

水电站辅助设备智能联调试验平台构建与可靠性评估

李子为

杭州江河水电科技股份有限公司, 中国·浙江 杭州 310012

摘要:为解决水电站辅助设备调试效率低、协同性差的问题,本研究开发了基于数字孪生技术的智能联调平台。通过构建高精度三维可视化模型,实现油、水、气等多系统数据深度融合与实时交互,进而达成辅助设备的协同调试。同时,采用改进的故障分析方法,从多维度对平台可靠性进行全面评估。实际应用结果表明,该平台使水电站辅助设备调试效率提升 40% 以上,系统稳定性显著增强,有效降低了人工调试成本与潜在安全风险,为水电站智能化运维提供了创新解决方案。

关键词: 智能调试; 数字孪生; 水电站; 可靠性评估; 多系统联动

Construction and Reliability Evaluation of Intelligent Joint Commissioning Test Platform for Auxiliary Equipment of Hydropower Station

Ziwei Li

Hangzhou Jianghe Hydro-Electric Science & Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310012, China

Abstract: In order to solve the problems of low commissioning efficiency and poor coordination of auxiliary equipment in hydropower station, this research developed an intelligent joint commissioning platform based on digital twin technology. Through the construction of high-precision three-dimensional visualization model, the deep integration and real-time interaction of oil, water, gas and other multi system data are realized, and then the collaborative debugging of auxiliary equipment is achieved. At the same time, the improved fault analysis method is used to comprehensively evaluate the reliability of the platform from a multidimensional perspective. The practical application results show that the platform can improve the debugging efficiency of auxiliary equipment of hydropower station by more than 40%, significantly enhance the system stability, effectively reduce the manual debugging cost and potential safety risks, and provide innovative solutions for the intelligent operation and maintenance of hydropower station.

Keywords: intelligent debugging; digital twins; hydropower station; reliability assessment; multi system linkage

1 概述

1.1 背景需求

水电站作为电力供应的重要组成部分,其辅助设备(如油泵、水泵、空压机等)的稳定运行对整个电站的安全与效率起着关键作用。这些辅助设备需定期进行联调测试,以确保各系统之间协同工作,及时发现并排除潜在故障。然而,传统的调试方式主要依赖人工操作,存在诸多弊端。一方面,各系统独立调试,缺乏有效的协同机制。例如,在油系统调试时,无法实时获取水系统和电气系统的运行状态,导致调试过程中难以全面考虑各系统之间的相互影响,调试效率低下。另一方面,故障诊断高度依赖技术人员的经验,准确性不足。以某电站 2022 年的调试为例,由于人工诊断失误,未能及时发现水泵叶轮的微小裂纹,导致设备在正式运行后出现故障,造成电站发电中断长达 3 天,直接经济损失超过百万元。此类案例表明,传统调试方式已难以满足现代水电站高效、安全运行的需求。

1.2 研究现状

随着智能化技术在电力领域的应用日益广泛,水电站

设备调试的智能化研究逐渐成为热点。国内外学者在数字孪生、智能诊断等技术方面取得了一定成果。数字孪生技术通过构建物理实体的虚拟模型,实现对设备运行状态的实时监测与模拟,在工业领域已有诸多成功应用。但在水电站辅助设备联调方面,现有研究大多集中于单一系统的智能化改造,缺乏对多系统协同调试的整体解决方案。同时,在可靠性评估方面,传统的评估方法难以适应智能联调平台复杂系统的特性,需要更科学、全面的评估手段。

1.3 解决方案

针对上述问题,本研究提出构建基于数字孪生技术的水电站辅助设备智能联调试验平台。该平台具有以下核心优势:一是通过三维可视化监控,技术人员能够直观地观察设备的运行状态和参数变化,快速定位故障点;二是利用智能诊断算法,实现自动故障诊断,提高诊断的准确性和及时性;三是借助多设备协同优化技术,打破各系统之间的信息壁垒,实现油、水、气等设备的协同调试,提高整体调试效率^[1]。

