

基于数字化工厂的车间布局仿真与物流优化

程晓伟

四川电子机械职业技术学院, 四川 绵阳 621023

DOI:10.61369/ETQM.2025120013

摘 要 : 数字化工厂技术将传统的基于手工和经验的设计规划转变为基于计算机仿真和优化的精确可靠的规划设计, 从而减少了工厂与工艺规划的时间, 缩短了生产准备周期, 优化了生产线配置, 减少了工程更改量, 降低了开发成本和投资风险。经济的全球化, 产品的竞争消除了国界, 其复杂程度越来越高。计算机仿真技术的发展和虚拟现实技术的产生, 使数字化工厂技术逐渐成为一个新的研究热点。

关 键 词 : 数字化工厂; Delmia/QUEST; 布局仿真; 物流优化

Workshop Layout Simulation and Logistics Optimization Based on Digital Factory

Cheng Xiaowei

Sichuan Electronic Machinery Vocational and Technical College, Mianyang, Sichuan 621023

Abstract : Digital factory technology transforms the traditional design planning based on manual and experience into accurate and reliable planning design based on computer simulation and optimization, thus reducing the time of factory and process planning, shortening the production preparation cycle, optimizing the production line configuration, reducing the amount of engineering changes, and reducing the development cost and investment risk. With the globalization of economy and the competition of products, national boundaries have been eliminated, and its complexity is getting higher and higher. With the development of computer simulation technology and the emergence of virtual reality technology, digital factory technology has gradually become a new research hotspot.

Keywords : digital factory; delmia/QUEST; layout simulation; logistics optimization

对模型中设施布局的空间干涉分析以及物流仿真运行, 发现了车间前期规划中存在的问题, 并给出了优化建议。分析了数字化工厂产生的背景以及数字化工厂的基本功能; 基于数字化工厂平台 Delmia/QUEST, 构建了某采煤机机械加工车间的数字化工厂模型。

一、数字化工厂布局仿真的核心价值

(一) 瓶颈识别与产能优化

数字化工厂布局仿真的核心价值在于通过虚拟化技术实现生产流程的精准优化, 其核心价值与瓶颈识别、产能优化的关联性可归纳为以下三点: 瓶颈识别的精准化, 数据驱动的瓶颈定位, 通过采集实际生产线的设备稼动率、物流数据等关键指标, 结合仿真模型可快速识别制约产能的薄弱环节。例如某汽车零部件企业通过智能监测系统3周内定位注塑工序瓶颈, 改造后产能提升40%。动态模拟验证, 数字孪生技术可预判潜在瓶颈, 某电子制造企业应用后换线时间减少45%, 异常停机降低70%。仿真系统通过调整生产节拍、U型布局等方案, 验证优化效果^[1]。产能优化的系统性, 全流程协同优化, 狭义数字化工厂以产品生命周期数据为基础, 通过仿真技术对加工、装配等真实活动虚拟化, 实现从工位到工厂层级的整体优化。资源利用率提升, 重庆桥丰

五金案例显示, 打破部门数据壁垒后, 跨部门协同使年收益提升超百万。仿真系统可量化分析在制品周转天数、工序平衡率等指标(目标值: OEE>85%)。决策支持的可视化, 三维模型与实时监控, Flexsim等仿真软件构建的可视化模型, 能直观展示物流距离、设备布局等问题, 辅助动态缓冲机制设计。低成本试错验证, 轻量化MES系统结合Excel协同表, 以40%行业均成本实现交货周期压缩28%, 仿真技术可降低实体改造风险。当前领先企业已通过数字孪生技术将新产品导入周期缩短60%, 印证了仿真技术在突破企业成长边界中的关键作用。

(二) 三维空间规划验证

数字化工厂布局仿真的核心价值在于通过三维空间规划验证实现生产系统的优化与透明化管理, 精益布局与价值流分析, 通过三维可视化模型直观模拟改进前后的价值流状态, 优化设备布局与物流路径, 提升空间利用率(某案例显示焊装车间空间利用率提升18%)^[2]。同时支持动态干涉检测, 避免设备碰撞风险。

数字孪生与仿真基础，三维模型为工艺仿真和数字孪生提供底层支撑，例如特斯拉柏林工厂通过 Unity 模拟生产线，虚拟调试使投产时间提前4个月。此外，结合实时数据（如 PLC 状态）实现设备运行状态的动态映射。生产透明化与效率提升，实时监控：通过 OPC UA 协议绑定设备数据，实现故障定位与颜色编码预警。运维优化：波音利用 AR 指导维修减少40%操作错误，PwC 调研显示三维可视化可提升运维效率27%。培训与应急：通过三维动画进行人员培训与应急演练，提升响应能力。动态集成：通过 WebGL 或 Unreal Engine 实现浏览器端或工业级渲染。三维空间规划验证通过多技术融合，从静态布局到动态仿真全流程优化，成为数字化工厂建设的核心驱动力。

