response. A multi - dim. benefit eval. index system is set up, and digital twin tech. enables full - chain visual monitoring. A core - based process control strategy is proposed. Empirical study on a power grid validates its cost - reducing and carbon - cutting effects.

Keywords

demand response; Verifiable benefits; supply chain management;

基于可验证效益的需求响应精益化管理在供应链中的深度应用与优化策略

熊颖杰

国网江西省电力有限公司上饶供电分公司, 中国·江西 上饶 334000

摘要

在构建基于动态需求响应的供应链精益化管理模型的基础上, 通过建立多维效益评估指标体系, 运用数字孪生技术实现供应链全流程可视化监控, 提出以能源消耗强度、库存周转率、运输能效比为核心的过程控制策略。结合某省级电网的实证研究表明, 该方法可使供应链综合运营成本降低18.7%, 碳排放强度下降23.4%, 验证了需求响应机制与精益化管理融合应用的可行性。

关键词

需求响应; 可验证效益; 供应链管理

1 引言

在全球能源转型加速与“双碳”目标纵深推进的背景下, 能源供应链正面临系统性的变革压力。国际能源署2023年调查报告揭示, 当前45%的能源企业因需求预测偏差率超15%导致资源配置失准, 这一数据充分暴露了传统供应链粗放式管理的结构性缺陷。以电力物资供应链为例, 运输环节中存在39%的能耗占比、仓储环节节能水平也达到21%, 更为严峻的是, 现行管理模式普遍缺乏贯穿全生命周期的效益验证机制, 致使节能措施实施效果难以量化追溯, 形成“投入产出”闭环断裂。鉴于此, 本研究突破传统管理范式, 创造性移植热力系统量化分析方法论, 构建了能流物流动态耦合模型, 将吨公里电耗、仓储能效比、库存持有成本率、应急响应成本系数、订单响应偏差度以及补货周

期达成率等核心参数纳入统一分析框架, 形成可验证、可复制的精益化管理体系, 为破解供应链能效管理“黑箱”难题提供全新解决方案。

2 需求响应精益化模型构建

2.1 动态需求感知层架构

在动态需求感知层中, 基于多维度数据融合与自适应调节机制, 构建了具有时空特性的需求预测体系^[1]。本体系基于电力物资供应链的行业特征, 创新性地引入了双闭环反馈机制: 一方面, 利用边缘计算节点实时采集市场动态数据, 另一方面, 借助数字孪生技术构建虚拟仿真环境实现预测模型迭代优化。

三维数据采集系统的数学建模可表述为:

$$D_{total}(t) = \sum_{i=1}^n \underbrace{\phi_i(t)}_{\text{市场基础需求}} \cdot \underbrace{cdot D_{market}^i(t)}_{\text{环境调节因子}} \times \underbrace{\Psi(T, H, \theta)}_{\text{应急扰动项}} + \xi(t) \cdot \epsilon_{emergency}(t)$$

式中, $\phi_i(t)$ 表示第*i*类物资需求权重系数, $\Psi(\cdot)$ 为温湿

【作者简介】熊颖杰(1991-), 女, 中国江西高安人, 硕士, 高级工程师, 从事负荷管理研究。

度补偿函数, $\xi(t)$ 为突发事件激活函数。该模型在江苏省电力公司 2024 年迎峰度夏期间的应用表明, 需求预测准确率提升至 93.7%, 较传统方法提升 27 个百分点^[2]。

表 1 动态校准机制的关键参数设置

参数名称	校准周期	阈值判定标准	调节幅度约束
市场需求基准值	每 4 小时	残差绝对值 > 历史均值 1.5σ	$\pm 15\%$
季节因子	每日	温度偏差 > 3°C 持续 24 小时	0.81.2
应急响应系数	实时	预警等级 \geq 橙色	0.10.3

数据特征工程的实施路径包含下面三个关键步骤:

(1) 时空对齐处理: 采用改进型动态时间规整算法 (DTW), 其代价函数定义为:

$$C_{DTW} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_{ij} \cdot \|x_i y_j\|^2 + \lambda \cdot \text{cost}R(w)$$

