

水利工程精细化运行管理内涵与实施路径研究

李 琦

黄河万家寨水利枢纽有限公司 山西 太原 030001

摘 要：水库尤其是混凝土坝工程的运行管理正经历从传统粗放模式向现代精细模式的深刻转型。本文在系统梳理混凝土坝运行管理现实困境的基础上，界定了水库混凝土坝精细化运行管理的核心内涵，提出了涵盖全要素辨识、全流程管控、全时段监测、全生命周期优化的四维理论框架。研究认为，精细化运行管理的本质是通过制度、技术、标准、信息的系统集成，实现管理对象精确化、管理责任具体化、管理过程规范化、管理效果可量化。围绕这一内涵，本文从标准体系构建、信息技术融合、组织流程再造、绩效评估机制四个维度设计了实施路径，并对各路径的关键节点与内在逻辑进行了深入阐释。研究强调，精细化不是碎片化的技术堆砌，而是一套以精准决策为目标的系统性管理哲学，其成功实施依赖于标准、数据、技术与组织的协同演进。

关键词：水库混凝土坝；精细化运行管理；内涵界定；实施路径

引言

长期以来，我国混凝土坝工程运行管理以经验驱动、人工操作为主，制度体系碎片化、技术手段滞后、信息孤岛严重等问题普遍存在。面对工程老化加剧、运行风险上升、管理人力有限的现实约束，传统管理模式在调度决策、安全监测、维护保养、应急响应等环节的粗放特征日益凸显。近年来，水利部明确提出推进水利工程运行管理现代化，倡导引入精细化管理理念。然而，现有研究多聚焦于某一具体技术或某一类工程的管理优化，对精细化运行管理的理论内涵缺乏系统性阐释，对实施路径的整体设计尚不清晰。部分实践出现了“重技术轻制度”“重硬件轻数据”“重短期达标轻长效运行”的倾向，精细化流于形式。基于上述问题，本文旨在回答两个核心命题：水库混凝土坝精细化运行管理的内涵究竟是什么？如何构建可操作、系统化的实施路径？

1 水库混凝土坝运行管理的现实审视

1.1 管理模式的演进历程

我国水库混凝土坝运行管理大致经历了三个阶段。第一阶段为建国初至改革开放前的“行政指令型”管理，以政府直接管控、人工巡查记录为主，管理目标聚焦工程安全与基本功能实现。第二阶段为改革开放后至二十世纪末的“制度规范型”管理，各类管理办法与技术标准相继出台，管理逐步走向规范化。第三阶段为二十一世纪以来的“信息化驱动型”管理，自动化监测、远程控制、地理信息系统等技术开始应用。然而，这三个阶段的演进更多表现为技术工具的叠加，尚未实现管理理念的根本变革，粗放底色依然存在。

1.2 突出的结构性矛盾

其一，制度刚性与操作弹性的矛盾。大量规章制度的约束性条款因缺乏细化操作指南，在执行层面被选择性落实，形成“制度高空悬挂、落地变形走样”的困境。其二，数据丰富与信息贫瘠的矛盾。传感器布设密度持续增加，但数据分散在不同系统中，格式不统一、质量参差不齐，难以转化为精准的决策支持信息[1]。其三，责任明确与追溯困难的矛盾。岗位职责文本描述清晰，但因过程记录缺失、交接机制不健全，问题发生后往往难以精准定位责任环节。其四，标准统一与工程个性的矛盾。现行技术标准追求普适性，难以充分覆盖不同坝型、不同坝高、不同库容、不同老化程度的混凝土坝个性需求。

1.3 精细化转型的必要性与紧迫性

上述矛盾的叠加效应导致管理效能持续衰减。以安全运行为例，部分混凝土坝的安全监测频次偏低、数据异常预警机制缺失、维护决策依赖主观判断，隐患发现时往往已进入加速发展阶段。在水资源调度方面，静态调度方案难以响应水文过程的动态变化，汛限水位动态控制、生态流量精准保障等精细化需求无法满足。面对极端天气频率强度双增的新形势，传统管理模式的容错空间被急剧压缩。因此，从“大致可控”走向“精准可控”，从“事后应对”走向“事前预防”，已成为水库混凝土坝运行管理的必然选择^[1]。

2 水库混凝土坝精细化运行管理的内涵界定

2.1 精细化管理的一般理论溯源

精细化管理源于二十世纪中期的制造业质量管理实践，其核心要义可概括为“四化”：对象精确化——管

理单元的粒度足够细；过程规范化——每个操作环节有明确标准；结果可量化——绩效能够被测量和评估；改进持续化——形成反馈驱动的优化闭环。这一理念随后被引入工程建设、医疗服务、公共管理等领域，其通用逻辑在于：通过拆解管理对象、标准化作业流程、量化绩效指标，消除模糊地带与执行变异，实现系统的稳定可控。

