

# 水利工程中电气控制系统可靠性提升技术研究

宋杰

贵港市润港工程勘察设计有限责任公司, 广西 贵港 537100

DOI:10.61369/WCEST.2025080009

**摘 要 :** 本文聚焦水利工程中电气控制系统可靠性提升技术研究,从硬件、软件、通信网络三大核心模块剖析故障机理,构建融合故障树分析(FTA)、失效模式与影响分析(FMEA)等传统方法与模糊故障树(FFTA)、贝叶斯网络(BN)的多层次可靠性分析体系,并基于MATLAB/Simulink、OPNET等工具实现多领域协同仿真评估,验证了模型与实测数据的一致性(误差4.8%)。提出硬件冗余设计(双PLC热备切换 $\leq 50\text{ms}$ )、抗干扰优化及全生命周期管理,软件模块化容错编程与实时调度优化,通信网络三级冗余拓扑与全链路防护的一体化提升技术。构建“硬件-软件-环境”三位一体状态监测体系,融合机器学习与深度学习实现智能故障诊断,并建立“数据-模型”双驱动的预测性维护机制,形成数字化智能运维方案。技术可显著提升系统平均无故障工作时间(MTBF达8600h)与应急响应能力,为水利工程电气控制系统的可靠性设计、优化及运维提供了理论支撑与技术参考。

**关 键 词 :** 水利工程; 电气控制系统; 可靠性提升; 冗余设计

## Research on the Technology for Enhancing the Reliability of Electrical Control Systems in Water Conservancy Projects

Song Jie

Guigang Run'gang Engineering Survey and Design Co., Ltd., Guigang, Guangxi 537100

**Abstract :** This paper focuses on the research of technology for enhancing the reliability of electrical control systems in water conservancy projects. It analyzes the failure mechanisms from three core modules: hardware, software, and communication networks, and constructs a multi-level reliability analysis system that integrates traditional methods such as Fault Tree Analysis (FTA) and Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) with Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA) and Bayesian Networks (BN). Furthermore, it achieves multi-domain collaborative simulation evaluation based on tools such as MATLAB/Simulink and OPNET, verifying the consistency between the model and measured data (with an error of 4.8%). The paper proposes integrated enhancement technologies including hardware redundancy design (with dual PLC hot standby switching time  $\leq 50\text{ms}$ ), anti-interference optimization, and full lifecycle management; software modular fault-tolerant programming and real-time scheduling optimization; and communication network three-level redundant topology with full-link protection. It constructs a "hardware-software-environment" trinity state monitoring system, integrates machine learning and deep learning for intelligent fault diagnosis, and establishes a "data-model" dual-driven predictive maintenance mechanism, forming a digital intelligent operation and maintenance solution. The technology can significantly improve the system's Mean Time Between Failures (MTBF reaching 8600h) and emergency response capability, providing theoretical support and technical references for the reliability design, optimization, and operation and maintenance of electrical control systems in water conservancy projects.

**Keywords :** water conservancy projects; electrical control systems; reliability enhancement; redundancy design

## 引言

随着“数字水利”“智慧水利”战略的深入推进,电气控制系统已从传统的“设备驱动型”升级为“智能中枢型”,成为实现水利工程自动化调度、精准控制及高效运维的核心载体。然而水利工程多地处偏远流域、河口海岸等复杂环境,电气控制系统长期面临高湿度、强振动、电磁干扰、温度剧烈波动等极端工况考验,同时需承受防洪汛期、供水高峰期等周期性高负荷运行压力。当前学界与工程界已针对电气控制系统可靠性开展初步研究,但现有技术仍存在明显局限。基于此,本文以水利工程电气控制系统可靠性提升为核心目

标,剖析系统耦合故障机理并建立多维度可靠性评估体系;从硬件、软件、通信网络三大维度提出一体化提升技术;构建状态监测与智能运维系统,实现从“被动抢修”到“主动防控”的转变。研究成果旨在破解复杂环境下系统可靠性不足的瓶颈,为水利工程的安全稳定运行提供技术支撑,助力智慧水利建设向更深层次推进。

