

工程测量数据融合与动态监测方法研究

李玉峥 李 季 王志涛 史云硕 李玉广
航天规划设计集团有限公司 北京 102600

摘要: 工程测量领域中,数据融合与动态监测技术至关重要。本文详细阐述工程测量数据融合技术体系,包括基础理论、关键方法及预处理标准化;分析工程动态监测技术方法,涵盖技术分类、误差控制与实时处理;探讨数据融合与动态监测的协同应用,涉及协同框架、技术挑战及应用场景扩展;最后展望技术融合方向、方法论创新及工程应用深化趋势,为提升工程测量精度与效率提供参考。

关键词: 工程测量;数据融合;动态监测;协同应用;技术趋势

引言: 工程测量作为工程建设的基础环节,对保障工程质量与安全意义重大。传统工程测量依赖单一数据源与静态监测手段,难以满足复杂工程场景下对高精度、实时性数据的需求。随着传感器技术、通信技术及人工智能的发展,多源数据融合与动态监测技术应运而生。数据融合可整合不同来源数据,提升数据完整性与可用性;动态监测能实时感知工程状态变化。二者结合可突破传统测量局限,为工程测量提供更全面、精准、及时的数据支持。

1 工程测量数据融合技术体系

1.1 数据融合基础理论

1.1.1 定义与分类

多源数据融合是指集成不同传感器、不同测量手段获取的工程测量数据,通过系统化整合实现数据互补,提升数据的完整性与可用性^[1]。异构数据融合专注于处理来源不同、格式各异、尺度有别、精度不均的测量数据,通过针对性处理消除数据间的差异,实现各类数据的有效兼容与整合,为后续工程分析提供统一的数据支撑。

1.1.2 融合层次

数据级融合是直接对原始测量数据进行整合,未经过复杂的特征提取或分析处理,能最大程度保留原始数据中的细节信息,为后续融合环节提供基础数据支撑。特征级融合需先从原始测量数据中提取关键特征信息,剔除冗余数据,再对提取的特征进行整合,兼顾数据处理效率与信息完整性。决策级融合基于各数据源的分析结果进行整合,结合不同数据的分析结论形成综合决策,提升工程测量数据应用的可靠性。

1.2 关键融合方法

1.2.1 统计融合方法

加权平均法依据不同测量数据的可靠性分配相应权重,可靠性越高的数据源权重越大,通过加权计算得到

综合数据结果,适用于数据精度差异明显的工程测量场景。卡尔曼滤波主要用于动态工程测量场景,通过建立动态系统模型,实现系统噪声的抑制与状态估计,有效修正测量过程中的误差,提升动态测量数据的稳定性与准确性。

1.2.2 智能融合方法

深度学习模型中的卷积神经网络擅长提取工程测量数据中的空间特征,通过多层网络结构挖掘数据深层关联,适配图像类、点云类工程测量数据的融合处理。图神经网络专注于处理具有拓扑结构的工程测量数据,能够精准捕捉数据间的关联关系,适配地下管网、道路网络等具有复杂拓扑结构的测量数据融合需求。

1.2.3 模糊逻辑融合

隶属度函数定义是模糊逻辑融合的核心,通过合理定义隶属度函数,有效处理工程测量数据中存在的确定性,将模糊信息转化为可量化的融合依据。模糊规则推理模拟人类决策过程,结合工程测量的实际需求设定推理规则,实现对不确定数据的合理融合,提升融合结果的合理性与适配性。

1.3 数据预处理与标准化

数据清洗是预处理的基础环节,主要用于剔除测量数据中的噪声、异常值,同时对缺失数据进行合理填补,减少数据异常对融合结果的影响。坐标统一用于解决不同数据源的空间基准差异,通过坐标转换实现各类测量数据在同一空间基准下的整合,消除空间偏差。格式转换针对工程测量中常见的矢量、栅格、点云等不同格式数据,进行标准化处理,实现不同格式数据的兼容与互通,为后续融合操作奠定基础。

2 工程动态监测技术方法

2.1 动态监测技术分类

2.1.1 实时动态定位

载波相位差分技术是实时动态定位的核心技术之一,可实现厘米级精度定位,依托载波相位观测值进行差分计算,有效抵消卫星钟差、大气延迟、轨道误差等各类系统性偏差,显著提升动态定位的精度与稳定性,适配各类工程场景下的动态监测需求,尤其适用于对定位精度要求较高的工程结构监测^[2]。动态初始化技术专注于运动目标的快速重定位,通过优化初始化算法流程,缩短定位初始化耗时,能够在运动目标位置发生突变或定位信号中断后,快速恢复定位功能,保障动态监测数据的连续性与时效性,满足工程动态监测中目标位置实时更新的核心需求。

