

高层建筑沉降监测方法及数据处理优化研究

刘叶兵

合肥工大共达工程检测试验有限公司, 安徽 合肥 230000

[摘要]高层建筑施工和使用时容易出现不均匀沉降,这对结构稳定性和安全性有直接影响,为提高沉降监测精度和响应速度,水准测量、GNSS、倾斜传感、激光雷达等多源监测技术被整合且数据处理模型通过构建融合算法得到优化,沉降趋势预测和误差修正借助卡尔曼滤波与神经网络方法实现,经实际工程数据验证,该方法稳定且具适应性,提出的优化方案有很好的工程推广价值。

[关键词]高层建筑;沉降监测;多源融合;数据处理优化;卡尔曼滤波

DOI: 10.33142/ec.v8i6.17253

中图分类号: TU43

文献标识码: A

Research on Monitoring Methods and Data Processing Optimization of High-rise Building Settlement

LIU Yebing

HFUT Engineering Test & Inspection Co., Ltd., Hefei, Anhui, 230000, China

Abstract: Uneven settlement is prone to occur during the construction and use of high-rise buildings, which has a direct impact on structural stability and safety. To improve the accuracy and response speed of settlement monitoring, leveling measurement GNSS, Multi source monitoring technologies such as tilt sensing and LiDAR are integrated, and data processing models are optimized through the construction of fusion algorithms. Settlement trend prediction and error correction are achieved through Kalman filtering and neural network methods. Through practical engineering data verification, this method is stable and adaptable, and the proposed optimization scheme has good engineering promotion value.

Keywords: high-rise buildings; settlement monitoring; multi-source fusion; data processing optimization; Kalman filtering

引言

城市化进程加快,高层建筑数量不断增多,其结构复杂性和地基承载要求也明显提高,沉降问题愈发凸显,轻微的不均匀沉降就可能引发结构裂缝、变形甚至安全事故,严重影响建筑使用寿命,因此工程技术领域急需在高精度、智能化的沉降监测与数据处理方面有所突破,通过技术集成与算法优化可有效提升沉降监测系统的响应能力和预警水平,从而为结构安全提供坚实保障。

1 沉降监测的关键技术分析

1.1 水准测量技术

沉降监测里水准测量是最早应用且最为成熟的传统方法中的一种,测量精度极高一般能到毫米级,在高层建筑初始施工阶段的基准沉降测定中尤其适用,实际操作时设置固定水准基点和沉降观测点,用水准仪和测量标尺进行高差观测就能有效得到建筑物各关键部位的高程变化情况。

该方法操作比较麻烦且天气、地形、人为因素对其影响也不小,但它精度高,在关键阶段的监测任务里有着不可替代的作用。现在有些工程将数字水准仪和数据采集设备弄到一块,实现了现场数据自动采集和后端处理的半自动化流程,测量效率和数据可靠性也进一步提高了。

1.2 GNSS 定位技术

GNSS(全球导航卫星系统)定位技术,尤其 GPS,

有着实时性强、长时间动态监测适用等优势,在高层建筑沉降监测中的应用逐渐广泛,该技术靠接收卫星信号确定监测点在三维空间的精确位置变化,特别适用于大跨度、高风险区域的连续沉降动态追踪。

厘米级甚至亚厘米级精度现代 GNSS 设备已经能够支持,差分技术、网络 RTK 等方式能有效提高定位稳定性,并且部署起来很灵活,监测数据可远程实时传输,适用于城市高层建筑群多点、多维综合沉降监测方案,能有效提升信息化管理水平和预警能力。

1.3 倾斜计与光纤传感技术

建筑结构倾斜角度和方向的变化能被倾斜计技术实时监测,从而间接反映出沉降趋势与不均匀程度,倾斜计设备安装简单且响应快,适合用于结构柱、剪力墙等关键部位的局部变形监测,这对整体沉降信息是很好的补充。

新兴的高灵敏度监测手段光纤传感技术在高层建筑里已被广泛应用,在建筑关键构件内预埋分布式光纤传感系统的传感光纤可实时采集变形、温度、应力等多维信息以构建高精度三维变形监测模型,和倾斜计一块使用能有效提升局部沉降识别与预警精度。

