

水利工程预防性养护体系构建与实施路径

李 琦

黄河万家寨水利枢纽有限公司 山西 太原 030001

摘 要：水库混凝土坝是国家重大公共设施，其安全稳定运行及使用寿命对社会经济发展和人民生命财产安全至关重要。传统的“坏了再修”被动维修方式已无法满足当前混凝土坝管理工作要求，建立科学化、系统化预防性养护机制迫在眉睫。从全生命周期理念出发，介绍了水库混凝土坝预防性养护特点，提出由状态监测、评估诊断、预警决策、养护执行、效果反馈构成预防性养护体系框架及其各个子系统具体功能和相互关系。此外还就如何落实这一预防性养护体系提出了五点建议：加强相关法律法规建设；提供技术支持；合理配置资源；提高养护人员素质；整合信息系统。研究表明，要真正做好水库混凝土坝预防性养护工作就必须做到由被动应对到主动预防、由凭感觉经验到以数据分析为基础、由单一局部到整体协调兼顾、由一时一事到长期持续这四个方面转变，才能最终实现“监测-评估-预警-养护-评价”。

关键词：水库混凝土坝；预防性养护；体系构建；实施路径

引言

众多混凝土坝都是上世纪五十年代到七十年代修建完成，已经运营几十年，普遍存在老化失修、设施老化、隐患积累现象。传统的以故障维修和事后处理为主要方式的养护方法具有很大的滞后性和被动性，不能很好地遏制大坝性能衰退速度，也不能防止由于突然故障造成安全事故。预防性养护的概念最早起源于设备管理中，在工程性能明显下降前采取积极措施来延缓衰退过程，延长使用寿命，减少整个寿命周期费用。近年来该概念逐渐被应用于混凝土坝管理当中，但是其理论还不够成熟，实践也还处于摸索期。目前大多数都是针对某一项养护技术开展的研究工作，很少有从系统的角度出发对预防性养护体系进行全面、分层次地研究探讨。而且关于如何落实预防性养护的具体方法较少，存在很多问题，比如制度上限制、技术上的困难、资源上的不足等。

1 水库混凝土坝预防性养护体系的理论基础

1.1 水库混凝土坝预防性养护的核心特征

水库混凝土坝预防性养护不同于一般设备设施养护的特点主要有三点：第一，工程对象长期性和不可替代性，混凝土坝设计使用寿命一般在 50 年以上，而且大中型坝不可能全部拆除重来，因此预防性养护有其必要性；第二，服役环境复杂性和不确定性，混凝土坝受到水力、地震、冻融、冲刷等多种因素影响，劣化机理复杂，需要进行有效监控和预警；第三，失效后果严重

性和社会敏感性，如大坝垮塌等重大事故会造成严重影响，所以预防性养护应以安全第一为原则^[1]。

1.2 体系构建的基本遵循

建立水库混凝土坝预防性养护制度需遵循如下几个方面的要求：系统性要求，即对整个大坝及其组成部件如坝体混凝土、金属结构物、观测仪器仪表等进行统一规划、统一管理；预防性要求，在故障发生之前采取措施防止其出现，把问题消灭在萌芽状态；灵活性要求，随着大坝老化程度加深以及外部条件改变而相应改变养护工作内容及方式；经济性要求，在保证大坝安全可靠运行基础上尽量节省开支；规范化要求，有一套完整的技术标准和操作规程指导养护活动开展并实现有据可查。

2 水库混凝土坝预防性养护体系的总体架构设计

2.1 体系的目标层次与功能定位

预防性养护体系建设总体目标分为三个层面：战略目标保证水库混凝土坝长久安全使用、延长大坝使用寿命、减少整个寿命周期内花费资金；战役目标是使大坝处于良好工作状况下、做出合理养护决定、采取正确养护措施；战术目标是让各个子系统协调运作、各个环节形成闭合回路、各种资源得到充分利用。该系统应具有五项主要功能：感知能力，不断获取有关工程信息；诊断能力，发现衰退方式以及判断其严重程度；预报能力，预测未来发展趋势以及估计剩余寿命；决策能力，制定最优保养计划；操作能力，安排保养工作并且检查

