

# 水利工程大坝安全监测自动化技术应用

文 / 高建辉 青岛安坤建筑工程有限公司

张高旗 青岛安坤建筑工程有限公司

**摘要：**随着社会的发展，水利工程在国民经济中的地位越来越重要，而大坝作为水利工程的核心，其安全问题关系到国计民生。由于受时间、空间和人力等因素的限制，传统的人工监测方法很难对潜在的风险进行实时监测。当今，随着科学技术的发展，自动化技术也随之诞生。它能全天候、全方位地感知大坝的细微变化，并对数据进行实时反馈，突破信息滞后的限制，为大坝的安全管理注入精准高效的生命力，开启大坝安全运行的崭新篇章。

**关键词：**水利工程；大坝安全监测；自动化技术；应用

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.09.080

## 引言

随着水利事业的蓬勃发展，大坝规模越来越大，结构越来越复杂，对其安全性的要求也越来越高。以往依靠常规的人工巡检，找出隐患犹如大海捞针，容易漏掉关键点，而且不能对大坝的实时状态进行动态跟踪。自动化技术的兴起给大坝安全监控带来了希望。依托高精度传感网络 and 智能传输网络，可以快速获取大坝位移、渗流等关键数据，使管理人员能够及时发现异常，提前预警，确保大坝稳如泰山，保障下游安全。

### 一、自动化技术的基本概念

自动化技术是一种综合技术，它是指利用先进的控制理论、电子技术、计算机技术以及传感器等设备，使机器、设备或系统能够根据预先设定的指令自行运行，最大限度地减少甚至不需要人为的直接干预。它的核心是自动化控制，可以精确地控制生产、监控等多个过程。在工业流水线中，自动控制技术可以根据预先设定的程序，精确地抓取和装配零件，大大提高了生产效率和产品质量；在智能交通系统中，它可以通过传感器来感知道路状况，从而自动调整信号灯的使用时间，优化交通流量。在智能家居领域，它可以根据使用者的习惯，自动调节房间的温度和开关。总之，自动化技术已经渗透到了生活的每一个角落，它可以让人在工作中自动完成任务，从而让人变得更加方便，更加高效，更加精准<sup>[1]</sup>。

### 二、大坝安全监测自动化技术的特点

大坝安全监测自动化技术是一项具有特色的技术。首先是高精度传感特性，利用光纤光栅、高精度应变仪等先进设备，对大坝进行精确监测，如大坝变形监测精度可达毫米及以下，温度监测精度可达0.1℃，为掌握大坝实时状况提供精细数据。其次，实时性，它克服了传统人工巡检方式的不间断缺点，24小时不间断运转，无论白天烈日炎炎，还是夜深人静，传感器都会在岗位上不停地采集数据，将大坝在不同时间、不同工作状态下的动态信息全部记录下来，形成一条连贯的监控“数据流”，确保不遗漏任何潜在的危险。然后，多参数同步监测，实现大坝温度、应变、渗透、水位等多个关

