引文格式:王坚,于亦龙,柳根,等.超高层建筑变形GNSS多源融合监测方法及进展[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(6):1065-1076.DOI:10.13203/j.whugis20240317

Citation: WANG Jian, YU Yilong, LIU Gen, et al. Method and Progress for GNSS Multi-source Fusion Deformation Monitoring in Super-Tall Buildings[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(6): 1065-1076. DOI: 10.13203/j.whugis20240317

超高层建筑变形GNSS多源融合监测方法及进展

王 坚[1] 于亦龙[2] 柳 根[1] 柳 絮[1] 姜玉龙[2] 韩厚增[1]

1 北京建筑大学测绘与城市空间信息学院,北京,102616

2 中建宏达建筑有限公司,北京,100125

摘 要:超高层建筑变形监测是确保建筑长期安全运行的重要保障。针对全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)多源融合超高层建筑变形监测面临的难题,首先构建了一套感-传-融-用一体化的GNSS多源融合变形监测解决方案,重点分析了超高层变形监测关键参数,梳理了GNSS变形监测单差、双差、三差模型的发展历程,总结了惯性测量单元振动监测、平移-沉降监测及扭转变形监测模型。然后在此基础上,阐述了经典数理统计算法、卡尔曼滤波及其衍生算法、智能学习算法的多源数据融合监测技术框架,并采用大型多功能振动台阵模拟超高层建筑的监测数据及超高层变形监测案例进行相关技术验证。结果表明,所提监测体系具有较好的可行性和实用性。最后对未来GNSS多源融合监测技术进行了展望。

关键词:超高层建筑;GNSS;IMU变形监测;多源融合监测

中图分类号:P237,TP208 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-12-17

DOI:10.13203/j.whugis20240317 **文章编号**:1671-8860(2025)06-1065-12

Method and Progress for GNSS Multi-source Fusion Deformation Monitoring in Super-Tall Buildings

WANG Jian[1] *YU Yilong*[2] *LIU Gen*[1] *LIU Xu*[1] *JIANG Yulong*[2] *HAN Houzeng*[1]

1 School of Geomatics and Urban Spatial Informatics, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China

2 China State Construction Hongda Engineering Co. Ltd, Beijing 100125, China

Abstract: **Objectives**: Deformation monitoring of super-tall buildings is critical for ensuring the long-term safety and stability. Multi-source fusion deformation monitoring technology based on global navigation satellite system (GNSS) plays a vital role, but the application of GNSS multi-source sensors for such monitoring lacks a systematic approach. Current challenges include the narrow range of deformation parameters, incomplete GNSS/multi-source fusion models, weak data coupling capabilities, and low intelligence in monitoring and early warning systems. **Methods**: To address these issues, this paper proposes a GNSS multi-source fusion deformation monitoring method based on a perception-transmission-fusion-application framework. Key deformation parameters for super-tall buildings, including translation, settlement, vibration, torsion, deflection, and tilt, are identified. The development of GNSS deformation monitoring models is also reviewed. Furthermore, it improves inertial measurement unit (IMU) -based vibration, translation-settlement, and torsional deformation, and enables comprehensive monitoring of multiple deformation parameters. **Results**: The proposed method is validated using data from a large-scale shaking table simulation and a case study of super-tall buildings. The results confirm the effectiveness of IMU-based accelerometer integration model, Mahony complementary filter-based torsion monitoring model, and the applications of IMU for vibration monitoring in super-tall buildings. **Conclusions**: This pa-

基金项目:国家自然科学基金(42274029);北京市教育委员会科学研究计划(KM202410016007)。

第一作者:王坚,教授,主要从事GNSS位置服务及建筑变形监测研究。wangjian@bucea.edu.cn

通信作者:柳根,副教授。liugen@bucea.edu.cn

per offers a robust GNSS/IMU multi-source sensor fusion solution, and provides strong support for the safety monitoring and operational management of super-tall buildings throughout their lifecycle.

