

水利工程中的大坝变形监测与维护

王誉臻

新疆维吾尔自治区塔里木河流域吉音水利枢纽管理中心 新疆 和田 848000

摘要: 大坝作为水利工程的核心构筑物,其安全性直接关乎区域经济发展与人民生命财产安全。变形监测与维护是保障大坝稳定运行的关键环节,通过多元化监测技术应用,实现对大坝变形的实时感知与精准分析;依托数据驱动的预警机制及针对性维护策略,可有效降低安全风险。随着智能化、多学科融合技术的发展,全生命周期管理与绿色环保维护理念的推广,大坝监测维护体系正迈向更高效、可持续的新阶段。

关键词: 水利工程;大坝变形;监测;维护

引言

水利工程大坝在防洪、发电、灌溉等领域发挥着不可替代的作用,但长期受水流冲刷、地质变动等因素影响,变形风险始终存在。科学的变形监测与维护对保障大坝安全运行意义重大。本文从多元化监测技术应用、数据分析预警、维护策略制定等方面,系统探讨大坝变形监测与维护要点,并结合智能化、多学科交叉等前沿趋势,分析行业未来发展方向,以期为水利工程安全管理提供理论参考与实践借鉴。

1 水利工程中大坝变形监测与维护的重要性

水利工程作为水资源调控与利用的核心设施,大坝的安全稳定直接关系到下游区域的生命财产安全与生态环境平衡。在长期运行过程中,大坝不仅承受水体压力、渗透作用及温度变化等自然因素影响,还面临材料老化、基础沉降等潜在风险,因此大坝变形监测与维护是保障工程安全运行、延长使用寿命的关键环节。大坝变形监测通过精密测量技术实时捕捉坝体位移、沉降、裂缝变化等关键数据。采用水准测量、GPS定位、InSAR技术及光纤传感等多种手段,构建全方位监测网络,可获取毫米级甚至亚毫米级精度的变形信息。这些数据能直观反映大坝结构受力状态,帮助技术人员识别异常变形趋势,为后续维护决策提供科学依据。例如,当坝体出现不均匀沉降时,可能预示基础承载力下降或内部结构损伤,通过及时监测可避免问题恶化引发溃坝等严重事故。维护工作基于监测数据展开,对保障大坝结构安全意义重大。定期对大坝表面裂缝进行修补、采用灌浆技术加固坝体薄弱部位,能有效提升结构耐久性;对渗流异常区域实施防渗处理,可防止水体渗漏引发管涌、流土等渗透破坏。通过优化泄洪调度方案,合理控制水位变化,可减少水位骤变对坝体产生的附加应力。这些维护措施不仅能维持大坝正常功能,还能降低运行风

险,确保水利工程长期稳定发挥防洪、发电、灌溉等综合效益。在极端气候与复杂地质条件影响下,大坝变形监测与维护是一项持续且动态的工作。只有将先进监测技术与科学维护手段相结合,才能及时发现并消除安全隐患,保障水利工程安全运行,为社会经济发展筑牢坚实的水利屏障。

2 水利工程中的大坝变形监测与维护要点

2.1 多元化监测技术应用

(1) 大地测量技术凭借高精度全站仪、GPS定位系统及水准仪等设备,实现对大坝表面位移、沉降及倾斜的精准测量。全站仪通过极坐标法测量测点三维坐标,结合周期性观测数据,构建大坝表面变形趋势模型;GPS技术利用卫星信号实时获取监测点动态位移信息,其毫米级定位精度可有效捕捉大坝微小形变,为变形分析提供基础数据支撑。(2) 内部监测技术以渗压计、测斜仪、应变计等传感器为核心,嵌入大坝内部关键部位。渗压计实时监测坝体孔隙水压力变化,结合地质条件与渗流理论,分析渗流对坝体稳定性影响;测斜仪沿预埋测斜管连续测量土体或岩体倾斜角度,精确掌握坝体内部深层滑动面位移情况;应变计则用于监测混凝土坝体应力应变状态,判断结构受力是否处于安全阈值内。(3) 新兴监测技术如InSAR(合成孔径雷达干涉测量)、光纤传感技术正逐步应用于大坝监测领域。InSAR通过卫星雷达获取大范围区域变形信息,可实现对大坝周边区域地表变形的远程、非接触式监测;分布式光纤传感技术利用光纤中光的散射特性,对坝体温度、应变进行连续分布式测量,具有高灵敏度、长距离监测优势,能够及时发现局部异常变形区域^[1]。

