

The Application of Environment-friendly Technology in the Operation and Maintenance of Hydraulic Construction of Hydropower Station

Menglin Dong

Jin Anqiao Hydropower Station Co., LTD., Lijiang 674100, Yunnan, China

Abstract: This study focuses on the application of environmentally friendly technology in the maintenance of hydraulic structures of hydropower stations. The application principles and practical effects of UAV, 3D modeling, artificial intelligence, ecological restoration and long-term sacrificial anode protection technologies in monitoring, maintenance program optimization, automatic early warning, ecological restoration and corrosion prevention are deeply analyzed, and comprehensive maintenance strategies are proposed, aiming to achieve efficient maintenance and ecological protection coordination, and provide theoretical and practical support for sustainable operation of hydropower stations.

Keywords: Hydropower station; Hydraulic structure; Environmentally friendly technology; Maintenance strategy

环境友好技术在水电站水工建筑运行维护中运用

董猛林

金安桥水电站有限公司, 中国·云南丽江 674100

摘要: 本研究聚焦水电站水工建筑物维护中的环境友好型技术应用。深入剖析无人机、三维建模、人工智能、生态恢复及长效牺牲阳极保护等技术在监测、维护方案优化、自动化预警、生态修复与防腐等方面的应用原理与实践成效, 提出综合性维护策略, 旨在达成高效维护与生态保护协同, 为水电站可持续运营提供理论与实践支撑。

关键词: 水电站; 水工建筑物; 环境友好型技术; 维护策略

1 引言

水电站对于能源供应与水利调控意义非凡, 然传统维护方式对生态有所忽视。当下, 环境友好型技术应用迫在眉睫, 其可降低环境冲击、提升维护效能并保障电站安全, 推动水电站与生态和谐共生, 契合可持续发展理念, 是水电工程领域技术革新与生态保护的关键路径。

2 无人机技术在水电站水工建筑物维护中的应用

2.1 监测原理与数据采集

无人机凭借其卓越的飞行机动性, 能够在复杂的水电站环境中实现多高度、多角度的全方位监测。搭载先进的高分辨率光学摄像头、红外热成像仪及多光谱传感器, 可获取建筑物表面丰富的多源数据。光学摄像头如同敏锐的视觉器官, 能清晰捕捉大坝混凝土结构的细微裂缝、剥落等病害细节。红外热成像仪则

基于渗漏区域与正常结构热传导特性差异, 通过温度分布成像精准定位建筑物内部潜在的渗漏通道与结构缺陷, 其温度异常区域反映了内部隐患。多光谱传感器如同物质成分分析专家, 通过解析建筑物表面材料光谱特性变化, 精确判断材料老化、腐蚀程度及植被覆盖状况。这三种传感器协同工作, 为全面评估建筑物健康状况提供了坚实的数据基础^[1]。

2.2 数据处理与分析

采集的海量数据需经专业算法与模型处理转化为实用决策信息。图像识别与处理算法对光学图像进行深度分析, 不仅精准识别裂缝几何特征(位置、长度、宽度、走向), 还能通过不同时期图像对比计算裂缝扩展速率, 为结构安全性评估提供量化依据。对于红外热成像数据, 融合热传导模型与图像处理技术, 准确推断温度异常区域对应的内部渗漏或缺陷深度、范围, 评估其严重程度。多光谱数据则与材料光谱库比对, 洞察材料成分与表面状态变化。最终通过

数据融合技术整合多源数据，显著提高对建筑物健康状况评估的准确性与可靠性，确保维护决策科学合理。

2.3 运输与配送功能

在地形复杂的水电站区域，无人机的运输配送能力极大提升了维护工作效率。以山区或峡谷地带水电站为例，部分维护点交通不便，传统人工运输耗时费力且风险高。无人机依预设航线可精准将小型维修工具、零部件及检测设备送达指定地点。如大坝坝顶或偏远泄洪设施维护时，无人机迅速响应需求，及时运输物资，大幅缩短维修等待时间，增强维护工作的时效性与灵活性，有效减少因物资延误导致的安全隐患与经济损失，保障了维护工作的顺利进行。

3 三维建模技术在水电站水工建筑物维护中的应用

3.1 模型构建与信息集成

三维建模技术以水电站水工建筑物的设计图纸、施工资料以及实际测量数据为基础，构建高精度的三维数字化模型。通过激光扫描技术获取建筑物的点云数据，能够精确还原建筑物的几何形状与空间位置关系。将点云数据与设计模型进行配准与融合，补充设计阶段未涵盖的施工变更与实际细节信息，形成完整的三维信息模型。在模型中集成建筑物的结构属性信息，如混凝土强度等级、钢筋布置、各部件的材料参数等，以及维护历史记录，包括以往维修的部位、采用的维修方法与材料、维修时间等信息。同时，关联周边地理环境信息，如地形地貌、水文地质条件、生态植被分布等，使三维模型成为一个涵盖建筑物全生命周期信息与周边环境信息的综合性信息平台^[2]。

