

# 基于物联网的工业气体智能充装与监控系统设计与应用

张 龚

新昌县新工气体有限公司 浙江 绍兴 312500

**【摘要】**：工业气体是现代工业的“血液”，其充装环节的安全、效率、精准度影响生产制造全链条稳定运行。传统充装模式人工干预多、数据孤岛严重、安全预警滞后，难适配智能制造要求。本文以物联网技术为核心，结合工业气体充装特性与规范，提出“感知层全覆盖、网络层高可靠、平台层强协同、应用层高适配”的系统设计架构。融合无线传感等技术，构建涵盖气瓶全生命周期追踪等功能的智能系统。阐述系统在感知节点部署等方面设计要点，结合典型场景验证实用性。研究表明，该系统可将充装误差控制在±0.5%以内，安全隐患识别响应时间缩至秒级，提升充装效率20%以上，为行业数字化转型与安全升级提供支撑与路径。

**【关键词】**：物联网；工业气体；智能充装；安全监控；全生命周期管理

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.075

## 1 引言

工业气体作为关键产业原料，其充装作业的安全与效率至关重要。当前依赖人工操作的传统模式面临充装精度难控、气瓶追溯困难、安全响应滞后等严峻挑战。同时，日益严格的国家法规与行业对精准高效的需求，都呼唤着技术革新。物联网技术凭借其实时数据采集、传输与分析能力，为构建智能化解决方案提供了关键路径。

在技术层面，现有研究主要围绕自动化充装设备、独立安全监测和初步信息管理展开，但普遍存在系统孤立、缺乏智能联动等不足。尽管物联网与工业的融合已成趋势，但现有系统在感知层环境适应性、网络层可靠性与应用层智能深度方面仍有明显欠缺。因此，本文旨在针对这些不足，设计一套架构完善、智能可靠的物联网智能充装与监控系统。

## 2 工业气体充装的工艺特性与核心需求

本章剖析工业气体充装作业规律，明确智能充装与监控系统核心功能要求，为系统设计提供依据。

### 2.1 充装工艺的内在特性与约束

工业气体充装工艺复杂，其特性是系统设计前提。工艺多样，永久性气体高压充装，对设备承压与密封性要求高；液化气体低压充装，需精确控温与控液位，系统要有灵活的工艺参数配置能力。作业模式有双重性，要满足连续、大批量流水线式充装和间歇性、小批量灵活充装。安全管控极端重要，多数气体危险，系统需遵循最高安全标准，实现全方位覆盖。气瓶动态流转复杂，传统管理易致信息断层，智能系统要解决其状态实时、精准追溯难题。

### 2.2 智能系统的核心功能需求

基于上述特性，智能充装与监控系统需满足多层次功能需求。基础层要精准充装与本质安全，集成高精度传感器与执行机构，精确控制充装量，建立实时安全监测网络，具备风险预警与自动应急切断能力。核心层要实现气瓶全生命周期可追

溯，为气瓶赋予唯一电子身份，构建数字化档案，记录与追溯全过程信息，杜绝“黑户瓶”和超期服役。协同层要高效运营与系统集成，打通数据孤岛，实现作业计划自动下发、状态实时反馈与异常协同处置，具备与企业现有系统对接能力，推动作业联动优化。智能层要提供数据驱动的决策支持，积累运行数据，具备数据分析与挖掘能力，如预测需求、故障，优化充装策略等。

## 3 基于物联网的系统总体设计

本章旨在构建一个以物联网为技术骨架、深度融合工业气体充装工艺的智能化系统总体方案。设计以“安全为核心、效率为目标、智能为支撑”为核心理念，通过分层架构实现从物理感知到智能决策的全链条闭环管控。

### 3.1 系统设计理念与总体架构

系统设计遵循安全、可靠、灵活、易用、经济五项核心原则，确保所有现场设备满足防爆安全标准，数据传输加密，关键环节冗余，并适应恶劣工业环境长期稳定运行。采用模块化设计以支持灵活配置与未来扩展。

基于此，系统构建了经典的“感知-传输-平台-应用”四层物联网架构：

感知层作为“神经末梢”，通过部署各类防爆传感器与识别装置，实时采集充装参数、安全状态、气瓶身份及设备工况等全方位数据。

网络层作为“信息动脉”，采用混合网络策略：利用低功耗广域网传输传感数据，工业以太网或5G传输大带宽视频，4G/5G专网保障关键指令。同时具备边缘计算能力，实现本地数据处理与实时分析。

