

南水北调工程安全监测技术应用与研究进展

李彦平

南水北调中线公司北京分公司涿涿管理处 河北保定 074100

DOI: 10.32629/ems.v8i4.19737

[摘要] 南水北调工程是缓解我国北方水资源严重匮乏的重要举措,关系着上亿人口的生产生活以及生态环境的可持续发展。安全检测则是整个工程的安全保障,可随时掌握输水建筑物、交叉设施及周边环境等设施运行情况并据此进行风险预警及维修决策。本文对结构安全监测、渗流与水质监测、环境与应急监测等内容的主要技术进行了介绍,并突出了智能监测技术和预警系统相结合的有效应用,切实提升了该类工程的安全性。今后还需进一步解决包括数据融合、多技术协同及标准规范化等方面的难题。总之,推动监测技术向“空地一体化”与“智能自诊断”发展,有利于保障超大型调水工程可持续安全运行。

[关键词] 南水北调工程; 安全监测技术; 预警系统; 智能化监测; 工程安全

引言:

工程安全关系到整个南水北调工程能否正常运行,该工程是一项综合性极强、技术性极高的系统工程,涉及多区域管理,输水线路所经过的地区多为复杂地质条件区域,在施工过程中还会面临结构老化、渗流风险、地质灾害等问题。而安全监测作为南水北调工程的“眼睛”,可实时获取结构变形、渗流状态、环境参数等方面的信息,有助于风险隐患的发现、预警及运维决策的有效制定。近年来,随着科技的进步发展,逐步采用新型技术手段取代传统人工巡检模式,如基于传感器的实时监测、无人机巡检及大数据分析等智能化手段。基于此,本文系统地介绍了应用于南水北调工程的安全监测技术体系,包含结构安全、渗流与水质、环境应急等方面的实践经验,为构建科学有效的监测体系提出一些借鉴意义,为更好服务超大型调水工程安全保障工作提供技术参考。

1. 南水北调工程安全监测技术体系构建

1.1 监测目标与核心内容

南水北调安全监测体系的建立主要是以确保整个工程在全生命周期内能够实现安全运行为主要目的,在此基础上,具体有以下三点作用:第一是结构稳定监测,对输水建筑物进行有效的观测以及监控,例如混凝土建筑的应力应变情况、管道变形情况以及渡槽位移情况等,以此保证此类设施能长期承受荷载及外界环境的影响而不会出现沉降。渗流安全监测针对工程周边地质条件的复杂性,加强对于渠堤、隧洞、涵管部位渗流量、渗透压力及扬压力的监测,避免因管涌或者渗漏等原因造成结构破坏。环境适应监测是关注工程与周边生态系统之间的关系并进行连续记录以评估该工程对周围生态环境的影响及适应能力。监测对象覆盖工程全要素,包括输水建筑物、交叉设施、配套设施及周边环境。尤其是大

型渡槽、深埋隧洞、高填方渠道等部位因特殊结构及工况而成为重点监测对象。通过对上述对象的系统性监测,形成“点-线-面”的立体监测体系,实现信息保障全覆盖,用作工程的安全性评估及可能存在的风险预防。

1.2 技术框架与层级划分

南水北调安全监测技术体系采用“感知层-传输层-应用层”的三层架构模式实现采集到决策全过程管控。感知层作为基础层,通过传感器设备获取工程状态参数信息,如PCCP光纤光栅应变计监测管壁应力,在渠道边坡布置裂缝计监测变形趋势,在水源地布置多参数水质传感器进行pH值、溶解氧等指标的实时监测。传输层利用水利信息化基础设施建设“有线+无线”混合通信网络,确保复杂环境下的监测数据可靠传输。其中,光纤通讯承担着远距离的大容量传输任务,LoRa技术更适合在偏僻区域作为低功耗传感器的接入手段。最终的应用层则基于集成化数据平台对多源异构数据进行清洗、分析、建模,并采用有限元模拟以及智能算法实现风险预警。比如基于数字孪生建立的工程虚拟模型能够反映真实工程状态,并为运维决策提供直观的参考依据。这一层级体系实现了对于“采集-传输-分析-应用”的数据监测流程控制,在满足实时监测的同时,通过数据分析提升了项目安全保障的智能化水平。

2. 关键安全监测技术应用实践

2.1 结构安全监测技术

保障南水北调工程建筑设施的安全稳定最重要的手段是开展结构安全监测工作,主要是利用多种技术手段对建筑物力学状态进行实时掌控,其中以传感器监测法作为基础手段已广泛应用在混凝土渠道、渡槽、PCCP管道等重要部位上。应变计能粘贴于构件外表或者埋入内部分别测量材料在荷载作用下的微小变形,例如PCCP管道接口处布置光纤光栅应变