1.4 无人机航测与激光雷达

高精度摄影测量系统或者激光雷达(LiDAR)被无人机搭载后,就能对建筑周边以及基础设施快速且高效地进

行三维扫描与沉降分析,这一技术在辅助评估大范围区域沉降变化方面尤其适用,像地铁施工、地基开挖导致的周边建筑沉降这种复杂场景就可以用。

激光雷达有穿透植被和复杂表面结构的本事且无人机很灵活机动,二者相结合就能高频率地获取高精度的点云数据,对建立建筑与地形沉降变化的动态模型有辅助作用,这种技术虽然还没法彻底取代接触式高精度传感,但作为一种补充监测手段,其应用价值和推广前景都非常高。

1.5 监测系统集成化发展趋势

信息技术和智能传感技术不断融合,沉降监测向着系统集成化、智能化方向发展,集成化系统一般包含多种传感单元、无线通信模块、数据处理终端和可视化平台,能远程实时监测建筑沉降状态并自动分析数据,工作效率和监测响应速度因此大幅提高。

全天候自动数据记录与传输智能采集终端能将云计算与边缘计算能力结合起来,支持沉降数据的在线处理、异常识别与智能预警,可与 BIM、GIS 等平台协同运行,实现沉降信息在建筑生命周期管理中的深度融合与应用,为高层建筑运行安全提供坚实保障。

2 高层建筑沉降数据特征与误差来源分析

2.1 沉降数据的时间性与空间性特征

高层建筑沉降数据的时间性特征明显,其变化常是渐进、非线性且有阶段性特点,施工初期沉降速度快,结构荷载增大使基底应力集中,到后期便慢慢平稳进入缓慢沉降阶段,得连续采集监测数据以捕捉沉降发展的全过程,从而对不同阶段的行为规律进行建模分析。

在空间性这一方面,高层建筑结构分布广泛且荷载作用于各结构部位不同、土壤压缩特性也不一样,这使得沉降分布不均匀,沉降数据在空间上存在差异会使局部结构或许有较大位移进而形成沉降差异,要多点布设监测网格以掌握各关键构件的沉降状态,进而实现对整体沉降变形的三维立体感知。

2.2 误差来源分类

测量仪器本身的系统误差和稳定性问题是仪器误差的主要方面,就像水准仪,其精度等级、温漂性能以及长时间使用后的标定偏差,都可能对沉降数据的可靠性产生影响,并且仪器要是没按周期校准或者选择不合适,整个监测数据体系就可能出现系统性偏移。

沉降监测中环境误差常见,像材料热胀冷缩被温度变化引起、无人机或设备倾斜由风力干扰导致、测量点瞬时漂移受地面震动带来等情况都属于环境误差,施工现场粉尘、湿度、电磁干扰等因素或许会影响部分电子传感设备正常运行。

人为因素会造成操作误差,像读数存在误差、仪器安放不稳固、观测点不复测、监测点布设不规范等情况都属于人为因素,这种误差有偶然性,而且在工程里要是频繁

观测或者多人轮换测量,它就被容易放大,进而对整体监测系统的一致性和精度产生影响。

2.3 异常值识别与剔除技术

实际沉降监测数据里异常值难免会出现,常见识别异常值的方法有静态阈值法、均值标准差法、滑动平均法以及更复杂的主成分分析 (PCA) 和孤立森林算法,设定统计上下限或者依据数据趋势找出突变点就能快速把错误数据剔除。

异常值剔除之后得进行数据补偿处理才能让时间序列保持连续,可以用插值法(像线性插值、样条插值)或者拟合预测模型合理补充数据,数据清洗时要求在不破坏整体趋势的情况下最大程度地还原沉降的真实状况以给后续趋势判断和预警模型打基础。

2.4 误差传播分析与控制策略

在沉降监测的时候,各类误差在数据采集、融合处理、模型分析以及结构响应评价等环节会产生累积与放大效应,这就叫误差传播,数据体系一旦有仪器误差、环境干扰和人为操作误差进入,在多源融合或者趋势预测里就可能叠加起来,让沉降趋势判断出现偏差,从而可能触发误报或者漏报,建立误差传播函数,能定量分析各干扰因子的灵敏度以及对最终计算结果的影响程度,给数据处理链路的优化提供理论依据。

多种技术手段和管理机制协同实施包括在有效控制误差传播的策略里,采用多设备交叉验证和冗余布点布局就能容易识别异常读数并提高系统鲁棒性,而在数据处理阶段,将多源数据融合机制和像卡尔曼滤波、小波降噪等滤波算法相结合可使沉降曲线平滑并抑制高频扰动,建立标准化监测流程、操作规范和周期性校验机制能从源头压缩误差范围,从而全面提升沉降数据准确性和工程应用可靠性。

