

数字化技术在水利工程运行管理中的应用

沈锡陵

无锡市水利工程管理中心

DOI:10.32629/etd.v6i9.20499

[摘要] 水利工程在防洪、供水、灌溉和发电等各方面起着基础性的作用,水利工程运行管理的安全性和精细化程度同工程效益的发挥密切相关。伴随着传感、通信、大数据以及人工智能这些技术的发展,数字化技术也渐渐地开始对传统的依靠人工巡查和经验判断的管理方式进行改变。本文主要研究数字化技术在水利工程运行管理中的应用,从感知、传输、应用三个部分构建了水利工程运行管理的总体技术体系,论述了工程安全监测预警、水资源调度运行控制、运维决策及全生命周期管理等各方面的应用方式和技术要点,并给出了具体的实施路径,为水利工程管理智能化转型提供一定的借鉴。

[关键词] 数字化技术; 水利工程; 运行管理; 安全监测

中图分类号: TV 文献标识码: A

The Application of Digital Technology in the Operation and Management of Water Conservancy Projects

Xiling Shen

Wuxi Water Conservancy Engineering Management Center

[Abstract] Water conservancy projects play a fundamental role in flood control, water supply, irrigation, and power generation. The safety and precision of water conservancy project operation and management are closely related to the effectiveness of the project. With the development of sensing, communication, big data, and artificial intelligence technologies, digital technology is gradually changing the traditional management methods that rely on manual inspection and experience judgment. This article mainly studies the application of digital technology in the operation and management of water conservancy projects. It constructs an overall technical system for the operation and management of water conservancy projects from three parts: perception, transmission, and application. It discusses the application methods and technical points of engineering safety monitoring and early warning, water resource scheduling and operation control, operation and maintenance decision-making, and full life cycle management, and provides specific implementation paths, providing certain reference for the intelligent transformation of water conservancy project management.

[Key words] digital technology; Water conservancy engineering; Operation management; safety monitoring

我国水利工程量覆盖面广,大部分设施服役时间长,存在设备老化、监测手段单一、信息孤岛等问题,传统的巡视方式已经不能满足工程实时状态的全面掌握。随着物联网和人工智能技术的发展,数字化技术依靠各种传感器以及数据平台把分散的物理状态转变成连续的在线监测,给破解以上难题创造了条件。厘清数字化技术在运行管理各个阶段的应用逻辑,不但是工程从被动应对到主动防御转变的重要途径,也是提高工程安全管理水平的必然要求。本文从实际应用出发,试图给水利工程管理的数字化转型赋予系统的技术参照和操作方向。

1 水利工程运行管理数字化的技术体系与构成

1.1 多源感知与数据采集

数据采集是数字化运行管理的基础,主要用各种传感器把工程物理状态变成可以测量的数字信号。雷达式水位计是采用非接触测量的方式,量程可以达到几十米,精度可以达到毫米级或者满量程的0.02%,适合于库区和闸前闸后连续观测。流量一般用声学多普勒流速剖面仪(ADCP)或者量水建筑物配合推算得到。结构安全监测用振弦式渗压计、测缝计等仪器以频率信号输出,受导线长度影响小,长期稳定性好,精度一般优于满量程的0.5%。变形监测大多使用GNSS技术,用载波相位差来解算,水平方向精度可以达到 $\pm(2.5\text{毫米}+1\text{ppm})$ 。各种传感器按照整点或者更高的频率进行自动采集,在参数变幅超过一定限度的时候才会触发加报,既考虑了经济性又考虑了时效性^[1]。采集装置

具有自检、定期标定功能,并且按照工程实际布置冗余测点,可以有效地避免由于单点失效而造成的监测盲区。

1.2 数据传输、存储与平台架构

采集数据的价值发挥要依靠可靠的传输链路和统一的平台架构。传输环节要因因地制宜,枢纽区等具备布线条件的部位用光纤做主干,保证带宽和时延;偏远测点用4G/5G公网和北斗卫星短报文互相补充,在没有公网覆盖的地方也能回传水位、雨量等重要数据。数据进入平台之后一般会形成“边缘-中心”的两级架构,边缘侧做数据预处理和本地缓存,防止网络断开造成数据丢失,中心侧依靠数据中台对多源异构数据展开清洗、统一编码以及时空对齐,创建起标准的数据资源池。平台用分层的设计把基础数据、模型计算和业务应用分离开来,使监测预警、调度运行等各个功能模块共用同一个数据底座。该架构不但消除了传统信息孤岛的弊端,而且为之后模型更新和功能拓展留出了接口,为运行管理体系持续发展打下了技术基础。

