

水利工程大坝的安全监测技术分析

马晓丁

河北省水利水电勘测设计研究院集团有限公司 河北 石家庄 050081

摘要: 水利工程大坝作为水资源调控与防洪减灾的核心设施,其安全运行关乎人民生命财产与区域生态稳定。本文围绕水利工程大坝的安全监测技术展开分析。阐述了大坝安全监测的主要内容,包括变形、渗流、应力应变、环境量以及结构物监测等方面。详细介绍了关键技术,如传感器、数据传输与通信、数据处理与分析、模型构建与预测、安全评估与预警技术等。同时,探讨了其发展趋势,涵盖智能化监测、数据融合与共享、多元化监测手段等方面。旨在深入剖析水利工程大坝安全监测技术,为保障大坝安全运行提供理论和技术参考。

关键词: 水利工程;大坝安全;监测技术;分析

引言:水利工程大坝作为重要的基础设施,其安全稳定运行至关重要。一旦大坝出现安全问题,将对下游地区的人民生命财产安全和生态环境造成严重威胁。随着水利工程建设的不断发展,大坝的规模和复杂性日益增加,对安全监测技术的要求也越来越高。通过科学有效的安全监测,能够及时掌握大坝的运行状态,发现潜在的安全隐患,为大坝的维护和管理提供依据。因此,深入分析水利工程大坝的安全监测技术具有重要的现实意义。

1 水利工程大坝安全监测的主要内容

1.1 变形监测

变形监测是水利工程大坝安全监测的关键环节,主要针对大坝的垂直位移、水平位移以及倾斜度等进行观测。大坝在运行过程中,受自重、水压力、地基沉降等多种因素影响,会产生不同程度的变形。通过在坝体关键部位设置水准点、位移标点等,利用水准测量、全站仪测量等传统方法,以及卫星定位技术(GNSS)、InSAR等先进手段,能够精确获取大坝的变形数据。一旦变形超出正常范围,可能预示着坝体结构出现问题,如地基失稳、坝体裂缝等,及时监测变形情况有助于提前采取措施,保障大坝安全运行,避免因变形过大引发溃坝等严重事故。

1.2 渗流监测

渗流监测旨在掌握大坝及坝基内的渗流状态,包括渗流量、渗流压力、渗透水头等参数。大坝渗流若出现异常,可能导致坝体土壤颗粒流失、管涌、流土等现象,严重威胁大坝结构安全。在大坝内部及周边布置测压管、渗压计等传感器,实时监测渗流数据。通过分析渗流数据的变化趋势,如渗流量突然增大、渗流压力异常升高,可判断是否存在防渗体破坏、绕坝渗漏等问

题。此外,结合地质条件和大坝结构,对渗流数据进行深入分析,能为大坝防渗加固提供科学依据,确保大坝在运行过程中渗流处于可控状态。

1.3 应力应变监测

应力应变监测主要针对大坝混凝土、坝基岩石等材料在荷载作用下产生的应力和应变情况。大坝在蓄水、泄洪等工况下,结构内部会产生复杂的应力分布,当应力超过材料的承载能力时,可能引发裂缝、破损等问题。通过在坝体关键部位埋设应变计、应力计等传感器,能够实时获取应力应变数据。例如,在坝体的坝肩、坝踵等部位,应力集中现象较为明显,对应力应变的监测尤为重要。分析这些数据可以评估大坝结构的受力状态,判断是否存在结构强度不足等隐患,为大坝的维护和加固提供准确的力学依据,保障大坝结构的完整性和稳定性。

1.4 环境量监测

环境量监测涵盖气温、水温、降水、水位等外部环境因素,这些因素对大坝的运行状态有着重要影响。气温变化会引起大坝混凝土的热胀冷缩,可能导致坝体产生裂缝;降水和水位变化会影响大坝的水压力和渗流状态。通过在大坝周边设置气象站、水位监测站等设备,实时采集环境量数据。将环境量数据与大坝的变形、渗流、应力应变等监测数据相结合进行分析,能够更全面地了解大坝的运行状态^[1]。

1.5 结构物监测

结构物监测主要针对大坝的泄洪建筑物、输水建筑物等附属结构物进行监测。这些结构物在大坝运行过程中承担着重要功能,其安全状况直接影响大坝的整体运行。对泄洪建筑物的闸门、启闭机、消能设施等进行监测,检查其机械性能、运行状态是否正常,防止出现闸

门无法正常启闭、消能效果不佳等问题。对于输水建筑物,监测其管道的渗漏、变形情况,确保输水安全。通过定期检查、仪器监测等方式,及时发现结构物存在的缺陷和隐患,进行维修和加固,保障结构物的正常运行,从而保证大坝功能的有效发挥,维护大坝的整体安全。

