

智能监测设备在水利大坝施工安全中的应用

劳晓婷

桐乡市经纬水利工程有限公司 浙江 嘉兴 314500

摘要：水利大坝施工面临地质与结构等多重安全风险，传统监测方法存在滞后、片面等局限。本文探讨智能监测设备的应用，其通过集成物联网、边缘计算及大数据分析技术，构建实时监测体系，可精准感知地质、结构及环境风险，实现数据自动采集与动态预警，有效提升了施工安全管理的智能化水平，为大坝安全建设提供了坚实的技术支撑。

关键词：水利大坝；施工安全；智能监测设备；物联网；大数据分析

引言：水利大坝工程规模宏大，地质条件复杂，施工中滑坡、渗流及结构开裂等风险突出。传统人工巡检与单点监测难以满足实时管控需求，安全隐患发现滞后。随着物联网与智能传感技术的发展，智能监测设备为施工安全提供了全新解决方案。本文分析传统方法的不足，探讨智能监测技术体系及其在风险预警与安全管理中的具体应用，以提升大坝施工本质安全水平。

1 水利大坝施工安全风险分析

1.1 地质灾害风险

水利大坝施工多选址于河谷、山体等复杂地质区域，地质灾害风险是施工期间最突出的安全隐患之一，直接威胁施工人员、设备及大坝主体结构安全。滑坡风险主要源于施工扰动破坏山体原有应力平衡，加之降雨、地下水渗透等因素，导致坡体岩土体强度降低，易发生整体滑动或局部溜塌，尤其在坝肩、边坡开挖阶段风险显著。塌方多发生于基坑开挖、地下洞室施工过程中，因岩土体稳定性不足、开挖坡度不合理或支护不及时，导致顶部岩土体坍塌，掩埋施工区域、损毁设备甚至造成人员伤亡^[1]。渗流突变则主要因施工过程中破坏地下含水层结构，或坝基、坝体防渗设施施工不完善，导致地下水异常渗透，引发管涌、流土等现象，严重时会导致坝基失稳，影响大坝施工安全与后期运行稳定性，需重点防控。

1.2 结构安全风险

水利大坝结构复杂、施工周期长，结构安全风险贯穿施工全过程，若防控不当会留下永久性安全隐患。混凝土浇筑裂缝是最常见的结构风险，由于大坝混凝土浇筑量大、水化热释放集中，若温控措施不到位，会导致混凝土内外温差过大，产生温度应力，进而引发表面裂缝或深层裂缝，影响坝体防渗性和承载能力。基坑变形主要发生在深基坑开挖阶段，受岩土体性质、地下水水

位变化及施工荷载影响，基坑边坡易出现沉降、位移，若变形量超过允许范围，会导致基坑坍塌，连带破坏周边施工设施。支护失效则多因支护设计不合理、材料质量不达标或施工工艺不规范，如锚杆锚固力不足、喷射混凝土强度不够等，无法有效抵御岩土体压力，进而引发边坡坍塌、洞室变形等连锁安全事故，严重威胁施工安全。

2 传统监测方法的局限性

2.1 人工巡检的滞后性与主观性

传统水利大坝施工安全监测以人工巡检为主，该方法存在明显的滞后性与主观性，难以满足施工安全实时防控需求。滞后性主要体现在人工巡检多为定时、定点检查，无法实现24小时连续监测，对于滑坡、渗流突变等突发性安全隐患，往往只能在事故发生后或隐患发展到一定程度才能发现，错失最佳处置时机，导致隐患扩大升级^[2]。主观性则源于巡检人员的专业水平、责任心存在差异，对隐患的判断标准不统一，如对混凝土裂缝宽度、边坡位移的观察的误差较大，易出现漏判、误判情况，部分隐蔽性隐患（如地下渗流异常）难以通过人工巡检发现，进一步降低了监测的准确性和可靠性，无法为施工安全决策提供及时、有效的数据支撑。

2.2 单点监测的片面性

传统监测方法多采用单点监测模式，仅针对大坝施工中的个别关键点位进行监测，存在明显的片面性，无法全面反映施工安全整体状况。水利大坝施工是一个系统性工程，安全风险相互关联、相互影响，如边坡滑坡可能引发基坑变形，混凝土裂缝可能导致渗流异常，而单点监测仅能获取单个点位的监测数据，无法实现对各个风险点的协同监测，难以捕捉风险之间的关联性和传导性。另外，单点监测的覆盖范围有限，对于大型大坝施工区域，大量潜在风险点无法被纳入监测范围，易

