

水利泵站电气自动化设计

杜小伟 董晨 张显

江苏省灌溉总渠管理处 江苏 淮安 223200

摘要：水利泵站作为水资源调控关键设施，其自动化水平关乎运行效率与安全。本文聚焦水利泵站电气自动化设计，围绕需求分析、关键技术、系统架构及安全防护展开研究。先从运行特点、功能、性能等多维度剖析设计需求，再阐述智能控制策略、工业通信网络等关键技术，接着构建三级系统架构，涵盖硬件配置、软件开发等内容，最后提出物理、电气、网络层面的安全防护措施。研究为水利泵站电气自动化系统的设计与实现提供了全面技术框架，助力提升泵站自动化水平与运行可靠性。

关键词：水利泵站；电气自动化设计技术；架构设计与实现

引言

传统泵站依赖人工操作，存在响应滞后、调控精度低等问题。随着工业自动化技术发展，实现泵站电气自动化成为必然趋势。本文基于泵站运行实际，先分析设计需求，明确系统功能与性能目标，再深入研究关键技术与系统架构，旨在构建科学的设计体系，为泵站自动化升级提供理论与技术支撑，推动水利工程现代化发展。

1 水利泵站电气自动化设计需求分析

水利泵站电气自动化设计的需求分析需紧密结合泵站运行特性与实际场景，从以下多维度构建体系化需求框架，为后续设计提供精准依据。（1）从泵站运行特点来看，其核心任务是实现水资源的精准调度与高效输送，运行过程具有周期性、动态性和多变量耦合的特征。泵站设备的协同运行涉及流量、压力、水位等多参数联动，需通过自动化手段实现参数的实时感知与动态调控。（2）功能需求层面，首要目标是构建全流程自动化监控体系。需实现对泵站关键设备运行状态、水文参数的实时采集与远程可视化监控，消除人工巡检盲区。其次要具备智能控制功能，包括水泵机组的自动启停、转速调节，以及闸门开度的精准控制，以响应水位、流量的动态变化。故障诊断与预警功能不可或缺，需通过数据分析识别电机过载、管道泄漏等潜在故障，触发声光报警并生成维修建议，降低停机风险。（3）性能需求聚焦于系统响应速度与运行效率。考虑到泵站工况的快速变化，自动化系统的控制指令执行延迟需控制在毫秒级，确保对突发情况的及时响应。数据传输的稳定性同样关键，尤其是在远距离通信场景中，需保证传感器数据与控制指令的无丢包传输，支持工业以太网、4G/5G等多种通信方式的兼容。（4）安全与可靠性需求是设计的底线。电气自动化系统需满足电气安全规范，配置过

流、过压、接地保护装置，防止设备损坏或人员触电。在软件层面，建立数据加密与权限管理机制，防范非法操作与数据篡改。系统需具备抗干扰能力，应对泵站复杂电磁环境对传感器与通信设备的影响，确保在潮湿、多尘等恶劣环境下稳定运行^[1]。

2 水利泵站电气自动化设计的关键技术

2.1 智能控制策略设计技术

智能控制策略其技术要点在于通过多维度算法融合实现精准调控，具体如下：（1）基础层采用改进型PID控制算法，通过动态调整比例系数、积分时间和微分时间，解决传统PID在参数整定中存在的静态误差与动态超调问题。在算法优化上，引入自适应因子，根据泵站实时工况自动修正控制参数，确保系统在变工况下的稳定性。（2）进阶控制层面采用多变量耦合控制技术，通过建立水泵机组、管道网络与水位调节的数学模型，解析流量、压力、液位之间的耦合关系。基于模型预测控制（MPC）理论，构建滚动优化窗口，将未来一段时间的系统响应纳入当前控制决策，实现对多变量的协同调控。融入模糊控制逻辑，通过隶属度函数将水位偏差、流量变化率等精确量转化为模糊量，经模糊推理与解模糊处理，生成符合实际工况的控制指令。（3）针对泵站运行的非线性特征，采用神经网络控制技术，利用多层次感知器（MLP）构建非线性映射关系，通过样本训练优化网络权重，实现对复杂动态过程的逼近。在控制结构上，采用分层递阶设计，底层负责设备执行控制，中层处理多变量协调，顶层实现全局优化，各层级通过标准化接口实现数据交互与指令传递。

