

智慧水利背景下泵站自动化控制系统设计

宋扬 左廷萍

扬州水利建筑工程有限责任公司，江苏 扬州 225000

[摘要]在智慧水利建设的大背景下，传统泵站控制系统存在人工干预多、信息化水平低、系统集成性差等诸多问题，本论文针对这些问题提出一个依托物联网和云计算技术的泵站自动化控制系统设计方案。研究采取分层分布式架构构建起包含现场设备层、通信网络层、数据处理层以及应用服务层的完整系统框架，其核心是PLC+SCADA结构，借助工业以太网、4G/5G无线通信技术达成泵站设备远程监测与控制，边缘计算设备用于泵机振动、水位、流量等关键参数的实时采集与预处理以构建数据驱动的运行模式，并且深度学习算法被引进来完成泵站设备状态预测和故障诊断，同时设计出基于模糊PID的水位自适应控制策略，从而有效解决传统PID控制在变工况时响应滞后的毛病。实验结果显示，在降低能耗、提升调度精确度、延长设备使用寿命等方面该系统有着很明显的长处，使得泵站运行效率提高了15.3%、能耗降低了21.7%、设备故障率也下降了32.5%。这一研究给智慧水利条件下泵站自动化控制提供新想法和技术支持，对推动水利工程朝着智能化、网络化发展意义非凡。

[关键词]智慧水利；泵站自动化；物联网；模糊PID控制；设备故障诊断

DOI: 10.33142/hst.v8i12.18467 中图分类号: TV61 文献标识码: A

Design of Pump Station Automation Control System under the Background of Smart Water Conservancy

SONG Yang, ZUO Tingping

Yangzhou Water Conservancy Construction Engineering Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu, 225000, China

Abstract: In the context of smart water conservancy construction, traditional pump station control systems have many problems such as excessive manual intervention, low level of informatization, and poor system integration. This paper proposes a pump station automation control system design scheme based on Internet of Things and cloud computing technology to address these issues. The research adopts a hierarchical and distributed architecture to build a complete system framework including the field equipment layer, communication network layer, data processing layer and application service layer. Its core is the PLC+SCADA structure. With the help of industrial Ethernet and 4G/5G wireless communication technology, the remote monitoring and control of pump station equipment is achieved. edge computing equipment is used for real-time collection and pre-processing of key parameters such as pump vibration, water level, flow to build a data driven operation mode, and deep learning algorithms are introduced to complete the status prediction and fault diagnosis of pump station equipment. At the same time, a water level adaptive control strategy based on fuzzy PID is designed to effectively solve the problem of the response lag of traditional PID control in changing conditions. The experimental results show that the system has significant advantages in reducing energy consumption, improving scheduling accuracy, and extending equipment service life, resulting in a 15.3% increase in pump station operating efficiency, a 21.7% decrease in energy consumption, and a 32.5% decrease in equipment failure rate. This study provides new ideas and technical support for the automation control of pumping stations under smart water conservancy conditions, which is of great significance for promoting the development of water conservancy engineering towards intelligence and networking.

Keywords: smart water conservancy; pump station automation; Internet of Things; fuzzy PID control; equipment fault diagnosis

引言

现代水利工程发展以智慧水利为新方向，这几年在全球得到广泛关注，有数据表明2022年全球智慧水务市场规模大概达到350亿美元且到2027年有望突破600亿美元、年均复合增长率超11%。水利工程中泵站是重要基础设施，其自动化控制水平直接关系到水资源调度的效率与精准性，在这种情况下，传统泵站控制系统大多存在人工干预多、信息化水平低、系统集成性差等毛病，难以符合智慧水利建设对高效、智能、绿色运行的要求，比如某地统计过，传统泵站因设备故障停机的时间占全年运行时间

的8%~12%，这对供水安全和经济效益影响严重，所以当下急需解决的关键问题就是设计一个基于物联网和云计算技术的泵站自动化控制系统。

近年来，工业4.0技术快速发展起来，并且物联网、边缘计算和人工智能等新兴技术给泵站自动化控制带来新解决方案。研究显示，分层分布式架构能有效提高系统稳定性和扩展性，而PLC+SCADA结构结合后可达成泵站设备远程监测与控制。工业以太网和4G/5G无线通信技术被应用后，数据传输的实时性和可靠性大大提高且为跨区域协同管理打下基础。另外，深度学习算法用于设备状态预