Key words: super-tall building; GNSS; IMU deformation monitoring; multi-source fusion monitoring

根据世界高层建筑与都市人居学会发布的报告统计,截至2024年7月底,全球共有150 m以上的建筑7 142座,其中中国有3 314座,居世界第一。在运营荷载、风载、日照、温度等外界环境因素综合影响下,超高层建筑将发生特定频率的振动变形与似静态变形,并且随着建筑服役时间的加长,建筑结构参数将逐步偏离原有设计参数,带来安全隐患,超高层建筑变形协同监测对确保建筑安全运行具有重要意义[1-3]。

全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)以其连续、实时、高精度、全天候测量等特点,近些年被广泛用于超高层建筑变形监测。20世纪80年代,英国金丝雀码头大厦(244 m)最早采用卫星定位技术监测结构变化及其变形位移,随后,英国碎片大厦、伦敦金融城摩天楼、伦敦奥林匹克塔相继使用了卫星定位技术进行变形监测。世界最高建筑迪拜哈利法塔(828 m)在施工过程中使用卫星定位技术进行结构健康监测,并研发了一套基于卫星定位技术的自动爬模系统,但是并未公布详细的系统集成方案与施工策略[4]。

随着北斗定位技术全球组网,北斗/GNSS监测技术被广泛用于中国超高层建筑精准监测领域。上海金融大厦(632 m)施工过程中拟采用GNSS技术监测变形,但由于大厦周围高楼林立,受多路径影响严重,最终仍采取了传统铅垂仪结合GNSS的施工垂直度控制方案。深圳平安国际金融中心(592.5 m)将北斗精密测量引入到工程施工当中,包括GNSS控制网的建立与外业数据采集处理、轴线竖向传递和GNSS摆动归心测量等内容,以实现轴线精准引导和垂直度监测。随着GNSS、惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)、加速度计、应力应变计等多源传感器技术的发展,GNSS融合不同传感器进行超高层建筑平移、扭转、倾斜等因子的安全监测成为新的发展趋势,并迅速得到工程应用[5]。

超高层建筑GNSS多源融合变形监测系统主要由超高层建筑监测现场、数据分析与管理及智慧监控中心组成(如图1所示)。采用多种传感器开展数据采集,并将数据实时传输至数据处理中心,对数据进行解算、分析和展示。然而,目前针对GNSS多源融合传感器进行超高层建筑安全监测研究仍缺乏系统性,存在变形监测参数单一、GNSS/多源融合变形监测模型不完善、GNSS多源数据耦合分析能力弱以及GNSS/多源传感器监测预警系统智能化程度不高等问题。因此,亟需构建超高层建筑变形GNSS多源融合协同监测关键技术体系,研制支撑的软硬件系统,提高超高层建筑安全监测技术水平。

本文针对GNSS多源融合超高层建筑变形监测面临的难题,系统梳理了超高层变形监测关键参数,回顾了GNSS变形监测的发展历程,完善了IMU振动监测、平移-沉降监测及扭转变形监测模型,并基于此构建出一套完整的GNSS/IMU多源传感器协同融合变形监测关键技术,为超高层建筑的全生命周期安全监测、运行管理提供有力保障。

1 超高层变形监测关键参数

超高层建筑全方位实时动态监测通常包括平移、沉降、振动、扭转、挠度、倾斜等关键参数,如图2所示。平移、沉降和倾斜是超高层建筑变形监测整体平移变形量化描述的3项关键参数,而振动、挠度及扭转是超高层建筑局部相对变形量化描述的关键参数。这些监测参数简介如下:

1)平移是指建筑在水平方向的移动,通常伴随沉降和倾斜现象,采用GNSS或全站仪进行监测。对300 m以上建筑,监测误差应小于1.5 mm;300 m以下则不超过3.0 mm。

2)沉降包含下沉和上升的位移,监测范围包括沉降量、沉降差和沉降速率。对300 m以上建筑的高程误差控制在0.3 mm内,300 m以下则为0.5 mm[6]。

3)倾斜是建筑物因不均匀沉降或侧向荷载引起的整体变形,对于超高层建筑,倾斜程度直接反映了结构的安全性。通过差异沉降及距离计算可确定倾斜值,并分层计算各高度的偏移量。