3.2 施工与维护过程监控

在水电站水工建筑物的施工阶段，三维建模技术可实现实时的施工进度监控与质量控制。通过在施工现场布置传感器与定位设备，采集施工过程中的实际数据，并与三维模型进行比对分析，及时发现施工偏差与质量问题。例如，在混凝土浇筑过程中，利用传感器监测混凝土的浇筑高度、温度变化以及振捣情况，与模型中的设计要求进行对比，确保浇筑过程符合设计标准。在维护阶段，三维模型为维护人员提供了直观、全面的建筑物信息展示平台。维护人员可通过虚拟现实（VR）或增强现实（AR）技术，沉浸式地查看建筑物内部结构与外部形态，准确识别潜在风险点与需要维护的部位。在进行大坝内部廊道检查时，维护人员借助 AR 设备，在实地查看廊道结构的

同时，可在视野中叠加显示三维模型中的相关结构信息、维护历史记录以及预警信息，提高检查工作的准确性与效率。

3.3 维护方案模拟与优化

利用三维建模技术的可视化与模拟功能，可对不同的水电站水工建筑物维护方案进行预先模拟与效果评估。在对大坝表面防护涂层更新方案进行设计时，可在三维模型中模拟不同涂层材料、厚度以及施工工艺下大坝的耐久性、抗渗性以及外观效果等指标。通过改变模型中的相关参数，如涂层材料的导热系数、老化速率等，预测不同方案在未来使用过程中的性能变化趋势。结合经济成本分析与环境影响评估，综合比较各方案的优劣，筛选出最优维护方案。这种基于三维建模技术的维护方案模拟与优化方法，能够有效避免盲目施工带来的资源浪费与环境破坏，提高维护资金的使用效率与维护工作的整体效益。

4 人工智能技术在水电站水工建筑物维护中的应用

4.1 自动化监测系统

人工智能技术驱动的自动化监测系统通过在水电站水工建筑物关键部位部署智能传感器网络，实现对建筑物运行状态参数的实时、连续监测。这些传感器包括应变片、位移计、加速度计、压力传感器以及水质传感器等，能够采集建筑物的结构应力应变、变形位移、振动特性、水压力以及水质变化等多维度数据。利用人工智能算法对传感器数据进行实时处理与分析，自动识别数据中的异常模式与变化趋势。例如，采用深度学习算法对大坝振动数据进行分析，能够区分正常运行振动与因结构损伤或外部荷载异常引起的异常振动，准确判断振动的频率、振幅以及相位变化特征，及时发现潜在的结构安全隐患。当监测数据超出预设的安全阈值时，系统自动触发报警机制，并通过短信、邮件或智能终端应用程序等方式向维护管理人员发送详细的报警信息，包括异常数据的类型、位置、时间以及可能的故障原因分析，确保维护人员能够迅速响应并采取相应的处理措施。

4.2 智能诊断与预测维护

基于人工智能的智能诊断技术利用机器学习算法对大量的历史监测数据与已知的建筑物故障案例进行学习训练，构建故障诊断模型。该模型能够根据实时监测数据自动诊断建筑物的健康状况，确定是否存在结构损伤、设备故障或其他异常情况，并对故障的类型、位置与严重程度进行准确判断。例如，通过对

水电站水轮机运行数据的分析，利用支持向量机算法建立水轮机故障诊断模型，能够有效识别叶片裂纹、轴承磨损、密封失效等常见故障类型，并预测故障的发展趋势。结合预测性维护理念，人工智能系统根据诊断结果与预测模型，提前制定维护计划与维修策略，合理安排维护时间与资源。在预测到大坝某部位的混凝土结构在未来一段时间内可能因碳化作用导致强度下降并出现裂缝风险时，系统提前规划混凝土修复与防护工程，提前调配所需的材料与设备，避免故障发生或在故障发生前进行及时修复，从而降低维修成本，提高水电站的运行可靠性与安全性，延长建筑物与设备的使用寿命^[3]。

5 生态恢复技术在水电站水工建筑物维护中的应用

5.1 植被恢复与生态护坡

水电站建设过程中，大面积的土地开挖与工程扰动往往导致周边植被破坏与水土流失。在维护阶段，生态恢复技术通过科学规划与实施植被恢复工程，逐步重建受损的生态系统。根据水电站所在地的气候、土壤、水文等自然条件，选择适宜的本土植物物种进行种植。在大坝下游消力池周边区域，种植耐水湿、根系发达的草本植物与灌木，如芦苇、菖蒲、紫穗槐等，形成植被缓冲带。这些植物根系能够深入土壤，增强土壤的抗侵蚀能力，固定坡面土体，防止水土流失。同时，植被的枝叶能够减缓坡面水流速度，降低水流对坡面的冲刷力，促进雨水的入渗与涵养。在河岸护坡工程中，采用生态护坡技术，结合土工格栅、生态袋等工程材料与植被种植，构建具有生态功能的护坡结构。生态袋内填充土壤与植物种子，随着植物生长，根系穿透生态袋并与坡面土体相互锚固，形成稳定的植被护坡体系，不仅有效保护河岸稳定性，还为水生生物与陆生生物提供了栖息与繁衍的生态环境，促进了生态系统的多样性恢复与平衡^[4]。

