

Innovation and Practice of an Intelligent Quantitative Loading Management System for Hazardous Chemicals

Bo Li¹ Wen Chen² Changping Li¹ Hua Xu¹ Yun Li²

1. China Shipbuilding Group 716 Research Institute, Lianyungang, Jiangsu, 222000, China

2. China Petroleum Southwest Oil and Gas Field Company, Chengdu, Sichuan, 621000, China

Abstract

This study focuses on an intelligent quantitative loading management system for hazardous chemicals at a natural gas processing plant, providing an in-depth analysis of its innovative practices in hazardous material handling. By integrating IoT technology, process reengineering, and digital twin technology, the system achieves a fundamental safety transformation from "human-centric" to "technology-driven" approaches. The research proposes a dual closed-loop model for safety and efficiency in hazardous material loading, establishes a process optimization framework based on ESIA principles, develops a multidimensional rule-based dynamic allocation algorithm, and implements a digital twin-driven 3D monitoring strategy. Results demonstrate that the system reduces average single-vehicle operation time by 21% (from 70 minutes to 55 minutes), decreases safety inspection omission rates by 92% (from 12% to < 1%), completely eliminates overloading incidents, and improves data integrity to 99.6%. Beyond showcasing the system's significant achievements in safety and efficiency, this study focuses on addressing typical practical challenges, proposing solutions, and highlighting systemic innovations, thereby providing replicable templates and theoretical references for digital transformation in the hazardous materials industry.

Keywords

hazardous chemical logistics; intelligent loading; intrinsic safety; process reengineering; Internet of Things (IoT); digital twin

危化品智能化定量装车管理系统创新与实践

李波¹ 陈文² 李昌平¹ 徐华¹ 李云²

1. 中国船舶集团第七一六研究所, 中国·江苏 连云港 222000

2. 中国石油西南油气田公司, 中国·四川 成都 621000

摘要

本研究以某天然气处理厂危化品智能化定量装车管理系统为研究对象, 深入剖析了其在危化品充装领域的创新实践。系统通过物联网技术、流程再造与数字孪生技术的有机融合, 实现了从"人防"到"技防"的本质安全转型。本研究提出了危化品充装安全-效率双闭环模型, 构建了基于ESIA原则的流程优化框架, 开发了多维规则动态分配算法, 并实现了数字孪生驱动的三维监控策略。研究表明, 该系统将平均单车作业时间缩短21% (从70分钟降至55分钟), 安检漏检率降低92% (从12%降至<1%), 完全消除了超装事件, 数据完整率提升至99.6%。本研究不仅展示了系统在安全与效率上的显著成效, 更重点探讨了实践中的典型问题、解决路径与系统性创新, 为危化品行业数字化转型提供了可复制的模板与理论参考。

关键词

危化品物流; 智能装车; 本质安全; 流程再造; 物联网; 数字孪生

1 引言

危化品充装作为连接生产与消费的关键环节, 其作业过程具有高风险、高技术要求的特点。近年来, 国家层面出台《"十四五"危险化学品安全生产规划方案》, 明确提出通过数字化手段提升本质安全水平, 强化全链条风险防控。然而, 传统危化品充装模式仍存在效率低、误差大、安全隐患多等问题, 亟需智能化改造。物联网、AI 视觉、智能算

法等技术应用, 实现充装过程自动定位、定量控制及全流程可视化监管等技术赋能与标准化建设变得愈来愈迫切。

该天然气处理厂作为国内首座天然气全链条多工况深冷处理厂, 因其技术领先性被业内称为"深冷处理航母"。本研究基于该天然气处理厂在 LNG、乙烷、LPG、稳定轻烃等危化品充装项目中的创新实践, 构建了集数字化技术与标准化流程于一体的危化品充装安全管理体系。该系统通过流程标准化、操作自动化、监控实时化、数据闭环化, 显著提升了充装作业的安全性与效率, 降低了人为失误与合规风险, 为危化品物流与仓储领域的数字化转型提供了理论参考与实践范本。

【作者简介】李波 (1989-), 男, 中国江苏连云港人, 本科, 工程师, 从事危化品运输系统研究。

2 传统危化品充装管理模式的问题分析

2.1 充装流程问题

在实施管理创新前,传统危化品充装现场主要面临以下管理痛点:

* 装车计划与执行脱节:危化品充装计划与现场车辆排队缺乏有效联动,易导致车辆集中到达,现场秩序混乱,存在交通安全隐患。

* 危化品安检标准执行不一:危化品进场前与装车前安检项目繁多,依赖安检人员个人经验和责任心,存在检查项遗漏、标准执行打折扣的风险。

* 计划信息孤岛现象严重:车队、销售、门岗、安检、充装操作、地磅等各环节信息独立,依赖口头或纸质传递,效率低下且易出错,出现问题难以追溯。

* 充装过程人为干预环节过多:从车辆引导、橇位分配到充装过程的多个确认步骤,均需人工。

* 操作与判断,不仅效率低,更为“三违”(违章指挥、违章作业、违反劳动纪律)提供了土壤。

* 充装过程监管与追溯困难:危化品充装过程的关键数据(如检查结果、操作人员、时间节点)未能全面、自动地记录,不利于事中监管与事后分析。

2.2 管理模式缺陷

传统危化品充装站依赖制度与人的责任心,存在“管理疲劳”和“执行偏差”的固有风险。通过文献调研发现,国内危化品充装管理普遍存在以下问题:

* 安全管理体系不健全:多数危化品企业未建立完整的安全管理体系,责任分工不明确,导致管理工作不到位。

* 信息化管理滞后:由于资金投入不足,危化品充装环节的技防管理不到位,难以控制采购、存储、运输、使用和废弃物处置等各环节的安全隐患。

* 人员安全意识淡薄:从业人员流动性大,专业素质较低,安全培训效果不佳,导致操作不规范、防护措施不到位。

* 数据采集与处理不完善:充装过程数据采集不全面,处理不及时,无法实现充装过程的动态监控与风险预警。

2.3 行业发展趋势

近年来,随着数字化技术的发展,危化品充装管理正向着自动化、数字化、智能化方向发展。物联网、AI视觉、智能算法等技术应用,为实现充装过程自动定位、定量控制及全流程可视化监管提供了技术支撑。同时,国家政策也在推动危化品充装管理的标准化与规范化,如国务院安委会办公室《关于进一步加强危险化学品安全生产工作的指导意见》(安委办〔2008〕26号)和国家安全监管总局、工业和信息化部《关于危险化学品企业贯彻落实〈国务院关于进一步加强企业安全生产工作的通知〉的实施意见》(安监总管三〔2010〕186号)均要求。

3 系统设计与创新点

3.1 系统总体架构

本系统采用物联网四层架构模型,包括感知层、网络层、平台层和应用层:

* 感知层:气体传感器、高精度摄像头等设备,实现对车辆、人员、设备状态的实时感知。

* 平台层:基于云平台对采集的数据进行处理、存储和分析,构建危化品充装数字孪生模型,实现虚实映射与实时交互。

* 应用层:开发小程序预约排队、身份证签到、平板电脑标准化安检、装车系统智能分配、批控制器自动控制及一体化终端服务等应用,实现全流程、闭环式安全管理体系。

3.2 核心创新点

本研究提出的危化品充装安全-效率双闭环模型,通过技术感知→管理决策→执行反馈→优化迭代的闭环,实现了充装过程的安全与效率的双重提升。

3.2.1 基于 ESIA 原则的流程再造

本系统采用流程再造的 ESIA 原则(消除、简化、整合、自动化)对传统充装流程进行了全面优化:

* 消除非增值环节:通过多控制环节,消除人工核验环节;通过电子化勾选安检,消除纸质记录环节。

* 简化操作流程:将 13 项安全检查项整合为电子化勾选流程,简化操作步骤。

* 整合分散流程:将分散在各环节的信息整合为统一的数据平台,打破信息孤岛;将车辆引导、橇位分配、充装监控等环节整合为统一调度系统。

* 自动化执行:通过平板与批控器的双向验证机制,实现充装过程的自动化控制;通过数字孪生技术,实现充装过程的自动化监控与预警。

3.2.2 动态工艺参数包

针对低温介质与常温介质的充装特性差异问题,本系统开发了动态工艺参数包技术:

参数包设计:为不同介质(LNG、乙烷、LPG、稳定轻烃等)建立独立的充装工艺参数包,包括温度、压力、流速等关键参数。

参数包调用:系统根据车辆信息自动调用相应的参数包,实现差异化精细控制。

参数包优化:通过历史数据统计和专家经验,不断优化参数包,提高充装效率和安全性。

3.3 系统技术选型与模块化设计

3.3.1 技术栈选择

本系统采用 BS 架构设计,基于微服务模式开发,具体技术选型如下:

技术类别	技术选型	特点
后端框架	Spring Boot + Spring Cloud	高性能、模块化、易扩展
数据库	MySQL + Redis	关系型数据存储与实时缓存
实时通信	WebSocket + MQTT	低延迟、高可靠
数字孪生建模	Unity 3D + WebGL	高精度、可视化
前端框架	Vue.js + Android/iOS 原生开发	跨平台、响应式
边缘计算	Docker + Kubernetes	轻量化、容器化

3.3.2 系统模块划分

根据危化品充装业务流程，系统划分为以下核心模块：

* 用户权限菜单管理模块：标准化操作权限管理功能，多用户权限区分，有效实现操作流程审批流程化标准化，实现各操作的可追溯化。

* 预约排队模块：支持销售驻点人员提前导入当日充装计划，包含车辆信息、驾驶员 / 押运员资质、罐体检验报告、介质匹配要求等。司机通过小程序或现场终端完成自助排队。

* 身份核验模块：采用身份证读卡器进行人脸比对与身份核验，确保驾驶员与备案信息一致。支持二维码、NFC 等多种身份识别方式。

* 安检管理模块：检车区工作人员使用平板终端调取预审信息，逐项执行 13 项安全检查，包括车辆与罐体合法性、人员资质完整性、介质一致性确认等。

* 撬位分配模块：基于多维规则动态规划算法，综合考虑撬位空闲状态、车辆电池电量、历史充装效率等因素，实现全局最优调度。

* 过程监控模块：通过数字孪生技术，实时监控管线与罐体泄漏、槽车液位变化、实际充装量与预设值偏差等参数。

* 数据闭环模块：所有操作日志、检查记录、充装曲线、异常事件均存入数据库，支持后期审计与事故溯源。

3.3.3 数字孪生实现细节

本系统的数字孪生模型构建与实现包括以下关键步骤：

* 模型构建：基于 BIM 技术对充装设备进行三维建模，通过 STL 格式导入 Unity 3D 引擎，构建高精度数字孪生模型。

* 数据同步：采用 MQTT 协议实时传输传感器数据（如压力、温度、液位等），通过边缘计算网关进行数据预处理，确保数据精度与完整性。

* 双向交互：平板终端与批控器（PLC）之间通过 OPC UA 协议实现双向通信，确保操作指令与设备状态实时同步。

* 异常预警：通过滑动窗口算法分析压力曲线，当检测到异常趋势时，自动触发预警并联动批控器执行停机操作。

4 系统实施与运行效果

4.1 系统实施过程

本系统从 2024 年 10 月开始规划，2025 年 4 月正式上线运行，经历了以下几个阶段：

入场安检阶段：构建动态资质库，实现驾驶证、资格证等在线实时核验；引入 OCR 识别上传证件，自动比对有效期与真伪。

撬位分配与叫号阶段：基于多维规则的动态规划算法，实现撬位的智能分配；通过系统语音播报，实现车辆的智能引导。

装车前安全检查阶段：采用“氮气置换 + 压力测试 + 气体检测”三重验证机制，确保充装前的安全状态；通过平板与批控器的双向验证机制，实现充装前的安全确认。

自动充装与监控阶段：构建基于数字孪生的三维监控策略，实时监控充装过程的安全状态；通过“定质量 + 定液位”双控策略，实现充装量的精准控制。

数据闭环阶段：构建全流程日志留痕机制，实现充装过程的全面记录和追溯；通过数据挖掘技术，实现充装过程的持续优化。

4.2 运行效果分析

本系统上线后，与青岛港某多介质充装站 2024 年 Q3 运行数据进行了对比分析（样本量：日均 80 车次）

本研究通过该天然气处理厂充装站的实践表明，危化品充装智能化管理系统可显著提升充装效率和安全性。青岛港某多介质充装站 Q3 发生三起超充引发的泄露事故，而该天然气处理厂系统上线后未发生一起因操作不当引发的泄漏或火灾事故，员工安全意识显著提升，客户满意度提高 27%。