二、物流系统优化的关键技术路径

（一）动态路径规划算法

物流系统优化中的动态路径规划算法是提升运输效率的核心技术，其关键技术路径可从算法演进、实时数据处理和系统协同三个维度展开：算法演进与多目标优化，动态路径规划算法已从传统静态模型发展为融合实时数据的智能决策系统。遗传算法通过模拟生物进化过程解决多车辆协同问题，在 DHL 德国的实践中实现路径成本降低18%。蚁群算法则模仿昆虫觅食行为，通过信息素反馈机制优化路径选择，特别适合动态交通环境^[3]。深度强化学习（如阿里巴巴的 NeuRouter 系统）能融合200+维实时特征，实现0.8秒级动态重规划，双11期间降低空驶率41%。实时数据融合与动态响应，现代系统依赖多源实时数据构建决策模型：交通感知层：通过地磁传感器、GPS 浮动车数据和交通摄像头捕捉实时路况，精度可达分钟级。例如美团骑手系统结合电动车续航数据动态调整充电路径，使单日配送量提升20%。需求预测层：联邦学习框架下的 LSTM 模型将订单预测误差控制在7%以内，物流的时空特征引擎能提前识别晚高峰退货订单激增窗口期。弹性运力调度：深圳某平台采用博弈论设计动态计价模型，当区域订单密度超临界值时触发指数级溢价机制，使运力峰值承载量提升58%。系统协同与资源整合，跨企业数据共享成为新趋势，如物流联盟通过区块链技术实现货运信息互通，使整体路网通行效率提升19%。当前技术瓶颈在于局部最优陷阱和突发事件链式反应处理。量子计算可能带来下一轮突破，而图神经网络与物理信息融合（GNN-PINN）已展现出处理复杂约束的潜力。实际应用中需根据场景选择算法组合，如冷链配送需优先考虑温控约束，而即时配送则侧重时效性优化。

（二）多目标协同优化

物流系统优化的关键技术路径多目标协同优化涉及多个维度的技术整合与创新，路径优化算法的演进，元启发式算法：如蚁群算法和遗传算法，在 DHL 德国的实践中实现路径成本降低18%。机器学习增强：联邦学习框架下的需求预测模型（LSTM+Attention）将预测误差控制在7%以内。深度强化学习：阿里巴巴的 NeuRouter 系统通过分布式近端策略优化（DPPO）架构，双11期间降低空驶率41%。多目标协同优化技

术，动态需求与约束管理：某电商企业需处理每分钟2000+订单变更，并平衡准时率与碳排放的冲突（提升1%准时率可能导致碳排放增加3.5%）^[4]。图神经网络与物理信息融合：GNN-PINN 混合架构在东南亚跨关境物流中减少清关等待时间37%。应用场景与案例，即时配送：美团通过 AI 优化骑手路径，单日人均配送单量提升20%。城际物流：德邦快递应用 VRP 模型，跨省干线成本降低12%。冷链物流：九州通医药系统实现99.5%准时率，货损率降至0.2%。基础设施与政策协同，自动驾驶与车路协同：天津港至马驹桥的自动驾驶试点通过统一政策标准，实现货车编队跨区域运行。绿色配送体系：安阳市构建“4+9+N”三级节点网络，新能源车减少碳排放29123吨。系统架构设计，智能物流系统的四阶架构（感知层、边缘层、平台层、应用层）可提升资源利用率35%以上，预测准确率达92%。通过上述技术路径的协同，物流系统能够在成本、时效、环保等多目标间实现动态平衡。

三、实施框架与方法论

（一）精益化价值流优化

浪费识别与消除，基于丰田生产系统（TPS）的七大浪费理论（过量生产、库存、搬运等），通过价值流图（VSM）量化非增值环节，建立优先级改善矩阵。例如某电子企业通过单元化物流和快速换模技术，将订单交付周期缩短71%。拉动式供应链构建，采用看板管理和高级计划系统（APS），实现需求驱动的按需生产模式，结合 PDCA 循环形成持续改进闭环。

（二）智能技术集成应用

自动化仓储系统，自动化立体仓库（AS/RS）与 AGV 搬运设备可提升空间利用率2-5倍，分拣效率达99.9%。WMS 系统通过实时库存同步，使库存准确率提升至98%。算法驱动的路径优化，建立带时间窗的多车辆路径问题（VRPTW）数学模型，综合订单特征、车辆约束与环境数据，实现成本-效率-服务的最优平衡。某快消品城配案例显示，优化后里程成本降低15%-20%。