出现监测盲区，导致部分隐蔽性、区域性安全隐患被遗漏，无法为施工安全管理提供全面、系统的数据支撑，难以实现对施工安全风险的全面防控。

2.3 缺乏实时数据分析与动态预警能力

传统监测方法普遍缺乏实时数据分析与动态预警能力，监测数据的利用效率低下，无法实现安全风险的提前防控。传统监测中，监测数据多由人工记录、整理，数据传输滞后，无法实时汇总至安全管理平台，数据分析多为事后追溯，无法对监测数据进行实时处理、分析和研判，难以及时发现数据异常背后的安全隐患。同时传统监测缺乏科学的预警模型，无法根据监测数据的变化趋势，对安全风险的发展态势进行预测，仅能在隐患已经显现时发出警示，无法实现动态预警。监测数据与施工管理流程脱节，数据无法及时转化为安全决策依据，导致安全防控措施滞后。

3 智能监测设备的技术体系与功能

3.1 智能监测设备的分类与原理

智能监测设备是水利大坝施工安全智能防控的核心载体，根据监测对象和功能不同，可分为地质灾害监测设备、结构安全监测设备、人员与设备安全监测设备三大类，各类设备依托不同技术原理实现精准监测。地质灾害监测设备主要包括滑坡监测仪、渗流监测仪、孔隙水压力计等，其原理是通过传感器捕捉坡体位移、地下水位、渗流量等关键参数，将物理信号转化为电信号，实现对地质灾害隐患的实时监测。结构安全监测设备涵盖混凝土裂缝监测仪、基坑位移监测仪、应力应变传感器等，利用光学、力学、电学等技术，精准采集混凝土裂缝宽度、基坑沉降位移、结构应力应变等数据，反映坝体、基坑等结构的安全状态。人员与设备安全监测设备包括高空作业防护监测仪、设备定位tracker、环境监测仪等，通过定位、传感、视频分析等技术，实现对作业人员行为、设备运行状态、施工环境参数的实时监测，为人员与设备安全防控提供数据支撑。

3.2 关键技术支撑

3.2.1 物联网（IoT）技术：多源数据实时采集与传输

物联网（IoT）技术是智能监测设备实现多源数据实时采集与传输的核心支撑，为智能监测系统提供了高效的数据传输通道。该技术通过在监测点位部署各类传感器，构建全方位、多维度的监测网络，实现对地质、结构、人员、设备、环境等多源数据的自动采集，无需人工干预，大幅提升了数据采集的效率和准确性。同时，物联网技术依托无线通信（如5G、LoRa）和有线通信相结合的方式，将采集到的监测数据实时传输至云端管理

平台，打破了传统监测数据传输滞后的瓶颈，实现了数据的实时共享^[3]。物联网技术可实现对传感器的远程控制 and 状态监测，及时发现传感器故障并进行维护，保障监测网络的稳定运行，为后续数据处理、分析和预警提供了可靠的数据基础。

3.2.2 边缘计算：现场数据预处理与轻量级分析

边缘计算技术为智能监测设备的现场数据预处理与轻量级分析提供了技术支撑，有效解决了海量监测数据传输、处理效率低的问题。水利大坝施工场景复杂，监测数据量大、类型多样，若所有数据均传输至云端进行处理，会增加网络带宽压力，导致数据处理滞后。边缘计算技术将数据处理能力下沉至监测设备终端或现场边缘节点，对采集到的原始数据进行实时预处理，过滤无效数据、修正数据误差，提取关键特征参数，减少数据传输量。同时边缘计算可实现轻量级数据分析，对数据异常情况进行初步研判，及时发出局部预警信号，为现场施工人员提供快速处置依据。

3.2.3 大数据分析机器学习：风险预测模型构建

大数据分析机器学习技术是实现安全风险预测、提升智能监测水平的核心技术，通过对海量监测数据的深度挖掘，构建科学的风险预测模型。大数据分析技术可对物联网传输的多源监测数据（如位移、渗流、应力、环境参数等）进行整合、清洗、分析，挖掘数据之间的关联关系，识别安全风险的演变规律。机器学习技术则通过算法训练，利用历史监测数据和事故案例，构建风险预测模型，能够根据实时监测数据的变化趋势，精准预测安全风险的发生概率和发展态势，提前发出预警信号。对混凝土裂缝数据进行建模，可判断裂缝的发展趋势，为防控措施的制定提供科学依据，实现从“被动应对”向“主动防控”的转变。

3.2.4 数字孪生技术：施工过程虚拟映射与仿真

数字孪生技术通过构建水利大坝施工过程的虚拟映射模型，实现对施工过程的可视化仿真、监测与管控，为施工安全管理提供了全新的技术手段。该技术以大坝施工设计图纸、地质勘察数据、实时监测数据为基础，利用三维建模技术构建大坝施工全过程的数字孪生体，实现虚拟模型与实际施工场景的实时同步。通过数字孪生模型，可直观呈现坝体浇筑、基坑开挖、边坡支护等施工环节的实时状态，以及监测数据的动态变化，便于管理人员全面掌握施工安全状况。同时，数字孪生技术可进行施工过程仿真模拟，模拟不同施工方案、极端天气下的安全风险演变过程，为施工方案优化、风险防控措施制定提供支撑。

