

多传感器融合技术在大坝安全监测中的应用

沈迅 李建洪 李明和 张锦维 张中姣

云南省地质工程勘察有限公司，云南昆明，650051；

摘要：本文旨在探讨多传感器融合技术在大坝安全监测中的应用，通过阐述大坝安全监测的重要性及传统监测方法的局限性，详细分析多传感器融合技术的原理与优势，并结合实际工程案例，研究其在大坝变形监测、渗流监测、应力应变监测等方面的具体应用。结果表明，多传感器融合技术能够有效整合不同类型传感器数据，提高监测数据的准确性、可靠性和全面性，及时发现大坝安全隐患，为大坝的安全运行提供有力保障。

关键词：多传感器融合技术；大坝安全监测；变形监测

DOI：10.69979/3041-0673.25.10.029

引言

大坝作为水利工程的重要基础设施，在防洪、发电、灌溉、供水等方面发挥着关键作用，然而，大坝在长期运行过程中，受自然环境、地质条件、工程老化等多种因素影响，可能出现变形、渗流异常、结构损坏等安全问题，一旦发生溃坝事故，将对下游人民生命财产和生态环境造成毁灭性打击，因此，大坝安全监测至关重要^[1]。传统的大坝安全监测主要依赖单一类型传感器，如水准测量用于监测大坝垂直位移、测压管监测渗流压力等，这些方法存在监测信息单一、实时性差、可靠性不足等问题，难以全面准确地反映大坝的实际安全状况。随着传感器技术、计算机技术和通信技术的不断发展，多传感器融合技术逐渐应用于大坝安全监测领域，多传感器融合技术通过对多种不同类型传感器采集的数据进行综合处理和分析，充分发挥各传感器的优势，弥补单一传感器的不足，能够更全面、准确、及时地获取大坝的运行状态信息，为大坝安全评估和决策提供更可靠的依据。

1 多传感器融合技术原理与优势

1.1 多传感器融合技术原理

多传感器融合技术是将来自不同类型、不同位置传感器的数据进行协同处理，通过互补、冗余与协同机制，获取比单一传感器更全面、准确信息的技术体系^[2]。其核心流程涵盖数据采集、预处理、融合处理与结果输出四个环节，在数据采集阶段，依据监测目标部署多种传感器，如用于大坝变形监测的全球导航卫星系统(GNSS)、全站仪，用于渗流监测的渗压计、流量计，以及用于应力应变监测的应变计、光纤光栅传感器等。这些传感器基于不同物理原理获取数据，如GNSS通过卫星信号定位获取位移信息，渗压计利用压力传感元件测量孔隙水

压力。数据预处理环节旨在消除原始数据中的噪声、异常值与量纲差异。通过滤波算法（如卡尔曼滤波、小波滤波）去除随机噪声，采用归一化方法统一数据尺度，并利用插值法填补缺失数据，为后续融合提供高质量数据源。融合处理是多传感器融合的关键步骤，主要采用三类方法：一是基于模型的方法，如卡尔曼滤波、贝叶斯网络，通过建立数学模型描述传感器数据的概率分布，实现数据最优估计；二是基于人工智能的方法，如神经网络、支持向量机，利用机器学习算法挖掘数据间的非线性关系；三是基于特征的方法，如主成分分析(PCA)、证据理论，通过提取数据特征并融合，降低数据维度的同时保留关键信息。最终，融合处理后的结果经可视化与分析，输出为大坝安全状态评估报告，为运维决策提供依据。

1.2 多传感器融合技术优势

多传感器融合技术在大坝安全监测中展现出显著优势，有效弥补了单一传感器的局限性。首先，其具备信息互补性，不同类型传感器获取的数据反映大坝安全状态的不同维度，如GNSS提供整体位移趋势，光纤光栅传感器捕捉局部应变细节，融合后可构建完整的安全监测图景。其次，数据冗余性提升了监测可靠性。当某一传感器出现故障或数据异常时，其他传感器可提供补充信息，避免监测盲区^[3]。例如，在强电磁干扰环境下，光纤传感器数据可辅助修正电磁类传感器的误差，保障数据连续性。第三，多传感器融合显著提高监测精度与效率。通过算法优化，可将不同传感器的误差相互抵消，如融合全站仪与GNSS数据可将位移监测精度从厘米级提升至毫米级。同时，自动化数据处理流程大幅缩短分析周期，实时输出监测结果，满足大坝安全动态管理需求。此外，该技术具备较强的适应性与扩展性。可根据

大坝不同运行阶段、地质条件灵活增减传感器类型与数量，如在蓄水期加强渗流监测，在老化期侧重应力应变监测。同时，融合框架支持与物联网、云计算、人工智能技术集成，为大坝安全智慧化管理奠定基础。

