 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i2.9320

Design and Application of 5G Intelligent Gateway in Digital Construction of Metro Base Pump

Fei Fu

Shanghai Metro Electronic Technology Co., Ltd., Shanhai, 200233, China

Abstract

To address industry challenges including low operational efficiency, delayed fault alerts, and complex wiring in subway station pump systems, this study explores the design and application of 5G smart gateways for digital infrastructure transformation in metro facilities. Leveraging 5G communication technology and IoT architecture, the research establishes a "cloud-pipe-edge-device" four-tier digital operation framework. Key innovations include integrated smart monitoring, real-time data transmission, and optimized fault prediction protocols for pump control boxes. The solution enables remote visual management of pump status through intelligent detection and predictive maintenance. Field implementation demonstrates enhanced operational reliability, reduced maintenance costs, and minimized downtime risks, providing a replicable technical pathway for digital upgrades in rail transit electromechanical systems.

Keywords

5G smart gateway; Subway base pump; Digital operation and maintenance; Internet of Things (IoT); Fault early warning

5G 智能网关在地铁基地水泵数字化建设的设计与应用

傅斐

上海地铁电子科技有限公司，中国·上海 200233

摘　要

为破解地铁基地水泵运维效率低、故障预警滞后、布线难度大等行业痛点，助力轨道交通基础设施数字化转型，本文基于5G通信技术与物联网架构，开展5G智能网关在地铁基地水泵数字化建设中的设计与应用研究。论文首先分析了地铁基地水泵运维现状及数字化建设的必要性，随后构建了“云-管-边-端”四层数字化运维架构，重点阐述了5G智能网关与水泵控制箱的联动设计、核心模块选型及数据交互协议优化方案，通过集成智能检测、实时数据传输、故障预判预警等功能，实现水泵设备运行状态的远程可视化管理。实践应用表明，该方案可有效提升地铁基地水泵设备运行可靠性与可维护性，降低人力运维成本及故障停运风险，为轨道交通领域机电设备数字化升级提供了可复制、可推广的技术路径。

关键词

5G智能网关；地铁基地水泵；数字化运维；物联网；故障预警

1 引言

随着上海地铁全路网 5G 网络全覆盖落地及数字化转型战略的深入推进，轨道交通设施设备运维正从传统“被动维修”模式向“主动预防、数据驱动”的智能化模式转型。地铁基地水泵作为保障线路排水安全、防范内涝风险的核心机电设备，其运行稳定性直接关系到地铁行车安全与运营秩序。当前，地铁基地水泵多分布于户外轨行区边缘、出入场线附近等区域，存在安装分散、作业环境复杂、布线施工难度大等问题，传统人工定期巡检模式已难以满足精细化运维需求。基于此，本文依托 5G 低时延、高带宽、广连接的技术优势，结合智能网关与物联网技术，构建地铁基地水泵数字化运维体系，为水泵设备全生命周期管理提供技术支撑。