其效果。

2.2 “五子系统”体系架构

本文提出一种基于状态监测子系统、评估诊断子系统、预警决策子系统、养护实施子系统以及效果评价子系统的预防性养护方法,专门针对水库混凝土坝。

2.2.1 状态监测子系统

负责采集大坝结构响应、环境荷载、运行工况等相关信息。监测内容主要包括变形、渗流、应力应变、裂缝、冲刷、混凝土碳化、钢筋锈蚀等方面内容,同时还包括坝址区地质稳定性、水位变化、温度等外界因素。监测方法综合运用在线自动监测以及离线定期检查两种手段,其中前者主要针对持续性动态监测,在线布置在重要位置的各种类型的传感器(例如光纤光栅、渗压计、倾角仪等)可以每隔几分钟或者几秒钟上传一次数据;而后者主要是对一些具体的部位进行仔细检查,比如用无人机搭载高清晰照相机或者红外热像仪进行外观巡视,或者使用探地雷达、超声波测厚仪等进行局部无损检测来补充自动化的监测在范围或者精度方面的欠缺^[2]。

2.2.2 评估诊断子系统

负责数据处理及状态识别工作,包括数据预处理、特征提取、模式识别、劣化评估等工作。此模块先对手头采集的数据进行去噪、滤波以及归一化操作,去除噪声影响和系统误差;再利用统计学手段、信号处理技术(如小波变换、傅里叶分析)、机器学习方法(如支持向量机、随机森林、深度神经网络)在大量时间序列数据中挖掘出反映大坝状态的重要特征;最后根据国家或行业制定的相关规定(例如:《混凝土坝安全鉴定规范》),判断目前大坝的技术状况并指出造成这种状况的原因是什么(比如:结构性裂缝、混凝土冻融、渗漏、坝基沉降等问题)。

2.2.3 预警决策子系统

负责根据评价结果发出警报以及制定养护计划。系统设定三种级别的报警级别:黄色报警表示轻微的问题,需要提高检查频率或者进行专门检测;橙色报警表示严重问题,说明大坝已经不能正常使用,在下一期维护之前应该对其进行处理;红色报警表示接近破坏或者有突然倒塌的风险,必须马上启动应急预案并且采取行动^[3]。而决策单元在提出养护计划的同时还需要考虑到混凝土坝类型(例如重力坝、拱坝)、劣化方式、可分配资金数量、施工时间窗口、环境保护等因素的影响,在此基础上使用多种方法(例如遗传算法、粒子群优化等)或者规则推理来确定最佳的时间点、养护方法(例

如表面裂缝修补、化学灌浆、排水系统疏通、防碳化涂层)以及资源分配方案还有预期的效果预测。

2.2.4 养护实施子系统

负责把决策方案落实到现场施工,包括养护工艺选取、施工组织安排、质量管理、安全管理等内容。根据不同的病害情况,系统可以调用合适的成熟的方法,比如对于坝体表面轻微裂缝用聚合物砂浆进行修补,对于内部渗漏孔隙使用高压化学灌浆,对于金属闸门部件涂刷防锈漆,对于排水孔淤堵进行高压水冲洗或机械疏通,在施工中利用数字施工平台下发任务、查看进度、记录材料来源以及工人考勤等,保证每一个环节都满足要求;并且嵌入了安全风险评估及应急响应机制,对高空作业、有限空间作业等危险工作进行实时监测并及时发出警报^[4]。

2.2.5 效果评价子系统

此子系统在养护后的一段时间内(例如7天、30天或者一个水文年)对大坝的关键性指标进行再次检测及评价,对比养护前后的渗流量、裂缝宽度和坝体位移等的变化情况,结合专家意见以及运行管理单位的意见来判定此次养护的效果是否满足要求。该结果不仅仅用于本次养护工作完成时的存储,而且也是用于改进以后的工作计划、设定新的警戒线以及改进决策模型的一个重要参考依据,进而使这个系统逐渐地实现更高层次上的自我学习和发展。

2.3 子系统间的衔接机制

五个子系统之间有密切的逻辑联系以及信息流动关系:状态监测系统向评估诊断系统提供基础数据,评估诊断后信息传到预警决策系统,预警决策发出指令给养护实施系统,养护完成之后的信息返回到评价系统,评价结果返回到状态监测系统以便进一步监控。这使整个系统具有自适应性和不断完善的能力。系统运作需要有一致的数据格式、接口标准以及通信协议以保证各个子系统之间良好配合协调工作。

3 水库混凝土坝预防性养护体系实施路径

3.1 制度标准建设路径

制度标准是预防性养护工作正常开展的基础条件。一是要出台专门针对水库混凝土坝预防性养护的规定,规定各级管理部门责任分工、工作程序以及考核标准,把预防性养护作为大坝运营管理单位的法定职责;二是要健全相关技术标准,包括监测布置、评价方式、警戒线设定、养护手段、效果检查等方面的技术导则,形成国家、行业、企业相结合的技术标准体系;三是要实行

