

总图运输路径优化中数字化技术的效果分析

沈嘉莹¹ 卢朝辉¹ 庞雪颖¹ 张家炜¹ 李伟斌²

1.长庆工程设计有限公司 陕西 西安 710021

2.长庆油田分公司第一采气厂 陕西 榆林 718500

【摘要】：本文旨在探究数字化技术在总图运输路径优化中的应用效果，以解决传统路径规划中效率低、适应性差等问题。选取典型工业厂区与物流园区案例，对比应用数字化技术前后的路径规划指标，结合数据统计与实证分析，量化技术应用效果。结果显示数字化技术可使运输路径总长度缩短 15%-22%，运输效率提升 20%-30%，设备闲置率降低 18%-25%，空间利用率提高 10%-15%。结论表明，数字化技术能显著优化总图运输路径的经济性、时效性与空间适配性，为复杂工业场景的路径规划提供科学支撑，具有广泛的推广价值。

【关键词】：总图运输；路径优化；数字化技术；GIS；BIM；遗传算法；效果分析

DOI:10.12417/2811-0528.26.18.019

1 研究背景

总图运输作为工业工程与物流系统的核心环节，其路径规划的科学性直接影响企业的生产效率、运营成本与空间利用。随着智能制造与工业 4.0 的推进，数字化技术为总图运输路径优化提供了新的解决方案。GIS（地理信息系统）的空间网络分析能力可实现多约束条件下的路径寻优；BIM（建筑信息模型）的三维参数化建模能精准模拟运输场景中的空间关系；遗传算法、强化学习等人工智能技术可动态生成最优路径方案；数字孪生技术则通过虚实映射实现运输过程的实时监控与预测。据《2024 年中国工业数字化发展报告》显示，应用数字化技术的企业其总图运输效率平均提升 25%，但不同技术的适用场景与效果差异尚未形成系统认知，亟需深入分析。

2 总图运输路径优化的核心需求与数字化技术应用机制

2.1 总图运输路径优化的核心需求

（1）效率需求：在效率类指标方面，路径总长度指的是周期内运输路径的累计长度，通过对比技术应用前后的 GPS 轨迹数据进行量化；平均运输时间为单次运输从起点到终点的耗时，统计 100 次运输的均值，在工业厂区传统方法下该指标通常大于 40 分钟；路径调整响应时间是指从需求变化到新路径生成的时间，记录 10 次临时调整的耗时均值，人工规划方式下该指标一般大于 60 分钟；运输频次为单位时间内的运输次数，对比相同周期内的运输次数，在物流园区传统模式下该指标通常小于 20 次/天。

表 1 效率类指标及量化方法

指标名称	定义	量化方法	基准值（传统方法）
------	----	------	-----------

路径总长度	周期内运输路径的累计长度	对比技术应用前后的 GPS 轨迹数据	-
平均运输时间	单次运输从起点到终点的耗时	统计 100 次运输的均值	工业厂区：>40 分钟
路径调整响应时间	需求变化到新路径生成的时间	记录 10 次临时调整的耗时均	人工规划：>60 分钟
运输频次	单位时间内的运输次数	对比相同周期内的运输次数	物流园区：<20 次/天

（2）成本需求：涵盖运输能耗（燃油、电力）、设备折旧、人工成本等。据测算，运输路径每增加 1 公里，重型货车的燃油成本增加约 1.2 元，若年运输量 10 万吨，年额外支出可达数十万元。此外，路径不合理导致的设备闲置（如叉车等待装货）会使设备利用率从 70%降至 50%以下，间接增加成本。

表 2 成本类指标及量化方法

指标名称	定义	量化方法	基准值（传统方法）
单位运输能耗	运输单位重量货物的能耗	燃油/电力消耗 ÷ 运输量（L/吨或 kWh/吨）	重型货车：>0.15L/吨
设备闲置率	设备非作业时间占比	（总时间-作业时间）÷ 总时间	叉车：>30%
改造成本	路径优化导致的设施改造费用	统计道路拓宽、转弯区改造等支出	-
成本节约率	（优化前成本-优化后成本）÷ 优化前成本	对比年度运输总成本	-

（3）空间需求：需实现“运输通道”与“生产/仓储空间”的高效适配。具体包括：通道宽度匹配车辆转弯半径；路径布局避免与管线、设备基础冲突；空间利用率最大化（如通过路径优化释放 10%-15%的场地用于扩建）。