2.2 工业通信网络构建技术

通信网络技术的核心在于构建高可靠性、低延迟的信息传输架构，其技术组成包括以下网络拓扑设计、通

信协议选型与数据传输优化。（1）网络拓扑采用分层架构，分为现场设备层、控制层与监控层。现场设备层采用总线型拓扑，通过RS485、Profibus等现场总线连接传感器与执行器，实现短距离数据汇聚；控制层采用星型拓扑，通过工业以太网连接PLC、DCS等控制设备，保障控制指令的高效传输；监控层采用环型冗余拓扑，利用光纤传输实现远程监控中心与控制层的高速互联，通过环网冗余协议（如RSTP）实现故障自动切换。（2）通信协议选择需满足实时性与兼容性要求，底层设备采用ModbusRTU协议，支持简单设备的周期性数据交换；控制层采用Profinet协议，通过实时通道（IRT）实现微秒级时间同步与数据传输；监控层采用OPCUA协议，基于面向对象的数据模型实现跨平台数据交互，支持信息模型的扩展与语义互认。（3）数据传输优化技术包括带宽分配、数据压缩与差错控制。采用时分复用（TDM）技术对通信带宽进行静态与动态分配，保障控制指令等关键数据的传输优先级；通过霍夫曼编码对采集的冗余数据进行压缩，降低传输负荷；应用前向纠错（FEC）编码与循环冗余校验（CRC），实现数据传输中的差错检测与自动纠错，提升通信抗干扰能力。

2.3 自动化设备选型与集成技术

设备选型技术需以性能匹配与系统兼容为核心，涵盖以下电机与驱动设备、传感检测设备及控制设备的选型规范。（1）电机选型依据泵站设计扬程、流量及运行工况，确定额定功率、转速与防护等级，同步考虑变频调速适配性，优先选择具备矢量控制接口的异步电机或永磁同步电机，确保调速范围与控制精度满足要求。驱动设备需与电机参数匹配，变频器应支持转矩补偿、滑差补偿功能，具备过载、过压、过流等保护模块，且兼容主流通信协议。（2）传感检测设备选型需满足测量范围与精度要求，流量检测采用电磁流量计，其测量范围应覆盖设计流量的120%，精度等级不低于0.5级，具备抗浆液干扰能力；压力检测选用扩散硅压力变送器，量程为工作压力的1.5倍，输出信号采用4-20mA或HART协议；水位检测采用超声波液位计或雷达液位计，测量盲区应小于0.5m，分辨率不低于1mm，具备温度补偿功能。（3）设备集成技术的关键在于接口标准化与信号适配，通过分布式I/O模块实现传感器信号的集中采集与转换，将模拟量（4-20mA、0-10V）、数字量（DI/DO）信号统一转换为数字信号接入控制网络；控制设备集成需采用模块化设计，PLC应具备足够的I/O点数与扩展插槽，支持高速计数、脉冲输出等功能模块，其运算速度与存储容量需满足控制算法的运行需求；人机界面

（HMI）与PLC通过以太网或串口实现数据交互，支持画面组态与数据记录功能，且具备权限管理与操作日志记录模块^[2]。

3 水利泵站电气自动化系统架构设计与实现

3.1 系统整体架构设计

水利泵站电气自动化系统架构设计需以层级化、模块化为核心原则，构建覆盖以下设备层、控制层、管理层的三级架构体系。（1）设备层作为系统的底层执行单元，主要由各类传感器、执行器、电机及驱动装置组成，负责完成物理量的采集与控制指令的执行。该层级采用分布式布置方式，根据泵站工艺分区（如进水区、机组区、出水区）划分若干设备集群，每个集群通过区域控制箱实现本地信号汇聚，减少跨区域线缆敷设。（2）控制层承担数据处理与逻辑运算功能，是系统的核心决策单元。其硬件配置以可编程逻辑控制器（PLC）为核心，搭配工业控制计算机（IPC）实现复杂算法运行。PLC需采用冗余设计，主备机通过高速同步模块实现数据实时同步，切换时间不大于100ms，确保控制连续性。控制层与设备层之间通过现场总线连接，采用光电隔离技术实现电气隔离，避免强电干扰传入控制单元。（3）管理层作为系统的人机交互与数据存储中心，由服务器、工作站及数据存储设备构成。服务器采用双机热备模式，运行数据库管理系统与监控软件，实现全系统数据的集中存储与分发。管理层与控制层通过工业以太网连接，网络采用千兆光纤环网结构，支持VLAN划分，将控制数据与管理数据分离传输，保障控制指令的传输优先级。