平台层作为“智慧大脑”，采用云边协同模式。边缘侧处理实时预警与紧急控制，云端负责数据存储、深度分析与全局优化，集成了存储、处理、分析与服务接口等核心模块。

应用层作为“交互界面”，面向操作员、管理员、决策者等不同角色，通过工业屏、电脑、移动 APP 等多终端提供个性化功能模块。

### 3.2 核心功能规划

基于总体架构，系统规划并集成以下核心智能化功能模块：

**智能充装控制：**实现气瓶自动识别、资质核验与充装过程全自动精准控制，支持多设备协同与批量任务调度。

**安全风险监控与预警：**构建多维度主动安全防线，实时监测关键参数并实现秒级报警与应急联动，结合视频 AI 识别人员违规行为。

**气瓶全生命周期管理：**利用 RFID 等技术为气瓶建立唯一数字身份，实现从入库、充装、检验到报废的全流程数字化追踪与调度优化。

**设备运维与生产调度管理：**实现关键设备的状态监测与预测性维护，并集成订单、库存与设备信息，自动优化充装与发货计划。

**数据分析与决策支持：**对系统积累的多维数据进行深度分析，挖掘需求规律、优化工艺参数、评估设备绩效，为管理决策提供科学依据。

该设计通过分层解耦的架构与模块化功能，旨在构建一个安全可靠、高效协同、智能决策的工业气体充装管理新范式。

## 4 系统关键技术设计与实现

本章聚焦于智能充装与监控系统核心技术的分层实现，涵盖从现场数据采集到上层智能应用的全链路，旨在构建一个可靠、高效且可扩展的技术支撑体系。

### 4.1 感知层：多源数据智能采集

感知层部署于充装现场，负责全面、精准地获取物理世界信息。其设计围绕四大核心采集任务展开：

**工艺与安全参数采集：**在管路与关键点位部署防爆型传感器，针对不同气体特性选用催化燃烧、红外或电化学传感器监测泄漏；采用高精度压力与温度传感器实时跟踪充装动态。

**气瓶身份智能识别：**为每只气瓶绑定超高频 RFID 标签作为唯一数字身份，在出入库及充装工位设置读写器实现自动追踪。对于特殊气瓶，辅以机器视觉与 OCR 技术进行识别，确保全覆盖。

**关键设备状态监测：**在泵、阀等设备上安装振动与电流传感器，并结合设备 PLC 接口，同步采集机械振动、电气参数及运行状态数据，支撑预测性维护。

**环境与人员行为感知：**通过环境传感器监测温湿度，并利用搭载 AI 分析算法的防爆摄像头，自动识别人员未佩戴防护

装备、违规闯入等风险行为。

所有原始数据在边缘侧进行预处理，采用卡尔曼滤波降噪、阈值法剔除异常值，并通过多传感器数据融合技术提升关键测量参数的精度与可靠性，为上层系统提供高质量数据输入。

### 4.2 网络层：异构数据可靠传输

网络层采用“云-边-端”协同与混合网络架构，确保海量异构数据的实时、可靠、安全传输。

**差异化网络传输：**针对低数据量、广分布的传感数据，采用 LoRa/NB-IoT 等低功耗广域网技术；对实时控制指令与关键报警，采用有线工业以太网保障毫秒级延迟；对高清视频流，则采用 5G 或工业 Wi-Fi 满足大带宽需求。数据传输协议根据业务特性优化选择，如 MQTT 用于传感数据，RTSP 用于视频流，HTTPS 用于管理交互，并集成工业防火墙、VPN 等保障网络安全。