4)振动是指建筑因风、地震等外力作用引发的周期性运动,振动频率通常为31.5~500 Hz,采用加速度计监测。

5)扭转是指建筑围绕垂直轴线的旋转变形,受风力和地震荷载影响,可能导致结构内部挤压和损伤。

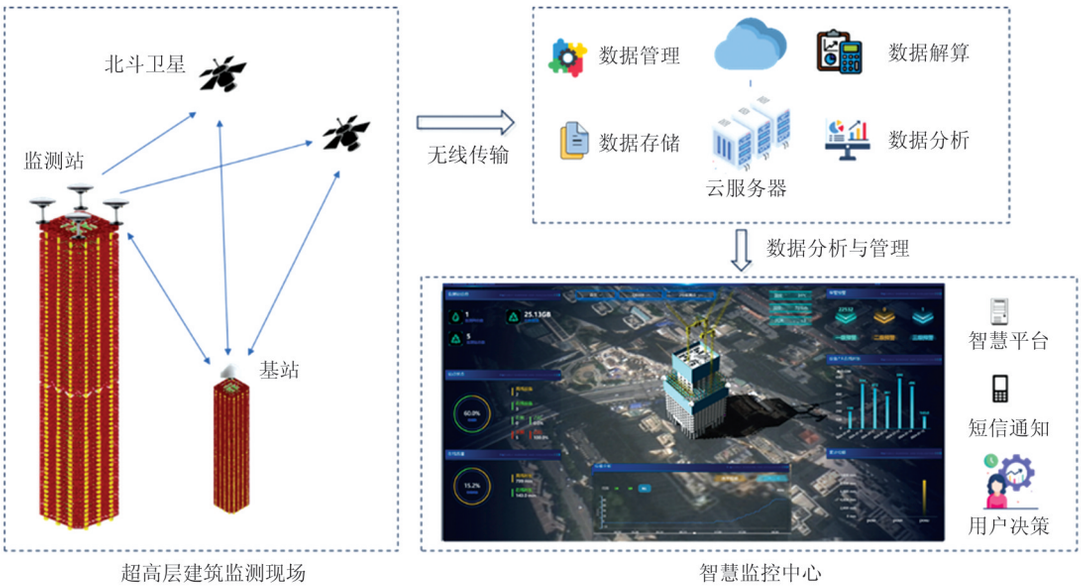


图 1　超高层建筑 GNSS 多源融合变形监测系统的组成

Fig. 1　Composition of GNSS Multi-source Fusion Deformation Monitoring System for Super-Tall Buildings

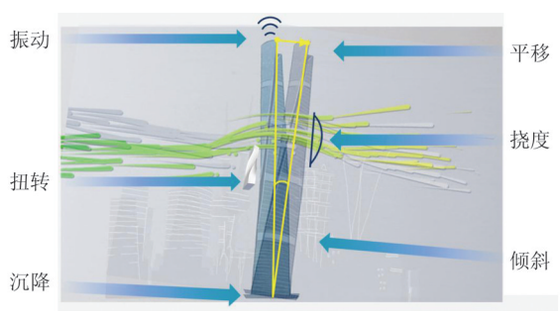


图 2　超高层建筑监测关键参数

Fig. 2　Key Parameters for Monitoring Super-Tall Buildings

6)挠度是指建筑构件在载荷作用下的弯曲变形,包括竖向和横向挠度,反映构件的受力变形程度[7]。

对于超高层建筑,综合进行平移、沉降、振动、扭转、挠度、倾斜等关键参数的变形监测,可对建筑结构进行全面的健康评估,为后续维护和加固工作提供完备的数据支撑[8]。

2　GNSS 多源融合变形监测解决方案

针对超高层建筑变形监测,本文提出了一套感-传-融-用一体化的全方位变形监测解决方案。该方案包括感知层(感)、传输层(传)、数据层(融)和应用层(用)4 个部分,涵盖了从多源传感器数据采集到用户端可视化的完整流程,如图 3 所示。利用北斗卫星、环境监测设备、摄像头等多种传感器进行数据采集,通过卫星通信、无线通信等技术将数据实时传输至数据处理中心,运用高精度定位、多源数据融合处理、云端解算和多回路双备份通信技术对数据进行综合处理和分析,将处理后的数据通过计算机、服务器和移动设备进行直观展示,使用户能够方便地查看和利用数据。该解决方案可实现实时监控、精准定位和数据可视化,为用户提供全面的数据支持。