3.2 硬件模块配置

硬件模块配置需依据系统功能需求进行针对性选型，确保各模块性能匹配，具体如下：（1）电源模块采用UPS不间断电源与双回路供电设计，UPS后备时间不小于30分钟，满足断电情况下的系统安全停机需求。电源分配采用分级供电方式，控制回路与动力回路独立供电，控制回路电源经隔离变压器与滤波器处理，降低电源噪声干扰。（2）数据采集模块包含模拟量输入（AI）、数字量输入（DI）、脉冲量输入（PI）等类型。AI模块需支持4-20mA、0-10V等标准信号输入，分辨率不低于16位，采样速率不小于10kHz；DI模块应具备光电隔离功能，输入电压支持24VDC与220VAC兼容，响应时间不大于1ms；PI模块用于采集流量脉冲信号，计数频率不低于10kHz，支持脉冲宽度滤波。（3）执行控制模块由数字量输出（DO）、模拟量输出（AO）及电机驱动模块组成。DO模块输出容量需满足接触器、继电器等设备的驱动需求，具备过流保护功能；AO模块输

出4-20mA标准信号，用于控制变频器转速、调节阀开度等，输出精度不低于0.1%；电机驱动模块采用矢量控制变频器，支持转速闭环控制与转矩限制功能，调速范围不小于1:100，过载能力满足150%额定电流持续60s^[3]。

3.3 软件系统开发

软件系统开发采用模块化设计思想，划分为以下数据采集模块、控制逻辑模块、人机交互模块及数据管理模块。（1）数据采集模块负责与硬件设备通信，通过标准通信协议（如Modbus、Profinet）读取传感器数据与设备状态，采用多线程技术实现并行采集，采集周期可根据参数重要性动态配置，关键参数采集周期不大于100ms。（2）控制逻辑模块是软件系统的核心，包含基础控制算法与高级控制策略。基础控制算法实现设备的启停控制、联锁保护等逻辑，采用梯形图或结构化文本编程；高级控制策略基于模型预测控制、模糊控制等算法，运行于IPC或高性能PLC中，通过实时数据库与基础控制层进行数据交互，输出优化后的控制参数。（3）人机交互模块采用组态软件开发，界面设计遵循“分区展示、重点突出”原则，包含总览界面、分系统界面、参数设置界面、报警界面等。总览界面以泵站工艺流程图为背景，实时显示关键参数与设备运行状态；分系统界面按设备类型（如水泵机组、闸门系统）展开，提供详细参数监控与操作入口；参数设置界面采用权限分级管理，关键参数修改需经多级审批，操作记录自动存入日志系统。（4）数据管理模块负责系统数据的存储、查询与分析，采用关系型数据库存储结构化数据（如设备参数、操作记录），时序数据库存储实时采集数据，存储周期不小于3年。该模块支持数据导出、报表生成等功能，提供基于SQL的自定义查询接口，方便第三方系统调用数据。

3.4 安全防护体系设计

安全防护体系设计需从以下物理安全、电气安全、网络安全三个维度构建全方位防护网。（1）物理安全方

面，控制机房采用防静电地板与恒温恒湿系统，环境温度控制在18-25°C，相对湿度控制在40%-60%；设备柜体具备防尘、防水功能，防护等级不低于IP54，柜门加装电磁锁，通过权限卡或密码开启。（2）电气安全方面，系统接地采用联合接地系统，接地电阻不大于4Ω，接地网采用铜带焊接连接，定期进行接地电阻测试；所有电气设备金属外壳需可靠接地，电缆屏蔽层单端接地，避免形成接地环路；在电源进线端配置浪涌保护器（SPD），根据回路电压等级选择合适的标称放电电流，SPD动作后需具备状态指示功能。（3）网络安全方面，采用分层防护策略，在管理层与控制层之间部署工业防火墙，设置访问控制列表（ACL），仅允许授权IP地址与端口的通信；控制层设备禁用不必要的网络服务与端口，采用端口锁定技术限制非法接入；数据传输采用SSL/TLS加密协议，确保数据在传输过程中不被篡改或窃取^[4]。

结束语

水利泵站电气自动化设计需兼顾需求分析、技术应用与系统构建。通过多维度需求剖析明确设计方向，依托智能控制等关键技术提升系统性能，构建三级架构保障稳定运行，辅以全面安全防护措施降低风险。该设计体系为泵站自动化提供了完整解决方案，后续可结合新技术进一步优化，如引入人工智能提升故障诊断精度，以适应水利行业智能化发展新要求。

参考文献

- [1] 张耀祖.浅析水利泵站电气自动化设计[J].当代农机,2023(6):55-56,60.
- [2] 李松霖,郝玉平,李侃.水利泵站电气自动化设计[J].水利电力技术与应用,2024,6(19):22-23.
- [3] 欧阳少宏.浅析水利泵站电气自动化设计[J].建筑工程技术与设计,2021(33):1797-1798.
- [4] 朱振昊,卓南,孙森,等.水利泵站电气自动化设计[J].机械与电子控制工程,2025,7(2):11-12.