4 智能监测设备在施工安全中的具体应用

4.1 地质灾害预警

智能监测设备在地质灾害预警中的应用,有效提升了水利大坝施工期间地质灾害的防控能力,实现了隐患的提前发现、及时预警和快速处置。在滑坡防控方面,通过在边坡、坝肩等关键区域部署滑坡监测仪、位移传感器等设备,实时采集坡体水平位移、垂直沉降等数据,结合大数据分析和机器学习模型,对坡体稳定性进行实时研判,当位移数据超过预警阈值时,系统自动发出声光预警信号,同时将预警信息推送至管理人员和现场作业人员,提醒及时撤离并采取加固措施。在渗流突变防控方面,利用渗流监测仪、孔隙水压力计等设备,实时监测地下水位、渗流量、孔隙水压力等参数,当出现渗流量突增、水位异常波动等情况时,系统快速预警,管理人员可及时排查防渗设施隐患,采取封堵、排水等措施,防止管涌、流土等灾害发生,保障施工区域地质安全。

4.2 结构安全监控

智能监测设备在结构安全监控中的应用,实现了对大坝施工结构的全流程、精细化监测,有效防范结构安全风险。在混凝土浇筑环节,通过混凝土裂缝监测仪、温度传感器等设备,实时监测混凝土浇筑温度、内外温差及裂缝宽度、长度的变化,当温差超过允许范围或裂缝出现扩展趋势时,系统发出预警,管理人员及时调整温控措施、采取裂缝修补措施,防止裂缝进一步发展。在基坑施工环节,利用基坑位移监测仪、应力应变传感器等设备,实时监测基坑边坡沉降、位移及支护结构的应力应变情况,精准掌握基坑变形规律,当变形量或应力超过预警值时,及时调整开挖进度、加固支护结构,防范基坑坍塌事故。另外,智能监测设备还可对坝体、溢洪道等主体结构的施工质量和安全状态进行实时监控,确保大坝结构符合设计标准,为后期运行安全奠定基础。

4.3 人员与设备安全管理

智能监测设备在人员与设备安全管理中的应用,有效规范了作业行为、防范了设备安全隐患,保障了施工人员和设备的安全。在人员安全管理方面,通过高空作业防护监测仪、人员定位设备等,实时监测高空作业人员的安全防护措施落实情况(如是否系安全带)和作

业位置,若出现违规作业行为,系统立即发出预警,提醒作业人员整改;通过定位设备可实时掌握人员分布情况,在突发事件时便于快速搜救^[4]。在设备安全管理方面,利用设备定位tracker、运行状态监测仪等,实时监测大型施工设备的运行参数、作业位置和状态,及时发现设备故障、违规操作等隐患,如机械碰撞风险、设备超载等,系统发出预警并提醒操作人员停机检查。

4.4 环境风险防控

智能监测设备在环境风险防控中的应用,实现了对施工环境的实时监测和精准管控,降低了环境因素对施工安全的影响。通过部署环境监测仪,实时采集施工现场的扬尘浓度、噪声分贝、温度、湿度、降雨量、雷电等环境参数,建立环境风险监测数据库。当扬尘浓度、噪声分贝超过国家标准时,系统发出预警,管理人员及时启动降尘、降噪措施,如开启雾炮机、调整作业时间,保障作业人员身体健康;在高温天气时,实时监测环境温度,提醒作业人员做好防暑降温措施,合理安排作业时间,防范人员中暑;在暴雨、雷电等极端天气来临前,通过降雨量、雷电监测数据,提前发出预警,暂停高空作业、基坑开挖等危险作业,撤离现场人员和设备,防范极端天气引发的地质灾害和安全事故,为施工安全营造安全、稳定的环境条件。

结束语

智能监测设备的应用,实现了水利大坝施工安全由“被动应对”向“主动防控”的转变。通过物联网与大数据技术的深度融合,构建了全方位、实时化的安全监控体系。未来应进一步优化算法模型,拓展智能设备应用场景,推动施工安全管理向智能化、精细化持续发展,为水利工程建设提供坚实保障。

参考文献

- [1]张宏祯,张鹏举,徐宝山.智能化大坝安全监测系统开发与研究[J].中国水利,2021(10):47-48.
- [2]周芳芳,张锋,杜泽东,等.基于微处理器和多通信方式的大坝变形智能监测仪器的设计与实现[J].长江科学院院报,2024,41(2):167-172,180.
- [3]戴济群.已建大坝智能化改造实践探索与思考[J].中国水利,2025(16):39-45.
- [4]高长胜,刘成栋,李登华,等.库坝安全智能监测感知体系构建与实践[J].中国水利,2025(16):72-80,90.