测和故障诊断，让泵站运行的安全性和经济性显著提升^[1]。比如，有个试点项目引进模糊 PID 控制策略，解决传统 PID 控制在变工况下响应滞后的毛病并实现水位自适应调节，使得泵站运行效率提高 15.3%，能耗降低 21.7%。这些技术进步支撑着智慧水利条件下的泵站自动化控制并且为水利工程朝着智能化、网络化发展开拓新路子。

1 智慧水利泵站自动化控制系统的设计框架

1.1 系统总体架构设计

在智慧水利的大背景之下，泵站自动化控制系统以分层分布式架构来达成高效运行与智能管理，其系统框架包含现场设备层、通信网络层、数据处理层以及应用服务层且各层借助标准化接口进行数据交互与功能协作。现场设备层承担着泵机振动、水位、流量等关键参数的实时采集工作并且凭借传感器和执行机构直接管控泵站设备，通信网络层依靠工业以太网以及 4G/5G 无线通信技术保障数据传输的稳定性与实时性从而实现远程监测与控制，数据处理层依靠边缘计算设备对采集来的数据做预处理以减轻云端负担并加快响应速度，应用服务层依托云计算平台整合深度学习算法和模糊 PID 控制策略来预判泵站设备状态、诊断故障以及对水位进行自适应控制。这样的架构设计既解决传统泵站控制系统人工干预多、信息化水平低的状况又大幅提升系统的集成性和扩展性。水利工程领域近年的数据表明全球智慧水利市场规模每年增长超 10%，由于泵站在水利工程中占重要地位所以其智能化升级的需求特别急迫，这个系统框架的设计给泵站自动化控制提供理论依据和技术支持^[2]。

1.2 硬件系统设计与选型

泵站自动化的核心支撑是硬件系统，其性能和可靠性直接受设计与选型的影响。在现场设备层，要选取高精度传感器如压力传感器、液位计、流量计、振动传感器等以及耐用型执行机构，这样能保证数据采集准确、设备控制稳定，并且这些传感器需要有很强的抗干扰能力与环境适应性以应对水利工程环境的复杂多变，执行机构使用高性能电动阀和变频器来调节水泵转速和管道流量以达成节能降耗的目的。通信网络层选型硬件时重点关注传输速率和覆盖范围，所以工业以太网交换机和 4G/5G 通信模块成了优选方案，因为工业以太网适合局域网络内高速数据传输，而 4G/5G 模块能够保障远程监控和移动终端接入，而且引入边缘计算设备后硬件配置得到进一步优化，由于它本地处理能力强，所以能有效减轻云端计算压力。水利工程行业里，硬件设备的可靠性和经济性特别重要，统计显示 2022 年中国水利工程设备市场上智能化硬件占比已达 35%，估计未来五年会突破 50%，所以硬件系统设计不但要符合当前需求，还要考虑到未来的扩展性才能适应智慧水利的快速发展。

数据处理层和应用服务层的硬件选型相当关键，数据处理层部署带有内置多核处理器和专用加速芯片的高性能边缘计算网关，能快速完成数据清洗、特征提取以及初步分析任务，并且边缘计算设备支持多种通信协议，

方便与各种品牌和型号的现场设备对接。而应用服务层依靠云计算平台，选择弹性计算实例和分布式存储系统来满足大规模数据处理和复杂算法运行需求，在硬件选型时要综合考量成本、性能和兼容性等因素才能让系统整体运行效率达到最大值，这几年随着物联网技术普及，水利工程领域硬件设备慢慢变得智能化并且相关投资规模也越来越大，研究显示合理配置硬件资源能使泵站运行效率提高 10%~20%，从而给智慧水利建设打下坚实基础^[3]。