## 一、系统故障机理分析与可靠性评估方法

### (一) 典型故障模式与机理研究

电气控制系统涉及领域较多,相关技术有计算机技术、网络智能技术等,在电气控制系统中对成熟技术的应用使得水利工程领域的电气控制系统实际应用

效果得到了很大提高,为水利水电工程自动化的实现提供了有力的保障<sup>[1]</sup>。水利工程电气控制系统的故障与环境深度耦合,其复合型特征可从三大核心模块系统剖析。硬件作为物理载体,故障占比最高,主要源于环境适应性不足和元器件老化,潮湿、振动和电磁干扰分别导致电路腐蚀、机械磨损和信号失真,而供电波动则易引发电源损坏乃至系统瘫痪<sup>[2]</sup>。软件作为逻辑核心,其故障多因设计缺陷与动态工况不匹配,缺乏应急逻辑、联锁保护和异常处理机制,可能导致闸门失控、设备危险运行,同时接口不兼容与代码冗余也分别造成“信息孤岛”和指令延迟<sup>[3]</sup>。通信网络作为数据传输的纽带,其故障与链路环境和结构缺陷相关,线缆易受物理破坏,无线信号受干扰衰减,高负载下易数据碰撞,而缺乏冗余的单链路设计一旦中断,便会引发控制失联的连锁反应。

### (二) 可靠性分析方法

为应对水利工程电气控制系统故障的复杂性与不确定性,需构建一个融合传统方法与创新技术的多层次可靠性分析体系<sup>[4]</sup>。该体系应用成熟的故障树分析(FTA),以自上而下的方式分解系统失效,通过最小割集量化“轴承磨损”、“线圈过载”等关键底事件的重要度,为预防提供明确靶点;同时结合失效模式与影响分析(FMEA),对各部件的潜在失效模式按风险优先数(RPN)排序,优先改进“传感器信号失真”等高风险项,有效降低故障率;并利用马尔可夫模型量化双PLC热备份等冗余设计对系统平均无故障工作时间(MTBF)的提升效果<sup>[5]</sup>。为克服传统方法在复杂工况下的局限,体系进一步引入创新技术,通过模糊故障树分析(FFTA)将难以量化的故障概率描述为模糊数,计算顶事件的模糊失效概率区间;借助贝叶斯网络(BN)强大的概率推理能力,动态更新故障概率,在监测到异常时快速定位最可能的致因;并开展多因素耦合分析,综合考虑环境、设备状态与运行负荷的交互作用,建立耦合失效模型,从而为可靠性设计与优化提供更全面、动态且精准的决策支持。

### (三) 基于仿真的系统可靠性评估

为高效评估水利电气控制系统可靠性,采用“硬件-软件-通信”多领域协同仿真思路,借助MATLAB/Simulink、PSPICE、OPNET等工具构建模型<sup>[6]</sup>。硬件层面,通过PSPICE搭建控制器、传感器等电路模型,并结合Simulink模拟电机、闸门动力学,注入元器件老化与环境干扰等故障;软件层面,基于

μC/OS-II构建调度模型,模拟任务执行与异常处理,并注入逻辑漏洞与数据错误;通信层面,利用OPNET和NS3构建工业以太网与无线传感网络模型,模拟链路中断与电磁干扰。评估体系结合了可靠度、MTBF等核心指标与数据传输成功率、指令响应时间等辅助指标<sup>[7]</sup>。通过设计单一故障、多故障耦合及极端环境等多维度仿真场景,可验证冗余设计有效性(如备用控制器切换≤50ms)和应急处理能力,并通过参数敏感性分析(如通信带宽提升)为系统优化提供量化依据。将仿真结果(如MTBF为8600h)与现场实测数据(8200h,误差4.8%)对比以验证模型准确性,从而明确系统薄弱环节,为可靠性提升提供技术方向。