2.1.2 多传感器集成监测

GNSS与IMU组合形成的监测模式,通过惯性导航技术弥补卫星信号遮挡带来的定位缺陷,惯性导航系统可在卫星信号中断或受遮挡时,持续提供高精度的定位与姿态信息,实现定位功能的无缝衔接,有效提升复杂工程环境下动态监测的连续性与可靠性。激光雷达与摄像头的集成应用,可实现三维点云与纹理信息的深度融合,激光雷达能够精准获取目标的三维空间几何信息,摄像头则可捕捉目标表面的纹理细节,两者有机结合可丰富监测数据维度,提升动态监测的全面性与精准度,为工程结构的精细化监测提供有力支撑。

2.1.3 测量机器人与移动测量车

测量机器人具备自动化测量周期与毫秒级响应速度,可自主完成监测点的瞄准、观测、数据记录与传输等一系列操作,大幅减少人为操作干预,降低人为误差,提升动态监测的效率与数据一致性。其搭载的高精度测角测距功能,能够适应复杂工程环境的监测需求,在地形复杂、视线受阻、环境恶劣等场景下,仍能保持稳定的测量精度,有效拓展动态监测技术的应用范围,适配各类大型工程、复杂地形的动态监测任务。

2.2 动态监测误差控制

2.2.1 误差来源分析

系统误差主要来源于设备精度不足与环境干扰,设备自身精度局限会导致测量数据出现固定偏差,大气折光等环境因素会影响信号传播路径,进而引入测量误差,影响监测结果的准确性。随机误差包括观测噪声与多路径效应,观测噪声由测量设备自身性能与观测环境波动引发,多路径效应则由信号反射产生,两类误差均具有随机性,难以完全消除,需通过针对性策略进行抑制。

2.2.2 误差补偿策略

自适应卡尔曼滤波通过动态调整权重分配,根据测量数据的可靠性实时优化滤波参数,有效抑制系统误差

与随机误差,提升动态监测数据的稳定性。多点校正法利用已知坐标的基准点,对测量数据进行修正,通过对比基准点测量值与真实值,消除测量过程中产生的系统偏差,提升动态监测的精度,为工程监测提供可靠的数据支撑。

2.3 动态数据实时处理

边缘计算架构将数据处理环节下沉至监测终端,无需将全部监测数据传输至远端服务器进行处理,可大幅减少数据传输过程中的延迟,实现动态监测数据的实时处理与分析,提升监测响应速度,满足工程动态监测的实时性要求。流式数据处理技术可对动态监测产生的连续数据流进行实时解析与分析,无需等待全部数据采集完成,能够快速提取监测数据中的关键信息,及时反馈工程动态变化。异常检测算法基于机器学习技术,通过挖掘监测数据的变化规律与正常范围,实现对异常数据的实时识别与预警,及时发现工程动态变化中的异常情况,为工程安全管控提供及时、有效的技术支撑。

3 数据融合与动态监测的协同应用

3.1 协同框架设计

数据流整合作为协同框架的核心支撑,承担着动态监测数据的汇聚与规整功能。动态监测过程中生成的各类实时数据,需遵循统一的技术标准接入数据融合系统,实现不同来源、不同类型监测数据的高效汇聚与有序管控^[3]。动态监测数据涵盖定位数据、姿态数据、环境数据等多种形态,通过数据流整合可有效消除数据冗余与格式壁垒,打通数据传输通道,确保各类监测数据能够顺畅输入融合系统,为后续融合运算提供全面、连续且规范的数据支撑。反馈机制是协同框架高效运行的关键保障,数据融合生成的综合结果可反向作用于动态监测环节,指导监测参数的动态调整。结合融合结果优化监测点位布局、传感器工作参数及数据采集频率,让动态监测更贴合工程实际需求,提升监测效率与数据质量,构建起“监测-融合-反馈-优化”的闭环协同体系,实现两者功能的深度联动。

3.2 关键技术挑战

时空对齐是制约协同应用效果的核心技术难题,动态监测数据与静态数据在时间与空间维度存在天然差异。时间维度上需化解不同数据源采集时间的偏差,实现各类数据在时间维度的精准匹配;空间维度上需完成各类数据在同一空间基准下的配准,消除空间坐标偏差,为数据融合的准确性奠定基础。计算效率面临高维数据实时融合带来的算力瓶颈,动态监测产生的数据流具备实时性、高维性特征,多源异构数据的融合处理需要大量