5.2 水体生态修复

水电站运行过程中，水库蓄水与放水操作可能对下游水体的生态环境产生一定影响，如水温变化、水质改变以及水流态的调整等。生态恢复技术通过一系列水体生态修复措施来缓解这些负面影响并提升水体自净能力。在水库中设置生态浮岛，浮岛上种植水生植物，如美人蕉、凤眼莲等。这些水生植物通过根系吸收水中的氮、磷等营养物质，降低水体富营养化程度，同时为浮游生物与水生动物提供栖息场所与食物来源，促进水体生态系统的物质循环与能量流动。在

下游河道中，采用人工湿地技术构建生态处理系统。人工湿地通过模拟自然湿地生态系统，利用湿地植物、微生物以及基质填料的协同作用净化水体。污水流经人工湿地时，湿地植物吸附、过滤水中的悬浮物与污染物，微生物分解水中的有机物质，基质填料则为微生物提供附着生长表面并参与部分污染物的吸附与转化过程。通过这些水体生态修复措施，改善了水电站下游水体的水质状况，恢复了水生生物群落的多样性与稳定性，保障了水生态系统的健康与可持续发展。

6 长效牺牲阳极保护技术在水电站水工建筑物维护中的应用

6.1 防腐原理与技术特点

长效牺牲阳极保护技术基于电化学腐蚀原理，在水电站水工建筑物的水下钢结构（如钢闸门、输水管道等）表面安装比钢结构基体电位更负的牺牲阳极材料。常用的牺牲阳极材料包括锌合金、铝合金等。在电解质溶液（如水库水或河水）存在的环境下，牺牲阳极与钢结构基体形成原电池回路，阳极材料优先发生氧化反应而溶解，释放出电子，电子通过金属导体流向钢结构基体，使钢结构基体表面获得阴极极化，从而抑制其自身的腐蚀反应。该技术具有诸多显著优点：其一，环保性好，牺牲阳极材料在反应过程中不产生有毒有害物质，不会对水体环境造成污染。其二，施工简便，只需将牺牲阳极按照设计要求固定在钢结构表面即可，无需复杂的施工设备与专业技术人员。其三，安全性与稳定性高，牺牲阳极保护系统一旦安装调试完成，能够长期稳定运行，无需额外的动力供应与复杂的监控设备，有效降低了因设备故障或操作失误导致的安全风险。其四，维护管理要求低，在牺牲阳极的设计使用寿命内，一般不需要进行专门的维护与更换操作，减少了维护工作量与成本投入，为水电站水工建筑物的水下钢结构提供了可靠、长效的防腐保护解决方案^[5]。

6.2 应用案例与效果评估

以某大型水电站钢闸门防腐工程为例，根据钢闸门结构、水环境电化学特性及设计寿命要求，精心计算设计，选用合适铝合金牺牲阳极并确定布置。安装后定期检测电位，结果显示钢闸门电位始终处于保护范围，表明系统运行正常，有效抑制腐蚀速率。多年运行检测对比表明，采用该技术的钢闸门腐蚀程度显著减轻，涂层完整性良好，仅局部边缘轻微腐蚀，未影响结构强度与运行功能。这不仅延长了维修周期与使用寿命，降低了成本与停机风险，还保障了水电站

安全稳定运行，充分体现了该技术在水下钢结构防腐维护中的卓越优势与良好应用效果。

7 结论

环境友好型技术在水电站水工建筑物维护中发挥着不可替代的关键作用。通过精准监测、智能诊断、生态修复与长效防腐等功能，实现了维护工作的全面升级，有效减少了资源消耗与环境影响，有力确保了电站的安全可持续运行。水电行业应进一步加大研发投入，深化跨学科合作创新，优化应用方案，加强人才培养与标准制定，积极推动这些技术的健康发展，为实现能源开发、水资源利用与生态环境保护的协同共进贡献力量。在未来的研究与实践中，应持续关注新技术的发展趋势，不断探索其在水电站水工建筑物维护中的更广泛应用，以应对日益复杂的工程需求与环境挑战。

参考文献

- [1]刘远,周浩澜,姜俊红.融入思政元素的案例教学在“水工建筑物”中的应用[J].科教文汇,2024,(21):100-104.
- [2]田静,郭汉驰,薛海.凯巴萨水电站泄水建筑物模型试验研究[J].水电与新能源,2024,38(10):22-25.
- [3]张易,朱俊,袁庆晴等.一种用于水电站水工建筑物缺陷检测的水下机器人系统设计[J].控制与信息技术,2023,(06):92-97.
- [4]胡超.浅析小型水电站泄洪建筑物水力学计算国家标准与美制标准的区别[J].水电站设计,2023,39(03):39-41.
- [5]谢颖涵,汪亚超,吴经干,等.构皮滩水电站通航建筑物第一级中间渠道布置与设计优化[J].水利水电快报,2023,44(09):62-67.