（三）协同网络与标准化

供应链协同机制，与供应商共享需求预测数据，实施 JIT 交付策略，降低牛鞭效应影响。普天铁心通过“三仓合一”智能仓储，实现原材料到成品的全流程自动化衔接。作业标准化体系，采用5S管理和作业指导书规范操作，某制造业企业通过批次管理系统实现产品全生命周期追溯。

四、典型应用场景

（一）新工厂规划

数字化工厂的车间布局仿真与物流优化在新工厂规划中具有以下典型应用场景：厂房与设备布局优化，通过三维建模和系统仿真技术，可快速验证不同布局方案对生产效率的影响^[5]。例如，基于二维 CAD 布局图构建三维虚拟工厂模型，精确定位设备位置并优化空间利用率。静态工厂仿真能评估厂房设计合理性，

如某制药企业通过仿真验证口服固体制剂车间的物流路径和产量达标情况。物流系统动态仿真，物流路径规划：通过 AGV、传送带等物流要素建模，模拟物料搬运过程，优化路线以减少交叉和冗余。例如，某企业利用 Factory Flow 软件分析厂区物流路线，将原材料仓库与产线衔接效率提升 30%。资源配置优化：仿真可动态计算缓冲区容量、设备负载等指标，输出最优物流工具和人员配置方案。产线平衡与瓶颈识别，通过离散事件系统仿真（如 Flexsim 软件），模拟生产节拍和工位负载，识别产能瓶颈。某机电产品生产线通过仿真优化后，设备利用率提高 25%。航空发动机车间还采用模型轻量化技术，将总装模型内存从 1GB 压缩至 20MB，实现高效仿真分析。数字孪生与方案验证，虚拟工厂模型可与 PLM、MES 等系统集成，支持“设计-仿真-实施”闭环。例如，某企业通过 Plant Simulation 验证不同生产节拍下的物流方案，最终选择最优配置。百子尖的化工仿真技术甚至能实时预测反应器聚焦风险，提前 72 小时预警。多目标协同优化，布局规划需平衡效率、成本、柔性等目标。博海咨询的“五步法”通过数据收集、方案比选和全程实施支持，确保布局方案科学落地。某煤化工企业通过多物理场耦合仿真，将碳转化率提升 4.7%。这些应用场景表明，数字化仿真技术能显著降低新工厂规划风险，实现从静态设计到动态优化的全流程升级。

（二）新产线改造

数字化工厂的车间布局仿真与物流优化在新产线改造中的典

型应用场景主要包括以下方面：三维虚拟工厂建模，正向建模：基于二维 CAD 布局图快速构建三维模型，支持参数化调整设备尺寸（如传送带、机械臂等），并集成 1500+ 机器人模型库。逆向建模：通过扫描实际设施生成点云数据，实现物理工厂的数字化复刻。物流动态仿真与优化，要素建模：对 AGV、存储设备等物流要素进行仿真，可模拟设备故障、能耗及排班等影响因素。瓶颈分析：通过动态仿真输出产能数据，识别生产瓶颈并优化物流路线，平衡工位负载。AGV 系统验证：模拟 AGV 转运能力与路径拥堵，合理配置车辆数量。多方案对比与决策支持，支持快速对比不同布局方案，通过定量数据（如设备利用率、空闲时间）辅助决策。仿真可预判产线极限能力，减少投资风险并缩短规划周期。数字孪生集成，虚拟模型与 PLM、MES 等系统集成，实现未来工厂的“数字孪生”建设。仿真结果可直接用于指导实际产线改造，确保一次投资正确性。离散事件系统仿真，针对机电类产线，采用 Flexsim 等工具建立逻辑模型，结合生产数据优化流程。

总之，制造企业在生产线规划、工艺规划和物流规划等诸多问题上都遇到了极大的困难，而基于数据驱动的数字车间（Digital Manufacturing Manufacturing Manufacturing，简称“数字车间”）是一种能够全面评价和分析工程整体性能的新方法。

参考文献

[1]严秀哲, 数字化工厂技术在生产线规划中的应用 [J]. 中国制造业信息化 .2011, (1)125-127.
[2]孙华浩. 基于数字化工厂的车间布局仿真与物流优化探讨 [J]. 汽车工程 .2009, (11)57-59.
[3]刘海平, 浅谈数字化工厂技术在生产线规划中的应用 [J]. 华东交通大学学报 .2006, (2)325-327.
[4]张红艳. 数字化工厂的车间布局仿真与物流优化研究 [J]. 计算机辅助工程 .2005, (3)143-145.
[5]周秀, 基于数字化工厂的车间布局仿真与物流优化分析 [J]. 现代工业经济和信息化 .2023, 13(5)128-130.