

医药仓储智能调度数字孪生可视化系统的关键技术研究

王夏欢子 赵志福 何洁莎 叶 萍 李厚强

中国医药集团联合工程有限公司 湖北 武汉 430000

【摘要】：针对传统医药仓储调度依赖人工、信息滞后、合规管控薄弱等问题，本文开展医药仓储智能调度数字孪生可视化系统关键技术研究。首先剖析医药仓储合规性、安全性、效率性核心需求，梳理数字孪生、智能调度与可视化技术基础；进而构建“感知层-数据层-平台层-应用层”四层系统架构，明确各层技术支撑与功能定位。重点研究三位一体数字孪生建模技术，研究成果为医药仓储智能化升级提供技术支撑，具有重要实用价值。

【关键词】：医药仓储；数字孪生；智能调度；可视化系统；改进遗传算法

DOI:10.12417/2811-0722.25.12.036

1 研究背景与意义

医药仓储作为医药供应链的核心枢纽，承担着药品存储、周转、分拣等关键职能，其管理水平直接关系到药品质量与安全流通效率。我国《药品经营质量管理规范》对医药仓储的温湿度监控、药品效期管理、批号追溯等提出了严格要求，而传统医药仓储管理模式普遍存在调度依赖人工经验、信息传递滞后、设备协同效率低、可视化程度不足等问题。据中国医药商业协会数据显示，传统医药仓储的订单分拣差错率约为0.3%，库存周转天数平均为45天，远不能满足医药行业高质量发展的需求。数字孪生技术通过构建物理实体与虚拟模型的实时映射，实现了对实体对象的全生命周期管理；智能调度技术则依托算法优化资源配置与作业流程；可视化技术为数据与流程提供直观呈现方式。三者融合形成的医药仓储智能调度数字孪生可视化系统，能够打破信息孤岛，实现仓储作业的精准化、自动化与智能化管控，对降低运营成本、提升合规水平、保障药品安全具有重要现实意义。

2 医药仓储智能调度数字孪生可视化系统的相关理论

2.1 医药仓储管理核心特性与需求

医药仓储区别于普通商品仓储，具有显著的行业特殊性，其核心需求可概括为三点。一是合规性需求，需全程记录药品存储环境参数（温湿度、光照等），实现批号、效期的全链条追溯，满足GSP认证要求；二是安全性需求，特殊药品（如麻醉药品、精神药品）需单独管控，避免错发、盗发风险；三是效率性需求，面对医药电商的即时配送需求，需实现订单快速分拣、库存动态平衡。传统医药仓储管理依赖人工记录与经验调度，存在数据追溯不完整、作业响应滞后、资源利用率低等问题，亟需通过技术革新实现管理模式升级。

2.2 数字孪生技术理论体系

数字孪生技术以“数据驱动、虚实联动、全生命周期”为核心特征，其技术体系包含五个关键维度：物理实体层（仓储设施、设备、药品等）、虚拟模型层（物理实体的数字化映射）、

数据交互层（虚实之间的实时数据传输）、功能服务层（调度、监控、分析等应用）、孪生智控层（算法与规则引擎）。在仓储场景中，数字孪生技术通过构建高精度虚拟模型，实现对仓储空间、设备运行、作业流程的实时复刻，为智能调度提供“虚拟试验场”，同时通过虚实联动实现异常事件的快速响应。

2.3 智能调度与可视化技术基础

智能调度技术以运筹学、人工智能算法为核心，通过对仓储资源（人员、设备、空间）与作业任务（入库、分拣、出库）的动态优化分配，实现作业效率最大化。常用算法包括遗传算法、蚁群算法、粒子群优化算法等，其中遗传算法因具备全局寻优能力，在复杂任务调度中应用广泛。可视化技术通过图形化手段将数据与流程直观呈现，按呈现维度可分为二维可视化（库存报表、作业甘特图）与三维可视化（仓储空间立体模型、设备运行轨迹）。在医药仓储中，可视化技术需实现“数据-模型-流程”的一体化呈现，支撑管理人员快速决策。

3 系统总体架构设计

3.1 架构设计原则

结合医药仓储的合规性、安全性与效率性需求，系统架构设计遵循四项原则：一是合规优先原则，内置GSP规范校验模块，确保所有作业流程符合监管要求；二是实时性原则，通过边缘计算与5G传输，实现数据采集与虚实同步延迟低于100ms；三是可扩展性原则，采用微服务架构，支持设备接入与功能模块的灵活扩展；四是易用性原则，可视化界面设计贴合仓储人员操作习惯，降低学习成本。