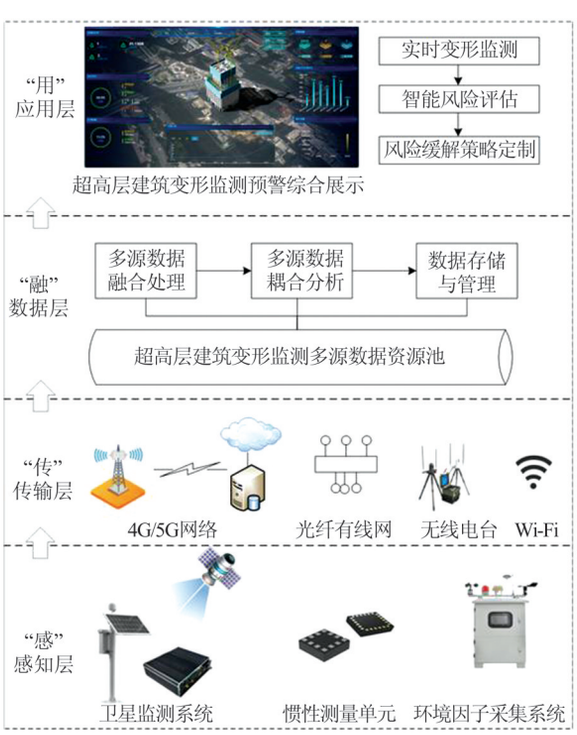


图 3　超高层建筑变形监测预警大数据平台架构

Fig. 3　Architecture of Big Data Platform for Deformation Monitoring and Early Warning in Super-Tall Buildings

1)感知层。感知层集成了GNSS、IMU和环境因子采集系统,构成具有多用途的数据采集终端,可同时满足平移、沉降、倾斜、振动、扭转以及挠度的多参数监测,实现全方位监测。

2)传输层。传输层具有灵活的传输模式选择能力,以满足超高层建筑对实时性和稳定性的要求。针对不同场景,方案支持多种数据传输方式,如5G通信、LoRa远距离传输和光纤传输,实现高效数据传输。尤其是在关键位置引入双通道冗余设计,提高数据传输的可靠性和抗干扰能力,保障数据链路的稳定性。

3)数据层。数据层可针对不同场景及数据类型,灵活选择多源数据融合算法进行多源数据融合处理。在完成多源数据的汇聚后,进行多源数据融合处理、多源数据耦合分析、数据存储与管理等功能,为长期稳定性评估提供了数据支撑和理论依据。

4)应用层。应用层构建了具备实时监测、智能预警与风险缓解功能的超高层建筑变形监测系统。该系统依托大数据和人工智能技术,可对监测指标进行动态阈值设定,在风险增加时主动生成应急策略。不仅实现了实时预警,还提供了基于历史数据的趋势预测,为超高层建筑安全管理提供了科学决策支持。

3 GNSS多源融合变形监测方法

3.1 GNSS变形监测模型

GNSS以其高精度、全天候、实时特性,被广泛应用于建筑结构变形监测中。在各类监测场景中,双差模型是最为常用且成熟的技术之一,通过消除公共误差提高了监测精度与可靠性。基于GNSS双差模型,文献[9-11]在环境激励(如地震、风荷载、季节、温度和日照变化)下实现了高层建筑厘米级监测精度,文献[12-13]对台风过境时深圳地王大厦(383.95 m)进行了实时动态变形监测,测得最大位移值为东西方向的9.52 cm。

近年来,针对不同监测需求,部分学者对双差模型进行了改进与扩展。文献[14-15]利用已知的精确基线关系,构建了一种变形量与双差模糊度相关关系的变形监测新模型,获得了南北方向±2.2 mm、东西方向±1.8 mm、高程方向±3.2 mm的外符合精度监测结果。文献[16]利用首期高精度基线以及卫星与站点的几何构型,提出了一种无须解算基线向量的变形信息直接提取方法,即似单差模型(similar single difference model,SSDM)。该方法避免模糊度的解算、周跳的探测与修复,直接从载波相位观测值中提取变形信息,提升了GNSS监测手段的适用性,但由于可探测变形量与载波波长相关,此方法只适用于对较小变形量场景使用。为此,文献[17]使用多种载波相位组合计算,构建了一种适合较大变形值(0.5 m)实时监测的方法,拓展了方法的适用场景。文献[18]提出了利用GNSS三差观测值直接提取建筑物在两个历元间动态变形信息的三差模型方法,避免了整周模糊度的解算,从而简化了变形监测过程中的计算量,进一步提升了复杂环境下监测系统的可靠性。文献[19]通过时间差分载波相位(time difference carrier phase,TDCP)解算监测体前后历元间三维坐标变化量,以识别监测体发生的显著位移,并结合卡尔曼滤波实现了监测体的快速变形识别,为监测体状态评估提供了新方法。