键参数的同步监测，多参数之间相互关联验证，全面反映大坝复杂运行环境，犹如对大坝健康状况进行“全面体检”。

### 三、水利工程大坝安全监测自动化技术的具体应用

#### (一) 大坝结构安全监测

在水利工程运营维护系统中，对坝体结构进行安全监控是最重要的工作。首先，从监测的内容来看，温度的监测是一个重要的组成部分。大坝是一种巨型混凝土结构，其内部温度容易受到外界环境和混凝土自身水化热等因素的影响。无论是炎炎烈日下的高温侵袭，还是寒冬严寒下的低温渗入，都会引起大坝内部温度的显著波动。如果温度变化超过一定程度，混凝土就会因为膨胀和收缩而出现裂纹，从而破坏大坝的稳定性，因此温度的精确控制是至关重要的<sup>[2]</sup>。其次，应变监测也是必不可少的。大坝在服役过程中，需要不断地受到水压、自重和地震等各种荷载的影响，各部位的受力情况也各不相同，导致了复杂多变的应变状态。大坝基础至坝顶各部位的应力应变关系到整个大坝的安全，如果应变值与设计要求偏差较小，则可能导致结构强度弱化，局部失效风险急剧增加，亟需实时掌握坝体应变状态。另外，变形监测也关系到大坝的生存和发展。在长期的水流冲刷、地基不均匀沉降和山体侧推等多种外部扰动作用下，坝体将发生水平位移和竖向沉降。哪怕只有几毫米的细微变化，日积月累之下，也有可能致大坝结构发生质变，引发坍塌等灾难性后果。在技术手段上，主要依赖于各种传感设备，以实现对这些关键环节的有效监控。光纤光栅温度传感器因其高灵敏度，可准确感知坝体温度的微小变化，并快速转换成光信号进行传输；应变片传感器与大坝关键部位紧密接触，就像触觉神经一样，能实时捕捉坝体的应变变化，并将其转化为电信号输出。同时，全站仪、水准仪等测量设备和自动化监控系统相互配合，形成严密的变形监测网络，实现对坝体位移的全方位、高精度跟踪。有了这些先进的监测手段，工程师们就可以实时、精确地掌握大坝结构的变化。一旦发现温度异常波动可能会导致混凝土出现病害，或者当温度超过临

界值时,就可以立即采取相应的措施,如温控措施,调整水库水位来卸载,紧急加固等,从而保证大坝的长期安全,为水利工程的稳定运行和下游地区的安全奠定坚实的基础。

## (二) 水文监测

水文监测是水利工程安全保障系统中非常重要的一个环节。首先,从监测的内容来看,水位监测是非常重要的。库岸水位的变化受到多种因素的影响,降雨季节的增减,上游来水流量的波动,水库的调蓄作用等都会使库岸水位发生动态变化。无论是在暴雨过后迅速上涨,还是在枯水期不断回落,每次水位波动都关系到大坝的安全。当水位超过设计警戒水位时,所产生的巨大水压会对大坝造成超负荷冲击,可能导致坝体开裂、渗漏水,甚至坍塌,因此实时、精确的水位监测是不可忽视的。其次,水压的监控也是必不可少的。大坝上游和下游因水位差异形成的水压力是大坝长期承受的一项重要荷载。洪水期间,水位迅速上涨,上游和下游的水压差瞬间增大,这种巨大的压力持续对大坝进行压力测试<sup>[3]</sup>。坝基、坝顶不同部位承受的水压差异较大,其内部压力分布复杂,若某一区域内水压力异常波动,则可能预示坝体发生渗漏等局部水压力不平衡,进而影响坝体整体稳定性。在技术手段上,要准确掌握水文要素,主要依靠各种先进的传感设备。坝周水体中广泛分布着埋入式水位传感器,它能快速感知水位的微小变化,并将其转化为电信号,实时传送到监控中心。水压传感器就像是大坝的“压力传感器”,与大坝的各个部位紧密相连,特别是关键部位,精确测量压力值,并将数据以数字形式反馈给用户。通过无线传输网络,将传感器采集到的数据迅速准确地传输到监测平台上。这样,通过这些自动化的监测技术,就可以使工作人员了解大坝的水文情况。当监控系统提示水位接近或超出警戒线,或者某个区域出现异常水压时,系统就会启动应急预案。及时调整水库泄量,对坝体薄弱部位进行提前加固,有效抵御洪涝等自然灾害,保障大坝在复杂多变的水文条件下的安全运营,保障下游人民生命财产和社会稳定。

## (三) 地质监测

在水利工程大坝安全保障这一错综复杂的拼图中,地质监测是必不可少的一环。首先,从监测的内容来看,滑坡隐患的监测是重中之重。工程建设改变了大坝周围山体的应力平衡,使其在降雨、地震和长期风化作用下发生松动。一旦发生大范围滑坡,不仅大量土石会瞬间冲入大坝,堵塞河道,改变水流形态,使大坝承受额外的横向冲击,还可能掩埋监测设备和交通要道,妨碍救援工作。对滑坡前兆进行实时监测,如地表位移、岩土体内部裂隙发育等,可以提前发现险情,提前做出反应<sup>[4]</sup>。其次,大坝基础沉降的监测也是不容忽视的。大坝主要依靠稳定的坝基承载力,但坝基处地质条件复杂多变,