3 数据处理与优化算法研究

3.1 多源数据融合模型构建

高层建筑沉降监测会用到水准仪、GNSS 接收机、倾斜传感器、光纤传感单元等多种类型的监测设备,这些设备输出的数据在精度、响应频率、坐标系统方面存在差异,若要让数据协同利用并且提升精度,则可引入卡尔曼滤波 (KalmanFilter) 用来做状态估计和多源数据融合,通过状态转移矩阵和观测矩阵,卡尔曼滤波能动态更新沉降状态预测值,在噪声影响下实现最优估计,其基本模型如下:

$$\begin{aligned} \hat{x}_k &= \hat{x}_{k-1} + K_k (z_k - H_k \hat{x}_{k-1}) \\ K_k &= \frac{P_{k|k-1} H_k^T}{H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k} \end{aligned} \quad (1)$$

其中,估计状态用 \hat{x}^k 表示,卡尔曼增益为 K_k 、协方差预测矩阵是 $P_k | k-1$ 、观测噪声协方差矩阵为 R_k 且

观测矩阵为 H_k 。

在此基础上要是引入 BP (BackPropagation) 神经网络, 就能实现非线性关系的建模与预测, BP 网络通过输入层、隐藏层、输出层构建沉降影响因素和结果之间的多维函数关系, 进而进一步弥补单一算法对复杂沉降模式识别的不足, 用多源数据把神经网络模型训练好之后, 不仅冗余监测点的利用效率显著提升, 而且整体监测系统的鲁棒性也能提高。

3.2 趋势分析与预测方法

沉降过程的时序性和可预测性很明显, 因此用统计建模能有效预测未来趋势, 而最小二乘法这种基础拟合手段, 可以对历史沉降数据做多项式或者指数曲线拟合, 基本目标函数如下:

$$\min \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 \quad (2)$$

求解最优参数以构建沉降发展趋势曲线, 从而判断异常沉降行为是否存在。

沉降预测模型可通过时间序列分析方法(像 ARIMA, 即自回归积分滑动平均模型)得到进一步细化, 在处理短周期高频监测数据时该方法表现优异, 且动态阈值设定机制能依据统计规律自动调整预警值, 敏感响应不同阶段的沉降速率, 从而提高监测系统对突变沉降的识别能力和预警效率。

3.3 大数据处理与云平台技术应用

高频、多点、长周期监测数据不断积累使沉降监测迈进大数据时代, 而传统本地数据处理方式在存储、响应速度、协同分析上存在瓶颈, 引入云架构数据处理平台能实时接入、存储、清洗与分析大规模沉降数据, 提高系统处理能力和扩展性。

云平台予以支持, 将数据挖掘技术(像聚类分析、相关性分析之类)与深度学习模型相结合, 就能深度挖掘沉降和环境因素、荷载变化等参数间的潜在联系, 且有配套的可视化分析界面, GIS 三维展示系统、动态趋势曲线面板等, 从而增强管理人员对监测结果的理解与判断, 为高层建筑沉降安全管理提供科学决策支持, 促使监测体系迈向从数据采集到智能辅助决策的新阶段。

4 监测系统优化与工程应用建议

4.1 系统建设建议

高层建筑中系统有效性和监测精度的提升关键在于沉降监测点的合理布设, 结构关键节点、荷载突变区域、沉降敏感部位以及基础底板边缘等位置应重点被监测点覆盖且布设密度要综合建筑高度、结构形式和地质条件分析确定, 运用对称布点原则与分层监测策略不但能精准识别各部位沉降趋势还能有效捕捉垂直方向和平面方向的沉降差异以提升数据完整性和代表性。

沉降监测发展的主流方向是多技术融合的系统集成,

构建“多源感知+边缘计算+远程传输+平台分析”一体化技术架构值得推荐, 要把水准测量仪、GNSS 接收机、倾斜计、光纤传感器及激光雷达等多种监测设备统一接入, 利用物联网网关进行数据汇聚与预处理, 再上传到云端或者本地平台, 结合实时可视化系统构建三维多维沉降感知网络, 从而对高层建筑全生命周期沉降进行监控和智能管理。