其中, 正则项 $R(w)$ 用于控制路径弯曲度, λ 取 0.3 时取得最优对齐效果。

(2) 异常值检测: 构建基于孤立森林 (IsolationForest) 的检测模型, 设置树深限制为 8 层, 异常评分阈值定为 0.65。

(3) 特征衍生: 从原始数据中提取出 12 个高阶特征, 包括:

$$\text{需求库存弹性系数: } \eta = \frac{\partial \ln D}{\partial \ln I}$$

$$\text{运输能耗敏感度: } S_E = \frac{\Delta E/E}{\Delta v/v}$$

$$\text{时间窗重叠度: } \omega = \frac{\text{cap}T_i}{\text{cup}T_i}$$

2.2 可验证效益指标体系

本体系构建了一个涵盖 3 个维度、6 个一级指标、15 个二级指标的评估系统 (如表 2 所示), 并创新性地引入动态权重分配机制, 权重计算采用以下改进型熵值法:

$$w_j = \frac{1H_j}{\sum_{k=1}^n (1H_k)}, \text{quad}H_j = \frac{1}{\sqrt{\ln m}} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}$$

其中 p_{ij} 为第 j 项指标在第 i 个样本中的标准化值。该方法的实施使得指标体系能够自适应不同场景下的评估重点迁移。

指标验证的闭环控制机制包含四个阶段:

(1) 数据采集阶段: 部署包含 132 个传感器的物联网系统, 实现运输车辆、仓储中心、配送站点的全要素监测。

(2) 模型计算阶段: 开发基于 Spark 的分布式计算框架, 单次全指标计算耗时控制在 23 秒内。

(3) 偏差分析阶段: 采用贡献度分解算法定位问题源头:

$$Y_k = \frac{\text{partial}F}{\text{partial}x_k} \cdot \frac{\Delta x_k}{\Delta F}$$

其中 F 为综合效益函数, x_k 为第 k 项影响因素。

(4) 策略优化阶段: 当关键指标连续两月未达目标时, 自动触发改进方案生成模块, 输出包含 3 种可选优化路径的

决策建议书。

表 2 核心效益指标及优化路径

指标类别	指标名称	优化措施
能源效益	吨公里电耗	①推广电动重卡; ②优化路径规划算法降低空驶率
	仓储能效比	①实施智能照明系统; ②推广相变材料温控技术
经济性	库存持有成本率	①建立 JIT 配送体系; ②应用 RFID 技术实现库存可视化
	应急响应成本系数	①建设区域应急物资储备库; ②开发智能调度系统
时效性	订单响应偏差度	①建立多级配送网络; ②部署预测性维护系统
	补货周期达成率	①推广无人机巡检; ②实施供应商协同计划

2.3 模型验证与优化

在国网某省级公司开展的实证研究中 (2024Q3 数据), 本模型展现出显著优势, 见下表 3:

表 3 模型性能对比

评估项目	传统模型	本模型	提升幅度
需求预测 MAE	17.2%	6.8%	60.5%
库存周转天数	38.7	26.4	31.8%
紧急订单满足率	72.3%	89.1%	23.2%
单位能耗成本	¥2.37/t · km	¥1.85/t · km	22.0%

经参数敏感性分析表明, 季节调节因子权重在 0.150.25 区间时综合效益最优; 运输路径优化算法的迭代次数超过 50 次后效益增益趋于平缓; 仓储温度每升高 1°C , 能效指标下降 0.7 个百分点。本模型还引入了量子遗传算法进行多目标优化, 具体的适应度函数设计为:

$$F = \sum_{i=1}^3 \omega_i f_i(x) \lambda \sum_{j=1}^2 g_j(x)$$

其中 ω_i 为效益指标权重, $g_j(x)$ 为约束惩罚项。算法参数设置: 种群规模 80, 突变概率 0.15, 收敛阈值 0.005。经测试, 该算法在解决 10 维以上优化问题时较传统 NSGAI 算法收敛速度提升 37%。

3 案例分析

某省级电网在供应链管理中曾面临诸多挑战, 在引入基于可验证效益的需求响应精益化管理体系前, 能源效益方面, 运输车辆多为传统燃油车, 路径规划缺乏智能化, 空驶率达 28%, 仓储中心照明系统与温控设备能效低, 导致吨公里电耗与仓储能效比远低于行业先进水平^[3]。经济性层面, 库存持有成本率为 15%, 应急响应成本系数高达 0.8。时效性上, 订单响应偏差度达 5 天, 补货周期达成率仅 70%, 严重影响客户满意度与电网运营稳定性。

应用本研究构建的模型时, 公司首先利用动态需求感知层架构中的三维数据采集系统与双闭环反馈机制, 对市场

基础需求、环境调节因子及应急扰动项进行实时采集与分析，基于公式 $(D_{total}(t) = \sum_{i=1}^n \phi_i(t) \cdot D_{market}^i(t) \times \Psi(T, H, \theta) + \xi(t) \cdot \epsilon_{emergency}(t))$ ，精准捕捉物资需求动态。以迎峰度夏期间为例，该公司借助边缘计算节点实时采集市场数据，结合数字孪生技术迭代预测模型，将需求预测准确率提升至 93.7%。

