

水电站风险预警与运行管理研究

王伟

黄河万家寨水利枢纽有限公司

DOI:10.32629/bd.v9i6.4503

[摘要] 本文旨在系统性地探讨水电站风险预警与运行管理的理论框架与实践路径。首先,深入剖析了水电站面临的主要风险类型及其成因;其次,构建了一个融合多源信息感知、智能分析决策与分级响应联动的综合风险预警体系;再次,提出了以风险为导向、以全生命周期为核心的精细化运行管理模式;最后,结合数字孪生、人工智能等前沿技术,展望了未来水电站智慧化风险管理的发展方向。研究表明,建立科学、高效、智能的风险预警与运行管理体系,是保障水电站长周期安全、经济、绿色运行的根本途径。

[关键词] 水电站; 风险预警; 运行管理; 安全风险; 智能监测; 数字孪生

中图分类号: TV737 **文献标识码:** A

Research on Risk Early Warning and Operation Management of Hydropower Stations

Wei Wang

Yellow River Wanjiashai Water Conservancy Hub Co., Ltd.

[Abstract] This paper aims to systematically explore the theoretical framework and practical paths of risk early warning and operation management for hydropower stations. First, it deeply analyzes the main risk types faced by hydropower stations and their causes. Second, it constructs a comprehensive risk early warning system integrating multi-source information perception, intelligent analysis and decision-making, and graded response linkage. Third, it proposes a risk-oriented, lifecycle-centric refined operation management model. Finally, combined with cutting-edge technologies such as digital twin and artificial intelligence, it looks forward to the future development direction of intelligent risk management for hydropower stations. Research shows that establishing a scientific, efficient, and intelligent risk early warning and operation management system is the fundamental way to ensure the long-term safe, economical, and green operation of hydropower stations.

[Key words] hydropower station; risk early warning; operation management; safety risk; intelligent monitoring; digital twin

引言

在全球能源转型与“双碳”战略下,水能作为清洁可再生能源,战略地位愈发重要。我国水电装机容量居世界首位,水电站群规模宏大、结构复杂,是国家电力供应“压舱石”,还兼具防洪、灌溉等综合效益。但“高峡出平湖”背后有安全风险,历史上的漫坝、机组故障、系统崩溃等事故,会带来灾难性后果,造成经济损失、人员伤亡与生态破坏。传统水电站运行管理侧重事后处置与定期检修,对风险前瞻性识别、动态评估和精准预警能力不足。且随着服役年限增长、极端气候频发、电网灵活性要求提高,被动管理模式难适应新时代需求。所以,构建主动、前瞻、智能的风险预警与运行管理体系,实现从“被动应对”到“主动防御”的转变,是水电行业亟待解决的核心问题。

1 水电站主要风险类型与成因分析

水电站是由水工建筑物、机电设备和运行环境构成的复杂巨系统,其风险具多样性、耦合性与隐蔽性,主要分为四类。自然灾害风险不可控且破坏力强,极端水文事件致水位超警戒线,干旱削弱调节与发电能力,蓄水诱发地质灾害,强震对地震带水电站威胁毁灭性。工程结构与设备风险源于内部物理属性及性能退化,大坝长期受高水头压力有碳化、裂缝等隐患,机电设备持续运行会机械磨损、绝缘老化,金属结构腐蚀与空蚀影响调度精确性与安全性^[1]。运行管理与人为风险源于管理体系漏洞和人员行为不确定性,误操作、维护保养不当、应急管理能力缺失都会埋下隐患。网络安全风险随自动化、信息化提升而凸显,恶意攻击者可能篡改指令、窃取数据,其破坏力不亚于传统物理风险。

2 水电站综合风险预警体系构建

针对上述多元化的风险,必须构建一个覆盖全面、反应灵敏、决策科学的综合风险预警体系。该体系应遵循“全面感知、智能分析、分级预警、快速联动”的原则。

2.1 多源异构信息感知层

多源异构信息感知层构成了整个预警体系的“感官”基础,其核心任务是实现对水电站内外部风险要素的全天候、全方位、自动化数据采集。这一体系不仅包括布设于大坝本体上的GNSS位移监测站、静力水准仪、测斜仪、渗压计和应变计等,用以实时捕捉大坝的变形、渗流及应力应变状态;还包括针对水轮发电机组、主变压器等核心机电设备的振动、温度、局部放电及油色谱在线监测系统,以精准刻画设备的健康状况。同时,该感知层还需无缝集成流域水文自动测报系统、库区雨量遥测站、区域气象雷达数据以及地质灾害专业监测网络的信息,从而对外部水文、气象和地质环境变化形成动态感知^[2]。此外,对运行人员的操作行为进行日志记录与视频分析,也是评估人为操作风险不可或缺的一环。只有将这些来自不同维度、不同格式的数据进行全面汇聚,才能为后续的风险分析提供坚实的数据底座。