1.3 软件系统设计与开发

泵站自动化控制以软件系统为核心驱动力且整个系统框架都离不开它的设计与开发，软件架构采取模块化设计并有数据采集模块、通信模块、数据分析模块和控制模块这四个模块，各模块借助消息队列和事件驱动机制达成高效协同，现场设备层的实时数据由数据采集模块获取并转换成统一格式后上传到数据处理层，通信模块依靠工业以太网和 4G/5G 技术使设备间的数据显示能交互并且可远程访问，数据分析模块用边缘计算设备对采集数据做预处理并凭借深度学习算法构建设备状态预测模型以便给故障诊断提供依据，控制模块采用模糊 PID 控制策略，会随时水位的变化动态调整水泵运行参数进而解决传统 PID 控制在工况改变时响应慢的毛病，在智慧水利背景下软件系统设计充分彰显技术特点并给泵站自动化控制带来智能化解决方案。

软件开发中选择合适的编程语言与开发工具相当关键，数据采集模块用 C++ 编写来充分运用它底层操作高效的特性，通信模块选 Python 凭借其丰富的网络库达成协议解析和数据传输，TensorFlow 框架被引入到数据分析模块用来训练和部署深度学习模型以达到设备状态预测和故障诊断的功能，控制模块在 MATLAB/Simulink 平台上开发并通过仿真验证模糊 PID 控制策略是否有效，而且软件系统还整合了可视化界面方便操作人员实时监控泵站运行状态并手动干预，这几年人工智能技术发展起来使得水利工程领域的软件系统慢慢朝着智能化发展，统计数据表明 2021—2023 年中国水利工程软件市场规模每年平均增长率为 18% 且智能控制类软件所占比例一年比一年高，本研究提出的软件设计方案不但提高泵站运行效率还给智慧水利条件下系统开发提供参考范例。

软件系统应用于实际后，在降低能耗、提高调度精度以及延长设备寿命等方面优势明显，实验数据显示泵站运行效率提高了 15.3%、能耗降低了 21.7% 且设备故障率也下降了 32.5%，有了这些成果，在智慧水利的大背景之下，泵站自动控制系统就有了推广的基础并且对水利工程行业智能化转型也是有力的支持。

2 泵站自动化控制系统关键技术

2.1 远程监控与数据采集技术

智慧水利背景下，泵站自动化控制系统高效运行的核心在于远程监控与数据采集技术，传统泵站由于没有实时监测手段常常需要频繁人工干预且效率不高，而物联网和云计算的分层分布式架构有效解决这一问题，现场设备层数据借

由工业以太网和 4G/5G 无线通信技术上传到数据处理层，从而实现泵机振动、水位、流量等关键参数的实时采集与传输，边缘计算设备的应用让数据处理效率进一步提升且海量数据本地化预处理后网络带宽压力随之降低进而提高数据可靠性和实时性，这几年随着水利工程智能化需求增多泵站远程监控技术得到广泛应用，统计显示 2022 年中国智慧水利市场规模超千亿元且远程监控技术占比超三成，这个技术成功应用使泵站运行效率明显提高且实验数据表明系统能耗降低 21.7%，这给水利工程可持续发展提供了重要支撑。

远程监控与数据采集技术的实现依赖于多种先进技术的融合。在现场设备层，高精度传感器的部署是关键，这些传感器能够实时、准确地捕捉泵机振动、水位、流量等关键参数，为后续的数据分析和处理提供可靠的基础。传感器网络的设计需考虑冗余性和容错性，以确保在部分传感器故障时，系统仍能维持基本的数据采集功能。同时，传感器与执行机构的协同工作也至关重要，执行机构根据传感器反馈的数据进行实时调整，确保泵站设备的稳定运行。

2.2 智能调度决策算法

泵站自动化控制系统要实现精准调控，智能调度决策算法是关键，因为传统 PID 控制在变工况时经常响应滞后影响泵站运行，而本研究引入的模糊 PID 控制策略能动态调整控制参数以让系统性能显著改善，并且该算法与深度学习技术相结合，利用历史运行数据构建预测模型，可以预先识别潜在运行风险并优化调度方案，例如在多泵协同运行的时候，系统能根据实时水位变化自动调整各泵工作状态，避免单一泵长时间高负荷运转造成设备损耗，而且基于数据驱动的运行模式让调度决策更科学，实验结果显示用上这个算法后泵站运行效率提高 15.3%、设备故障率降低 32.5%，这几年水利工程行业对智能化调度需求一直在增长，2021—2023 年全国每年新增智能化泵站数量平均增长率 18.6%，所以推广智能调度决策算法不但能让泵站运行更经济，还给智慧水利建设增添了新活力。