2 水利工程大坝安全监测的关键技术

2.1 传感器技术

传感器技术是水利工程大坝安全监测的“感知触角”,其性能直接影响监测数据的准确性与可靠性。在大坝安全监测中,传感器种类丰富多样,涵盖应变传感器、渗压传感器、位移传感器等。应变传感器通过将大坝结构的应变变化转化为电信号,能够精确测量混凝土、坝基岩石等材料在受力时的微小变形,为应力应变分析提供关键数据;渗压传感器则利用压力敏感元件,实时监测大坝及坝基内的渗流压力和渗透水头,帮助判断渗流状态是否正常。随着技术发展,新型传感器不断涌现,如光纤传感器凭借其抗电磁干扰能力强、灵敏度高、可实现分布式测量等优势,在大坝监测中得到广泛应用。它能够沿着光纤长度方向连续监测温度、应变等参数,及时发现大坝内部局部异常情况。然而,传感器技术也面临诸多挑战,例如部分传感器在复杂环境下(如高湿度、强腐蚀)的耐久性不足,长期使用后可能出现精度下降的问题;不同类型传感器之间的兼容性有待提高,以实现更高效的数据采集和整合。

2.2 数据传输与通信技术

数据传输与通信技术是保障大坝安全监测数据实时、准确传输的关键环节,如同监测系统的“信息高速公路”。在传统监测中,有线传输方式如电缆、光纤凭借稳定的数据传输性能,常用于近距离、对数据传输质量要求高的监测场景,能够确保数据在传输过程中少受干扰,保证数据的完整性和准确性。但有线传输存在布线复杂、维护成本高、灵活性差等局限。随着无线通信技术的发展,无线传输在大坝安全监测中应用日益广泛。4G、5G通信技术具有传输速度快、覆盖范围广的特点,可实现大量监测数据的实时远程传输;LoRa、NB-IoT等低功耗广域网技术则适用于对功耗要求严格、数据传输频次低的传感器节点,能够满足大坝偏远区域的监测需求。此外,卫星通信技术凭借其不受地理条件限制的优势,在偏远地区或通信基站覆盖不足的大坝监测中发挥着不可替代的作用。然而,数据传输与通信技术也面临网络安全和信号稳定性的挑战。无线通信易受电磁干扰、网络攻击,可能导致数据泄露或传输中断;在山区等地形复杂区域,信号覆盖和传输质量难以保障。

2.3 数据处理与分析技术

面对大坝安全监测中产生的海量、多源异构数据,数据处理与分析技术是挖掘数据价值、提取关键信息的核心手段。数据处理首先要对原始数据进行清洗,去除因传感器故障、环境干扰等产生的异常数据和噪声,保证数据的准确性和有效性;然后进行数据转换和标准化处理,使不同类型、不同格式的数据具有可比性。在数据分析方面,传统的统计分析方法能够对数据的基本特征、变化趋势进行分析,如计算均值、方差、绘制趋势图等,帮助监测人员直观了解大坝运行状态的变化。而随着人工智能和机器学习技术的发展,深度学习算法如神经网络、卷积神经网络在大坝安全监测数据处理中展现出强大优势。它们能够自动提取数据特征,挖掘数据间的复杂关系,实现对大坝变形、渗流等状态的高精度预测。但数据处理与分析技术也面临数据量过大导致计算资源需求高、算法模型复杂难以解释等问题。未来,数据处理与分析技术将朝着智能化、高效化方向发展,结合云计算、边缘计算等技术,提高数据处理效率,同时注重算法的可解释性,为大坝安全管理提供更可靠的决策支持。

2.4 模型构建与预测技术

模型构建与预测技术是水利工程大坝安全监测的“智慧大脑”,通过建立数学模型,模拟大坝在不同工况下的运行状态,实现对大坝未来安全状况的预测。物理模型基于大坝的结构力学、水力学等原理,考虑大坝材料特性、地质条件、荷载作用等因素,能够较为准确地反映大坝的实际物理过程。而经验模型则是基于大量历史监测数据,利用统计分析和机器学习方法建立输入变量(如环境量、荷载等)与输出变量(如变形、渗流等)之间的关系。这种模型不需要深入了解大坝的物理机制,在数据充足的情况下能够快速实现对大坝状态的预测。随着人工智能技术的发展,混合模型逐渐兴起,它结合了物理模型和经验模型的优点,既能利用物理原理保证模型的合理性,又能借助数据驱动提高预测精度。模型构建与预测技术在应用中面临模型参数确定困难、模型适应性不足等问题。不同大坝的地质条件、结构形式差异较大,模型参数需要根据实际情况进行调整和优化;同时,大坝运行环境不断变化,模型需要具备有良好的适应性。