此外,为应对基站设置困难等挑战,GNSS精密单点定位(precise point positioning,PPP)和PPP-实时动态差分定位(real-time kinematic,RTK)技术逐步应用于复杂建筑环境监测。PPP技术通过精密轨道和钟差改正误差,无需基站即可获得高精度绝对坐标,但在动态监测精度上有所限制[20-22]。PPP-RTK技术结合了PPP的广域覆盖与RTK的快速收敛优势,通过布设稀疏全球观测站和局域稠密观测站,实现了厘米级实时定位[23-26]。尽管PPP-RTK在超高层建筑变形监测中尚未大规模应用,其未来发展潜力巨大。

3.2 IMU变形监测模型

IMU最早应用于导航领域,其核心组件主要包括加速度计和陀螺仪。随着IMU在小型化、低成本、高精度、低功耗、抗冲击和抗振动等方面的不断发展,其逐渐被引入变形监测领域[27]。IMU中的加速度计可用于振动监测,通过对加速度信号进行二次积分,还可以实现平移和沉降的监测。而加速度计与陀螺仪的结合能够有效测量载体的倾斜与扭转[28-29]。因此,IMU在多参数变形监测领域具有极大的应用潜力,涵盖振动、平移、扭转和倾斜等多个方面的监测。图4为实验室自研阵列式IMU监测模组。

3.2.1 IMU振动监测

IMU振动监测是通过采集IMU的加速度数据,利用结构模态参数分析方法提取结构的频率、振型和阻尼比等模态参数,其中振动频率是

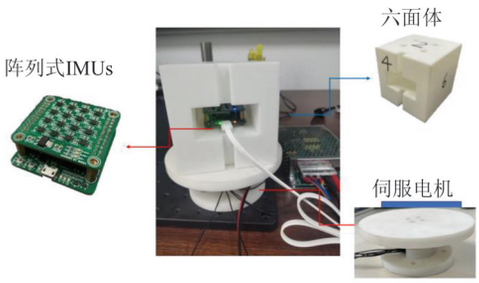


图 4　阵列式 IMU 变形监测模组

Fig. 4　Arrayed IMU Deformation Monitoring Module

核心参数。功率谱密度作为频谱分析中最为广泛应用的方法之一,通过傅里叶变换将随机信号从时域或空间域转换到频域,进而提取随机信号的主征频率[30]。功率与频率的关系由功率谱密度(power spectral density,PSD)曲线表示。计算过程如下:将随机信号 $x(n)$ 作为有限能量级数,计算其快速傅里叶变换(fast Fourier transform,FFT)。$X(k)$ 是 FFT 函数的结果,是信号在频域上的表示,包含信号的幅度谱和相位谱信息,计算式为:

$$X(k)=\sum_{n=0}^{N-1}x(n)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi kn/N} \tag{1}$$

式中,$x(n)$ 为采集的加速度信号序列,其中 n 为序列的索引数,取值范围为 $0,1,\cdots,N-1$,N 为 $x(n)$ 的采样点个数;j 为虚数;k 为频率索引,$k=0,1,2,\cdots,N-1$。FFT 揭示了信号的频率组成,PSD 进一步提供了信号各频率分量中存在的功率信息,特别适用于了解能量或功率在各个频率上的分布,如振动分析。

将 $X(k)$ 的模方除以 N 可得到信号的 PSD,记为 $S(k)$,计算式为:

$$S(k)=\frac{1}{N}\left|X(k)\right|^2 \tag{2}$$

由于估计方差较大,上述传统的 PSD 存在失效问题。此外,随着 $x(n)$ 长度的增加,方差并没有减小。为了克服这些限制,Welch 方法首先将随机信号分段且每个段之间部分重叠,以降低方差;然后计算每个段的 PSD,并取其平均值以获得更稳定的估计。平均周期图函数 $S_{xx}(k)$ 的定义为:

$$S_{xx}(k)=\frac{1}{MN}\sum_{i=1}^{M}X_i(k)X_i^*(k) \tag{3}$$

式中,i 为段的索引,取值范围为 $1\leqslant i\leqslant M$,M 为平均次数;$X_i(k)$ 为随机信号第 i 段的傅里叶变换;$X_i^*(k)$ 为 $X_i(k)$ 的共轭复数。