软土层长期受压后会发生固结沉降,地下水溶蚀、断裂活动等作用会使岩体产生不均匀沉降。即使有很小的差异沉降,随着时间的推移,也可能造成坝体结构的受力不均匀,从而导致大坝出现裂缝和渗漏等严重的问题。在坝基关键部位布设高精度沉降传感器,并对其进行实时的沉降监测,可以及时发现潜在的病害。另外,地震监测关系到大坝的生死存亡。许多高坝处于地震活动区,当地震波突然袭击时,大坝周围的地质环境将瞬间发生变化,导致大坝遭受强震、砂土液化、崩塌等多灾变。地震监测设备能够实时获取地震波信息,提前数秒乃至数十秒进行预警,为大坝紧急制动、泄水等应急作业提供提前预警,将地震造成的损失降到最低。从技术手段上看,要实现高精度、高效率的地质监测,主要依赖于各种传感设备。倾斜传感器像是一双锐利的眼睛,安装在山坡上,可以准确地捕捉到山体倾斜角的变化,从而预测滑坡的发生。在坝基布置静力水准仪,通过高精度液位测量来反映沉降的动态变化;强震仪24小时待命,能迅速感应到地震的强度和方向。这些传感器实时采集到的数据,经过专门的传输线路,汇集到监控中心,通过这些数据分析,工作人员就可以对大坝周围的地质环境造成的影响进行判断,从而在地质灾害发生之前,对大坝进行加固,清除滑坡隐患,制定地震应急预案,有效地防止地质灾害对大坝造成的破坏,确保大坝在复杂地质条件下的长期安全运行。



图1 倾斜传感器

## (四) 灾害监测

在水利工程安全防护网中,灾害监测就像是一支锐利的“前哨”,担负着重要的任务。首先,我们把研究的重点放在地震灾害的监测上。很多大坝都位于板块碰撞的边缘,或者是地壳活跃区,一旦发生地震,大坝周围的地质环境将会发生翻天覆地的变化。地震监测装置

中的强震仪，就像是一名机警的守护者，精确地布置在大坝的关键节点和周围的山体上。它们能非常灵敏地捕捉到一些重要的信息，如地震波的开始时间，强度和持续时间。一旦发生地震，哪怕只是轻微的震动，强震仪也会第一时间将数据传送到监测中心，让工作人员第一时间知道发生了什么事。这一点非常重要，因为地震引起的强地震可能会对大坝造成破坏，导致混凝土开裂、混凝土开裂等情况，提前几秒到几十秒的预警，可以为紧急关闭相关设备、清空水库等应急作业赢得宝贵的时间，将地震对大坝的影响降到最低。其次，对滑坡的监测也不能忽视。大坝周围山体长期受到降雨、风化侵蚀和工程施工等因素的影响，导致原应力平衡发生改变，导致滑坡风险持续存在。边坡位移传感器、裂隙测量仪等与山体边坡及潜在裂隙密切相关的仪器发挥了巨大的作用。边坡位移传感器实时跟踪山体运动轨迹，微小到毫米的位移都无法逃出“法眼”；裂隙测量仪就像一把精密的尺子，精确地测量出岩石内部裂隙的宽度和深度。一旦监测数据显示滑坡有加剧趋势，意味着大量土石将倾泄而下，冲击大坝、堵塞河道，这时候工作人员就可以快速启动应急预案，对坝体迎水面进行加固，并对坝前可能堆积的土石进行清理，确保大坝不会被滑坡体直接损毁。此外，洪涝灾害的监测也是十分重要的。暴雨后，上游水量急剧增加，水位迅速上涨，一旦超过大坝的泄水量，将对大坝产生巨大的压力。水位传感器、流速仪等仪器在这个时候起到了至关重要的作用，水位传感器实时反馈水位高度，流速仪准确测量水流流速，二者相互配合，使工作人员能够及时掌握洪水的演变情况。一旦洪水达到警戒线，所有的泄洪通道都会被打开，下游的人也会被及时撤离，保证大坝的安全。这些传感器等设备可以实时监控自然灾害的发生与发展，工作人员可以根据这些信息，及时判断灾害对大坝造成的影响，并及时采取相应的应对措施，为大坝筑起一道安全防线。