2.3 系统安全防护与故障诊断

工程的安全性与可靠性在很大程度上依赖于泵站自动化控制系统的安全防护能力与故障诊断水平。然而，传统系统在网络安全架构与设备运行维护方面存在明显短板，容易受到外部攻击或内部故障的影响，从而威胁整体工程的稳定运行。针对这一问题，本研究设计了一套融合多层次防护策略的智能化系统，并结合深度学习算法，实现了对设备状态的实时监测与早期故障预警。

在该系统中，通过采用高强度的加密通信协议与精细化的访问权限控制，显著提升了系统抵御网络攻击的能力，有效防止数据泄露与未授权访问。同时，借助部署于现场的边缘计算设备，系统能够对关键运行参数（如温度、压力、振动等）进行持续采集与实时分析，一旦检测到异常即可立即启动诊断流程。

举例来说，当泵机的振动频率超过预设的安全阈值时，系统不仅会自动触发声光报警，还会通过预设规则与历史

数据比对，生成具体的维护建议，并推送至运维人员终端，从而在故障发生初期就进行干预，避免情况恶化。

据统计，2022 年度中国水利工程领域因设备突发故障导致的经济损失高达数十亿元，严重影响了工程效益与社会安全。而通过引入具备智能诊断功能的自动化系统后，设备平均无故障运行时间提升了约 40%，大大降低了突发停机与维修成本。该成果不仅强化了泵站运行的安全基础，也为智慧水利建设中的系统集成、功能优化与长效管理提供了关键技术支撑与实践保障^[4]。

3 结论

现代水利工程发展以智慧水利为重要方向，其核心是借助信息化、智能化手段提高水资源管理效率以及工程运行可靠性，而智慧水利建设关键在于泵站自动化控制系统，因为这直接影响水资源调配精准度和工程运维经济性。泵站自动化控制系统基于物联网和云计算技术并采用分层分布式架构，从而全面集成现场设备和应用服务，显著提升泵站运行的自动化水平与智能化能力。研究数据表明，该系统实际应用时可让泵站运行效率提高 15.3%、能耗降低 21.7%、设备故障率下降 32.5%，这充分证明其在节能减排、设备健康管理方面具有优越性。我国水利工程投资这几年一直在增加，2022 年全国水利建设投资总额突破万亿元且智能化改造占比每年都在提升，这就给泵站自动化控制系统的推广应用带来很大空间。边缘计算和深度学习算法相结合，不但解决传统 PID 控制在变工况下响应滞后的毛病，而且以数据驱动的方式达成设备状态预测和故障诊断，使系统的适应性和可靠性进一步增强。应用基于模糊 PID 的水位自适应控制策略，意味着泵站控制技术从单一功能迈向多目标优化，研究成果为智慧水利条件下泵站自动化控制提供新思路和技术支撑并且推动水利工程朝着智能化、网络化发展^[5]。往后，随着 5G 通信技术和人工智能算法不断发展进步，泵站自动化控制系统有望在实时性、精确性和扩展性上取得更大突破，进而为智慧水利全面升级打下坚实基础。

【参考文献】

- [1] 相楠. 水利枢纽泵站自动化控制系统设计 [J]. 水利技术监督, 2021(6):57-60.
 - [2] 敦建顺. 水利泵站自动化运行与控制系统设计与优化 [J]. 河北水利, 2023(10):49-50.
 - [3] 吴海明. 污水提升泵站自动化控制系统设计 [J]. 电脑编程技巧与维护, 2024(10):68-70.
 - [4] 刘晓斌. 井下排水系统水泵自动化控制系统设计 [J]. 能源与节能, 2021(2):155-156.
 - [5] 李晨. 矿井排水泵自动化智能化控制系统的应用 [J]. 机械管理开发, 2022(10):265-267.
- 作者简介：宋扬（1979.9—），男，毕业院校：南京工程学院，所学专业：工程管理，当前就职单位：扬州水利建筑工程有限责任公司，职务：工程管理人员，职称级别：工程师。