3.2.2　IMU 平移-沉降监测

IMU 中的加速度计是监测位移变形信息的常用手段,其采样频率可达 1 000 Hz,为短时间内精细结构监测提供了有效方法。加拿大 Measurand 公司采用加速度计阵列进行空间形态监测,开发的 SAA(shape accel array)监测系统已广泛应用于隧道掘进过程变形、大坝变形与滑坡等领域的变形监测[31]。中国清华大学研究团队利用 IMU 监测机器人的姿态,浙江大学研究团队利用 IMU 获取硅橡胶的姿态重构水下曲面[32],中国海洋大学研究团队利用 SAA 监测系统在黄河三角洲浅水区域监测水下地形的横向变形[33],但目前尚未见到 IMU 在超高层建筑变形监测中的应用报道。

IMU 的加速度计在进行变形监测时不需要外界信息辅助,但其变形结果需要通过二次积分得到,容易受到温度、气压、光照等环境因素影响,导致稳定性较差,并且随着时间的推移存在系统性偏移。随时间产生的漂移误差主要由加速度数据的高低频噪声引起,通过引入 FID(free induction decay)数字滤波方法可以有效滤除高频和低频噪声,从而补偿随时间累积的误差。然而,滤波方法通常需要位移和速度的初始值,而在实际应用中往往难以获得这些初始条件。频域积分方法通过将加速度信号从时域转换到频域,去除高频和低频噪声后再将其转换回时域,从而获取高精度的位移信息[34-35],计算式为:

$$F\left[\int_{-\infty}^{t}a(t)\mathrm{d}t\right]=\frac{1}{\mathrm{j}\omega}\cdot F[a(t)] \tag{4}$$

式中,$F[\cdot]$ 为傅里叶变换;$a(t)$ 表示加速度信号;t 表示时间变量;ω 表示频率。由式(4)可知,对加速度信号积分结果进行傅里叶变换,等价于对该信号的傅里叶变换除以因子 $\mathrm{j}\omega$,这一性质可将复杂的积分运算简化为除法运算。频域积分法首先对加速度信号做傅里叶变换,将时域信号转化为频域信号,在频域内完成运算;然后经傅里叶逆变换得到时域的速度和位移信息。

对加速度信号作傅里叶变换后的频谱 $A(k)$ 计算式为:

$$A(k)=\sum_{n=0}^{N-1}a(n)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi nk/N} \tag{5}$$

式中,$a(n)$ 是 $a(t)$ 的离散化表达。

根据式(4)和式(5),经过一次积分得到速度信号的频域 $V(n)$,计算式为:

$$V(n)=\frac{A(k)}{\mathrm{j}\omega}=\sum_{k=0}^{N-1}\frac{1}{\mathrm{j}2\pi k\Delta f}H(k)a(n)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi nk/N} \tag{6}$$

式中,Δf为频率分辨率,$\Delta f=1/(N\Delta t)$;$H(k)$为滤波器的频率响应函数,用于定义通带和阻带。

进行二次积分得到位移信号的频域$X(n)$,其计算式为:

$$X(n)=-\frac{A(k)}{\omega^2}=\sum_{k=0}^{N-1}\frac{1}{-(\mathrm{j}2\pi k\Delta f)^2}H(k)a(n)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi nk/N} \tag{7}$$

$$H(k)=\begin{cases}1, f_d\leqslant k\Delta f\leqslant f_u\\ 0, \text{其他}\end{cases} \tag{8}$$

式中,f_d和f_u分别为上限截止频率和下限截止频率,用于定义滤波器的通带范围。将所有不同频率的傅里叶分量按频域关系式运算后进行傅里叶逆变换,能够得出积分后的时域信号。

采用加速度计开展变形监测仍然存在诸多缺陷,主要表现为:(1)加速度计易受温度、气压、光照等环境因素影响,稳定系数较差;(2)速度和位移信息通过积分获取,初始位移和初始速度难以确定;(3)积分位移随时间产生累积误差,长期监测精度差,因此,一般与其他传感器组合使用。