2.2 智能分析与风险评估层

智能分析与风险评估层是预警体系的“大脑”,负责将海量、原始的感知数据转化为有价值的决策信息。首先,需要建立一个统一的大数据融合平台,打破传统各专业子系统间的数据壁垒,实现多源异构数据的标准化接入、清洗、存储与关联。在此基础上,运用层次分析法(AHP)、模糊综合评价或贝叶斯网络等成熟的定量方法,构建针对不同类型风险的量化评估模型。例如,可以将大坝的变形速率、渗流量变化趋势、库水位涨落等多个关键指标进行加权融合,计算出一个能够综合反映大坝当前安全态势的风险指数。更为重要的是,应积极引入人工智能技术以提升分析的深度与精度。利用支持向量机(SVM)、随机森林(RF)等机器学习算法,可以从历史故障数据中学习规律,建立设备故障的早期预测模型;而长短期记忆网络(LSTM)等深度学习模型,则擅长于处理振动、声学等复杂的时间序列信号,能够识别出人眼难以察觉的微弱异常模式。进一步地,通过构建水电站领域的知识图谱,将设备、部件、故障现象、维修案例等实体及其逻辑关系进行结构化表达,可以极大地辅助系统进行根因追溯和智能诊断,使风险评估从简单的阈值报警迈向深层次的因果推理。

2.3 分级预警与响应联动层

分级预警与响应联动层是连接风险分析与实际行动的“神经中枢”,确保预警信息能够被有效接收并转化为具体的防控措施。该层通常采用四级预警机制,即蓝色(低风险,需关注)、黄色(一般风险,发布预警)、橙色(较大风险,严重预警)和红色(重大风险,紧急预警),每一级都对应着明确的量化阈值、判定标准以及标准化的响应流程。预警信息的发布必须高效、精准,通过监控中心可视化大屏、移动终端APP推送、短信通知乃至现场声光报警等多种渠道,确保相关责任人能够在第一时间获知风险状况。最关键的是,预警必须与应急响应实现深度

联动。当系统判定风险等级达到预设阈值时,应能自动触发相应的应急预案^[3]。例如,在接收到红色地质灾害预警后,系统可自动执行一系列预设动作:关闭进水口事故闸门以隔离水源、启动柴油发电机保障厂用电、并向下游相关单位发送撤离警报。这种从风险识别到自动执行的闭环联动,是将预警价值最大化的核心所在。

3 基于风险导向的精细化运行管理模式

风险预警的最终目的是服务于更安全、更高效的运行管理。因此,必须将风险理念贯穿于运行管理的全过程。

3.1 全生命周期风险管理

全生命周期风险管理强调将风险管控的视野从传统的运行阶段向前延伸至规划设计与施工建设,并向后拓展至退役报废,形成一个完整的闭环。在规划设计阶段,就应将潜在的自然灾害风险纳入核心考量,通过科学的选址、合理的工程布置和冗余的安全设计,从源头上规避或减轻未来可能面临的风险。施工建设阶段则是风险管控的基石,必须通过严格的质量管理体系,确保工程实体的施工质量完全满足甚至超越设计要求,为电站未来数十年的安全运行奠定坚实的物质基础。运行维护阶段无疑是风险管理的核心战场,需要依托前述构建的综合预警体系和精细化管理手段,实现对各类风险的动态、精准管控。而在电站服役末期,科学的退役评估与规划同样重要,需对老旧设施进行全面的安全鉴定,并制定周密的拆除或改造方案,彻底消除遗留的历史风险,完成全生命周期的最后一环。

3.2 预测性维护(PdM)替代预防性维护(PM)

运行维护策略的革新是提升管理效能的关键。传统的预防性维护(PM)主要依据固定的运行时间或周期进行,这种方式容易陷入“过维护”造成资源浪费,或“欠维护”导致设备带病运行的两难境地。相比之下,基于风险预警的预测性维护(PdM)是一种革命性的转变,它完全由设备的实时健康状态所驱动。当在线监测系统捕捉到设备性能开始出现劣化趋势,但尚未达到故障临界点时,智能分析平台便会自动生成精准的维护工单,提示运维人员在最佳时机介入^[4]。这种“按需维护”的模式,不仅能够最大限度地延长设备使用寿命,避免突发性故障带来的巨大损失,还能显著优化备件库存和人力资源配置,实现安全效益与经济效益的双重提升。