【作者简介】傅斐（1986—），男，中国上海人，硕士，助理工程师，从事城市轨道交通相关研究。

2 地铁基地水泵数字化建设的背景与意义

2.1 地铁基地水泵运维现状及痛点

当前国内地铁基地水泵运维普遍采用“人工定期巡检＋工器具辅助测试”的传统模式，该模式存在三大核心痛点：

一是故障诊断时效性不足，人工巡检周期固定，无法实时捕捉设备突发故障或潜在隐患，易因故障处置不及时引发积水倒灌、设备损坏等连锁问题。

二是运维效率偏低，水泵控制箱安装位置分散且部分区域可达性差，人工巡检耗时耗力，加之专业运维人员缺口较大，难以实现全时段、全覆盖监测。

三是布线施工受限，户外轨行区边缘区域敷设有线网络工程量巨大、成本高昂，且易受轨道施工、环境侵蚀影响，网络稳定性难以保障，制约了数字化运维转型进程。这些痛

点不仅增加了运维管理成本，更对地铁运营安全构成潜在威胁，亟需通过技术创新寻求突破。

2.2 水泵数字化建设的核心价值

地铁基地水泵数字化建设以 5G 智能网关为核心枢纽，融合物联网、大数据分析等技术，构建全流程智能化运维体系，其核心价值体现在三个方面：

一是提升运维精准度，通过实时采集水泵运行参数，结合算法模型实现故障预判预警，将运维模式从“事后维修”转变为“预防性维护”。

二是降低综合成本，远程可视化管理减少人工巡检频次，预计可降低 60% 以上现场运维工作量，同时延长设备使用寿命，减少非计划停机损失。

三是赋能全路网协同，通过云平台整合各基地水泵运行数据，实现跨区域运维资源调度与数据共享，为地铁运维数字化决策提供数据支撑，契合轨道交通行业智能化发展趋势。

3 5G 智能网关在水泵数字化建设中的设计方案

3.1 整体架构设计（云 – 管 – 边 – 端）

本次水泵数字化建设采用“云 - 管 - 边 - 端”四层架构设计，实现从设备终端到管理平台的全链路数据贯通。

云层：搭建水泵数字化运维云平台，实现数据存储、分析、可视化展示、故障告警、远程控制等功能，形成“采集 - 传输 - 分析 - 决策 - 执行”的闭环运维体系。

管理网：依托上海地铁全路网 5G 专网，结合生产管理网，构建低时延、高可靠的数据传输通道，支持海量终端并发接入。

边缘层：以 5G 智能网关为核心，承担数据预处理、本地计算、协议转换及边缘决策功能，可在网络中断时实现本地独立控制，保障设备基础运行。

终端层：部署于水泵控制箱内，包括传感器、执行器及状态监测模块，负责采集水泵运行原始数据及控制信号。

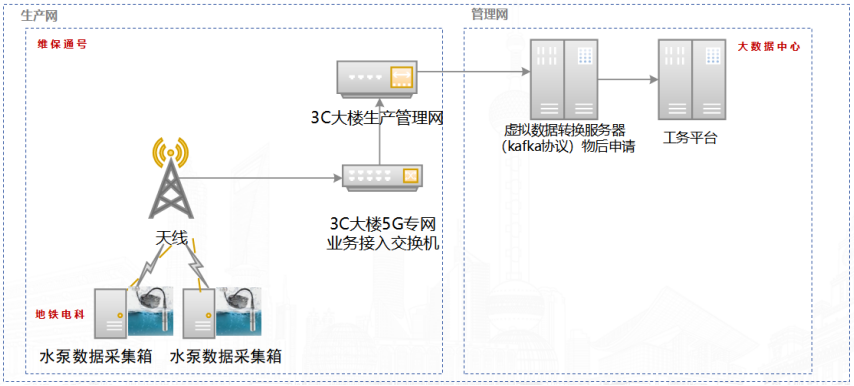


图 1

3.2 5G 智能网关核心模块设计

5G 智能网关作为架构核心枢纽，采用模块化设计，适配地铁复杂运维场景需求，核心模块包括：

一是 5G 通信模块，选用工业级 5G 模组，兼容地铁专网频段，保障数据传输低时延、高可靠）。

二是数据采集与协议转换模块，支持 Modbus TCP、RS485 等多种工业协议，可直接与水泵控制箱 PLC 对接，实现运行参数、故障代码等数据的标准化采集，同时支持协议自定义扩展，适配不同品牌水泵设备。

三是边缘计算模块，搭载轻量化处理器，集成故障预判算法，可对采集数据进行实时分析，识别异常波动并触发本地告警，减少云端数据传输压力。

四是电源模块，采用宽电压输入（DC 12-24V）设计，配备不间断电源，保障网关在突发断电情况下持续工作 ≥2 小时，提升设备稳定性。

3.3 关键技术实现要点

数据交互优化：采用“边缘预处理 + 云端深度分析”模式，网关内置处理器，搭载轻量级边缘计算框架，对采集数据进行异常值剔除及归一化处理，仅上传有效数据及异常事件，将 5G 网络带宽占用率降低 60% 以上；通过自定义心跳包协议实现网关与云端平台的实时联动，网络中断后重启可自动重连，重连时间 ≤3 秒，确保数据传输连续性。

故障预警算法设计：基于水泵历史运行数据与故障案例，构建多参数融合预警模型，同时嵌入自适应阈值调整算法，可根据不同季节、工况动态优化预警阈值，适配地铁基地水泵启停频繁、负载波动大的运行特点。

安全防护设计：网关支持状态检测、访问控制列表（ACL）功能，对传输数据采用 AES-256 加密处理；接入地铁生产管理网安全防护体系，采用“身份认证 + 权限分级管控”机制，仅授权运维人员可访问设备控制权限，同时具备操作日志审计功能，所有远程控制指令留存时间 ≥6 个月，全面保障运维数据与设备运行安全。

协议适配技术：针对地铁基地不同品牌水泵 PLC 通信协议差异问题，设计通用协议转换中间件，通过 Modbus TCP/RTU 等多协议兼容接口，实现不同设备数据的标准化采集；中间件支持协议自定义扩展，可通过配置文件新增协