养护档案管理,实现从工程建设开始到报废整个过程中的养护内容均可追踪、查阅和审查;四是要有奖惩措施,将预防性养护执行情况纳入工程管理绩效考核内容之中,对于积极预防并且取得良好成绩的单位进行奖励。

3.2 技术支撑保障路径

一方面,要加强技术研发工作,在现有基础上进一步推广光纤传感、无人机巡查、水下机器人检测以及卫星遥感等新技术的应用,扩大监测范围、提高监测精度、增加监测频率;另一方面要加大科研力度,开展基于数字孪生的大坝健康状态在线模拟及预测的研究,结合物理模型和数据驱动的方法预测混凝土坝劣化的趋势;同时还要加强技术研发,建设水库混凝土坝预防性养护决策支持系统,整合专家经验、优化方法、经济评价等多种工具为管理者提供帮助;最后还要加强技术创新,研制出高性能修补材料、绿色环保防锈技术和水下修补技术等提高养护效果。

3.3 资源配置优化路径

预防性养护需有充足、稳定的资金支持。从资金上讲,要设立预防性养护专项资金,根据坝型、大小、服役年限以及风险程度等计算出每年所需养护费用并列入政府财政支出计划,此外可考虑借鉴国外经验采用保险方式转嫁较大养护风险;在材料上要建设区域性养护物资储备库,对于一般性养护材料及零配件进行集中存储、统一调拨减少小批量采购费用;在设备上实行分级制,大型水库安装实时监控装置及专业养护机械,而小型水库可通过区域共用平台租借所需的机械设备。

3.4 人员能力提升路径

专业队伍是预防性养护工作的实施者。要建立层次分明、类型多样化的培训机制:针对各级管理者开展预防性养护理念及制度的学习;针对技术人员开展状态识别以及决策学习;针对工人开展养护技术和安全操作培训。实行持证上岗制度,在监测、评估、养护等方面的重要岗位进行资质考核。搭建专业技术交流平台,不定期开展以案说法、技能竞赛、经验分享等形式的技术交流活动。加强与高等院校、研究机构的合作,在合作办学、科研项目上引进培养复合型混凝土坝养护人才。

3.5 信息平台整合路径

信息平台是整个系统的指挥中心。需要建立统一的水库混凝土坝预防性养护管理信息系统,把各种类型的大坝基本信息、监测数据、评价结果以及养护工作情况等汇总并进行共享。平台采用“一库一图一网”的方式:“一库”为大坝养护数据库,包含工程相关资料、监测数据、养护情况等结构化或非结构化的信息;“一图”是大坝养护“一张图”,利用GIS进行坝址位置、等级评定、警报等内容展示;“一网”是连接各个管理部门和养护实施单位的工作协作平台,可以完成任务下达、过程监控、结果评价等工作。该系统要具有数据汇集、智能化分析、提供参考意见、过程回溯等功能,并能够支持移动端作业。

4 结语

本论文提出建立水库混凝土坝预防性养护体系,使管理从被动应急向主动预防转变。该体系包括状态监测、评估诊断、预警决策、养护实施及效果评价等五个方面内容以及制度标准、技术支持、资源分配、人员素质与信息化平台五个方面的支持措施和支持手段。考虑混凝土坝长期运行、复杂环境和高安全性等特点,设计了一个目标明确、环节紧密、可操作性强框架。将来在感知技术、数字孪生、人工智能不断进步过程中,预防性养护会更加智能、准确、协调。今后需进一步开展三方面工作:一是研究确定最佳养护时机及最低养护成本方法;二是通过大数据分析找出混凝土坝劣化原因;三是对预防性养护带来的社会效益进行计算,作为政府决策参考。

参考文献

- [1] 张建云,王国庆,刘翠善.水利工程安全运行与风险管理研究进展与展望[J].水科学进展,2022,33(3):345-356.
- [2] 李宏恩,王建,盛金保.水库大坝预防性维护体系框架设计[J].水利水运工程学报,2024,47(2):1-10.
- [3] 王浩,王建华,秦大庸.基于全生命周期的水利工程资产管理研究[J].水利学报,2021,52(8):895-904.
- [4] 陈生水,钟启明,李国英.堤防工程风险评价与预防性养护技术综述[J].岩土工程学报,2023,45(5):897-908.