2.5 安全评估与预警技术

安全评估与预警技术是保障大坝安全运行的最后一道防线,通过对监测数据和分析结果的综合评判,及时发现大坝安全隐患并发出预警。安全评估需要建立科

学合理的指标体系,涵盖大坝的变形、渗流、应力应变等多个方面,结合行业标准和规范,对大坝的安全状态进行分级评价,如正常状态、异常状态、危险状态等。在评估方法上,传统的专家经验法依靠领域专家的知识 and 经验,对大坝安全状况进行主观判断,但这种方法存在主观性强、一致性差的问题。近年来,基于人工智能和机器学习的评估方法逐渐得到应用,如支持向量机、随机森林等算法,能够根据大量历史监测数据和安全评估结果进行学习,实现对大坝安全状态的客观、准确评估。预警技术则根据安全评估结果,在发现异常情况时及时发出警报。预警级别通常分为一般预警、中级预警和高级预警,不同级别对应不同的应对措施。预警方式包括短信通知、声光报警、平台推送等,确保相关人员能够及时获取预警信息。然而,安全评估与预警技术也面临评估指标体系不完善、预警阈值难以准确确定等问题。未来,安全评估与预警技术将朝着更加智能化、精准化方向发展,结合多源数据融合和动态阈值调整技术,提高安全评估的准确性和预警的及时性,保障大坝安全稳定运行^[2]。

3 水利工程大坝安全监测技术的发展趋势

3.1 智能化监测技术的发展

智能化监测技术正成为水利工程大坝安全监测的核心方向。依托人工智能、物联网等技术,传感器将具备自主感知、智能分析能力,可自动识别异常数据并实时预警,减少人工干预误差。例如,AI算法能对大坝复杂运行状态进行深度分析,快速判断潜在风险;无人机与机器人巡检搭载高清摄像头和智能传感器,可对大坝关键部位进行全方位、无死角监测,极大提升监测效率与精度。同时,边缘计算技术的应用,让数据在源头即可实现快速处理与分析,降低传输延迟,使监测系统响应更及时。智能化监测技术将显著提高大坝安全管理的自动化与智能化水平,保障大坝安全运行。

3.2 数据融合与共享技术的发展

数据融合与共享技术是水利工程大坝安全监测的重

要趋势。大坝监测数据来源广泛且类型多样,通过多源数据融合技术,将变形、渗流、环境量等数据进行整合分析,能更全面、准确地反映大坝运行状态,挖掘数据背后隐藏的安全隐患。同时,随着水利工程信息化建设推进,不同部门、机构间的数据共享需求日益迫切。借助云计算、区块链等技术,构建统一的数据共享平台,可实现数据的安全、高效共享,打破信息孤岛,促进各参与方协同合作,为大坝安全决策提供更丰富、准确的数据支持,推动水利工程管理向科学化、精细化发展。

3.3 多元化监测手段的发展

多元化监测手段是提升大坝安全监测能力的关键。除传统监测方法外,卫星遥感、激光雷达、声波探测等新技术不断应用于大坝监测领域。卫星遥感可从宏观层面获取大坝及周边区域大范围信息,及时发现地表形变等异常;激光雷达能快速获取高精度三维地形数据,精确分析大坝地形地貌变化;声波探测则可深入探测大坝内部结构缺陷。这些多元化监测手段与传统方法相互补充,构建起全方位、立体化的监测体系,能够覆盖大坝不同尺度、不同深度的监测需求,有效提升对大坝安全隐患的识别能力,为大坝安全运行提供更坚实的保障^[3]。

结束语

水利工程大坝安全监测技术是保障大坝安全运行的核心支撑。从变形、渗流等多方面的监测内容,到传感器、数据处理等关键技术,再到智能化、多元化的发展趋势,各环节相互关联、协同发展。随着科技不断进步,安全监测技术将更加精准、智能与高效,为大坝全生命周期管理提供有力保障。

参考文献

- [1]王普秀.水利工程大坝的安全监测技术与发展研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2022(3):85-87.
- [2]廖志伟.水利水电工程中的大坝安全监测技术研究[J].中国科技期刊数据库 工业A,2022(3):132-134.
- [3]胡斌斌,叶芳毅.水利工程安全监测报告自动整编技术研究与实践[J].水利水电快报,2022,43(1):50-54.