

基于全生命周期的水利水电工程运维管理策略分析

候伟

沙湾市农村饮水安全工程管理站

DOI:10.32629/etd.v7i4.20259

[摘要] 传统的水利水电工程运维管理模式多聚焦于运行阶段,与设计建设及退役阶段存在显著脱节,导致全生命周期成本高企与管理效能低下。本文首先审视了当前水利水电工程全生命周期运维管理的现状,揭示了规划设计阶段与运维需求衔接不足,以及运行维护与退役报废阶段管理断裂的核心问题。进而,系统识别了现行管理模式中的关键障碍,主要包括阶段间信息传递衰减形成数据断层、运维资源配置与设备老化速度不匹配,以及退役处置环节缺乏前置评估与备选方案。在此基础上,本文构建了一套面向全生命周期的运维管理策略体系,重点围绕设计建设阶段的可运维性预置规则、运行期状态监测与维护计划的联动方法、中期改造扩容阶段的资产延续管理、临近退役期的状态评估与处置决策流程,以及全周期信息传递的节点管控要求五个维度展开论述。该策略体系旨在打破阶段壁垒,实现从项目构思到退役终结的闭环管理,为提升水利水电工程整体效益与安全保障水平提供系统的理论框架与实践指引。

[关键词] 水利水电工程; 全生命周期; 运维管理; 可运维性; 状态监测; 资产管理; 信息传递

中图分类号: F416.9 **文献标识码:** A

Analysis of Operation and Maintenance Management Strategies for Water Conservancy and Hydropower Projects Based on the Whole Life Cycle

Wei Hou

Shawan Rural Drinking Water Safety Project Management Station

[Abstract] The traditional operation and maintenance management mode of water conservancy and hydropower projects mostly focuses on the operation stage, which is significantly disconnected from the design, construction, and retirement stages, resulting in high lifecycle costs and low management efficiency. This article first examines the current status of the full life cycle operation and maintenance management of water conservancy and hydropower projects, revealing the core issues of insufficient connection between planning and design stages and operation and maintenance requirements, as well as the management gap between operation and maintenance and retirement and scrapping stages. Furthermore, the system identified key obstacles in the current management mode, mainly including data gaps caused by information transmission attenuation between stages, mismatch between operation and maintenance resource allocation and equipment aging speed, and lack of pre evaluation and alternative solutions in the retirement disposal process. On this basis, this article constructs a set of operation and maintenance management strategy system for the entire lifecycle, focusing on five dimensions: pre-set rules for operability during the design and construction phase, linkage methods for monitoring and maintenance plans during the operation phase, asset continuity management during the mid-term renovation and expansion phase, status assessment and disposal decision-making process near retirement, and node control requirements for information transmission throughout the lifecycle. This strategic system aims to break down stage barriers, achieve closed-loop management from project conception to retirement, and provide a systematic theoretical framework and practical guidance for improving the overall efficiency and safety assurance level of water conservancy and hydropower projects.

[Key words] water conservancy and hydropower engineering; Full lifecycle; Operation and maintenance management; Operability; Status monitoring; Asset management; information transmission

引言

随着水利水电工程规模越来越大、系统越来越复杂,其运行维护工作所遇到的困难也越来越严重。工程的建设、运行、维护和退役在传统意义上是相互独立的,分别由不同的部门来管理^[1]。割裂的管理模式容易造成前期设计没有考虑到后期运维的便利性,运行阶段无法得到完整的建设期数据,退役决策缺少对设备长期运行历史的系统评价。结果就是运维成本无法控制、设备非计划停机风险增大、资产处置随意性大、资源浪费严重。全生命周期管理思想认为把工程从规划设计、建设施工、运行维护到最终退役报废的全过程看作是一个有机的整体,追求整体效能最佳和总成本最低。因此把全生命周期的思想深入到水利水电工程运维管理当中,创建起贯穿各个阶段的系统性策略,已经成了行业发展的迫切要求。本文主要对现有的问题进行系统的分析,进而提出一套有实践指导意义的全生命周期运维管理策略体系。