计可以精确监测环向应力的变化,分辨率可达 $1\mu\epsilon$;位移计用于测量结构整体或者局部的空间位移量,如渡槽支座部位布设拉线式位移计监测跨中挠度,量程为0-500mm,精度达0.1mm。

中线公司近年来大力推广智能运维,无人机巡检是中线工程不可或缺的重要手段之一,其优势在于高效性与灵活性。安装高清摄像头及红外热成像设备的无人机可快速对渠道边坡、渡槽顶部等人力难以进入的区域进行巡视检查,及时发现裂缝、剥蚀等情况。与传统的地面巡检相比,无人机可以更快地收集数据。对于隧道和涵管这样的封闭空间,管道机器人发挥着其独特的优势,其可以搭载激光雷达和全景相机设备在内部移动,并生成一个三维点云模型,这样就可以准确测量管内堵塞的情况以及腐烂程度,现已在中线穿黄隧洞等工程中成功应用。

以PCCP管道监测为例,传感器工作原理基于“应变-压力-变形”模型,即当管道内部水压发生变化或者外部土体位移变化后,管道外壁将产生应力应变响应,而传感器则可将这种物理量转化为电信号,再经传输网络传输至数据平台。随后按照预设阈值对管道结构的健康状态进行评价,某干线工程布置了2000余个应变监测点,成功发现了3处管道接口异常变形,为及时更换老化密封件提供了依据。

2.2 渗流与水质监测技术

渗流监测作为工程防渗的重要环节之一,主要采用渗压计配合测压管实现。渗压计能够直接反映土体中及结构内部的渗透状态,主要是通过测量孔隙水压力的变化值得出。将该方法应用在渠堤、隧洞衬砌等部位时,需采用钻孔埋设法布设在预定深度,通常为0-1MPa,在精度方面可达到0.25%FS。而测压管是根据水位观测间接得出渗透压力,多用于监测土质渠道边坡,若想对渗透坡降进行更为直接的观测,则会沿渗流路径设置若干个测压管,接着根据水位差进行计算,并判断是否存在管涌可能。

水质监测技术的应用是为了在保证输水安全,采用在线传感器与实验室检测相结合的方式对水质进行监测,在线监测能够实时采集pH值、溶解氧、浊度及重金属离子浓度等参数,并以5-10分钟的频率进行更新。对于部分指标如有机物、微生物,则采用实验室检测方式取得,在中线工程水源地,根据实际情况将水质监测系统与调水调度联动,当浊度超过5NTU时自动启动沉淀处理流程,确保供水水质安全。

渗流与水质监测技术应用于全工程线路,高填方渠道段采用渗压计阵列监测堤身浸润线;渡槽与土壤接触部位采用测压管监测基础渗稳状况;分水口部位采用水质传感器结合

流量控制阀门实现开度控制,便于及时解决污染问题。各技术的协同使用,形成“点面结合”的渗流与水质安全体系。

2.3 环境与应急监测技术

环境与应急监测技术的应用可以通过对外部影响因素进行实时跟踪,实现为工程风险防控提供预警能力。针对水情和气象要素的水文气象监测主要是通过雨量计、水位计等监测单元应用以及基于多普勒雷达数据预判未来6-12小时由于强降雨导致渠道超水位风险。比如中线河北段,气象台和洪水预报模型联动,2023年有效避开了3次区域性暴雨造成的渠道漫溢风险。

地质灾害监测是将裂缝计与GNSS技术结合起来应用于沿线复杂地形测量中,裂缝计放置于滑坡体表面,可随时监测滑坡体的位移速率变化;GNSS接收机采用厘米级定位,用来监测区域的地壳形变趋势,通过对该技术的应用,在丹江口库区周边已经实现了滑坡隐患的早期预警功能。

生态流量监测主要就是对生态环境进行保护,关注工程对沿线生态的影响,在一些重要的重要河流交汇处设置流量监测断面来确保下泄的基本生态流量满足《南水北调工程生态流量管理办法》的要求,以此达到保护河道整体水生态系统完整性的目的。

通过对环境与应急检测技术的应用实现工程安全从“被动应对”向“主动防控”的转变以及多源数据融合以提升对极端天气及地质灾害的响应速度,为工程的应急调度提供科学依据。

3. 安全监测技术研究进展

3.1 预警技术体系进展

预警技术体系构建了以有限元模拟为基础的三级预警指标体系,可分级管控工程风险。预警临界值以结构正常运行状态下的参数波动范围确定,例如PCCP管道环向应力技术预警值按设计值60%取用,在监测结果接近此值时即启动加密监测。安全警示值对应结构性能的临界状态,如渡槽挠度达到设计限值80%会触发人工现场复核与结构健康评估。安全预警值直接指向工程安全底线,如渗流坡降超标或结构变形速率突增,立即启动应急预案。