2 平台构建方案

2.1 系统组成

2.1.1 数据采集层

数据采集层是智能联调平台的基础,负责实时采集辅助设备运行过程中的各类数据。在水电站辅助设备上安装了多种高精度传感器,如压力传感器、温度传感器、振动传感器等。这些传感器能够精确采集设备的压力、温度、振动频率等关键参数,并通过工业以太网或无线通信技术将数据传输至平台。以水泵为例,在泵体进出口安装压力传感器,实时监测水流压力变化;在轴承部位安装振动传感器,捕捉设备运行时的振动信号,为后续的故障诊断提供数据支持。

2.1.2 数字孪生层

数字孪生层是平台的核心部分,通过建立设备的三维模型,实现物理设备与虚拟模型的实时同步。利用三维建模软件,对油泵、水泵、空压机等辅助设备进行高精度建模,模型不仅包含设备的外观结构,还精确模拟了内部部件的运行原理,同时,结合数据采集层传输的数据,将设备的实时运行状态映射到三维模型上。例如,当水泵的温度升高时,三维模型中相应部位会以红色高亮显示,技术人员可以通过旋转、缩放等操作,从不同角度观察设备的运行细节,直观地了解设备的工作状态。

2.1.3 智能控制层

智能控制层基于数字孪生层提供的设备状态信息,实现自动生成调试方案和远程操控功能。该层集成了先进的算法和控制策略,能够根据设备的运行参数和历史数据,自动分析设备的性能状态,生成最优的调试方案。技术人员也可以通过平台的操作界面,远程控制设备的启停、参数调整等操作,无需亲临现场,提高了调试的便捷性和安全性。此外,智能控制层还具备自学习能力,能够不断积累调试经验,优化调试方案。

2.2 关键技术

2.2.1 多系统联动技术

水电站辅助设备涉及油、水、气等多个系统,各系统之间存在复杂的关联关系。为实现多系统协同调试,本平台采用多系统联动技术,通过制定统一的数据接口标准,实现各系统之间的数据互通。利用工业通信协议,如 OPC UA、Modbus 等,确保不同系统之间的数据能够准确、实时传输。同时,建立多系统联动控制模型,根据各系统的运行状态和调试需求,自动协调各设备的工作顺序和参数设置。例如,在启动油泵时,系统会自动检测水系统的压力是否满足要求,若不满足,则先启动水泵调节水压,待水压稳定后再启动油泵,实现各系统的协同运行^[2]。

2.2.2 智能诊断算法

智能诊断算法是实现自动故障诊断的关键。本研究采用基于机器学习的故障诊断方法,结合水电站辅助设备的历史运行数据和故障案例,训练故障诊断模型。首先,对采集到的数据进行预处理,包括数据清洗、特征提取等操作,提

取出能够反映设备故障特征的关键参数。然后,利用支持向量机(SVM)、随机森林等机器学习算法,构建故障诊断模型。该模型能够快速识别常见故障类型,如管道泄漏、泵体振动异常、轴承磨损等。例如,当检测到水泵的振动频率出现异常波动时,模型会自动分析振动信号的特征,判断是否存在轴承磨损或叶轮不平衡等故障,并及时发出报警信息。

2.3 平台界面示例

智能联调平台的主界面采用简洁、直观的设计风格,主要分为三个功能分区。左侧是设备树状列表,按照水电站辅助设备的系统分类,清晰展示各设备的层级关系。技术人员可以通过点击列表中的设备名称,快速定位到相应设备的详细信息页面。中部是三维模型展示区,以 3D 形式展示设备的运行状态。技术人员可以通过鼠标操作,对模型进行旋转、缩放、平移等操作,全方位观察设备的内部结构和运行细节。右侧是实时数据仪表盘,实时显示设备的关键运行参数,如压力、温度、流量等。仪表盘采用图表、数字等多种形式展示数据,方便技术人员直观地了解设备的运行状态。当某个参数超出正常范围时,仪表盘会以醒目的颜色和图标发出报警提示,提醒技术人员及时处理。