1 水利水电工程全生命周期运维管理的现状审视

1.1 规划设计建设阶段对运维需求的衔接不足

水利水电工程项目初期决策的重点是技术可行性、投资概算和短期建设目标,对于水利水电工程长达数十年到上百年的运维期考虑不够。设计图纸为了节约初期投资或者简化施工,忽略了将来检修时所需要的操作空间和通道^[2]。水轮机室、变压器廊道空间布局只满足安装要求,没有给大型部件的吊装、运输留出足够的裕度,造成后期更换工作十分困难、成本极高。从材料的选择和工艺的设计上来说,有时会用初期造价低的方案,但是没有对材料在长期水压、腐蚀环境下的耐久性以及可更换性做出足够的评价。建设过程中,施工方更重视进度和验收,对应该向运维方移交的数据类型、格式、质量没有强制性的规定,大量的安装调试数据散落在施工日志或者个人的记忆里,没有形成资产信息,造成信息在移交节点上严重流失。

1.2 运行期维护与退役报废阶段的管理断裂

水利水电工程进入运行期以后,管理重心转向保证发电、防洪等功能的运行,维护工作一般按照既定的规程或者事后响应。对于设备老化规律的认识大多依靠经验,缺少和设计寿命、初期性能参数的主动联系分析。工程运行几十年之后进入性能衰退期,是否大修或者直接退役,其决策常常是被动的、突发的。退役阶段的管理就更薄弱了,一般被看作是拆除清理的过程。缺少对设备全生命周期状态记录的退役前系统性评价,造成一些具有利用价值的部件被废弃,或者本应该安全封存的处理不当引起环境风险^[3]。运行阶段积累下来的大量故障记录、维修历史和性能监测数据很少被系统地整理出来,并传递给退役决策方,造成最终处置方案缺少足够的技术支持,不能达到资产残值最大化和环境风险最小化的目的。

2 现行运维管理模式中的关键障碍识别

2.1 阶段间信息传递衰减与数据断层

信息从产生到消亡的过程中,存在着天然的衰减和断层。水利水电工程设计阶段的仿真计算书、建设阶段的隐蔽工程影像、

安装过程的偏差记录、运行初期的磨合数据等,对预测设备长期行为、诊断潜在故障有很重要的作用。但是由于缺少统一的数据交付标准和信息平台,很多重要的数据会随着项目的阶段移交而消失或者被封存到不同的责任主体的档案柜里。运维人员所获得的设备信息只是最后的图纸和简要的操作手册,并且存在数据孤岛现象。

2.2 运维资源配置与备件储备策略的失当

水利水电工程运维资源的分配,尤其是备品备件的储备,常常处于两难的境地。另一方面,为了避免因为缺少零件而造成长时间的停工,管理机构会过多地储备,占用大量的流动资金和仓储空间,一些备件直到设备淘汰都没有被使用过,造成了浪费。另一方面,对一些非标件或者长周期的零部件来说,储备量不足,一旦出现故障,就要经过很长一段时间的采购或者定制才能得到,从而影响到工程的可用性。由于备件策略没有和设备真实的衰老速度、故障模式以及供应链特性动态关联起来,所以才产生了上述矛盾。传统的静态定额管理方法不能适应设备群体在各个生命阶段风险的变化,造成资源配置的全局效益低^[4]。

2.3 退役处置环节缺乏前置评估与备选方案

水利水电工程退役决策一般是在接近设计寿命的终点或者存在重大安全隐患的时候才会被提出,属于末端管理。此种情况下缺少工程运行后期才开始的、系统的退役前置评价。评价内容应该包含结构安全剩余寿命、主要设备技术状况、改造技术经济性、拆除环境和社会影响等^[5]。由于没有前置评估,不能事先规划出各种备选方案,比如局部更新延寿、功能降级运行或者生态化拆除等等。仓促决策只能选择成本最高或者最简单的“一拆了之”方案,不但会浪费掉有使用价值的资产,还会错过通过适度改造保留工程部分功能、服务地方社区的机会,而且由于缺少详细的拆除方案,还可能导致二次环境问题的发生。