4.2 监测流程标准化

建筑不同阶段有不同的风险特征, 沉降数据采集周期得据此动态调整, 施工高峰期结构荷载老变, 高频采集模式比较好, 每 2h 采一次, 这样能全掌握沉降发展过程, 建筑运营阶段结构稳了, 采样频率可以适当降到每日或者每周一次, 得构建异常数据触发机制, 监测系统要是识别出沉降突变趋势, 能自动切换成高频采样模式, 从而在关键时段精准追踪及时响应。

数据存储与交互要严格按照统一格式规范进行, 以保证数据标准化和互通性, 统一采用 UTC+8 作为时间戳且测量单位使用国际单位制, 从而提高国际兼容性, 数据格式最好为结构清晰、扩展性强的 JSON 或者 XML 格式, 以便跟 BIM、GIS 等信息平台无缝集成, 配上像 Modbus、OPCUA 这样的标准化通信协议, 使不同品牌、类型的监测设备在系统里实现互联互通, 进而构建起高效智能的沉降监测数据共享与协同分析平台。

4.3 预警机制构建

沉降预警机制的阈值设定是关键, 得把规范限值、历史沉降数据和建筑承载能力综合起来动态调整阈值范围, 设置“正常—关注—预警—报警”四级响应等级, 使沉降速率、差异沉降值、累计沉降深度的变化幅度分别与不同等级相对应。

联动报警系统要与现场施工设备、控制系统联动起来, 沉降达到报警等级时应通过短信、邮件、声光报警器等多种渠道同步推送信息以便管理人员及时介入处理, 这一情况如表 1 所示。

表 1 典型沉降预警等级设定

等级	累计沉降值 (mm)	沉降速率 (mm/d)	响应措施
正常	<10	<0.2	持续监测
关注	10~20	0.2~0.4	加密监测频率
预警	20~30	0.4~0.6	现场复核、技术评估
报警	>30	>0.6	停工检查、结构加固等

4.4 应用推广价值

不同类型大型结构工程都能广泛应用优化后的沉降监测系统, 这系统适应性很强, 在超高层建筑里它能监控塔楼核心筒、裙房结构和地下室沉降协调性, 保障结构整体稳定, 在大型综合体项目中它能有效掌握地基应力分布与场地变形规律, 有助于施工管理和结构安全评估, 在桥梁与隧道工程中它可识别地质变化带来的长期缓慢沉降以及突发变形风险, 为重大基础设施运行提供早期预警支撑。

该系统支持多项目统一接入与远程集中管理,可为智慧工地、智慧城市等复杂工程场景提供服务,可扩展性良好且工程推广前景不错。结合 BIM(建筑信息模型)、CIM(城市信息模型)等平台,能够实现从施工期、运营期到维护期的全生命周期沉降健康管理,推动工程结构安全保障从传统监控向数据驱动、智能决策转型,全面提升建筑安全管理的科学性与现代化水平。

5 结语

高层建筑结构安全保障的核心在于沉降监测,其技术体系和数据处理方法急需持续优化升级,多源监测技术融合、智能化数据分析和标准化系统构建能让监测精度、响应效率和风险预警能力显著提高,构建科学完善的沉降监测系统对实时掌握建筑状态、预防结构隐患有益且工程适应性和推广价值良好,以后要加强智能算法和云平台深度融合促使沉降监测朝着高效、精准、智能发展从而给高层建筑安全运行提供坚实保障。

[参考文献]

- [1]韩亚洲.某超高层建筑结构变形监测方法研究[D].安徽:合肥工业大学,2020.
- [2]王俊瑜.区域性多变量沉降预测模型的构建及应用[D].山东:聊城大学,2023.
- [3]朱成军,韦溪,张美叁.高精度电子水准仪在高层建筑沉降观测中的应用[J].新疆有色金属,2021,44(4):102-104.
- [4]白芷绮.民用建筑沉降监测预报方法研究[J].测绘与空间地理信息,2021,44(3):173-175.
- [5]李久飞,陆永红,梁贞.高层建筑沉降监测技术研究与应用[J].建材与装饰,2019,11(28):230-231.
- [6]李爱国.中软土地区高层建筑物沉降监测及稳定性探析[J].安徽建筑,2022,29(5):142-143.

作者简介:刘叶兵(1987.9—),毕业院校:西安交通大学,所学专业:土木工程,当前就职单位:合肥工大共达工程检测试验有限公司,职称级别:工程师。