3.2 系统分层架构

系统采用“感知层-数据层-平台层-应用层”的四层架构，各层功能与技术支撑如下表所示。

表1 系统分层架构

架构层级	核心功能	关键技术	主要设备/工具
感知层	药品信息采集、设备状态监测、	物联网（IoT）、射频识别（RFID）、边缘计算	RFID标签/阅读器、温湿度传感器、AGV定位模块、边

	环境参数感知		缘网关
数据层	数据存储、清洗、融合与管理	时序数据库 (InfluxDB)、关系型数据库 (MySQL)、数据中台	服务器集群、数据清洗引擎、ETL 工具
平台层	数字孪生建模、智能调度运算、可视化渲染	数字孪生引擎、遗传算法、WebGL、Unity3D	孪生建模工具、算法运算框架、三维渲染引擎
应用层	作业调度、实时监控、合规追溯、决策分析	微服务架构、B/S 交互模式	调度管理终端、可视化监控大屏、移动查核设备

3.2.1 感知层

作为系统的数据入口，感知层实现对医药仓储物理世界的全面感知。通过在药品包装粘贴 RFID 标签，实现药品批号、效期、规格等信息的自动采集；在仓储区域部署温湿度传感器，每 5 秒采集一次环境数据；通过 AGV 内置的 GPS 与惯性导航模块，实时获取设备位置与运行状态。边缘网关对采集数据进行预处理（过滤噪声、格式转换）后，通过 5G 网络传输至数据层，降低云端处理压力。

3.2.2 数据层

承担“数据中枢”职能，实现多源数据的一体化管理。采用混合数据库架构：时序数据库存储温湿度、设备运行参数等高频动态数据；关系型数据库存储药品基础信息、人员信息、作业订单等结构化数据；非结构化数据库存储设备维修记录、监控视频等数据。数据中台通过数据清洗、融合算法，消除数据冗余与冲突，形成标准化的“仓储数据资产”，为上层应用提供统一数据接口。

3.2.3 平台层

系统的核心技术支撑层，包含三大引擎。一是数字孪生引擎，负责物理实体与虚拟模型的建模、映射与同步，支持模型精度按需调整（从厘米级到毫米级）；二是智能调度引擎，基于遗传算法与实时数据，实现任务分配、路径规划与资源优化；三是可视化渲染引擎，采用 WebGL 技术实现三维场景的轻量化渲染，支持多终端自适应展示。

4 医药仓储智能调度数字孪生可视化系统关键技术实现

4.1 医药仓储数字孪生建模技术

数字孪生模型的精度直接影响系统管控效果，本文构建“几何-物理-行为”三位一体的建模体系，实现对医药仓储的精准复刻。

4.1.1 多维度建模方法

采用激光扫描技术获取仓储空间、货架、设备的三维点云数据，通过 SolidWorks 软件构建高精度几何模型，误差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内。针对药品包装的多样性，建立标准化几何模型库，可通过参数配置快速生成特定药品模型。基于牛顿力学与热力

学原理，构建设备运行与环境变化的物理模型。例如，在 AGV 物理模型中，融入载重-速度关系方程与转弯半径约束；在温湿度物理模型中，模拟空调启停对区域温湿度的影响规律。通过采集历史作业数据，提炼设备与人员的行为规则，构建行为模型。例如，基于 AGV 历史行驶数据，建立“路径-拥堵概率”映射模型；基于分拣人员操作数据，构建“任务复杂度-完成时长”预测模型。

4.1.2 虚实实时同步机制

采用“主动推送+按需拉取”的混合同步策略，感知层设备状态与环境参数变化频率高于 1Hz 的数据，通过 MQTT 协议主动推送至虚拟模型；药品库存、作业订单等低频变化数据，由虚拟模型按需拉取。同时引入时间戳同步技术，确保虚实数据的时间一致性，同步延迟控制在 50ms 以内，满足实时监控需求。

4.2 基于改进遗传算法的智能调度技术

针对医药仓储作业的多约束特性，本文提出一种融合约束因子的改进遗传算法，实现作业调度的优化。

在标准遗传算法基础上，进行两处关键改进。一是自适应交叉变异算子，根据种群适应度方差动态调整交叉概率与变异概率，避免算法陷入局部最优；二是约束因子嵌入，在适应度函数中加入约束满足罚项，对违反约束的解赋予极低适应度，确保最优解符合合规要求。通过仿真测试，改进遗传算法的调度效率较标准遗传算法提升 18%，约束满足率达到 100%，优于蚁群算法（约束满足率 92%）与粒子群优化算法（调度效率提升 12%）。

