

无人值守泵站技术研究与应用

文 / 谢树欣 广州市穗云自来水有限公司

摘要：本文聚焦我国村镇供水系统存在的供需矛盾加剧、传统运营模式滞后等核心问题，阐述网络冗余架构与智能控制系统等创新技术在系统改造中的应用。泵站改造项目实践表明，该方案能有效提升供水稳定性、显著降低人工成本并优化综合能效，为新型城镇化背景下的农村智慧水务建设提供了可推广的技术路径。

关键词：网络冗余；自动控制；无人值守；远程监控

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.20.074

引言

在新型城镇化与乡村振兴驱动下，我国村镇用水量年均增长 6.8%，但农村供水系统面临管网漏损率高、老旧泵站故障停水率超 12% 的挑战。传统人工值守模式成本高、故障处置响应慢、能效低，严重制约供水安全与公共服务均等化。针对村镇供水规模小、用户分散且与城市差异显著的特点，本文基于项目实践，提出融合 5G 通信、工业物联网与智能决策的无人值守泵站系统方案，实现自动恒压供水，旨在显著降低人工成本，提升运行效率与安全水平，并通过工程案例验证其技术有效性。

一、技术背景与挑战

（一）供需矛盾升级驱动技术变革

当前村镇供水系统正面临量、质、压三维需求的复合挑战，2015—2022 年居民日均用水量以 5.7% 的年复合增长率持续攀升，叠加工业场景扩展带来的 0.3—1.2MPa 差异化压力需求，传统供水系统已陷入量不足、质不稳、压不稳的三重困境，既要匹配总量增长的刚性需求，又要应对多场景、精细化的压力调节要求，系统调节能力亟待突破。针对这一矛盾，本研究创新性构建了智能控制系统：通过实时采集泵站运行数据（如管网压力、泵组状态、用水流量等），依托自适应算法对泵组启停组合、出口压力参数进行智能优化，实现水压精准调控（避免传统固定参数导致的高压浪费或低压缺水问题），并通过实时能耗数据分析，动态调整运行策略，降低泵站电耗。该技术推动供水系统从传统单一量能供给向智慧化服务模式转型，为城乡供水一体化提供了关键技术支撑。

（二）村镇供水的特殊技术诉求

村镇供水系统相较城市呈现三重特殊性：一是网络拓扑结构复杂，呈现多泵站、长距离管网和分散用户端的树状分布；二是传统泵站运维能力薄弱，专业技术人员数量少，设备巡检周期长；三是电能质量较差，农村电网波动大、供电稳定性不足，直接影响泵组运行安全与能效。这些特殊性导致城市集中式供水技术难以适配，倒逼村镇供水系统向分布式智能控制、自诊断方向发展，以形成低依赖、高弹性的技术体系，支撑乡村振兴中的供水稳定。

（三）传统泵站的技术困局

某省水利厅 2021 年评估数据揭示，传统泵站在运行管理中存在三大结构性短板，严重制约安全与经济效能，其一，人工依赖较为突出，单泵站需 4~6 人常驻值守，人工成本占运维支出较高，设备状态、风险研判全凭人工巡检与经验判断，导致运维效率低、隐患发现滞后，且面临人员老龄化、主观误差等风险。其二，故障响应迟滞，配电设备智能化不足，缺乏实时监测与自愈功能，仅靠人工经验评估配用电风险，故障处置需经现场排查、定位等多环节，平均响应超 2 小时，易引发停机停水事故，扩大安全风险。其三，能效管理失控，日常能耗无分项计量与数据采集，关键指标（如有功电能、功率因数）无法动态监测，导致节能改造无据可依，能源浪费显著。三大缺陷从安全、效率、经济三重维度阻碍泵站现代化转型。为此，亟须通过智能化改造，部署传感器与边缘计算终端实现全景感知，依托大数据构建智能化系统，推动经验运维向数据驱动转型，全面提升配用电安全、隐患响应时效与能源利用效率，为无人值守泵站高质量发展提供支撑。

二、智能控制系统

（一）技术架构

无人值守泵站系统以智能感知、安全传输、精准控制为核心，通过数据采集、自动控制、远程传输、安防管理及视频监控五大功能模块，系统完全遵循物联网分层分布式物理体系，即感知层、通讯层、应用层，构建而成无人值守泵站系统，全面赋能泵站无人化、智慧化运行。