2.2 水库混凝土坝情境下的特殊内涵

将精细化管理一般原理迁移至水库混凝土坝运行管理领域，必须考虑三重特殊性。第一，混凝土坝具有强烈的地理空间属性，工程状态受流域水文、工程地质、气象条件等多因素耦合影响，不确定性远高于工厂车间。第二，混凝土坝的安全后果具有非线性特征，小偏差可能触发连锁失效（如坝体裂缝扩展、坝基渗漏恶化），容错阈值极低。第三，混凝土坝运行管理涉及防洪、供水、生态、发电等多目标，不同目标之间常存在冲突，精细化的本质不是单一目标的极致优化，而是多目标约束下的精准平衡^[2]。基于上述认识，本文将水库混凝土坝精细化运行管理界定为：以精准决策为目标导向，以标准体系为行为约束，以信息技术为支撑手段，以全要素数据为决策依据，实现坝体结构状态精确感知、调度指令精准执行、安全风险精密防控、维护保养精细安排的一种现代管理范式。其核心特征是“五个可”——状态可感知、过程可追溯、责任可落实、绩效可量化、风险可预控。

2.3 四维理论框架

本文提出水库混凝土坝精细化运行管理的四维理论框架，阐释其内在结构。第一维为全要素辨识。将混凝土坝分解为坝体混凝土、坝基岩体、伸缩缝、止水系统、泄洪建筑物、金属结构、机电设备、监测设施、库区水文环境等若干管理要素，每个要素进一步拆解至可独立管理的基本单元（如坝体不同高程的混凝土分区），并对每个单元的状态参数、退化规律、风险阈值进行精确标定。第二维为全流程管控。将运行管理活动划分为巡视检查、安全监测、维护保养、调度操作、应急响应、资料整编等核心流程，为每个流程制定标准化作业程序，明确输入条件、操作步骤、输出成果与质量控制节点。第三维为全时段监测。建立覆盖混凝土坝运行全生命周期的数据采集体系，对坝体变形、渗流、应力、温度等关键状态参数实施连续或高频监测，对非关键参数设定合理的监测频次，确保数据在时间维度上的完整性与连续性。第四维为全周期优化。将精细化管理视为持续改进过程，建立“数据采集—状态评估—决策

生成—执行反馈—标准修订”的闭环机制，实现管理行为的动态优化。四维之间并非并列关系：全要素辨识是精细化管理的空间基础，全流程管控是行为规范，全时段监测是时间保障，全周期优化是动力机制。四者相互支撑，构成一个有机整体。

3 水库混凝土坝精细化运行管理的实施路径

3.1 标准体系构建路径

实施路径的首要任务是构建分层分类的技术标准与管理标准体系。第一层次为通则类标准，明确精细化管理的基本原则、术语定义、总体要求。第二层次为工程类别标准，针对混凝土重力坝、拱坝、支墩坝等不同坝型，以及大型、中型等不同规模的水库，分别规定精细化管理的关键控制点与验收准则。第三层次为专项作业标准，覆盖安全监测、维护保养、调度操作等具体活动，细化到动作级操作规程。第四层次为岗位工作标准，将每个岗位的职责、权限、工作流程、输出成果、绩效指标进行精确界定。标准体系构建需处理三个关键问题。一是标准的颗粒度问题，过细则执行成本高，过粗则约束力弱，应根据风险等级确定合理粒度——对大坝坝体、坝基等高风险环节采用精细化标准，低风险环节适当简化^[3]。二是标准的动态更新问题，建立标准定期评审与快速修订机制，避免标准滞后于技术与实践发展。三是标准的可验证问题，每条标准都应配套对应的检查方法与评判依据，确保标准不是纸面文章。

3.2 信息技术融合路径

实施路径的重点是建设“感知—传输—存储—分析—决策—控制”六层技术架构。感知层部署智能传感器、视频监控、无人机巡检等设备，实现坝体变形、渗流、温度、应力及库区水文状态的全覆盖感知。传输层构建有线无线融合的通信网络，确保数据实时可靠上传。存储层建立数据中台，统一数据格式、清洗异常数据、打通信息孤岛。分析层运用数据挖掘、机器学习、数字孪生等技术，识别混凝土坝状态演化规律、预测退化趋势（如坝体徐变、碳化深度）、预警异常风险。决策层开发智能决策支持系统，集成调度规则库、案例库与优化算法，生成可执行的调度维护方案。控制层实现泄洪闸门启闭、坝顶表孔控制等关键操作的远程自动控制。技术融合需警惕“技术至上主义”。技术应为管理目标服务，而非反向驱使管理流程扭曲。应坚持三个原则：适用性原则——选择技术方案要评估投入产出比，老旧混凝土坝改造优先采用低成本适宜技术；冗余容错原则——关键监测参数（如坝体位移、渗压）应采用多种技术交叉验证，避免单一传感器失效导致信息盲区；人