2 数字化技术在水利工程安全监测与预警中的应用

2.1 大坝渗流与变形的在线监测

大坝是水利枢纽中安全风险最大的部位,失稳常常和渗流异常、变形发展有关,渗流和变形的在线监测因此成为安全监测的主要内容。渗流监测就是布设在坝体、坝基和绕坝部位的渗压计、量水堰,对扬压力、浸润线位置、渗流量等进行实时观测,当浸润线抬高或者渗流量在相同库水位下持续增大时,一般预示着防渗体系出现劣化,需要引起注意。变形监测是用GNSS、静力水准、引张线、测斜仪等方法对坝顶水平位移、垂直沉降、坝体内部相对变形同时观测。相比于传统的手工大地测量,自动化监测可以将观测频率从原来的每月几次提高到每天甚至连续采集,使变形过程曲线更完整,有利于发现趋势性变化和季节性周期。监测数据按照统一时基入库之后,系统会自动绘制过程线、相关图和分布图,并且可以和历史同期值以及设计允许值做对比,从而给判断工程是否处于正常工作状态赋予直接的依据,而且使得长期性态分析拥有连续可靠的数值支撑。

2.2 结构安全评估与风险预警

单纯的数据采集只是把数据变成信息,才能产生管理价值,结构安全评估与预警就是这种转化的关键。系统根据设置好的多级阈值进行分级控制,以变形或者渗流设计允许值、历史最大值、统计置信区间作为判定标准,划分出正常区、注意区、警戒区,当实测值进入相应的区间时就会发出相应的提示。为了减少由于传感器漂移或者偶发干扰造成的误报,一般会采用数据合理性校验以及多测点联合判断的方式,即要求相邻测点或者相关参数同时出现异常的时候才发出预警,以此来提高预警的可靠性。在此基础上,用回归分析和机器学习的方法建立位移、渗流和库水位、温度、降雨等环境量之间的统计模型,把实测值和模型预测值进行对比,当残差超出正常范围时就提示工程性态发生改变。预警信息经过平台生成之后,可以采用短信、移动端推送等方式及时通知管理人员,并联动应急预案,使异常发现到处置响应的链条变短,从而在险情演化的初期就争取到处置的

时间,减少突发事件的风险和损失。预警阈值不是固定不变的,在观测序列不断增长、工程性态认识越来越深入的时候,要根据实际情况对预警阈值进行调整,定期对历史预警记录进行复盘,剔除明显的误报、补强漏报环节,使评估模型和判别规则在使用过程中不断校准,逐渐接近工程真实运行规律。

3 数字化技术在水资源调度与运行控制中的应用

3.1 水雨情自动测报与预报调度

水利工程的调度运行要依靠对水雨情的准确把握,数字化技术把测报和预报由分散、滞后变为集成、前瞻。水雨情自动测报系统在流域内设置雨量站、水文站等遥测设备,定时自动采集降雨量、水位等数据,并实时上传至中心平台,遇到强降雨或者水位快速上涨的时候,加密报送频率,保证信息的及时性。汇集后的实时数据给水文预报模型提供输入,根据气象部门的降雨预报,系统可以对入库流量、洪峰量级、到达时间做出预测,把预见期从依靠经验的数小时延长到更长时段,给调度决策争取主动。在预报的基础上,调度模块根据防洪、供水、发电等各方面的约束条件,模拟出不同的泄流方案下库水位的变化过程,帮助管理者在保证防洪安全的同时兼顾兴利效益。全过程实现了数据采集、预报计算、方案比选连续衔接,使调度决策由以前的依靠经验转向依靠数据和模型,明显提高了应对复杂水情、极端天气的能力。汛期和非汛期交替的时候,系统还可以根据滚动更新的预报结果,对已经制定好的方案做相应的调整,使调度更加灵活。预报精度受到降雨预报不确定性的影响,在调度过程中应该留有足够的安全余地,用实测和预报的不断比较来修正模型参数,从而提高预报的可靠性^[2]。

3.2 闸泵设备远程控制与优化运行

调度方案最后要通过闸门、水泵等设备的实际情况来实现,远程控制技术为此提供了一种高效的方式。在完成自动化改造的闸站中,闸门开度、启闭机状态、电机电流等运行参数被实时采集并上传,管理人员可以在控制中心或者移动端查看设备状态并下达启闭指令,系统根据这些信息自动调节闸门开度来达到目标水位或者流量。为了保证控制的安全性,远程操作一般会设置权限分级、操作确认和现场闭锁等多重保护,并且保留就地手动控制的能力,防止由于通信故障或者误操作造成风险。在泵站运行过程中,对水位、流量和机组能耗进行联合分析,在保证输水任务完成的基础上,使机组启停组合和运行台数得到优化,使设备尽量工作在高效区,从而降低单位水量的能耗。运行时产生的操作记录、报警信息以及能耗数据都被全部保存下来,方便以后的追溯和责任划分,也给评价调度方案实际执行情况、不断改善运行策略提供了基本素材。