2.2 变形数据分析与预警

(1) 数据处理阶段,对原始监测数据进行粗差剔除、平差计算与滤波处理。采用稳健估计方法全面细致

地识别并精准剔除含有粗差的观测值，运用最小二乘法严谨地进行平差计算，以此提高数据精度；针对监测数据中的噪声干扰，运用卡尔曼滤波、小波分析等算法进行信号处理，提取真实变形信息，确保分析数据的可靠性与准确性。（2）变形分析过程中，综合运用统计分析、力学分析及模型分析方法。通过统计回归分析建立变形量与影响因素（如水位、温度、时间）的数学模型，量化各因素对大坝变形的影响程度；基于弹性力学、岩土力学理论，构建大坝有限元模型，模拟不同工况下坝体应力应变分布；结合历史监测数据与模型计算结果，对大坝变形趋势进行预测，评估结构稳定性。

（3）预警机制的构建以变形阈值为核心，根据大坝设计标准、运行工况及历史变形规律，设定多级预警指标。当监测数据接近或超过阈值时，通过自动化预警系统及发出警报，同时结合地理信息系统（GIS）直观展示变形区域与严重程度，为工程管理人员提供决策依据，以便迅速采取应急措施，保障大坝安全运行。

2.3 针对性维护策略制定

（1）针对表面变形问题，若监测显示大坝表面出现裂缝，需依据裂缝性质、宽度及深度制定修复方案。对于宽度较小的干缩裂缝，可采用表面涂抹环氧树脂胶等材料进行封闭处理；当裂缝较宽且深度较大时，采用压力灌浆技术，注入水泥基或化学灌浆材料，恢复坝体结构完整性；对于因不均匀沉降导致的表面变形，可通过局部加固或调整坝体荷载分布进行处理。（2）应对内部变形情况，若渗压计监测到坝体内部孔隙水压力异常升高，需加强排水系统维护，清理排水孔、增设排水设施，降低渗流压力；若测斜仪发现坝体内部存在滑动趋势，可采用预应力锚索、抗滑桩等加固措施，提高坝体抗滑稳定性；对于混凝土坝体内部应力集中区域，可通过粘贴钢板、碳纤维布等方式进行补强，增强结构承载能力。（3）考虑环境因素影响，在洪水期来临前，对大坝泄洪设施进行全面检查与维护，确保闸门启闭灵活、泄洪通道畅通；在冰冻季节，采取保温、加热等措施，防止坝体混凝土因冻胀产生破坏；针对强风、地震等极端工况，提前对大坝进行抗震、防风加固，优化结构设计参数，提高大坝抵御自然灾害的能力^[2]。

2.4 常态化维护管理

（1）日常巡检是常态化维护的基础工作，安排专业技术人员定期对大坝进行全面巡查，检查坝体表面有无裂缝、渗漏、滑坡等异常现象，观测设施是否完好，排水系统是否通畅。通过目视检查、简单测量工具（如裂缝观测仪、渗漏检测仪）及时发现潜在问题，并做好详

细记录，建立大坝健康档案。（2）设备维护管理方面，对各类监测仪器、维护设备进行定期校准、检修与更换。按照仪器使用说明书规定的周期，对全站仪、GPS接收机、渗压计等监测设备进行精度校准，确保数据采集准确性；及时维修或更换出现故障的设备，保证监测系统正常运行；对维护工具、机械设备进行定期保养，提高设备使用寿命与工作效率。（3）人员培训与应急演练是常态化维护的重要保障。定期组织技术人员参加专业技能培训，学习最新的监测技术、维护方法及安全知识，提升业务水平；制定完善的大坝安全应急预案，并定期开展应急演练，模拟大坝溃坝、渗漏等突发事件，检验应急响应机制的有效性，提高工作人员应对突发事件的能力，确保在紧急情况下能够迅速、有序地开展抢险救援工作，保障大坝及周边区域安全。

3 水利工程中大坝变形监测与维护的发展趋势

3.1 智能化监测技术深化

随着物联网、大数据、人工智能等新兴技术的不断突破，水利工程大坝变形监测正加速向智能化方向迈进。高精度传感器技术的持续革新，使得监测设备能够实现对大坝位移、应力、渗流等关键参数的毫秒级响应与亚毫米级精度测量。分布式光纤传感技术凭借其长距离、高灵敏度、抗电磁干扰的特性，可在大坝混凝土结构中实现应变场的连续监测，实时捕捉细微变形趋势；微机电系统（MEMS）传感器则以其体积小、功耗低、成本可控的优势，为坝体表面位移监测提供了大量分布式数据采集节点。数据处理与分析层面，人工智能算法深度融入监测系统，通过构建深度学习模型，能够自动识别变形数据中的异常模式与潜在风险。例如，基于卷积神经网络（CNN）的时间序列分析模型，可对大坝沉降数据进行特征提取，精准预测变形趋势；强化学习算法则能依据历史监测数据与环境变量，动态优化监测频率与数据采集策略。数字孪生技术的应用使大坝物理实体与虚拟模型实现实时交互，通过对虚拟大坝的仿真推演，可提前预判不同工况下的变形响应，为工程决策提供直观、可靠的依据。