构建预警模型的过程中结合了多物理场耦合分析和机器学习算法。例如,使用有限元工具来模拟不同的水位和降水条件下边坡的应力应变分布,从而建立“环境参数-位移速率-失稳概率”关联模型,然后将过去的监测记录用于训练LSTM神经网络,以能对变形发展趋势做出短期预测。技术突破点主要是采用了动态阈值修正机制,考虑了老化系数和环境衰减因子,将报警阈值随使用年限变化自动进行调整,克服了

传统采用固定阈值所带来的适应性不足的缺点,同时提升了预警系统效能,扩大了对工程全生命周期的覆盖力。

3.2 智能化监测技术进展

智能化监测技术的应用通过 AI 算法和数字孪生深度结合的方式完成对监测体系由原始信息采集向智能决策的转化,在流量预测方面取得了一定成效。基于 LSTM 模型构建了输水流量预测模型,本模型能够同时结合气象条件、用水需求等因素,提前 24 小时预测渠道流量变化,误差小于 5%,为合理安排供水方案提供有效依据。引入数字孪生技术是

工程实体进行虚拟仿真,实现实体世界与数字空间的实时映射。比如针对某一段中线工程的渠道,可以利用数字孪生技术构建其仿真模型,并能够基于不同工况下实时呈现水流流态与结构响应情况,辅助制定更好的运维方案。

其次是搭建物联网及大数据平台。部署百万级传感器节点,形成覆盖全线路的感知网络,数据平台采用边缘计算与云计算协同架构进行监测数据的实时处理与深度挖掘。以下为传统监测与智能化监测的技术优势对比:

表 1 传统监测与智能化监测的技术优势对比

技术维度	传统监测	智能化监测
数据采集方式	人工定期读数,采样频率低	传感器自动采集,秒级/分钟级采样
异常识别能力	依赖人工经验判断,滞后性强	AI 算法实时分析,异常识别准确率>95%
决策支持模式	静态报告输出,被动响应	动态预警推送,主动防控
全生命周期覆盖	侧重建设期监测	贯穿设计、施工、运维全阶段

3.3 技术标准化与规范化进展

安全监测技术规范体系为南水北调工程建设提供了统一的技术框架。就传感器而言,在《水利工程安全监测仪器技术要求》中规定了应变计、渗压计等关键性监测仪器量测性能指标并严格限定在-20℃~60℃工作环境条件下传感器零点漂移不大于 0.5%FS,确保测量结果的真实可靠,在数据采集环节,《调水工程安全监测数据采集规范》对采样频率、数据格式以及传输协议进行详细规定,达到各监测系统间的数据互通。

实施行业标准极大提升了监测质量。例如《水利工程安全监测资料整编规程》明确要求测量资料实行“三级审核”,并建立数据质量评定体系,对剔除及补测异常数据有严格的程序。这些标准将工程监测数据的合格率从 82%提升到了 98%。同时为安全评价和决策提供高质量数据支撑,并为同类大型水利工程提供了参考范例。

结束语:

南水北调工程安全监测技术的发展历程,是我国大型水利工程管理从经验驱动向数据驱动转型的生动实践。通过构建“感知-传输-应用”三级技术体系,结构安全、渗流与水质、环境应急等关键领域的监测技术已实现从单点监测到系统集成的跨越,为工程累计安全输水超 760 亿立方米提供了坚实保障。技术创新是工程安全的核心驱动力。数字孪生与 AI 算法的深度融合,推动监测系统从“被动预警”向“主动防控”升级;标准化体系的构建,则为监测数据的可靠性与应用的规范性提供了制度保障。

[参考文献]

- [1]张威,王岩. 南水北调中线工程安全监测系统智能化提升路径探索与思考[J]. 人民黄河, 2025, 47(S2): 172-174.
- [2]李义恒,李志海. 南水北调中线工程某输水渡槽项目后评价研究[J]. 河南水利与南水北调, 2025, 54(10): 32-34.
- [3]马啸,郝泽嘉. 南水北调中线工程运行期安全监测优化设计[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(S1): 219-222.
- [4]田巍,陈庆伟,吴险峰,等. 南水北调工程水质安全保障工作实践与对策建议[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(01): 47-58.
- [5]张俊飞,刘伟,王当强,等. 南水北调中线总干渠安全监测与工程安全浅析[J]. 河南水利与南水北调, 2024, 53(08): 36-37.
- [6]王靖宇. 大宁调蓄水库橡胶坝工程安全监测分析与评价[J]. 水利水电快报, 2024, 45(S1): 40-42.
- [7]马福恒,娄本星,孙涛. 南水北调东线工程江苏段泵站安全监测现状及专业化管理探讨[J]. 水利信息化, 2024, (03): 60-64.
- [8]贾新胜,张晓丹. 大中型调水泵站智能安全监测系统研究与应用[J]. 山东水利, 2024, (04): 57-59.

作者简介:李彦平,1969.10,男,汉族,本科,河北人,高级工程师,研究专业方向:水利水电工程施工管理、工程安全监测。