指标	青岛港传统模式	智慧系统	提升幅度	统计方法
平均单车作业时间	70 分钟	55 分钟	21%	独立样本 T 检验, P < 0.01
安检漏检率	12%	< 1%	92%	卡方检验, $\chi^2=21.5, P < 0.001$
超装事件数 (月)	3-5 起	0 起	100% 消除	卡方检验, $\chi^2=12.3, P < 0.01$
人工干预次数 / 日	25 次	< 5 次	80%	T 检验, P < 0.05
数据完整率	78%	99.6%	21.6%	卡方检验, $\chi^2=15.8, P < 0.01$
安全隐患响应时间	3-5 分钟	< 10 秒	-	观察法记录

4.3 系统评估方法

为确保系统的性能和安全性，本研究采用了以下评估方法：

4.3.1 性能测试

工具选择：使用 JMeter 模拟高并发装车请求（如每秒 10 次），NS-3 测试物联网层通信延迟（目标 < 200ms）。

测试场景：包括正常负载（日均 80 车次）、峰值负载（如 120 车次/日）和故障场景（断网恢复后数据同步）。

指标量化：吞吐量（如 95% 请求响应时间 < 5 秒）、系统稳定性（72 小时无崩溃）、数据一致性（装车量与地磅误差 < 0.1%）。

4.3.2 安全性验证

协议合规性：通过 Wireshark 抓包验证 MQTT QoS 2 的完整性，OPC UA 的 TLS 加密证书链有效性。

漏洞检测：使用 Nessus 扫描系统 API 漏洞（如 REST 接口未授权访问），Burp Suite 验证 SQL 注入防护。

物理层测试：电磁干扰测试（如特斯拉线圈攻击下系统仍能触发静电接地报警）。

数据保护策略：使用 Golden Safe 实现主服务器数据实时备份到备用服务器，防止主服务器宕机或者故障。

4.4 开发方法论与质量控制

本系统采用 S-Scrum（安全增强型敏捷开发）方法论，结合 STPA（系统理论过程分析）安全分析技术，确保系统开发过程中的安全性与效率。

4.4.1 开发方法论

* Sprint 1：基于 STPA 定义高风险操作（如橇位分配、超装监控），生成安全需求文档。

* Sprint 2-3：开发核心模块时，通过形式化验证（如 BDD）确保安全约束满足。

* Sprint N：最终系统通过 STPA 验证安全控制结构，确保符合 GB 30871-2022 等安全标准。

4.4.2 质量控制措施

* 技术验证：单元测试（JUnit）、集成测试（Spring Boot Test）、硬件在环测试（HIL）验证批控器与数字孪生模型的联动。

* 安全合规测试：通过 OPC UA 协议测试与 DCS/SCADA 的通信可靠性，MQTT QoS 2 确保数据完整性，符合 GB 30871-2022 的连锁功能测试。