3 可靠性评估方法

3.1 评估指标

为全面、科学地评估智能联调平台的可靠性,从系统稳定性、诊断准确率、响应速度和操作便捷性四个核心维度设定了详细的评估指标。在系统稳定性方面,将平台连续运行无故障时间作为主要衡量标准,明确要求平台能够持续稳定运行 72 小时以上,期间不出现系统崩溃、数据丢失等严重故障,确保平台在长时间运行过程中保持可靠性能,为水电站辅助设备调试提供坚实保障。诊断准确率维度,通过将平台自动诊断结果与经验丰富的技术人员人工诊断结果进行细致对比,精确计算故障诊断的准确率。人工诊断由具备深厚专业知识和丰富实践经验的技术人员执行,以此保障诊断结果的准确性与权威性,同时要求平台的故障识别率必须达到 90% 以上,确保对设备故障的精准判断。响应速度作为衡量平台实时性的关键指标,重点关注从故障发生到平台发出报警信息的延迟时间,严格要求系统响应延迟不超过 2 秒,使技术人员能够在最短时间内获取故障信息,及时采取应对措施,有效避免故障范围扩大和危害升级。操作便捷性则以技术人员掌握平台操作所需的培训时长为评估依据,旨在降低平台使用门槛,规定新入职技术人员经过不超过 8 小时的培训,就能熟练运用平台开展设备调试和故障诊断工作,提升运维工作的效率与质量,促进智能联调平台在水电站的广泛应用与高效运行。

3.2 测试方法

现场测试环节,选取 2 座规模各异的水电站,进行为期三个月的试运行。于真实运行环境下,实时监测平台对设备的监控与故障诊断效果,收集现场技术人员在实际操作中

的使用反馈，从操作流程、界面设计等方面评估平台的操作便捷性与实用性。此外，将平台诊断结果与设备实际故障情况进行细致比对，科学计算诊断准确率，确保平台在实际工况下的有效性。压力测试阶段，则人为制造网络延迟、数据丢包、系统负载过高等异常状况，旨在测试平台在恶劣环境下的运行稳定性与容错能力。通过逐步增加系统压力，模拟极端运行条件，密切观察平台响应速度变化，以及故障处理流程是否高效、准确，从而评估平台可靠性边界。这三个阶段层层递进，从模拟环境到实际场景，再到极限压力，全方位、多角度验证平台可靠性，为其投入大规模应用提供坚实的数据与实践支撑。

3.3 测试结果

经过全面测试，智能联调平台在各项评估指标上均取得了良好的成绩，具体测试结果如表 1 所示。

表 1 测试结果

测试项目	达标值	实测值
故障识别率	≥ 90%	93.6%
系统响应延迟	≤ 2 秒	1.5 秒
操作培训时长	≤ 8 小时	6 小时
连续运行时间	≥ 72 小时	120 小时

从测试结果可以看出，平台的故障识别率达到 93.6%，高于 90% 的达标值，能够准确识别设备的各类故障；系统响应延迟仅为 1.5 秒，满足不超过 2 秒的要求，确保故障信息能够及时传递给技术人员；操作培训时长为 6 小时，低于 8 小时的标准，新员工能够快速掌握平台的操作方法；平台连续运行时间达到 120 小时，远超 72 小时的要求，系统稳定性良好。

4 实际应用案例

4.1 项目背景

某中型水电站装机容量为 111MW，由于设备老化和传统调试方式的局限性，辅助设备的调试效率低下，故障频发，严重影响电站的安全稳定运行。为提高电站的智能化水平和运行效率，该电站于 2023 年启动技术改造项目，引入本研究开发的水电站辅助设备智能联调试验平台。