在通信系统层，采用工业光纤专线与 5G 智能网关双网冗余设计，形成高稳定加低时延的双保险：工业光纤专线保障长距离、大带宽的基础通信需求，抗电磁干扰能力强，适用于泵站与中心系统的稳定互联；5G 智能网关则依托其广覆盖、低时延特性，作为备用链路实时同步数据，当光纤链路因故障中断时，系统可自动完成主备切换，确保通信零中断，彻底解决偏远地区泵站网络覆盖难题。

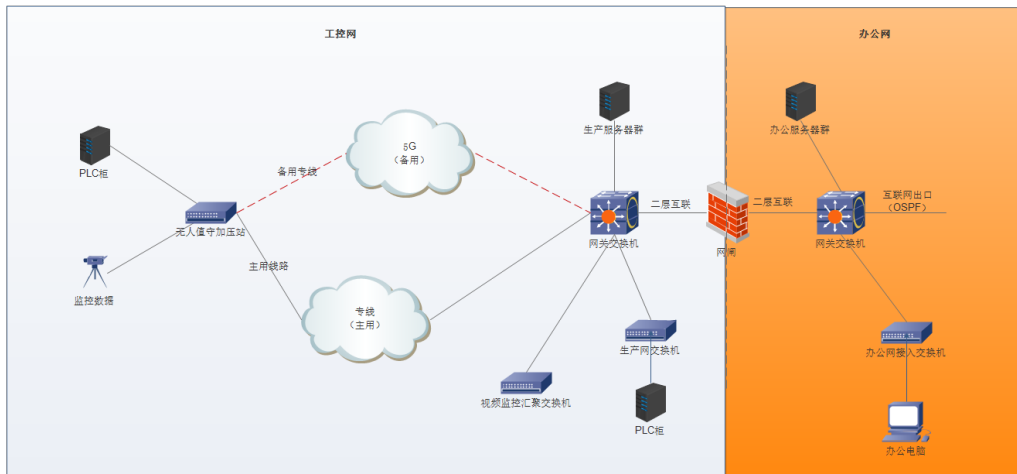
自动控制层聚焦多设备协同与精准调控，系统通过协议转换网关支持 Modbus RTU/TCP、Profinet、EtherCAT 等主流工业协议的无缝融合，打破不同品牌设备的“通信壁垒”，实现水泵机组、电动阀门、配电柜

等关键设备的统一管理 with 指令下发。依托可编程控制器对采集数据进行本地预处理，将关键报警信息上传中控系统，大幅降低网络负载的同时，确保控制指令从生成到执行的时延低，可自动完成监测—决策—执行的全流程闭环控制。

安防管理层构建网络隔离加数据加密的防御体系：通过网闸设备物理隔离，通过 VLAN 逻辑隔离，杜绝跨网

攻击风险；对远程运维数据进行端到端加密，防止数据在传输过程中被窃取或篡改；部署工业级网闸，精准拦截非法指令，保障系统运行安全。

视频监控层则与安防、控制模块深度融合，部署红外摄像头与智能分析终端，支持设备状态可视化、人员行为识别及设备状态自动读取，视频数据通过本地端存储与云端备份双机制留存。



(二) 控制系统

1. 数字孪生

数字孪生以可编程控制器为边缘智能核心，融合高精度传感器（电磁流量计、压力变送器、振动传感器）、变频器及电动阀门等，构建覆盖设备、环境、管网的全域感知网络。通过多维监测（流量、压力、电流、温湿度、浸水、电机振动）实现设备运行参数采集，数据经工业光纤低时延同步至中控系统，驱动数字孪生体动态映射物理实体的状态变化，为智能决策提供高保真、零延迟的数据基座。