算力支撑,如何在保障融合精度的前提下提升计算速率,满足工程实时监测的时效要求,成为协同应用推进过程中的重要难题。鲁棒性不足影响协同系统的稳定运行,复杂工程环境中存在多种干扰因素,电磁干扰、环境噪声、地形遮挡等都会破坏监测数据质量、影响融合效果,提升协同系统在复杂环境下的抗干扰能力,保障系统稳定输出,是协同应用需突破的关键技术壁垒。

3.3 应用场景扩展

高层建筑变形监测领域,融合GNSS与激光扫描数据可实现建筑变形的全方位、高精度监测。GNSS技术可实时捕捉建筑整体位移信息,激光扫描技术能够精准捕捉建筑表面细微变形特征,两者融合可弥补单一监测技术的局限,全面捕捉高层建筑的变形状态,为建筑结构安全管控提供可靠的数据支撑。地下工程安全监测中,多传感器数据融合可实现安全隐患的精准识别,整合惯性测量、地质雷达、应力监测等各类数据,通过融合分析挖掘数据间的深层关联,精准捕捉地下工程围岩变形、渗漏水、结构破损等隐患,提前发出安全预警,保障地下工程施工与运营的安全稳定。交通基础设施监测方面,依托动态数据驱动的路面病害分析模式,融合移动测量车、路况传感器等设备获取的动态数据,通过数据融合技术提取路面病害特征,实现路面裂缝、沉降、破损等病害的精准识别与分级,为交通基础设施养护维修提供科学依据,有效延长设施使用寿命,提升交通基础设施运维水平。

4 未来发展趋势

4.1 技术融合方向

AI驱动的智能融合将成为核心发展方向,端到端深度学习模型逐步替代传统融合算法,通过自主挖掘多源数据间的深层关联,无需人工干预即可完成特征提取与融合运算,大幅提升数据融合的效率与精度,适配复杂工程测量的多样化需求。量子测量技术的突破将实现亚毫米级动态监测精度,依托量子叠加与纠缠特性,突破传统测量技术的精度瓶颈,可捕捉工程结构的细微动态变化,为高精度工程监测提供全新技术路径^[4]。6G通信技术的支撑将构建全域覆盖的实时动态监测网络,凭借低延迟、高带宽、广连接的优势,打破监测空间限制,实现偏远区域、复杂地形下监测数据的实时传输,保障动态监测的全域性与时效性。

4.2 方法论创新

动态精度控制系统的研发与应用将实现监测精度的自适应优化,能够根据工程不同建设阶段的监测需求,自动调整数据权重分配,针对工程关键阶段提升核心数据的权重,非关键阶段优化计算效率,实现精度与效率的动态平衡。多模态数据语义融合将突破激光点云与遥感影像的语义鸿沟,通过创新融合方法论,实现两类数据的语义层面深度整合,挖掘激光点云的空间几何信息与遥感影像的纹理特征信息,实现数据互补,提升多模态数据的应用价值,为工程监测提供更全面的数据分析支撑。

4.3 工程应用深化

复杂环境适应性将成为工程动态监测的重要发展重点,通过技术优化与设备升级,提升监测系统在高海拔、极端气候等复杂环境下的运行稳定性,抵御低温、强风、缺氧等环境因素的干扰,实现复杂环境下工程动态的精准监测。全生命周期管理模式将逐步普及,数据融合技术将贯穿工程设计、施工、运营、维护的全链条,整合各阶段的监测数据与相关信息,为工程各阶段的决策提供数据支撑,实现工程全生命周期的动态管控,提升工程建设质量与运营安全性,推动工程监测向全流程、精细化方向发展^[5]。

结束语

工程测量数据融合与动态监测技术的协同发展,为复杂工程环境下的精准测量提供了有力支撑。通过优化数据融合方法、提升动态监测精度及构建协同应用框架,可有效解决传统测量中的数据异构性、实时性不足等问题。随着AI、量子测量及6G通信等技术的深度融合,工程测量将向智能化、高精度及全生命周期管理方向迈进,为工程建设与运维提供更高效、更可靠的技术保障,推动工程测量领域的技术革新与产业升级。

参考文献

- [1]胡晓东.多维数据融合在市政工程测量中的应用分析[J].工程与建设,2024,38(2):293-294,318.
- [2]李延芳,杨顺坡.基于多源数据融合的水利工程测量信息动态更新系统[J].自动化技术与应用,2024,43(1):88-90+138.
- [3]孙亭,陈传国.遥感数据在工程测量中的实时监测与数据处理方法[J].北斗与空间信息应用技术,2025(3):118-121.
- [4]蒋宇.基于激光雷达的工程测量数据融合方法研究[J].科学与信息化,2025(9):91-93.
- [5]白连君.分析工程测量GPS动态监测应用与数据处理[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2021(9):2.