* 数据校准流程：传感器数据定期校准（如每月一次气体探测器零点校准），阈值参数通过专家评审确定。

5 系统创新与理论贡献

5.1 技术创新

本系统在技术层面的创新主要体现在三个方面：

* 物联网技术应用：采用四层架构模型（感知层、网络层、平台层、应用层），实现危化品充装过程的全面感知和

实时监控。

* 数字孪生技术应用：构建充装设备的数字孪生模型，实现物理世界与虚拟世界的实时交互，支持风险预测与干预。

* 三维监控策略：开发“定质量+定液位+压力曲线分析”的三维监控策略，实现充装过程的精准控制和风险预警。

5.2 管理创新

本系统在管理层面的创新主要体现在四个方面：

* 标准化作业：将复杂操作分解为标准化步骤，减少人为判断误差，提高操作规范性。

* 硬性连锁：关键步骤未完成则无法进入下一环节，杜绝跳步操作，提高操作安全性。

* 实时监控：泄漏、静电、超压等风险实时感知，自动响应，提高风险防控能力。

* 责任可溯：每一操作留痕，明确责任人，增强履职意识，提高管理透明度。

5.3 理论创新

本系统在理论层面的创新主要体现在三个方面：

* 危化品充装安全-效率双闭环模型：提出技术感知→管理决策→执行反馈→优化迭代的闭环模型，实现安全与效率的双重提升。

* ESIA 原则在流程再造中的应用：将 ESIA 原则（消除、简化、整合、自动化）应用于危化品充装流程再造，实现流程的标准化和自动化。

* 数字孪生在工业安全中的应用：将数字孪生技术应用与危化品充装安全监控，实现虚实映射与实时交互，提高风险防控能力。

6 讨论与展望

6.1 安全性提升机制

本系统通过以下方式实现本质安全：

* 标准化作业：将复杂操作分解为标准化步骤，减少人为判断误差，提高操作规范性。

* 硬性连锁：关键步骤未完成则无法进入下一环节，杜绝跳步操作，提高操作安全性。

* 实时监控：泄漏、静电、超压等风险实时感知，自动响应，提高风险防控能力。

* 责任可溯：每一操作留痕，明确责任人，增强履职意识，提高管理透明度。

* 数据驱动：通过数据分析和挖掘，实现充装过程的持续优化，提高系统智能化水平。

6.2 效率优化路径

本系统通过以下方式实现效率优化：

* 减少等待时间：智能排队与自动叫号减少无效滞留，提高车辆周转率。

* 减少重复录入：信息一次录入，多端共享，提高信息

处理效率。

* 减少人工核对：自动比对证件、重量、介质等信息，提高核验效率。

* 并行处理能力：多充装位独立运行，系统统一调度，提高整体充装效率。

* 资源优化配置：基于多维规则的动态规划算法，实现撬位的智能分配，提高资源利用率。

6.3 存在挑战与改进建议

尽管本系统取得了显著成效，但仍存在以下挑战与改进建议：

* 系统稳定性依赖网络：断网可能导致流程中断，建议升级网络基础设施，并引入边缘计算网关，将车牌识别、道闸控制等核心功能在本地处理，降低对中心服务器的实时依赖。

* 人员适应期：老员工对新系统接受度低，需加强培训与激励，提高员工的安全意识和操作技能。

* 接口兼容性：不同厂商设备协议不统一，建议采用 OPC UA 标准，提高系统兼容性和扩展性。

* 算法优化：多维规则算法的权重参数需进一步优化，提高算法的准确性和效率。

* 标准化推广：建立在目前稳定运行的基础上，可进行系统更加智能化、自动化方向的升级软件以及硬件，争取成为同行业模板化智慧充装系统标杆。

6.4 未来研究方向

本研究的未来研究方向主要包括：

* 系统智能化升级：引入 AI 视觉技术，实现充装过程的智能监控和预警，提高系统智能化水平。

* 标准化推广：将本系统的技术和管理创新推广到其他危化品充装站，形成行业标准和规范。

* 数据挖掘应用：深入挖掘充装过程数据，发现潜在风险和优化点，实现系统的持续优化和改进。

* 跨区域协同：构建跨区域危化品充装协同平台，实现

资源共享和信息互通，提高整体管理水平。

* 安全文化培育：通过系统应用，培育员工的安全文化意识，提高全员安全素质和操作技能。

7 结语

本研究基于某天然气处理厂危化品智能化定量装车管理系统的创新实践，构建了一套完整的危化品充装安全管理体系。该系统通过流程标准化、操作自动化、监控实时化、数据闭环化，实现了危化品充装作业从“经验驱动”向“数据驱动”、“人工管控”向“智能联控”的转变。系统不仅在安全与效率上取得了显著成效，更在理论层面提出了危化品充装安全-效率双闭环模型，为危化品行业数字化转型提供了理论参考和实践范本。

本研究的创新点主要体现在技术、管理和理论三个方面：技术层面提出了物联网四层架构模型、数字孪生技术应用和三维监控策略；管理层面提出了标准化作业、硬性联锁、实时监控和责任可溯；理论层面提出了危化品充装安全-效率双闭环模型、ESIA 原则在流程再造中的应用和数字孪生在工业安全中的应用。

本研究的成果可为其他危化品充装站提供借鉴和参考，推动危化品行业向智能化、数字化方向发展，提高整体安全管理水平和效率。未来研究可进一步探索系统智能化升级、标准化推广、数据挖掘应用、跨区域协同和安全文化培育等方面，为危化品行业数字化转型提供更加全面的理论支持和实践指导。

参考文献

- [1] 陈磊,刘萍.江苏LNG智能化装车管理系统建设研究[J].天然气技术与经济,2017,10:61-63.
- [2] 陆名伟.智能装车系统建设与应用[J].物流技术与应用,2023,08:112.
- [3] 付净,张江石,聂方超.危化品事故根本原因判定标准的构建及实证研究[J].安全与环境学报,2019,19(1):18-24.