在可验证效益指标体系的指导下，公司针对能源效益指标，推广 35% 的电动重卡替换燃油车，并运用智能路径规划算法降低空驶率至 15%，吨公里电耗降低 22%。仓储中心部署智能照明系统与相变材料温控技术，仓储能效比提升 18%。在经济性指标优化上，建立 JIT 配送体系，应用 RFID 技术，库存持有成本率降至 10%；建设区域应急物资储备库，开发智能调度系统，应急响应成本系数降至 0.5。时效性方面，构建多级配送网络，部署预测性维护系统，订单响应偏差度缩短至 2 天，推广无人机巡检与实施供应商协同计划后，补货周期达成率提升至 85%。

该公司还基于模型验证与优化阶段的参数敏感性分析，明确了季节调节因子权重、运输路径优化算法迭代次数等关键参数对效益的影响。引入量子遗传算法进行多目标优化，设计适应度函数 $F = \sum_{i=1}^3 \omega_i f_i(x) - \lambda \sum_{j=1}^2 g_j(x)$ ，在解决 10 维以上优化问题时，较传统 NSGAI 算法收敛速度提升 37%。最终，公司供应链综合运营成本降低 18.7%，碳排放强度下降 23.4%，充分验证了模型应用的有效性。

4 优化策略

4.1 能源效益持续优化

为了实现可持续发展目标，应持续加大对电动载具的推广力度，与知名电动载具制造商及经销商携手，制定长期合作框架，明确车辆更替路线图，稳步提升电动重卡在车队中的占比。与此同时，建议积极与能源企业、基础设施建设商联动，推进配套快充设施网络的建设。依据仓储中心、配送站点及主要运输路线节点的布局，规划并建设快充站，确保电动载具能够随时随地便捷充电^[4]。在路径规划方面，可以引入一些的前沿的强化学习技术，与顶尖科研机构及高校展开深度合作，开发出能够实时响应路况、交通管制及天气状况等动态因素的自适应路径规划算法。

4.2 经济成本深度管控

为深化 JIT 配送体系，企业可与供应商携手搭建一体

化信息平台，实现订单状态、生产流程以及库存状况的实时同步，打破信息壁垒。同时，建立常态化沟通机制，围绕配送方案调整、库存优化策略等关键议题开展定期研讨，实现双方协作的无缝对接。面对应急管理挑战，企业应借助大数据分析技术，组建专业的数据分析团队，深入剖析过往应急订单数据，挖掘其中的潜在规律。积极与专业软件供应商合作，运用前沿数据分析工具精准预测各类物资在不同场景下的应急需求概率与规模，再基于预测结果，联合城市规划与物流领域专家，对区域应急物资储备库进行系统性布局优化，科学确定储备品类与数量。

4.3 时效提升创新举措

在多级配送网络的架构下，与智能物流设备制造商携手，引入智能仓储机器人与自动分拣系统，完成设备选型后，实施专业安装调试，针对相关人员进行培训。同时，联合通信运营商与系统集成商，借助 5G 通信技术搭建实时监控与调度平台。在供应商协同环节，与区块链技术企业合作，开发契合电网物资供应链的区块链平台，利用区块链技术保障信息真实且不可篡改，促进供应商、物流商、电网物资公司高效协同，实现供应链信息的无缝对接与顺畅流转。

5 结论与展望

综上所述，本研究以供应链为场景，借助可验证效益的需求响应精益化管理策略实现了供应链效能的提升。研究过程中，创新性地构建了动态需求感知层架构，该架构能够精准捕捉市场需求的细微变化，有效提升需求预测的准确率，为供应链管理提供了坚实的决策依据。本次研究成果有望在更多行业和企业中得到推广应用，并推动供应链管理向着更高水平的精益化方向发展。

参考文献

- [1] 杨小梅. 供应链视角下生物科技企业精益化成本管理与创新发展[J]. 中国管理信息化, 2024, 27 (09): 26-29.
- [2] 王涛,张剑,吴婧,等.迎峰度夏、迎峰度冬电力供需形势影响因素分析[J].电力勘测设计,2024(8):16-20
- [3] 褚芳君. 精益供应链下卡特彼勒挖掘机物流的运输业务优化[D]. 中国矿业大学, 2022.
- [4] 胡文青, 徐永浩, 李雷, 周隽. 供应链视角下生物科技企业精益化成本管理[J]. 中国管理信息化, 2023, 26 (05): 27-31.