4.2 实施过程

①第一阶段：设备改造与传感器安装。对电站的油泵、水泵、空压机等辅助设备进行智能化改造，安装 32 个智能传感器，实现设备运行数据的实时采集。同时，对电站的网络系统进行升级，确保数据传输的稳定性和实时性。

②第二阶段：数字孪生模型构建。利用三维建模技术，对电站的辅助设备进行高精度建模，构建数字孪生模型库。将采集到的设备运行数据与数字孪生模型进行关联，实现物理设备与虚拟模型的实时同步。

③第三阶段：开展对比试验。在平台投入使用前，先采用传统调试方式对部分设备进行调试，记录调试时间、故障发现情况和人工成本等数据。然后，使用智能联调平台对其余设备进行调试，对比两种调试方式的效果。

4.3 效益分析

在实际应用效益方面，智能联调平台展现出多维度显著提升：其一，调试效率实现跨越式突破，传统模式下完成油、水、气等全系统辅助设备联调需耗时 14 天，且因人工逐系统独立操作易受协同壁垒影响，而平台通过多系统数据实时互通与自动化调试方案生成，将整体调试周期压缩至 8 天，效率提升达 42.9%，大幅缩短设备停机时间，为电站增加约 6 天有效发电时长，直接提升发电效率与经济效益。其二，故障诊断能力实现从“经验依赖”到“智能精准”的质变，平台通过高精度传感器阵列与智能诊断算法，在某中型水电站三个月试运行中，成功识别 3 处人工巡检难以发现的隐蔽缺陷，包括直径不足 1 毫米的管道内壁微裂缝、轴承滚珠早期点蚀磨损等，此类缺陷若持续发展可能引发管道爆裂、设备轴系断裂等严重事故，平台通过实时数据建模与故障特征匹配，提前 72 小时发出预警，为缺陷处理争取了充足时间，有效规避潜在安全风险与停机损失。其三，人工成本结构显著优化，传统调试需配置至少 5 名技术人员全程参与参数监测、流程切换与故障排查，日均人工成本约 7000 元，而平台通过三维可视化监控、自动报警与远程操控功能，将现场操作人员减少至 2 人，且无需持续值守，单次调试周期内节约人工成本约 4.2 万元，同时将技术人员从重复繁琐的现场操作中解放，转向更具创造性的系统优化工作。上述实践成果充分验证了平台在提升调试效能、强化设备安全防护与降低运维成本方面的综合价值，为水电站智能化改造提供了可量化的效益参考范式。

5 结论

本研究开发的水电站辅助设备智能联调试验平台，借助数字孪生技术和多系统联动技术的应用，显著提升了水电站辅助设备的调试效率与安全性，实际应用中调试效率提升 40% 以上，系统稳定性大幅增强，可及时发现并处理设备潜在故障，有效降低电站运行风险。不过，该平台仍存在优化空间，未来将从三方面深入研究：其一，开发手机 APP 或移动网页端，增添移动端监控功能，便于技术人员远程监控设备、接收报警并开展调试管理，提升运维灵活性与及时性；其二，推动智能联调平台与电站 SCADA 系统、设备管理系统等智能运维大系统深度融合，实现数据共享与协同作业，构建更完备的智能化运维体系；其三，运用深度学习技术开发自学习型故障诊断算法，通过持续学习新故障案例与运行数据，增强算法准确性与适应性，达成复杂故障的智能诊断与预测。

参考文献：

[1] 杨厚君,唐宇航,翟伟,等.水电站生产设备安全风险评价标准[M].北京:中国水利水电出版社,2017.

[2] 谢云敏.水轮发电机组辅助设备及自动化运行与维修[M].北京:中国水利水电出版社,2005.

作者简介: 李子为(1986-), 男, 中国湖北仙桃人, 硕士, 从事水力机械研究。