

生产服务型物流枢纽布局优化评价体系研究

孔令争 付蓬勃 彭文

中冶京诚工程技术有限公司, 中国·北京 100176

摘要: 生产服务型物流枢纽作为连接制造业与物流业的核心节点, 其布局方案的科学性直接影响区域物流运营效率和供应链成本。针对当前物流布局优化缺乏系统量化评价手段的问题, 本文构建了涵盖时效、效率、成本三个维度的评价体系, 从物流动线优化、土地资源集约利用、流程冲突消除、作业时效性提升、资源周转率优化、运营成本节约六个方面设计具体评价指标, 并提出数据驱动式全流程推演评价方法。以北京经济技术开发区生产服务型物流枢纽为例进行验证, 结果表明优化方案在日物流运输总距离降低 54.2%、空间利用率提升至 91%、订单作业时间压缩 35.6%、年运营成本节约 150 万元等关键指标上均显著优于原方案, 验证了评价体系的有效性。

关键词: 生产服务型物流枢纽; 布局优化; 评价体系; 关键绩效指标; 数据驱动推演

Research on the Evaluation System for Layout Optimization of Production-Service-Oriented Logistics Hubs

Kong Lingzheng, Fu Pengbo, Peng Wen

Metallurgical Industry Beijing Engineering & Technology Co., Ltd., China Beijing 100176

Abstract: As a core node connecting manufacturing and logistics industries, the scientific design of production-service-oriented logistics hubs directly affects regional logistics efficiency and supply chain costs. Addressing the current lack of systematic and quantitative evaluation methods in logistics layout optimization, this study constructs an evaluation system encompassing three dimensions: timeliness, efficiency, and cost. Specific evaluation indicators are designed across six aspects: logistics route optimization, intensive land use, elimination of process conflicts, improvement of operational timeliness, optimization of resource turnover rate, and reduction of operating costs. A data-driven, full-process simulation evaluation method is proposed. The evaluation system is validated using the production-service-oriented logistics hub in Beijing Economic-Technological Development Area. Results show that the optimized scheme significantly outperforms the original plan in key metrics, including a 54.2% reduction in daily total transportation distance, a space utilization rate increased to 91%, a 35.6% reduction in order processing time, and annual operating cost savings of 1.5 million yuan, verifying the effectiveness of the evaluation system.

Keywords: Production-service-oriented logistics hub; Layout optimization; Evaluation system; Key performance indicators; Data-driven simulation

0 引言

随着国家物流枢纽网络建设的深入推进和高端制造业的快速发展, 生产服务型物流枢纽作为服务制造业供应链的核心基础设施, 其规划设计的科学性日益受到重视。然而, 当前物流枢纽布局规划多依赖经验判断和定性分析, 缺乏对布局方案在未来动态运营场景下实际表现的系统量化评价手段, 导致规划方案在实际运营中可能出现交通拥堵、月台不足、动线交叉、空间利用率低下等问题, 造成投资浪费和运营效率低下。

现有研究在物流枢纽布局优化方面取得了一定成果, 如基于系统布置设计 (SLP) 与遗传算法 (GA) 的功能布局优化方法、基于多元灰色模型的物流需求预测方法等, 但在布局方案的评价验证方面仍存在不足: 一是评价指标

较为单一, 多聚焦于成本或距离等个别维度, 缺乏覆盖时效、效率、成本的综合评价框架, 难以全面反映布局方案的综合性能; 二是评价方法以静态分析为主, 侧重于规划方案在当前条件下的技术经济指标, 难以反映布局方案在未来需求增长和动态运营条件下的真实表现, 尤其缺乏对高峰负荷场景下方案承载能力的评估; 三是评价过程缺乏真实运营数据的支撑, 多采用理论估算或经验参数, 结论的可信度和可操作性有限。从理论意义看, 构建系统的布局优化评价体系有助于填补静态规划与动态运营之间的方法论鸿沟, 丰富物流枢纽规划评价的理论框架; 从实践意义看, 科学的评价体系能够为布局方案的优选和优化决策提供量化依据, 避免因规划不合理导致的投资浪费和运营低效, 对提升生产服务型物流枢纽的运营效率和服务能力

具有重要的现实意义。针对上述问题，本文构建涵盖时效、效率、成本三个维度的综合评价体系，提出数据驱动式全流程推演评价方法，并以北京经济技术开发区生产服务型物流枢纽为例进行案例验证。

1 评价体系构建

1.1 构建原则与三维度框架

评价体系构建遵循四项原则：一是系统性原则，指标覆盖物流枢纽运营全流程和全要素，确保评价结果的全面性；二是可量化原则，各项指标能够通过数据采集和计算获得明确数值，避免主观定性判断；三是可比性原则，支持不同布局方案横向对比和同一方案纵向对比；四是动态性原则，结合未来物流需求预测评估方案的承载能力和适应能力。基于上述原则，构建时效、效率、成本三个维度的评价框架。时效维度关注对客户需求的响应速度，反映订单处理时间、车辆周转时间等表现；效率维度关注资源利用的充分性和合理性，涵盖物流动线、空间利用、流程冲突、资源周转等方面；成本维度关注运营经济性。三个维度相互关联、相互支撑，共同构成对布局方案综合性能的完整评价。