4 数字化技术在水利工程运维决策与全生命周期管理中的应用

4.1 数字孪生与可视化决策支持

伴随着建模、仿真的发展,数字孪生给水利工程运行管理赋予了更加直观、综合的决策环境。核心就是依靠建筑信息模型和地理信息数据来创建与实体工程相对应的三维数字模型,把

实时监测数据映射到模型上,使工程的水位、渗流、变形、设备状态等信息可以在虚拟空间里同时显示出来。管理人员利用三维场景可以一目了然地了解枢纽的整体情况,迅速找到异常测点的位置以及它和周围环境之间的关系,不会因为大量的表格、曲线而造成查找困难。在此基础上,数字孪生可以同水文、调度等模型耦合起来,对洪水演进、闸门调度等过程开展情景推演,直接对比各种方案的效果,使管理人员在复杂的工况下做出决定。模型可以结合历史数据、预警信息一起使用,产生出具备监测、分析、推演功能的可视化平台。数字孪生的价值是由数据的实时性以及模型的准确性决定的,只有在感知系统完善、数据质量可靠的条件下,推演出来的结果才有实际的意义。

4.2 设备运维与资产全生命周期管理

水利工程中有很多闸门、机电设备、监测仪器等,运维水平的好坏直接关系到工程能否正常运行,数字化技术给运维管理的规范化、精细化提供支持。利用建立起来的设备台账和电子档案,把设备的型号、安装时间、检修记录以及运行参数都归入信息系统当中,从而达到对资产从安装、运行、维护到更新报废整个生命周期的跟踪管理的目的。系统会根据设备运行时长、动作次数、检测到的振动、温度等状态参数来自动产生保养检修计划,促使维修方式从定期检修、事后维修变为以状态为基础的预测性维护,以此来提高可靠性并且降低不必要的停机以及人工成本。巡检环节使用移动终端进行电子化作业,巡检人员按照预设路线和标准项目对现场情况进行记录并及时上传,处理结果形成闭环,消除纸质记录容易丢失、难以统计的缺点。各类运维数据长期积累之后,可以对设备的故障规律及薄弱环节进行分析,从而给检修策略的制定以及更新改造计划的编制提供量化的支撑,使得有限的运维资源能够得到更合理地分配^[3]。与此同时,运维信息系统同监测、调度平台的数据共享,使得设备的运行状况可以同工程总体工况联系起来加以分析,在调度安排时统筹考虑设备的可用性和检修窗口,防止运行任务和维护工作相互抵触,从而改善了运行管理的协调程度和整体效率。

5 数字孪生丹江口赋能智慧防洪与调度

以丹江口水库为代表的一类行业标杆企业,把数字孪生等数字化技术深入到工程运行管理的全过程之中。该工程依靠自建和共享相结合的网络,利用水利测雨雷达捕捉云中的雨,用350套白蚁自动监测装置和2500多个自动化监测点,创建起“天

空地水工”一体化全要素感知体系。建立L3级数据底板的数字孪生镜像之后,系统可以实现坝体位移、渗流场、水温等要素的秒级映射和可视化展示,使工程管理人员可以在一屏之内掌握整个枢纽的情况,准确找到异常,彻底摆脱了以前依靠人工巡查和经验判断的盲目性。

面对2024年汉江汛情的时候,它所表现出的实战效果也得到了充分的证明。依靠水雨情自动测报系统,洪水短期预见期从原来的12~24小时提高到3天以上,场次预报合格率在90%以上。系统后台建立水文水动力学模型,根据未来的降雨数据自动产生各种水库调度方案,同其他方案进行比较,给管理人员提供复杂的工况下科学的决策支持。该案例很好地证明了本文所提出的数字化应用路径是可行的,给水利工程管理智能化转型提供了一个很好的范例。

6 结束语

数字化技术正在对水利工程运行管理方式产生深刻的变革作用,依靠完备的感知系统、稳定的传输网络以及统一的数据平台,工程管理在安全监测、调度运行和运维决策等诸多方面都由原来的人工判断转向了数据驱动,安全水平及管理效率得到了切实的改善。数字化转型不是简单的设备堆砌,它的效果是由数据质量、模型精度、制度和人员的配合来决定的。工程推进过程中要从工程的具体情况出发,统筹规划、分步实施,重视监测体系的可靠性以及数据的连续性,在应用过程中不断地对模型进行校正,完善程序。只有把技术手段同管理需求结合起来,数字化技术才能发挥出实际效用,给水利工程长久的安全运行和效益充分发挥赋予强有力的支持。

[参考文献]

- [1]王靛.水利工程运行中数字化管理技术应用探讨[J].长江信息通信,2023,36(03):163-165.
- [2]刘斌,蒋涛,吉庆伟,等.数字孪生技术与智慧水利系统的融合及应用[J].江苏水利,2022,(S2):41-44.
- [3]张瑞涛,宋亚路,夏琼.水利工程运行管理数字化改革实践与探索[J].水电站机电技术,2022,45(08):140-142.

作者简介:

沈锡陵(1986--),男,汉族,江苏无锡人,本科,工程师,研究方向:水利工程运行管理。