3.2.3 IMU扭转变形监测

IMU作为一种组合式惯性传感器,不仅可以测量建筑物的振动和位移变形,还能监测扭转变形。扭转变形往往会对建筑物内部产生挤压,从而导致内部结构损伤。因此,准确监测扭转变形对了解建筑物健康状态,并及时进行诊断与修复具有重要的意义。目前用于融合加速度计和陀螺仪的扭转角解算算法包括互补滤波算法、梯度下降法和Kalman滤波算法等[36-37]。其中Mahony互补滤波是姿态估计的经典算法,最初用于无人机姿态解算。由于该算法易于理解且计算耗时短,在工程实践中逐渐得到广泛应用。其基本思想是:当载体静止时,仅受重力加速度影响,重力加速度在地理坐标系下的理论分量为$\begin{bmatrix}0&0&g\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$,通过坐标转换矩阵将其转换到载体坐标系下,转换后的重力加速度与实际加速度计测量值之间的偏差即为陀螺仪积分的姿态与加速度计测得的姿态之间误差。算法具体步骤如下:

1)对加速度计进行归一化处理,转换为单一向量。

2)将地理坐标系下的加速度数据,通过四元数$\boldsymbol{q}=[\hat{q}_0,\hat{q}_1,\hat{q}_2,\hat{q}_3]$转换到载体坐标系,得到载体坐标系下的加速度估值为:

$$\hat{\boldsymbol{v}}=\begin{bmatrix}2(\hat{q}_1\hat{q}_3+\hat{q}_0\hat{q}_2)\\ 2(\hat{q}_2\hat{q}_3+\hat{q}_0\hat{q}_1)\\ \hat{q}_0^2-\hat{q}_1^2-\hat{q}_2^2+\hat{q}_3^2\end{bmatrix} \tag{9}$$

3)加速度估值$\hat{\boldsymbol{v}}$与加速度计测量值$\bar{\boldsymbol{v}}$之间的偏差即为陀螺仪积分的姿态与加速度计测得的姿态之间的偏差。偏差值R可表示为:

$$R=\hat{\boldsymbol{v}}\times\bar{\boldsymbol{v}} \tag{10}$$

4)通过PI(peripheral interface)调节补偿陀螺仪数据,得到补偿后的姿态角$\hat{\Omega}$,计算式为:

$$\hat{\Omega}=\bar{\Omega}_b+K_pR+K_I\int R \tag{11}$$

式中,$\bar{\Omega}_b$为陀螺积分获取的姿态角;K_p、K_I为PI调节参数。

5)利用补偿后的姿态角$\hat{\Omega}$可求解四元数的微分方程,更新四元数用于计算加速度计的理论估值(见式(9))。

然而,扭曲变形监测一直未受到学者们的足够重视,相关研究与应用相对较少。此外,IMU自身存在精度低、漂移大等缺陷,尤其是陀螺仪由于漂移较大,只能在短时间内提供可靠的信息,严重影响姿态测量的精度与性能。因此,IMU必须与其他姿态测量传感器组合使用才能提供长期相对稳定可靠的姿态信息。笔者采用GNSS/IMU融合技术对胜利油田石油平台进行扭转变形监测,结果表明,基于加速度计和陀螺仪数据的互补滤波融合解算结果可求解石油平台的扭转角[37]。文献[38]率先在国际上提出了深度融合加速度计和陀螺仪的六自由度GNSS地震仪原理、方法和仪器原型,利用GNSS位移、加速度计线运动和陀螺仪角运动观测,形成了一个高度互补的自耦合数据处理系统。震动台实验结果显示,该系统将0.1 Hz以下的位移信号观测噪声最大降低了68%,整体精度从2 cm提升至2 mm,攻克了强烈地震时严重损害位移观测精度的幅度和相位畸变难题。值得一提的是,近年来,随着IMU制造工艺的大幅提升以及IMU的高频特性,使其在变形监测领域占据显著优势,利用IMU开展超高层建筑变形监测逐渐成为研究热点,发展前景广阔。