## 二、关键可靠性提升技术研究

### (一) 硬件层面可靠性提升技术

为提升水利工程电气控制系统的硬件可靠性,需从冗余设计、抗干扰优化及全生命周期管理三方面构建综合体系。在冗余设计上,对控制器、电源和传感器等关键部件实施多重备份策略,如采用双PLC热备实现50毫秒内无缝切换,电源系统N+1冗余配置确保负载均衡,关键传感器则通过三取二表决机制提升数据可信度<sup>[8]</sup>。抗干扰优化则针对高湿、强振动和强电磁环境,通过电路板分区布局、选用工业级元器件、IP67及以上防护等级外壳、内置防潮加热模块以及三级防雷击体系来保障硬件稳定运行。全生命周期管理贯穿始终,从选型阶段优先采用军品级和工业级元器件,到入库前进行高温高湿老化筛选,再到运维阶段建立数据库预测寿命并实施预防性更换,从而系统性地避免元器件老化与突发失效。

### (二) 软件层面可靠性提升技术

为提升软件系统作为控制“逻辑中枢”的可靠性,需构建一个集容错编程、实时优化与全流程测试于一体的综合保障体系<sup>[9]</sup>。该体系通过模块化设计与异常处理双重机制实现容错,将控制逻辑拆解为独立模块,在故障发生时进行隔离并调用备用算法,同时利用CRC-32等多重校验确保数据传输的完整性,并针对传感器断线等常见故障设计数据预测算法。在实时性方面,系统采用FreeRTOS等实时操作系统,通过抢占式调度为关键任务分配最高优先级,并结合“主算法+快速响应子程序”架构,在工况突变时激活简化流程以实现即时响应。通过构建“单元测试-集成测试-现场测试”三级验证体系,并结合软件版本管理与远程升级功能,形成从开发到运维的闭环管理,确保系统在各种异常下均能稳定运行,为水利控制提供坚实保障。

### (三) 通信网络可靠性提升技术

为提升通信网络可靠性,需通过拓扑优化、传输强化和无线

适配三大技术路径综合解决链路中断、数据丢包及抗干扰能力弱等问题<sup>[10]</sup>。拓扑上,构建“现场设备层-控制层-监控层”三级架构,现场层采用RS485总线,控制层通过工业以太网环形冗余实现故障快速切换,监控层则利用光纤保障远距离传输,并配备工业级冗余交换机将故障恢复时间控制在毫秒级。传输上,从物理层到应用层构建全链路防护,采用屏蔽双绞线与铠装光纤等高性能介质,结合时分多路复用(TDM)技术为不同数据分配专属通道,并引入数据重传与流量控制机制确保可靠传输,同时利用VPN加密和工业防火墙保障网络安全。针对布线困难区域,则引入适配性无线技术,远距离低速率场景采用LoRa,近距离高速率场景采用5G,并通过高增益天线与跳频技术优化信号,同时在关键节点构建有线与无线冗余备份机制,保障数据传输的连续性与稳定性。

### 三、基于状态监测的智能运维技术

#### (一) 系统状态监测体系构建

为构建水利工程电气控制系统状态监测体系,需以故障特性为导向,通过“硬件-软件-环境”三位一体的参数体系,实现对设备运行状态的全面感知与精准采集。该体系聚焦于电机温度与振动、控制器CPU占用率、软件任务周期偏差及现场温湿度等核心指标。传感器部署采用“固定监测+移动补盲”的立体化方案,在关键设备上嵌入式安装专用传感器,同时在分散区域利用太阳能移动终端进行数据补充。数据采集与传输系统采用“分布式采集-混合传输-边缘预处理”架构,分布式节点就近对传感器信号进行滤波放大等调理,通过光纤与工业以太网保障核心数据毫秒级传输,并利用LoRa技术上传偏远区域数据,辅以4G/5G备用链路。最终,数据经边缘节点滤波压缩后,存入云端时序数据库,为智能诊断与维护提供可靠的数据支撑。

#### (二) 智能故障诊断技术

智能故障诊断技术融合数据与知识驱动方法,实现对故障的精准识别、定位与分析。在特征提取阶段,系统针对不同监测数据差异化提取统计、频谱和能量熵等多维特征,以区分轴承磨损、传感器漂移等故障。诊断模型采用“机器学习+深度学习”融合方案,对样本少的典型故障使用SVM和随机森林,对复杂故障则用CNN与LSTM捕捉时空演化规律,并结合迁移学习解决现