**边缘智能与协同：**在充装站现场部署边缘计算节点，处理实时性要求极高的本地控制与安全联动，实现快速闭环响应，同时进行数据缓存与轻量分析，有效减轻云端负荷与网络依赖。

### 4.3 平台层：数据中枢与智能引擎

平台层是系统“智慧大脑”，采用微服务架构，提供数据处理、存储、分析与服务集成核心能力。

**混合数据存储：**针对不同类型数据采用最优存储方案，用时序数据库处理传感器时序数据，关系型数据库管理业务数据，非关系型数据库存储非结构化数据。

**智能分析核心：**内置多种算法模型挖掘数据价值，融合多源数据实现安全风险评估与预警，用机器学习分析设备数据实现故障预测与维护，应用大数据技术优化生产与充装策略。

**开放服务集成：**通过标准化接口，实现与现场设备、企业系统及第三方应用的集成。

### 4.4 应用层：场景化功能服务

应用层面向不同用户，通过多终端提供场景化功能模块，包括：

**智能充装控制台：**为操作员提供“一站式”作业界面。

**全局安全监控中心：**动态展示全站安全态势，实现预警与指挥。

**气瓶全生命周期管理门户：**为管理员提供全流程数字化管理工具。

**设备运维与生产调度工作台：**支持维护人员设备管理，辅助调度人员订单管理与排产。

**数据决策分析驾驶舱：**为管理者提供数据可视化与分析功

能，辅助决策。

## 5 系统应用实践与效果分析

为验证系统的实用价值，项目在某大型工业气体充装企业进行了全面部署与试点应用。本章将概述应用概况，量化分析关键效果，并总结实施经验。

### 5.1 应用部署与实施概况

试点企业拥有 10 条充装生产线，年处理气瓶超 50 万只。部署前，企业面临充装精度波动、安全监控滞后、气瓶管理混乱等典型问题。系统部署覆盖其全部生产线及关键区域，集成了超过 200 台防爆传感与识别设备，实现了充装全流程数据采集。系统成功与企业现有 ERP、MES 系统对接，形成了从订单到交付的数据闭环。

### 5.2 关键绩效与效果量化分析

系统应用产生多维度、可量化显著效益：

**效率与精度提升：**自动化控制使常规气体充装误差稳定在  $\pm 0.3\%$  以内，特种气体达  $\pm 0.1\%$ ，优于行业标准。单线作业效率提升 25%，整体产能提升 20%，缩短订单交付周期。

**安全风险根本性改善：**系统实现风险实时监测与秒级响应。应用中成功预警处置 30 余起潜在安全隐患，纠正 15 起人员违规行为，安全事故发生率降至零。应急联动测试全流程响应时间小于 3 秒。

**资产与运维管理优化：**依托 RFID 技术精准管理 3 万余只气瓶全生命周期，检验提醒准确率 100%，杜绝超期瓶充装，气瓶周转率提升 15%。设备预测性维护使故障停机时间减少 40%，运维成本降低 25%。

**数据驱动决策：**数据分析模块使气体需求预测准确率达 85%，优化库存，减少 30% 积压。管理层借助多维数据报表科学决策，推动从经验管理向数据驱动转型。

### 5.3 实施经验总结

本次成功应用积累关键经验：

**深度融合业务：**系统设计要理解工艺痛点，让技术方案与业务流程契合，通过用户沟通优化体验。

**渐进式部署：**采用“先试点后推广”策略，先在部分生产线验证完善系统再全面铺开，控制项目风险。

**重视人员赋能：**对操作及维护人员系统化培训是发挥系统效能关键。

**构建可持续运维体系：**企业需建专职运维团队，寻求长期技术支持保障系统稳定运行。

**筑牢安全屏障：**制定严格数据管理制度，用技术与管理手段确保运营数据与隐私安全。

综上，该系统应用验证技术可行性与经济性，为工业气体充装行业智能化升级提供可复制路径与宝贵经验。

## 6 结论与展望

### 6.1 研究结论

本研究针对工业气体充装行业安全与效率痛点，设计并实现基于物联网的智能充装与监控系统。经理论构建与工程实践，得出核心结论：“感知-传输-平台-应用”四层系统架构形成闭环管控体系，提供解决行业难题的技术路径。防爆传感、多模网络与云边协同、数据平台及应用设计确保系统核心功能实用稳定。

试点企业应用中，系统效益显著：充装误差控制在  $\pm 0.5\%$  以内，作业效率提升 20% 以上，安全事故发生率降至零，气瓶与设备管理效率大幅优化。“安全为核心、智能为支撑”的设计理念及分阶段实施策略，为行业智能化转型提供可推广经验。

### 6.2 未来研究方向展望

未来研究可从以下方向拓展：

**技术深化：**引入数字孪生技术构建虚拟充装站，实现工艺仿真与预测性维护；融合 AI 技术，发展精准故障预测与工艺自优化模型。

**系统扩展：**利用区块链等技术构建跨企业供应链协同平台，实现数据可信共享与资源优化；集成新能源设施，推动充装站绿色低碳转型。

**应用拓展：**开发多语言、多标准的国际化系统版本，适应全球市场需求；参与行业标准制定，奠定产业互联互通基础。

## 参考文献：

- [1] 伊宁,王传良,朱军伟,等.新型气体自动充装系统[J].化工机械,2021,48(2):306-308.
- [2] 林百志.现场制氟纯化及氟氮混合气体充装技术的研究[J].信息记录材料.2022,23(7).
- [3] 秦思嘉,孙德华,郑庆涛,等.固定式气体检测报警器在线计量安全隐患分析[J].低温与特气,2025,43(4):48-50.
- [4] 陈伟,夏锦亚,徐帆,等.基于物联网技术的气体智能检测装置远程监控与管理[J].中国新通信,2025,27(6):17-19.