3.2 多学科交叉融合创新

大坝变形监测与维护已不再局限于传统水利工程领域，而是逐步发展为多学科深度融合的综合性技术体系。材料科学与工程力学的交叉创新，推动了新型智能材料在大坝监测中的应用。自感知混凝土材料通过在骨料中掺入碳纳米管、石墨烯等导电填料，使大坝结构具备自感知能力，能够实时反馈内部应力应变状态；形状记忆合金传感器则利用其独特的超弹性与记忆效应，实

现对大坝裂缝开合度的长期稳定监测。地球科学与空间技术的融合为大坝宏观变形监测提供了全新视角。合成孔径雷达干涉测量 (InSAR) 技术凭借其全天时、全天候的监测能力,可获取大坝及其周边区域的毫米级地表形变信息;卫星激光测距 (SLR) 与全球卫星导航系统 (GNSS) 的协同应用,能够实现对大坝整体位移的高精度动态监测。计算机科学与水利工程的结合催生出智能决策支持系统,通过整合地质、水文、气象等多源异构数据,运用数值模拟与优化算法,为大坝维护方案的制定提供科学依据,显著提升工程管理的精细化水平^[3]。

3.3 全生命周期管理理念强化

大坝全生命周期管理理念的强化,标志着工程维护模式从被动响应向主动预防的根本性转变。在设计阶段,基于三维地质建模与数值仿真技术,能够在大坝全生命周期内的受力特性、变形规律进行精确模拟,优化坝体结构设计,降低潜在风险。施工过程中,通过实时监测与反馈控制,可动态调整施工工艺与参数,确保工程质量符合设计要求。例如,采用智能碾压技术,通过在振动碾上安装传感器实时监测压实度,保证坝体填筑质量均匀性。运营阶段,借助物联网与大数据技术构建的大坝健康监测系统,实现对工程状态的持续跟踪与评估。通过对海量监测数据的深度挖掘,可建立大坝健康状态评价模型,量化结构损伤程度与老化趋势。预测性维护策略的应用,基于历史数据与机器学习算法,提前识别设备故障与结构隐患,制定针对性维护计划,有效避免突发事故。在退役阶段,依托先进的无损检测与结构评估技术,科学评估大坝剩余使用寿命,合理规划拆除或改造方案,实现资源的高效利用与环境的最低影响。

3.4 绿色环保维护技术推广

在可持续发展理念的驱动下,大坝维护技术正朝着绿色环保方向加速转型。生态友好型修复材料的研发与应用成为重要趋势,生物矿化混凝土通过引入微生物诱导碳酸钙沉淀技术,实现裂缝的自愈合,减少化学灌浆

材料的使用;植物根系固土技术则利用植被根系的力学加固作用,增强大坝边坡稳定性,同时改善生态环境。废旧材料再生利用技术在大坝维护中崭露头角,将废弃混凝土、沥青等材料经过破碎、筛分、改性处理后,作为新的筑坝材料循环使用,有效降低资源消耗与环境污染。在维护工艺方面,非开挖技术的广泛应用显著减少了对大坝结构的扰动与生态环境的破坏。例如,采用定向钻技术进行坝基帷幕灌浆,无需大面积开挖即可实现深部防渗处理;机器人检测与维护技术则通过智能爬机器人携带多种传感器,对大坝内部复杂结构进行无损检测与修复作业,降低人工操作风险与施工成本。绿色施工管理理念贯穿维护全过程,通过优化施工方案、采用清洁能源设备、加强废弃物回收处理等措施,最大限度减少维护工程对周边生态系统的影响,实现工程效益与生态效益的协同发展^[4]。

结语

综上所述,大坝变形监测与维护是保障水利工程安全运行的核心工作。多元化监测技术的协同应用与数据驱动的预警机制,为大坝安全管理提供了科学依据;针对性维护策略与常态化管理则有效提升了大坝运行稳定性。面向未来,智能化、多学科融合及全生命周期管理理念的深化,将推动大坝监测维护向更精准、高效、绿色的方向发展,为水利工程持续发挥社会效益筑牢安全防线。

参考文献

- [1]魏振伟,周继伟.水利工程中的大坝变形监测与维护要点分析[J].百科论坛电子杂志,2020(7):1413-1414.
- [2]田志华,张和平.水利工程中的大坝变形监测与维护措施研究[J].百科论坛电子杂志,2022(5):142-144.
- [3]章清坡.浅谈水利工程中的大坝变形监测与维护[J].电脑校园,2020(10):4882-4883.
- [4]郭新杰.水利工程中的大坝变形监测与维护要点分析[J].电脑高手,2021(4):89-90.