机协同原则——自动决策结果应保留人工复核与干预通道,重大操作(如泄洪决策)不宜完全交由算法执行。

3.3 组织流程再造路径

标准与技术落地最终要依靠组织与人员。实施路径包括三个层面。第一,明确责任网格。将水库大坝管理范围划分为若干责任网格(如坝体分区、廊道、边坡),每个网格对应具体责任人,实现“事事有人管、人人有专责”。网格划分应以管理单元的自然边界为基础,兼顾工作量均衡。第二,重构业务流程。打破传统的职能条块分割,建立以工程对象为中心、以数据流动为主线的业务流程。例如,将大坝安全监测、巡视检查、维护保养三类活动整合为“状态管控”闭环,监测数据异常自动触发复核任务,复核确认后自动生成维护工单,维护完成后自动更新状态档案^[4]。第三,重塑岗位能力模型。精细化管理对人员提出复合型能力要求,需制定新的岗位胜任标准,开展系统性培训,特别加强混凝土坝结构行为解读、系统操作、异常研判等数字化技能的培养。组织再造最易遭遇执行阻力,应遵循渐进原则:选择管理基础较好的混凝土坝工程作为试点,形成可复制的经验后再逐步推广;同步优化绩效考核与激励机制,将精细化执行情况纳入绩效评价;建立容错纠错机制,鼓励主动发现与报告问题,而非隐瞒或推诿。

3.4 绩效评估与持续改进路径

没有科学的绩效评估,精细化将失去方向校准机制。实施路径首先要构建多层次绩效指标体系。指标设置遵循SMART原则——具体、可测量、可达成、相关、有时限。一级指标包括工程安全、调度效能、维护质量、管理效率四个维度。每个一级指标下分解若干二级指标,如工程安全下设异常检出率、预警响应时间、隐患整改闭合率等;调度效能下设调度方案执行偏差率、生态流量保障达标率等。二级指标进一步分解至可量化采集的三级指标(如坝体位移超阈值次数、渗流量变化率)。绩效评估的关键技术问题是指标权重确定与综合评分方法。采用层次分析法与专家赋值相结合的方式确定权重,兼顾各水库的功能定位差异——以防洪为主

的工程适当提高安全类指标权重,以供水为主的工程适当提高调度类指标权重。评估频率应分层设置:关键指标实时评估,一般指标月度评估,综合绩效季度评估。持续改进是绩效评估的目的而非终点。建立“评估—分析—反馈—改进”四步循环机制。评估发现异常指标后,组织根因分析,判断是标准不合理、技术不到位、执行不规范还是外部条件变化所致,据此制定针对性改进措施,并将措施固化到标准、流程或系统中。同时建立绩效数据纵向对比与横向对标机制,识别管理短板与最佳实践。

4 结语

本文从理论层面界定了精细化运行管理的核心内涵——以精准决策为目标、以标准体系为约束、以信息技术为支撑、以全要素数据为依据的现代管理范式,并构建了涵盖全要素辨识、全流程管控、全时段监测、全周期优化的四维分析框架。在实施路径层面,从标准体系构建、信息技术融合、组织流程再造、绩效评估与持续改进四个维度设计了系统化方案,强调四者之间的协同演进关系。精细化不是一蹴而就的工程,而是一场持久的管理变革。其本质是以确定性管理应对不确定性风险的系统工程。未来研究可从三个方向深化:一是探索不同坝型、不同规模混凝土坝的精细化分级分类实施模式;二是研究精细化运行管理投入产出效益的量化评估方法;三是关注人工智能大模型等新一代技术在混凝土坝运行管理中的融合路径与风险边界。

参考文献

- [1]王浩,张建云,王建华.智慧水利理论框架与技术体系研究[J].水利学报,2021,52(5):515-524.
- [2]李云玲,郭旭宁,王晓红.我国水利工程运行管理现代化路径探析[J].中国水利,2022(15):12-16.
- [3]刘昌军,马建明,孙东亚.数字孪生水利工程关键技术与发展路径[J].水利信息化,2023(2):1-9.
- [4]严登华,秦天玲,翁白莎.新形势下水利工程精细化调度研究综述[J].水资源保护,2021,37(4):1-8.