3.3 标准化与智能化操作

操作过程的标准化与智能化是防范人为失误、保障运行安全的另一道重要防线。通过将复杂的倒闸、启停机等操作流程固化为电子操作票,并将其与现场设备的实时状态进行深度绑定,系统可以在每一步操作前自动校验逻辑的正确性与安全性。对于任何可能引发误操作或危及设备安全的指令,系统将实施强制性的防误闭锁,从根本上杜绝人为疏忽带来的风险。同时,借助虚拟现实(VR)和增强现实(AR)技术,可以构建高度逼真的电站三维仿真环境,用于对运行人员进行沉浸式的技能培训和应急演练。这种身临其境的体验远胜于传统的桌面推演,能够有效提升人员在面对真实险情时的心理素质和处置能力。

3.4 安全文化与责任体系

无论技术如何先进,制度如何完善,最终的执行主体依然是人。因此,培育深入人心的安全文化是风险管理的软实力保障。必须建立起覆盖从最高管理层到一线操作员工的全员安全生产责任制,确保每个岗位都清晰知晓自身的安全职责与边界。通过常态化开展安全事故警示教育、岗位风险辨识活动以及安全知识竞赛等形式,不断强化员工的安全红线意识,让“安全第一”的理念内化于心、外化于行。同时,建立正向的激励机制,对在风险隐患排查、应急处置中表现突出的个人或团队给予表彰和奖励,营造出人人关心安全、人人参与安全的良好氛围,从而构筑起一道坚不可摧的人文安全屏障。

4 前沿技术赋能与未来展望

4.1 数字孪生技术的应用

数字孪生技术为水电站管理带来范式级变革。它构建出与物理电站完全同步、实时互动的数字化镜像,让管理者能直观“透视”电站内部。通过查看大坝实时应力云图、机组温度场分布、水流三维动态流态等,实现全景式、沉浸式监控。其强大的仿真推演能力,使管理者能在虚拟环境模拟洪水漫坝、强震袭击等极端场景,反复测试优化应急预案,确保真实世界中的有效性。结合人工智能算法,还能自主进行多目标协同优化,为水库联合调度、机组最优组合、年度检修计划排定等复杂决策提供科学依据。

4.2 人工智能的深度融合

人工智能正从辅助工具的角色,逐步进化为水电站运行管理的核心驱动力。未来的AI系统将具备强大的自主学习与进化能力,能够持续不断地从电站积累的海量新数据和新事件中汲取知识,自动优化其底层的风险评估模型和故障预测算法,使得整个预警系统越用越精准、越用越智能。此外,AI的跨域关联分析能力将揭示出更多隐藏在复杂系统背后的深层规律。例如,通过分析多年的历史数据,AI可能会发现某种特定的水文条件(如连续小流量后的骤增)与某型号水轮机特定轴承的振动加剧之间存在强相关性,从而提前发出专项预警,指导运维人员进行针对性检查,实现真正的预见性管理。

4.3 云边协同架构

云边协同架构为智能化应用高效运行提供支撑。未来水电站信息系统架构将普遍采用“云-边-端”协同模式。在现场侧部署边缘计算节点,对振动、温度等关键实时数据进行本地高速处理和初步分析,满足毫秒级响应需求,还能过滤无效数据,减轻网络传输和云端计算压力。云计算中心则负责大规模历史数据存储、复杂AI模型训练以及多电站全局性、战略性决策分析任务。这种架构既保证本地控制实时性与可靠性,又发挥云端资源集约化与智能化优势,为构建高效、弹性智慧水电站筑牢技术底座。

5 结语

水电站安全运行是复杂系统工程,涵盖技术、管理、人员等多层面。本文梳理水电站风险,构建“感知-分析-预警-联动”综合风险预警体系,提出以风险为导向、全生命周期视角的精细化运行管理模式。研究发现,传统人工巡检和经验判断难满足现代大型水电站安全管理需求,需深度融合先进监测技术、智能算法与科学管理理念,实现风险早发现、预警、处置。展望未来,以数字孪生和人工智能为核心的智慧水电站是必然趋势。打造能与物理世界实时互动、自主学习决策的“数字大脑”,可使风险预警更精准、运行管理更高效,为国家能源、水资源和生态安全筑牢智能防线,这是技术革新与管理理念跃迁,对推动水电行业高质量发展意义深远。

[参考文献]

- [1]潘炳锬,李磊.DG水电站环境风险分析与预警机制的建立[C]//中国大坝工程学会.水库大坝智慧化建设与高质量发展.华电西藏能源有限公司大古水电分公司,2023:398-410.
- [2]张永春.水电站运行风险评估与应急管理体系构建[C]//重庆市大数据和人工智能产业协会,西南大学,重庆工商大学,重庆建筑编辑部.人工智能与经济工程发展学术研讨会论文集.甘肃电投大容电力有限责任公司,2025:885-888.
- [3]黄永红.中小型水电站运行管理中的问题及对策[J].新农村,2024,(04):37-39.
- [4]任良均.梯级水电站运行管理模式优化探索与实践[J].电气技术与经济,2023,(01):180-183.