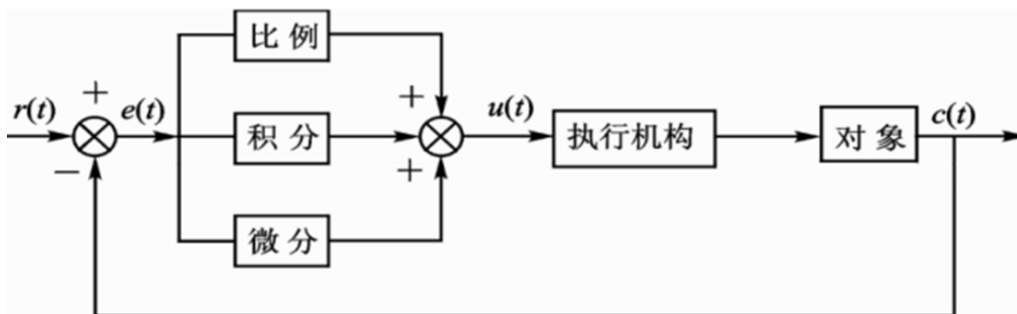
2. 智能决策

智能供水系统以可编程控制器为核心控制“大脑”，依托可编程控制器对设备状态、环境参数及管网运行态势等多源异构数据进行实时处理与融合分析，实现供水压力稳定性、设备能耗经济性与管网运行安全性三大目标的最优协同。在核心的恒压供水控制层面，系统采用改进型模糊 PID 算法，深度融合管网压力实时偏差、流量变化率及水泵运行状态等多维信息，动态精准调节变频水泵频率，将管网压力波动严格控制在 $\pm 0.02\text{MPa}$ 的

高精度范围内。泵组启停执行“先启泵后开阀、先降频关阀后停泵”的安全原则，当压力或者流量不足时，首泵降频至 45Hz 后启动第二台泵协同运行，若两泵达 50Hz，管网压力仍不足则启动第三台泵；反之，当需求降低时，则有序降频、关阀并逐步停泵，有效保障管网水锤防护与管网运行安全。在能效优化方面，系统基于实时流量需求与泵组效率动态匹配模型，智能决策最优运行泵组数量，精确规避因泵组冗余运行造成的无效能耗损耗，显著提升泵站整体能效。该系统通过边缘计算与控制算法的深度结合，为村镇供水系统在压力精准控制、设备安全运行及能源高效利用方面的智能化升级提供了可靠的核心技术支撑。

(三) PID 应用

PID 控制作为一种比较通用的控制方法，常用于设置被控对象的各种参数，具有很好的稳定性和较高的可靠性，是现代工业控制的主要技术之一。PID 控制器根据系统的误差，利用比例、积分和微分计算出控制参数来进行控制。PID 控制系统原理图如下图所示。



控制系统原理图

$r(t)$ 是给定值, $y(t)$ 是系统的实际输出值, 给定管网中水压和压力表读取的测量信号进行对比, 得出给定值和实际输出值构成控制偏差 $e(t) = r(t) - y(t)$ 。 $e(t)$ 作为 PID 控制的输入, $u(t)$ 作为 PID 控制器的输出和被控对象的输入。

通过设定调节 PID 控制器的参数使得输出的压力恒定, 达到恒压目的。

三、智能化

(一) 感知层扩展, 多维度监控

实现对关键设备状态的实时可视化管控, 部署高精度摄像头, 精准捕捉电柜仪表读数、阀门开关位置、环境状态等细节, 增设红外热成像摄像头: 实时监测电柜内部、电机表面、阀门执行机构等关键部位的温度场分布, 提前发现过热隐患。

电力系统状态智能感知, 部署无线温度传感器对电柜母排、电缆接头、断路器触头, 断路器加装辅助触点, 通过可编程控制器读取断路器辅助触点 (监测断路器分合闸状态), 实时数据采集, 自动识别局部过热、接触不良等异常, 及时触发预警, 中控端动态显示电气网络状态运行状态及预警信息, 显著提升供电安全性与可靠性。

在泵站管网中在进站水增设水质检测仪, 实时监测 pH 值、浊度、游离氯等核心水质指标, 为水质安全预警及工艺优化提供数据支撑; 读取进出水总管压力传感器、机组出口压力传感器、进出水总管安装流量计, 电机轴功率、变频器输出频率、电机轴承振动和轴承温度等参数, 关联压力与能耗关系, 通过电流与压力曲线匹配, 识别泵组效率异常 (如气蚀、磨损), 指导预防性维护。