表 3 空间类指标及量化方法

指标名称	量化方法	基准值(传统方法)
通道宽度达标率	(满足集装箱卡车通行宽度的通道长度+满足其他车辆通行宽度的通道长度)÷通道总长度×100%	-
转弯半径适配率	实际转弯半径符合要求的通道数量÷通道总数量×100%	集装箱卡车: <9米 (适配率低)
路径冲突率	发生冲突的路径长度÷路径总长度×100%	-
空间利用率	(已利用空间面积÷总场地面积)×100%	优化前水平 (优化后需提高 10%-15%)
有效使用面积占比	有效使用面积÷总场地面积×100%	-

2.2 数字化技术的应用机制与操作流程

(1) 空间网络分析与多约束路径规划: GIS 通过矢量数据模型存储场地的空间要素(道路、建筑、禁行区等),其核心功能为“网络数据集构建”与“最短路径分析”。通过卫星遥感、现场测绘获取地形数据,录入道路宽度、坡度、限速等属性,构建拓扑网络(节点为交叉路口,边为道路段);在属性表中定义权重(如将禁行区的通行时间设为无穷大,陡坡路段的能耗系数设为 1.5);调用 Dijkstra 或 A*算法,计算从起点到终点的最优路径(可按“最短距离”“最少时间”“最低能耗”等目标求解);在地图上标注最优路径,生成长度、时间、能耗等报表。

(2) 三维空间模拟与碰撞检测: 使用 Revit 软件构建厂房、设备、运输车辆的精细模型(精度达毫米级),定义车辆转弯半径、最小通行净空等参数;在模型中创建运输路径线,设置车辆行驶速度、停靠点,模拟运输全过程;运行 Navisworks 软件的“ClashDetective”功能,检测车辆与建筑、设备的碰撞点(如货车顶部与厂房横梁的距离<0.5 米时报警);根据碰撞报告调整路径(如拓宽局部通道、调整转弯角度),重新模拟直至无碰撞。

3 数字化技术应用效果的案例分析

(1) 项目概况: 该工厂占地 60 万 m2, 包含冲压、焊接、

涂装、总装 4 大车间,采用“叉车+AGV”混合运输模式,日均运输物料 500 吨。传统路径规划存在三大问题: AGV 在焊接车间入口拥堵(日均 15 次);叉车与行人交叉冲突(月均 3 次);总装线物料供应延迟(影响生产节拍)。

(2) 技术应用方案: 构建包含车间布局、设备位置、通道尺寸的三维模型,重点标注 AGV 轨道、叉车行驶区、行人通道的边界;遗传算法参数设置目标函数: min (路径长度+冲突次数×100 米惩罚值)。种群规模 80,迭代次数 150;约束条件 AGV 最高速度 5km/h,叉车与行人通道物理隔离;在 BIM 模型中运行算法,生成 AGV 与叉车的独立路径方案,通过碰撞检测验证后实施。

表 3 效果对比 (应用后 6 个月数据)

指标类别	具体指标	优化前	优化后	变化幅度
效率指标	路径总长度 (km/天)	180	142	-21.1%
	运输时间 (分钟/次)	45	32	-28.9%
	AGV 拥堵次数 (次/天)	15	2	-86.7%
成本指标	单位运输能耗 (kWh/吨)	0.18	0.13	-27.8%
	叉车闲置率	35%	22%	-37.1%
空间指标	空间冲突率	12%	3%	-75.0%
	通道利用率	65%	82%	+26.2%
安全指标	人车冲突次数 (次/月)	3	0	-100%

总装线物料供应延迟次数从每月 8 次降至 0 次,生产计划完成率提升至 100%;因冲突减少,叉车维修费用从每月 5 万元降至 2.8 万元,年节约 26.4 万元。

4 结论

综上所述,本文通过理论分析与案例验证,数字化技术能全面提升总图运输路径优化效果,其中 GIS 缩短路径 15%-22%,BIM 降低空间冲突率 60%以上,遗传算法提升效率 20%-35%,数字孪生减少安全事故 80%以上;技术组合应用效果优于单一技术,BIM+遗传算法在复杂工业场景中综合效益最佳,GIS+数字孪生在物流与危险场景中优势显著。

参考文献:

[1] 刘军.石油化工总图运输设计全过程优化方法[J].上海化工,2025,50(02):49-52.
[2] 刘亮.石油化工企业总图运输设计的节约用地策略探讨[J].化工设计通讯,2024,50(12):103-105+123.
[3] 勾先东,刘洪卫.汽车厂设计中总图运输的应用[J].工程建设与设计,2022,(13):246-249.