3 基于全生命周期的水利水电工程运维管理策略

3.1 设计建设阶段的可运维性前置规则

水利水电工程可运维性应该和安全性和经济性一起作为设计准则,强制性地规划设计阶段考虑进去。这就需要建立一个具体的前置规则。在空间布置上要制订并严格执行关键设备检修通道和更换空间的尺寸预留标准。该标准不能只根据设备本身的尺寸来制定,还要考虑吊装工具、人员操作空间、应急通道等方面的要求。对大型水泵水轮机转轮,其上方应留有不小于1.5倍转轮直径的净空高度,运输通道上所设的门洞宽度及承重能力应符合要求。对隐蔽工程,比如坝体内部廊道、埋设管道等,要规定可检测接口及标识的设置要求。在混凝土坝体关键受力部位预埋应力应变监测传感器接口,在埋设管道关键节点(转弯处、阀门处)上方地面设永久性、不易磨损的标识桩,接入地理信息系统。接口和标识成了未来状态评定和无损检测的基础。建设末期要确定建设期安装数据向运维平台移交的清单格式。清单要跳出传统的竣工资料范围,包含所有的主要设备及重要附件的出厂试验报告、现场安装调试记录、联调联试数据、重要焊接点的探伤报告、隐蔽工程的影像资料等,用结构化的电子格式

移交, 保证信息不被损坏, 为建设设备的“数字孪生”档案打下基础。

3.2 运行期状态监测与维护计划的联动方法

水利水电工程运行期状态监测与维护计划的联动机制是“数据采集、趋势判断、预警触发、维护执行、计划优化”这样一个闭环的过程。运行期是策略体系的主要执行阶段, 核心就是实现从被动应对到主动预知、从计划维修到状态维修的改变。联动方法第一点就是根据设备性能退化曲线来设定预防性维护触发条件。对关键设备(发电机绕组、变压器绝缘、闸门启闭机)的性能参数(振动、温度、绝缘电阻、油色谱等)实施长时间的连续监测, 并且依靠这些设备的设计基准值来创建出它的性能退化趋势模型。当监测数据偏离正常趋势, 达到预设的预警阈值而不是故障阈值的时候, 就自动发出维护工单, 安排检查或者干预。其次要创建日常运行数据同年度检修项目对应转换的规则。对全年的设备启停次数、负荷波动曲线、报警统计等数据做大数据分析, 根据分析结果来决定下一年度检修项目重点、范围和深度。以某水轮机当年频繁在振动区运行行为依据, 分析数据表明其转轮叶片存在空蚀加重的风险, 那么次年检修计划中, 该机组转轮检查、修复就应列为最优先的项目。最后, 备品备件储备定额应使用动态计算的方法。根据设备的可靠性预测结果、故障模式及影响分析、供应链响应时间、库存成本来创建备件重要性分类模型。

3.3 中期改造与扩容阶段的资产延续管理

水利水电工程运行几十年后, 由于技术更新、功能升级或者安全标准提高等原因, 一般会进行技术改造或者扩容。此阶段是资产信息延续与风险管控的关键期。首要规则就是建立改造前后设备编码和档案的连续编号规则。任何经过改造、更换的设备或者子系统, 其新部件必须在原有资产编码体系下获得一个具有继承关系的新编码, 在档案中清楚地记载改造的原因、内容、时间以及责任方, 保证资产历史信息的完整性和可追溯性。必须设置新旧系统接口兼容性测试的强制环节。改造方案设计时, 必须对接口协议、数据格式、电气参数、机械尺寸等进行兼容性评价。改造实施前后必须进行严格的联合调试和带负荷试验, 保证新系统和原有的无改动部分可以协同工作, 防止由于接口问题造成系统性故障。除此之外, 在改造过程中需要临时运行的方案也要设立明确的风险控制节点。更换主变压器时, 可能会单台主变带全部负荷运行, 这时需要制定详细的负荷控制方案、应急预案, 设置关键设备温度、油位等参数的加强监测点和报警值, 保证过渡期运行风险处于受控状态。