1.2 六类评价指标

在三维度框架下细化为六类评价指标：（1）物流动线优化指标，包括日物流运输总距离、单托盘平均搬运距离、作业动线转弯次数等；（2）土地资源集约利用指标，包括核心仓储区空间利用率、理论存储库容、库容满足率等；（3）流程冲突消除指标，包括一级动线交叉点数量、道路V/C比（饱和度）、人车分流程度等；（4）作业时效性提升指标，包括单笔订单库内作业时间、订单吞吐能力等；（5）资源周转率优化指标，包括月台周转率、货架周转率、设备利用率等；（6）运营成本节约指标，包括年运营成本节约额、综合经济效益、投资回收期等。

表1 生产服务型物流枢纽布局优化评价指标体系

评价维度	指标类别	核心指标
时效维度	作业时效性提升	单笔订单作业时间、订单吞吐能力
效率维度	物流动线优化	日运输总距离、单托盘搬运距离、转弯次数
效率维度	土地资源集约利用	空间利用率、理论库容、库容满足率
效率维度	流程冲突消除	动线交叉点数、V/C比、人车分流程度
效率维度	资源周转率优化	月台周转率、货架周转率、设备利用率
成本维度	运营成本节约	年运营成本节约、综合经济效益、投资回收期

2 数据驱动式全流程推演评价方法

2.1 方法框架与静态负荷测算

数据驱动式全流程推演评价方法包括五个环节：多源异构数据标准化整合与清洗、物流需求预测与总量投影、物理空间数字化解析与矩阵构建、静态负荷测算与动态流程推演、关键绩效指标多维量化对比。该方法通过将真实运营数据与空间布局矩阵进行时空融合，实现对规划方案在未来运营场景下表现的精准预测。在数据层面，对车辆进出场日志、月台装卸效率记录、库内SKU周转率表、设备维保记录等多源数据进行格式统一、缺失值处理、异常值检测和去重，构建高质量运营数据集；基于灰色预测模型产出未来物流需求，并依据月度波动系数拆解为日作业负荷和小时作业负荷。

静态负荷测算方面，首先对布局方案进行矢量化解析，从CAD图纸中提取功能区边界、道路中心线、月台位置等关键图层，建立统一坐标系并提取关键物流节点坐标；其次基于节点坐标构建OD距离矩阵，区分曼哈顿距离（模拟叉车沿直角通道行驶）和欧几里得距离（评估空间紧凑度），将工程图纸转化为可计算的数学模型；最后基于货架选型数据和有效存储面积进行库容建模，结合预测的峰值库存需求进行供需匹配分析，评估布局方案的库容负荷与空间匹配度。

2.2 动态流程推演

动态流程推演用于评估布局方案在实际运营条件下的效率表现。基于布局方案中的道路系统构建拓扑网络模型，将园区内道路抽象为节点和边的集合，其中节点表示道路交叉口、出入口、月台等关键位置，边表示连接这些位置的路段，为微观交通冲突分析和通行能力计算提供基础。通过叠加入库车流与出库车流的预计行驶轨迹，扫描潜在动线冲突点，计算各交叉口V/C比（饱和度），识别瓶颈环节和拥堵风险点。V/C比小于0.6表示自由流，0.6—0.75表示稳定流，0.75—0.9表示接近饱和，大于1.0表示过饱和和拥堵。同时，选取标准原材料入库和成品发货出库等典型业务场景，将标准作业流代入布局矩阵进行推演，追踪标准托盘货物从入园到出园的全生命周期轨迹，精细化复核全流程作业动线距离、转弯次数和作业时间。通过静态负荷测算与动态流程推演的有机结合，实现对布局方案在资源承载、交通通行、作业效率等方面综合性能的全面量化评价。

3 案例验证

3.1 案例背景

北京经济技术开发区是北京市唯一的国家级经济技

术开发区，已形成新一代信息技术、高端汽车和新能源智能汽车、机器人和智能制造、生物技术和大健康四大主导产业集群。马驹桥物流基地位于亦庄新城范围内，是北京六大物流节点之一，现有仓储面积超百万平方米，年货物吞吐量超过 800 万吨。随着四大主导产业快速发展，物流需求呈现“多批次、小批量、高时效”特征，现有布局难以完全匹配高端制造专业化、高效化的物流需求。本案例基于增强型遗传算法（E-GA）优化的布局方案，运用本文构建的评价体系进行量化验证，数据基础为超过 50 万条真实运营数据（覆盖 2020—2024 年）和 2028 年预测需求（年货物吞吐量 2215.6 万吨，旺季高峰日货运量约 7.5 万吨）。