### （五）数据传输与处理

在水利工程大坝安全监测系统框架中，数据传输与处理是连接前端监控和后端决策的重要“桥梁”。首先，就通信传输技术的应用而言，超高频（UHF）通信具有穿透力强、局部高效率等特点，可在某些地形较为复杂、电磁干扰较少的大坝施工现场周边，快速传输传感器近程数据到邻近的中继点。而全球移动通信系统（GSM）与通用分组无线服务技术（GPRS）凭借其广阔的网络覆盖范围，可以突破地域的限制，将大坝深层应变传感器、坝基渗流传感器等采集到的数据通过远距离传输到中央数据中心，保证了即便是在偏远山区建设的水坝，信息也不会因为距离的阻隔而被阻隔<sup>[5]</sup>。随着时代的发展，3G和4G网络的出现，使得数据的高速大容量传输成为可能。当大坝遇到地震等突发事件时，大坝发生多个结构变形，洪水引起水位急剧变化，大量的监测数据会在

第一时间生成，而3G和4G网络就像一条宽阔的信息高速公路，将这些数据迅速传输到大坝的“安危密码”上。光纤通信以其超高的传输速率和极低的信号损耗，成为高精度、高要求的监测数据传输的首选。例如，在大坝微裂纹的长期连续监测过程中，光纤传感器获取的微小变化信息，通过光纤传输无失真地传输，为精确分析提供可靠依据。其次，预写好的抽样协议起到了“指挥棒”的作用，在数据处理层次上起到了重要作用。在此基础上，对传感器采集数据的时间、频率和格式进行了规定。根据协议，温度传感器可能会每小时采集大坝核心区域的温度，以保证在白天和夜晚温度变化时，可能会对大坝结构产生影响；在坝体受水压力变化的关键节点处，采用应变传感器进行高频采集。根据协议收集到的数据，通过信息传输工具，有序地汇聚在一起，然后用专门的数据分析软件，对不同类型的传感器数据进行集成和比对。一旦发现某一段坝体变形速度加快，渗透压力增加，工程人员就可以及时发现大坝存在的安全隐患，从而采取相应的措施，如应急加固、水库运行水位调整等，通过高效的数据传输和处理，确保大坝的安全。

### 结语

总之，水利工程大坝安全监测自动化技术，凭借高精度感知、实时连续监测与多参数同步监测的特点，被广泛应用于大坝结构、水文、地质和灾害监测等领域。该系统有效地提高了大坝安全管理的准确性和时效性，使工程技术人员能够及时掌握大坝的运行状况，及时采取相应的措施。因此，复杂多变的环境和潜在的风险环境下，本项目研究成果能够有效地保证大坝的稳定运行，为水利工程的安全稳定和下游地区的安定繁荣打下坚实的基础。

### 参考文献

- [1] 马浩然. 水利工程大坝的安全监测技术分析[J]. 水上安全, 2024, (22): 40-42.
- [2] 颜彦, 曹金鑫. 大坝安全监测体系构建及其在水利工程中的应用探讨[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024, (17): 205-207.
- [3] 陈元福. 水库大坝安全监测技术标准相关问题探析[J]. 大众标准化, 2023, (08): 36-37+40.
- [4] 王翔, 郑淇文, 张志勇, 张卓然, 李晨. 高质量发展阶段中国水利工程安全监测现状及提升策略[J]. 水利水电快报, 2023, 44(03): 76-83+88.
- [5] 谭理则. 水利工程中安全监测自动化系统的应用方法[J]. 智能城市, 2021, 7(16): 167-168.

作者简介：高建辉，1988.05.04，男，汉，山东省青岛市莱西市，本科，中级工程师，研究方向：水利工程。张高旗，1986.11.04，男，汉，山东省青岛市莱西市，本科，中级工程师，研究方向：水利工程。