2 多传感器融合技术在大坝安全监测中的应用

2.1 大坝变形监测

大坝变形是反映其结构安全状态的关键指标，微小的位移变化可能预示着潜在安全隐患。多传感器融合技术通过整合全球导航卫星系统（GNSS）、全站仪、激光测距仪、光纤光栅传感器等多种设备，实现对大坝三维变形的高精度、实时监测^[4]。GNSS技术能够提供毫米级的水平和垂直位移数据，具有全天候、覆盖范围广的特点，适用于大坝整体变形趋势监测。全站仪则可通过极坐标测量，实现对特定监测点的高精度定位，精度可达亚毫米级，常用于大坝关键部位的局部变形监测。激光测距仪通过发射激光束并测量反射时间，能够快速获取大坝表面的距离变化数据，适用于高边坡、坝肩等区域的变形监测。光纤光栅传感器凭借其高精度、抗电磁干扰、分布式测量的优势，可埋设在大坝内部，实时监测坝体内部的应变变化，进而推算出坝体的变形情况。将这些传感器的数据进行融合处理，利用卡尔曼滤波、贝叶斯估计等算法，能够有效去除噪声干扰，提高监测数据的准确性和可靠性。例如，在某混凝土重力坝变形监测中，通过多传感器融合技术，成功捕捉到坝体在蓄水期0.3毫米的微小位移变化，为大坝安全运行提供了重要依据。

2.2 大坝渗流监测

渗流异常是导致大坝失事的主要原因之一，及时准确地监测大坝渗流状态至关重要。多传感器融合技术集成了渗压计、流量计、水位传感器、光纤分布式温度传感器等多种设备，实现对大坝渗流场的全面监测^[5]。渗压计通过测量孔隙水压力，可计算出坝体内部的渗流压分布，判断渗流是否正常。流量计用于监测大坝排水孔、测压管等部位的渗流量，直观反映渗流强度。水位传感器则实时监测上下游水位变化，结合渗流压力和流量数据，可分析渗流的成因和发展趋势。光纤分布式温度传感器利用温度与渗流的相关性，通过监测坝体内部温度场变化，间接反映渗流情况。由于渗流会引起热量传递，渗流区域的温度场会与周围区域存在差异，通过对温度数据的分析，可定位渗流通道，评估渗流风险。将这些传感器的数据进行融合，采用数据挖掘、机器学习等算法，能够建立渗流模型，预测渗流发展趋势。在

某土石坝渗流监测中，多传感器融合技术成功预警了坝体内部的集中渗漏问题，为及时采取防渗处理措施赢得了时间。

2.3 大坝应力应变监测

大坝在运行过程中，受到水压力、自重、温度变化等多种荷载作用，内部应力应变状态复杂。多传感器融合技术综合运用应变计、钢筋计、土压力计、光纤光栅传感器等设备，实现对大坝应力应变状态的全面监测。应变计和钢筋计可埋设在混凝土坝体或钢筋混凝土结构中，直接测量结构的应变和钢筋应力，反映结构的受力状态。土压力计用于监测土石坝坝体内部的土压力分布，评估坝体的稳定性。光纤光栅传感器由于其高灵敏度、抗电磁干扰等特性，可在大坝内部进行分布式布置，实时监测坝体不同部位的应变变化。将这些传感器的数据进行融合，结合有限元分析、数值模拟等方法，能够准确分析大坝的应力应变分布规律，评估结构的安全性。例如，在某拱坝应力应变监测中，多传感器融合技术发现了坝肩部位的应力集中现象，通过与有限元模型对比分析，确定了应力集中的原因，并及时采取了加固措施，保障了大坝的安全运行。通过多传感器融合，能够实现对大坝应力应变状态的多维度、立体化监测，为大坝的安全评估和维护提供科学依据。

3 案例分析

3.1 案例背景

某混凝土重力坝建于20世纪80年代，坝高128米，坝顶长度850米，承担着防洪、发电和灌溉等多重功能。随着运行年限增加，坝体受长期水荷载、温度变化及地质条件影响，出现局部裂缝、渗流异常等问题。传统单一传感器监测存在数据维度不足、预警滞后等问题，难以全面掌握坝体安全状态。为提升监测精度与可靠性，保障大坝安全运行，项目引入多传感器融合技术开展系统性安全监测。该大坝所在区域夏季暴雨频发，冬季温差达30℃以上，复杂的气候条件加剧了坝体结构受力的复杂性。坝基覆盖层存在软弱夹层，部分坝段混凝土强度出现衰减，且坝体下游面已发现多条长度超5米的裂缝，最大宽度达0.8毫米，存在渗流风险。同时，大坝监测系统原有设备老化严重，数据采集频率低、误差大，亟需通过技术升级实现更精准的安全监测。

3.2 应用过程

3.2.1 传感器部署与选型

针对大坝安全监测需求，构建了多层次、立体化的传感器网络：

变形监测：在坝顶及坝肩布置 8 个 GNSS 监测站，实现毫米级三维位移监测；在裂缝密集区域安装 12 台全站仪，进行亚毫米级局部变形监测；沿坝体内部廊道埋设 30 支光纤光栅位移传感器，实时捕捉内部变形。