电房、泵房部署排风扇和抽水泵联动控制, 当温湿度传感器、水浸传感器异常告警时自动联动开启排风扇或抽水泵, 进一步保障环境安全。

(二) 构建多重备份提升可靠性

冗余配置是提升工业控制系统可靠性的关键措施, 其核心在于构建多重备份机制以确保系统容错能力。在控制系统中, 通过配置不间断电源可有效应对突发断电情况, 利用不间断电源维持自控设备持续运行, 为信号传输提供稳定的保障, 确保控制指令和状态信息在异常工况下仍能及时反馈至中控系统, 使值班人员迅速了解情况, 作出应对措施。针对核心控制单元, 采用可编程控制器双机冗余架构可实现秒级故障切换: 主可编程控制器与备用可编程控制器通过同步数据链路实时交互运行状态信息, 当系统检测到主控制器出现硬件故障、软件异常或通信中断时, 热备份切换机制立即触发, 备用可编程控制器无缝接管控制权, 整个过程无需人工干预且不影响现场设备运行。这种双冗余设计通过硬件备份、实时监控和自动切换的三重保障, 显著提升了控制系统的容错等级, 确保关键生产过程在突发故障时仍能保持连续稳定运行, 为工业自动化系统提供高可靠性。

(三) 智能诊断管理体系

通过深度融合电力参数 (电压、电流、功率因数等) 与工艺参数 (压力、流量、电机轴承振动和轴承温度等), 构建多维度、多源数据协同监测体系, 突破单一参数监测的局限性, 实现泵机组复合型故障 (如泵气蚀叠加电机过载、阀门卡阻伴随管网负压等) 的精准识别。系统基于预设的关联规则库与动态阈值判定逻辑, 例如当流量异常波动伴随电流突增时, 自动触发故障。

系统集成预防性维护预测算法, 基于历史故障数据提前 3~7 天生成提示工单 (如润滑轴承、更换密封件), 从被动维修转向主动预防。通过监测、诊断、处置全闭环管理, 系统将故障平均修复时间大大缩短, 降低设备二次损伤, 运维人员巡检频次减少, 真正实现了无人值守泵站的自感知、自诊断、自决策, 为泵站的长期稳定运行提供了高可靠性技术保障。

结语

在新型城镇化与乡村振兴战略深入推进的背景下, 本研究针对村镇供水系统面临的供需矛盾升级、运维资源受限及能效低下等核心痛点, 创新构建了基于工业互联网与智能决策的无人值守泵站解决方案。系统以冗余网络架构为通信基石, 融合多参数协同监测体系与数字孪生技术, 解决泵气蚀、电机过载等关键故障难题。可编程控制器作为核心枢纽, 通过关键部位智能传感器与管网压力、流量、振动、温度等多维度实时监测, 结合电流、压力、流量关联算法, 实现异常工况的精准识别与定位。系统通过双可编程控制器热备机制与不间断电源供电系统, 保障断电、硬件故障等极端场景下的无缝切换; 同步部署网络安全防护体系, 实现数据传输零泄漏与控制指令零中断。应用成果不仅为村镇供水系统的高效稳定运行提供了技术示范, 更可进一步向智慧农业灌溉、工业园区供水等领域延伸, 为工业物联网技术在民生关键基础设施中的规模化应用提供可复制的实践路径。

参考文献

- [1] 易成钰. 基于无线传感网络的水利泵站无人值守远程监控系统设计研究 [J]. 现代工程科技, 2025, 4 (04): 85-88.
- [2] 沈伟群. 基于无线传感网络的无人值守泵站闸门启闭机自动控制方法 [J]. 中国水能及电气化, 2024, (12): 51-54.
- [3] 魏海娟, 朱俊卿, 吴钧, 等. 基于注意力机制的污水处理厂出口泵站无人值守仪表检测系统 [J]. 电气自动化, 2023, 45 (06): 65-68.
- [4] 李家劲, 何智才, 陈志平, 等. 边缘计算在无人值守排水泵站智慧运管平台的应用研究 [J]. 给排水, 2021, 57 (09): 139-143.
- [5] 张帅, 王祖迅. 煤矿瓦斯抽采泵站无人值守技术研究 [J]. 煤, 2020, 29 (12): 1-3+6.