4.3 多维度可视化与交互技术

可视化系统需实现“全局监控-细节钻取-交互控制”的一体化功能，本文从场景渲染、数据呈现与交互设计三方面实现技术落地。

4.3.1 三维场景轻量化渲染

针对仓储场景模型复杂导致的渲染卡顿问题，采用“LOD+实例化渲染”技术。远处场景采用低精度模型，近处场景自动切换为高精度模型；对相同类型设备采用实例化渲染，降低 GPU 渲染压力。通过 Unity3D 构建的三维场景，在普通 PC 端可实现 60fps 以上的流畅运行，支持 1000+设备的同时呈现。

4.3.2 多维度数据可视化呈现

设计“三级可视化”体系，一是全景可视化，在监控大屏呈现仓储整体布局、设备运行状态与库存分布，采用颜色编码区分设备状态；二是细节可视化，点击特定设备或药品，弹出详细信息面板；三是趋势可视化，通过折线图、柱状图展示库存周转、作业效率等指标的变化趋势，支持近 30 天数据的回溯分析。

4.4 数据采集与融合技术

4.4.1 多源数据采集网络

构建“RFID+传感器+摄像头”的立体化采集网络，药品流转环节采用超高频 RFID 实现批量识别；温湿度采用高精度传感器，部署密度为每 50 m² 1 个；关键区域安装 AI 摄像头，通过计算机视觉实现人员违规操作（如未戴安全帽）的自动识别。采集设备均支持 Modbus、OPCUA 等工业协议，确保与现有仓储系统的兼容性。

4.4.2 数据清洗与融合算法

针对采集数据中的噪声与冲突，设计两步处理流程，第一步数据清洗，采用滑动窗口滤波去除传感器数据的随机噪声，通过异常值检测算法（Z-score 法）剔除错误数据；第二步数据融合，采用 D-S 证据理论融合 RFID 与摄像头的药品识别数据，解决单一设备识别准确率不足的问题，融合后识别准确率从 95% 提升至 99.8%。

5 应用案例与效果评估

5.1 案例背景

选取某大型医药流通企业的区域仓储中心作为试点，该中心占地面积 15000 m²，存储药品 2000 余种，包含常温、阴凉、冷藏三个存储区域，原有仓储系统存在订单分拣效率低（日均处理 800 单）、温湿度监控滞后、库存周转慢（平均 52 天）等问题。2024 年 6 月引入本文研究的智能调度数字孪生可视化系统，部署设备包括 RFID 阅读器 30 台、温湿度传感器 120 个、AGV20 台、三维监控大屏 1 套。

5.2 应用效果评估

5.2.1 评估指标体系

从效率、成本、合规、安全四个维度构建评估指标体系，

选取系统应用前（2024 年 1-5 月）与应用后（2024 年 7-11 月）的数据进行对比分析。

5.2.2 具体效果分析

通过改进遗传算法的智能调度，订单分拣差错率从 0.32% 降至 0.08%，日均处理订单量提升至 1200 单，分拣效率提升 50%；AGV 路径优化后，设备空驶率从 28% 降至 12%，单票药品出库时间从 45 分钟缩短至 22 分钟。库存周转天数从 52 天缩短至 38 天，资金占用成本降低 26.9%；设备故障预警准确率达 92%，维修成本降低 31%；人工需求减少 15 人，年人工成本节约 120 万元。温湿度数据自动采集与上传，数据完整率达 100%，通过 GSP 认证检查耗时从 3 天缩短至 1 天；药品追溯实现“一物一码”全链条可查，追溯响应时间从 2 小时缩短至 5 分钟。特殊药品存储区域的 AI 监控实现违规操作识别准确率 98%，异常事件响应时间从 10 分钟缩短至 1 分钟，未发生药品错发、盗发事件。

6 结论

综上所述，本文针对医药仓储管理的合规性与效率性需求，开展智能调度数字孪生可视化系统的关键技术研究，构建了“感知层-数据层-平台层-应用层”的四层系统架构，明确了各层的核心功能与技术支持，实现了医药仓储物理实体与虚拟模型的深度融合。提出了“几何-物理-行为”三位一体的数字孪生建模方法与虚实实时同步机制，构建的虚拟模型精度误差低于 2mm，同步延迟控制在 50ms 以内，为智能调度提供了精准的虚拟试验环境。应用案例表明，系统可显著提升医药仓储的作业效率、降低运营成本、强化合规管控，具有较高的实用价值。

参考文献：

- [1] 李春泽.医药仓储物流配送中心拣选作业调度问题算法研究[D].广东工业大学,2025.
- [2] 袁露嫣.数字经济背景下医药企业供应链成本控制方法与效果研究[D].北京物资学院,2024.
- [3] 欧阳雨萍.电商医药发展背景下的智慧仓储优化研究[J].物流科技,2023,46(10):133-135.
- [4] 许兴龙,陆星驰,林琳,等.大型医药高标物流仓储工程施工关键技术研究[J].中国住宅设施,2022,(09):61-63.