3.4 临近退役期的状态评估与处置决策流程

水利水电工程接近设计寿命的终点时, 就要开始系统的、标准的退役前评价和决策过程, 取代主观、仓促的决策。评价开始的时间点可以定在退役之前五年, 对设备的剩余寿命做专项评

定。评定指标要综合化, 常规的结构安全检测数据(混凝土碳化深度、钢筋锈蚀率等)之外, 还应该包括设备长期运行效能数据(机组效率衰减曲线、自动化系统故障率等), 维护成本增长趋势, 适应性评价(是否符合最新的防洪或生态泄流要求)。根据以上专项评定, 形成继续运行、降级使用或者拆除的量化判定标准。可以建立一个多指标的评分体系, 结构安全评分小于阈值A, 改造经济性评分小于阈值B的时候, 就触发拆除决策; 如果安全评分还可以, 但是运行效能评分低并且改造可行, 那么就会做出局部更新之后降级运行的决定, 比如把主力调峰电站改造成备用或者径流式电站。最后要制订详细的退役拆除阶段可利用部件和废料的分类处置清单。该清单应当根据设备档案和现场勘查情况, 在拆除之前制定出来, 确定哪些部件可以通过检测后重新利用, 哪些材料(钢材、铜材)可以回收, 哪些废弃物(含多氯联苯的电容器、废旧油脂等)需要进行专业处理为危险废物, 达到资源回收最大化和环境影响最小化的目的。

4 结束语

水利水电工程全生命周期运维管理是复杂的系统工程, 牵涉到多个阶段、多个专业。本文所建立的策略体系是从现状出发, 找出主要障碍之后, 再系统地提出规划设计、运行维护、中期改造直到报废的各个环节的策略。其主要价值就是把可运维性放在设计之前, 把状态监测与维护结合起来, 把资产信息贯穿于改造之中, 把数据评估应用于退役, 并且依靠强制的信息节点控制来保证策略的落实。推行该体系可以改变重建设、轻运维、忽视退役的传统观念, 使水利水电工程管理由粗放型向精细化、智能化、可持续化转变, 从而达到水利水电工程全生命周期安全性、经济性、社会效益三者综合最优的目的。随着物联网、大数据、人工智能等技术的发展, 该策略体系会得到更好的技术支撑, 执行效率、决策的科学性也会随之提高。

[参考文献]

- [1] 邵银霞, 周洁, 汪玲玲, 等. 基于全生命周期策略的排水养护信息化管理新模式[J]. 中国给水排水, 2024, 40(8): 17-21.
- [2] 薛小龙, 张鸣功. 重大工程由建设转向运维的过渡机制——港珠澳大桥的实践创新[J]. 管理世界, 2023, 39(7): 158-179.
- [3] 席伟. 水利工程全生命周期智慧化运维管理模式创新[J]. 城镇建设, 2025(22): 244-246.
- [4] 姜健康, 吕金榜. BIM技术在水利工程全生命周期中的应用研究[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2023(5): 3.
- [5] 丘仕能, 黄鹏嘉. 基于BIM的大藤峡水利枢纽工程施工进度管理[J]. 人民珠江, 2023, 44(1): 42-46.

作者简介:

侯伟(1991—), 男, 汉族, 河南永城人, 大学本科, 工程师(水利专业), 研究方向: 水利工程管理。