渗流监测：在坝基和坝体内部布设 25 支渗压计，监测孔隙水压力变化；在排水孔安装电磁流量计，实时测量渗流量；在坝体上下游及内部关键部位布置 18 个光纤分布式温度传感器，通过温度场变化定位渗流通道。

应力应变监测：在坝体混凝土内部埋设 40 支振弦式应变计，监测结构应力变化；在坝基与坝体连接处安装 15 支土压力计，监测接触应力；在坝体钢筋混凝土结构中部署 20 支钢筋计，实时测量钢筋应力状态。

3.2.2 数据采集与传输

采用物联网技术搭建数据采集传输平台，所有传感器数据通过无线传输模块或光纤网络实时传输至监控中心。设定变形、渗流类传感器数据采集频率为 1 次/分钟，应力应变类传感器为 5 次/小时，确保数据的时效性和连续性。同时，建立冗余传输通道，保障数据传输的稳定性。

3.2.3 多传感器数据融合处理

运用卡尔曼滤波算法对变形监测数据进行融合，有效消除 GNSS 信号多路径效应及全站仪测量误差，将位移监测精度提升至±0.5 毫米。基于贝叶斯网络模型融合渗流监测数据，结合渗压计、流量计和温度传感器数据，构建渗流场分析模型，准确识别渗流路径和异常区域。采用主成分分析法（PCA）对不同类型应力应变数据进行降维处理，结合有限元仿真模型，实现对坝体应力状态的动态评估。

3.3 效果分析

3.3.1 监测精度显著提升

多传感器融合技术应用后，大坝变形监测精度提高 60% 以上，成功捕捉到坝顶在强降雨期间 0.3 毫米的水平位移变化和 0.2 毫米的垂直沉降，较传统单一传感器监测精度提升 3 倍。渗流监测方面，通过温度场与渗压数据融合分析，准确定位出 2 处隐蔽渗流通道，较常规方法定位效率提高 70%。应力应变监测实现了对坝体关键部位应力变化的实时追踪，应力监测误差控制在±3% 以内。

3.3.2 安全预警能力增强

基于融合数据建立的安全预警模型，在大坝运行过程中成功发出 3 次预警。其中，通过渗流数据融合分析，提前 72 小时预警了坝基某处渗压异常升高的情况，经

现场核查确认存在局部防渗层破损，及时采取灌浆处理措施避免了险情扩大；在某次寒潮期间，应力应变融合数据显示坝体下游面混凝土拉应力超过阈值，系统提前 48 小时发出预警，指导管理单位采取保温措施，防止裂缝进一步扩展。

3.3.3 运维管理效率提升

多传感器融合技术提供的全面、准确数据，为大坝运维决策提供了科学依据。通过可视化分析平台，管理人员可直观查看大坝安全状态，缩短决策时间 50% 以上。数据驱动的维护策略使年度巡检成本降低 35%，设备维护周期延长 20%。同时，历史数据的积累和分析为大坝安全评估提供了长期数据支撑，有助于制定更合理的维护和加固方案。

3.3.4 经济效益与社会效益显著

项目实施后，避免了因大坝安全问题可能导致的重大经济损失，预计每年减少潜在损失超千万元，精准的监测与预警保障了下游居民的生命财产安全，提升了区域防洪减灾能力。同时，该技术的成功应用为同类大坝安全监测提供了示范，推动了多传感器融合技术在水利工程领域的广泛应用。

4 结束语

多传感器融合技术凭借对多元数据的整合分析，显著提升了大坝安全监测的准确性、全面性与实时性，在变形、渗流、应力应变监测等关键领域成效显著，为大坝安全运行筑牢技术防线。未来，伴随人工智能、大数据技术的深入发展，多传感器融合技术有望实现监测的智能化升级，进一步提升大坝安全监测的自动化水平，为水利工程设施的长期稳定运行提供更强有力的保障。

参考文献

- [1] 马新涌, 杨德成. 水库大坝安全自动化监测质量问题及改进策略 [J]. 中国标准化, 2023(8): 198–200.
- [2] 陈飞. 基于多传感器融合的水库大坝变形监测系统 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2024(10): 167–169.
- [3] 梁永平, 李盛. 结构安全多源监测方法研究现状及进展 [J]. 北京测绘, 2025, 39(3): 275–281.
- [4] 徐乐, 王升华, 刘伟良. GNSS 视频 MEMS 加速度一体化设备在安全监测行业的应用前景 [J]. 传感器世界, 2024, 30(12): 1–6.
- [5] 叶辉, 蒋丽珠, 杨昊. 基于多传感器信号融合的大型水利坝体变形检测研究 [J]. 水利科技与经济, 2022, 28(7): 115–119.