场样本稀缺问题。同时,故障诊断专家系统整合专家经验与历史案例,通过正反向推理相互验证,提升结果可靠性。最终,系统通过可视化界面实时展示故障详情并自动推送维修方案,指导运维人员快速处理。

#### (三) 预测性维护与健康管理

预测性维护与健康管理以设备剩余寿命预测为核心,通过“数据驱动+模型驱动”的混合方法实现从“事后维修”到“事前预防”的转变。数据驱动方法利用LSTM等深度学习算法分析电机等复杂设备的监测数据,而模型驱动方法则基于物理模型计算电容等简单元器件的老化速率,两者相互补充形成全面的寿命预测体系。基于此,系统综合考虑设备重要性、寿命与成本,通过多目标决策算法为核心设备触发即时预警,为非核心设备制定经济计划,并自动生成规范化维护方案。所有功能集成于健康管理平台,通过可视化大屏以红黄绿三色直观展示设备健康状态,自动发送预警,并在紧急时触发应急联动,同时提供数据分析以支撑系统优化。作为数据传输“纽带”的通信网络,其可靠性通过拓扑优化、传输强化和无线适配三大路径提升:构建“现场-控制-监控”三级冗余网络,采用环形以太网和光纤实现断点自愈与远距离稳定传输;选用屏蔽线缆和铠装光纤,并结合时分复用与数据重传机制实现全链路防护;针对布线困难区域,按需部署LoRa或5G无线技术,并通过天线优化与有线无线备份确保通信连续性。此外,VPN加密与工业防火墙等网络安全措施同步推进,共同推动水利工程电气控制系统运维的数字化与智能化升级。

### 四、结束语

本文围绕复杂环境下该系统可靠性不足的核心痛点,从故障机理、评估方法、提升技术及智能运维四个维度开展系统性研究,形成了覆盖“问题诊断-方案设计-落地保障”的全链条技术体系,为破解传统系统运行瓶颈提供了理论与实践支撑。未来可结合长期实地监测数据,优化预测性维护模型的寿命评估精度;融合数字孪生技术,构建虚实联动的可靠性仿真平台,实现故障场景的全流程复现与技术验证;推动多工程数据共享,建立电气控制系统可靠性数据库,为通用化、标准化提升方案的制定提供支撑。

### 参考文献

- [1] 俞娟. 基于高耦合逆变补偿的水利工程电气控制系统设计[J]. 水利水电技术, 2020, 51(7): 70-76. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.07.009.
- [2] 曾庆祥. 水利工程电气自动化系统的信息安全防护技术[J]. 水上安全, 2024(18): 5-7.
- [3] 戴萱, 伏杰, 徐书洋. 电气工程中的智能控制系统设计与优化研究[J]. 电子元器件与信息技术, 2024, 8(10): 239-241. DOI: 10.19772/j.cnki.2096-4455.2024.10.074.
- [4] 张小伟. 基于智能水利工程电气自动化系统优化设计与实践[J]. 现代建筑工程技术, 2025, 1(2). DOI: 10.37155/3041-0819-0102-15.
- [5] 贾军利. 闸门液压启闭机电气控制系统设计[J]. 区域治理, 2018(9): 164. DOI: 10.3969/j.issn.2096-4595.2018.09.151.
- [6] 焦丹丹, 王阳, 那宏壮, 等. 水利工程电气自动化系统分析[J]. 黑龙江科学, 2021, 12(20): 124-125. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8646.2021.20.054.
- [7] 任杰, 周开欣, 严维. 如何加强电气自动化工程控制系统建设[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2013(36).
- [8] 王泽忠, 高莹, 胡安静, 等. 水电站电气系统设计分析研究[J]. 黑龙江水利科技, 2025, 53(2): 21-25. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7596.2025.02.006.
- [9] 吴琴琴, 洪波. 某大型水利工程国产电机控制系统设计 and 应用[J]. 工业控制计算机, 2017, 30(12): 69-70, 73. DOI: 10.3969/j.issn.1001-182X.2017.12.030.
- [10] 李作琴. 水利工程电气自动化及其电气一次设计研究[J]. 今日自动化, 2021(7): 19-21.