议类型，适配后续设备更新迭代需求。

4 5G 智能网关在水泵数字化建设中的应用实践

4.1 应用场景搭建与设备部署

本次应用实践选取上海地铁 4 座车辆基地（三林基地、江杨北路基地、陈太路基地、北翟路基地）作为试点，覆盖各类排水泵设备 22 台，包括雨水泵、污水泵等。设备部署遵循“最小改动、快速适配”原则，在水泵控制箱内加装工业级 5G 智能网关及配套传感器，具体配置如下：振动传感器选用压电式加速度传感器，液位传感器选用投入式。网关通过 Modbus TCP 协议与水泵 PLC 建立通信，液位高度、运行电流等核心参数，采样频率设为 1Hz；网关接入上海地铁 5G 专网，数据上传至专属水泵数字化运维云平台，采用 MySQL 集群存储数据，通过 OPC 接口实现故障告警信息跨系统推送。部署过程中，针对户外环境特点，对网关及传感器进行防水、防尘、抗电磁干扰处理，防护等级达到 IP67，外壳采用不锈钢材质，具备抗振动（≤5g），适配地铁复杂作业环境；同时在网关安装位置加装防雷模块（防雷等级：C 级），避免雷雨天气对设备造成损坏。

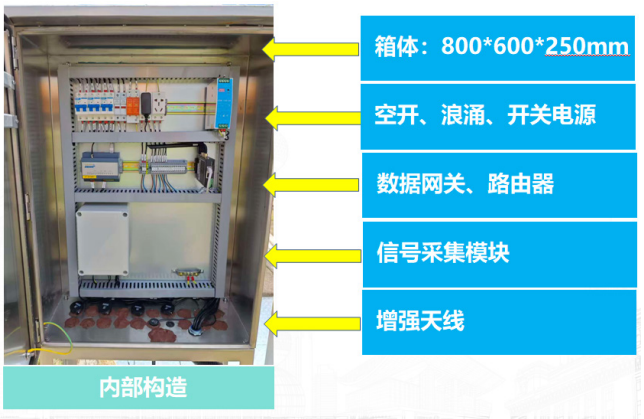


图 2

4.2 功能验证与效果分析

经过 9 个月的试运行，对 5G 智能网关及数字化体系功能与应用效果进行全面验证，核心指标如下：

实时监测能力：实现水泵运行参数秒级采集、毫秒级传输，数据准确率 ≥99.8%，云平台可视化界面可实时展示单台设备及多基地集群运行状态，支持历史数据回溯查询（存储周期 ≥1 年）。

故障预警效果：成功预判水泵故障等各类隐患 13 起，平均预警时间较人工巡检提前 2-8 小时，故障处置效率提升 60%，试点期间未发生因水泵故障引发的运营影响事件。

运维成本优化：人工巡检频次降低，单基地水泵运维人力成本，设备平均无故障运行时间（MTBF）提升 40%，维修成本降低 35%。

上述结果表明，该方案完全满足地铁基地水泵数字化运维需求，具备大规模推广价值。

5 结语

本文设计的基于 5G 智能网关的地铁基地水泵数字化方案，通过“云 - 管 - 边 - 端”架构搭建与核心技术创新，有效解决了传统水泵运维的诸多痛点，实现了设备运行状态的实时监测、故障精准预警与远程智能化管理。实践证明，该方案在提升运维效率、降低综合成本、保障运营安全等方面效果显著，为轨道交通机电设备数字化转型提供了切实可行的技术方案。

未来展望可从三方面推进：

一是扩大应用范围，将方案推广至上海地铁全路网车辆基地及车站水泵系统，实现规模化应用，同时结合边缘节点部署优化，构建“区域边缘节点 + 中心云平台”的分布式架构，降低跨区域数据传输时延。

二是深化技术融合，引入 AI 算法与数字孪生技术，基于 Unity3D 构建水泵设备虚拟仿真模型，通过实时数据映射实现设备运行状态的可视化仿真与故障模拟推演；集成强化学习算法，实现水泵运维策略的自主优化，进一步提升运维决策智能化水平。

三是拓展应用场景，将 5G 智能网关技术复用至站台门、通风空调、电梯等其他机电设备，基于统一的数据标准与通信协议，构建全品类轨道交通设施设备数字化运维体系；同步研发移动端运维 APP，支持运维人员现场巡检、故障上报、远程调试等功能，实现“云端 + 现场”协同运维，助力地铁运营向更高效、更安全、更智能的方向发展。

此外，可联合高校、科研院所开展技术攻关，重点突破低功耗传感、边缘 AI 推理加速等关键技术，进一步降低设备运维成本与能耗。

参考文献

[1] 王同军. 高速铁路弓网检测监测体系研究[J]. 中国铁路, 2021(03):1-7.

[2] 李良巧. 可靠性工程师手册[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2012.

[3] 张宏科, 苏伟. 5G技术在轨道交通智能化运维中的应用[J]. 铁道学报, 2022, 44(05):1-8.

[4] 陈馈, 李建斌. 地铁机电设备物联网运维技术实践[J]. 都市快轨交通, 2021, 34(04):102-107.

[5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50157-2013 地铁设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

[6] 刘军. 工业物联网网关技术及应用研究[J]. 自动化技术与应用, 2020, 39(07):145-148.