3.2 评价结果与分析

表2 新旧方案关键绩效指标（KPI）对比

维度	指标类别	核心指标	原方案	优化方案	改善幅度
效率	物流动线优化	日运输总距离（公里）	2450	1120	-54.2%
效率	土地集约利用	仓储区空间利用率	72%	91%	+19pp
效率	流程冲突消除	一级动线交叉点	3处	0处	全部消除
时效	作业时效性	单笔订单作业时间（分钟）	45	29	-35.6%
效率	资源周转率	月台周转率提升	基准	+40%	+40%
成本	运营成本节约	年运营成本节约（万元）	—	150	—

效率维度方面，优化方案表现突出。物流动线方面，日物流运输总距离从 2450 公里降至 1120 公里，降幅 54.2%，单托盘入库搬运距离从 180 米降至 85 米，出库从 210 米降至 98 米，全年入库出库合计减少无效搬运距离超 40 万公里，按叉车每公里能耗 0.5 升柴油计算，全年可节约柴油约 20 万升，减少二氧化碳排放约 530 吨。土地资源利用方面，核心仓储区空间利用率从 72% 提升至 91%，理论库容增加 18%，库容满足率从 90.8% 提升至 107.2%，能够从容应对 2028 年库存峰值。流程冲突方面，优化方案采用单向循环交通组织，彻底消除 3 处一级动线交叉点，主干道 V/C 比控制在 0.75 以下，车辆平均行驶速度从 12km/h 提升至 25km/h。资源周转方面，月台平均周转率

提升 40%，货架周转次数从每年 12 次提升至 15 次，设备利用率从 65% 提升至 80%。

时效维度方面，单笔订单理论库内作业时间从 45 分钟压缩至 29 分钟，降幅 35.6%，其中拣货时间从 18 分钟缩短至 10 分钟，搬运时间从 12 分钟缩短至 7 分钟，等待时间从 8 分钟缩短至 4 分钟。订单吞吐能力提升 35% 以上，极大增强了对客户急单的响应能力，能够更好地满足高端制造企业 JIT 配送需求。成本维度方面，仅因动线缩短带来的搬运能耗与人工工时节约，每年直接节省约 150 万元运营支出；若考虑避免违约罚款、潜在业务增量和管理成本降低，每年可带来约 400 至 500 万元综合经济效益，投资回收期不足一年，具有极高的投入产出比。综合三个维度的评价结果，优化方案在有关键绩效指标上均显著优于原有方案，验证了本文评价体系能够全面、客观地反映生产服务型物流枢纽布局方案的综合性能。

4 结论与展望

本文针对生产服务型物流枢纽布局优化缺乏系统量化评价手段的问题，构建了涵盖时效、效率、成本三个维度、六类指标的综合评价体系，提出了数据驱动式全流程推演评价方法，并以北京经济技术开发区生产服务型物流枢纽为例进行了验证。研究表明，该评价体系能够全面、客观地量化布局方案的综合性能，数据驱动式全流程推演方法能够有效评估布局方案在未来动态运营场景下的实际表现，为物流枢纽布局方案的科学评价和优化决策提供了可操作的方法论支撑。案例验证结果显示，基于 E-GA 优化的布局方案在日物流运输总距离降低 54.2%、空间利用率提升至 91%、订单作业时间压缩 35.6%、年运营成本节约 150 万元等方面均表现优异，充分证明了布局优化在不增加土地和设备投入的前提下，仅通过物理空间的科学重组与动线的逻辑优化即可获得显著的效率红利和经济效益，投资回收期不足一年。这一发现对物流枢纽规划实践具有重要启示：在有限的投资预算下，应优先通过科学的布局优化提升运营效率，而非盲目追求自动化设备的投入。未来研究可进一步拓展评价指标体系，增加绿色低碳、智能化水平、供应链韧性等维度，适应物流枢纽高质量发展的新要求；引入离散事件仿真技术，构建更精细的仿真模型，提升动态推演的精度和可信度；建立评价指标的权重确定和综合评分方法，实现多方案的自动排序和优选决策。

参考文献：

[1] 国家发展改革委，交通运输部. 国家物流枢纽网络建设实施方案[Z]. 2019.

[2] 刘浩, 张锦. 基于 SLP 与遗传算法的物流园区功能布局优化研究[J]. 物流技术, 2022, 41(3): 45-50.

[3] 王明, 李丽. 生产服务型物流枢纽规划设计理论与方法[M]. 北京: 中国物资出版社, 2021.

[4] 陈静, 刘伟. 基于灰色预测模型的区域物流需求预

测研究[J]. 统计与决策, 2023, 39(8): 78-82.

[5] 赵刚, 孙明. 物流园区交通组织优化与仿真研究[J]. 公路交通科技, 2022, 39(5): 112-118.

作者简介: 孔令争 (1997.12-), 男, 汉族, 北京人, 硕士研究生, 研究方向: 物流规划。