3.3 GNSS多源数据处理与分析方法

多源数据融合处理是超高层建筑变形监测的关键环节,本文提出了一种类似神经网络结构的GNSS多源融合变形监测模型,如图5所示,该模型包括输入层、数据融合层和输出层,

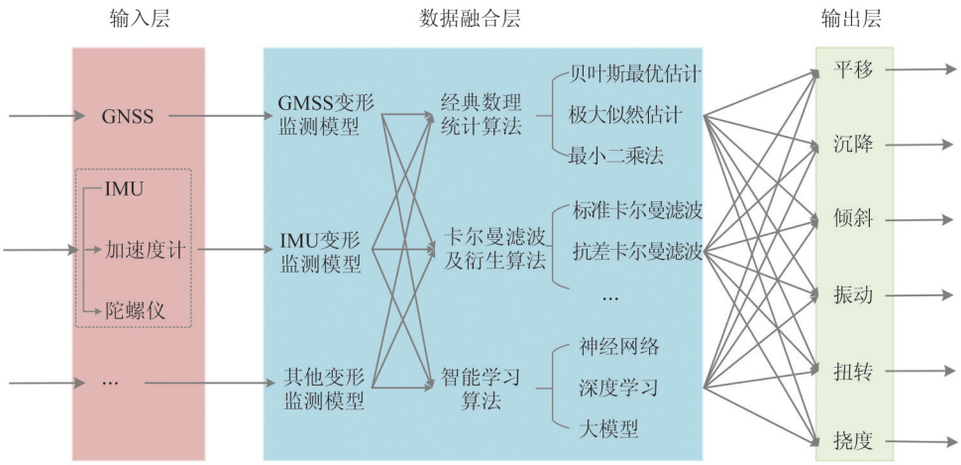


图 5　GNSS 多源融合变形监测技术框架

Fig. 5　GNSS Multi-source Fusion Deformation Monitoring Technology Framework

其中数据融合层是核心部分。数据融合层考虑数据来源的多样性及其在时间、空间和统计特性上的差异性,依据数据处理需求划分为单维数据处理、多源异构数据实时融合和智能学习辅助 3 个功能模块。

1)单维数据处理模块主要针对单一时间序列数据,采用经典数理统计方法完成初步分析。通过应用最小二乘法进行趋势拟合和异常检测,模块实现了对时间序列数据的基础性处理。此模块设计目标在于为后续复杂数据融合提供稳定的初始估计值,适用于监测点数量有限、数据波动较小的场景。

2)多源异构数据实时融合模块则面向复杂场景,结合卡尔曼滤波及其改进算法完成异构数据的联合处理与实时融合。扩展卡尔曼滤波针对非线性数据构建状态估计,无迹卡尔曼滤波通过采样点统计线性化方法处理高维数据,抗差卡尔曼滤波针对含粗差的数据输入增强了对异常值的适应性。此模块基于监测数据的噪声特性与结构特点,动态调整算法参数和融合策略,保证数据融合过程的鲁棒性与灵活性。

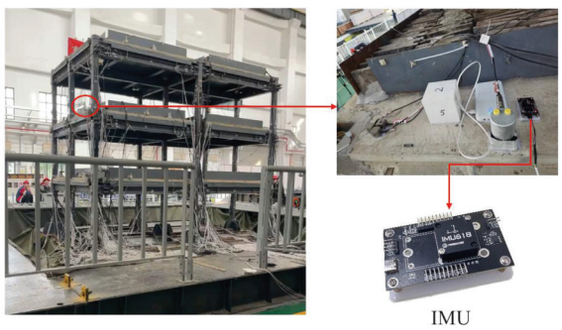
3)智能学习辅助模块结合新一代人工智能技术,通过引入神经网络模型对历史监测数据进行深度学习,捕捉数据之间潜在的复杂关联关系。该模块进一步优化了传统卡尔曼滤波中的状态转移与测量噪声协方差矩阵的动态更新过程。智能学习辅助模块与卡尔曼滤波算法形成协同机制,为多源异构数据的实时融合提供支持,特别是在数据质量波动较大或输入数据不完整的情况下发挥关键作用。然而,智能学习算法的提升依赖于大量的训练样本。随着变形监测数据资源池的持续扩大,变形监测数据管理的不断规范和完善,基于智能学习算法的变形监测融合技术展现出巨大的应用潜力,发展前景广阔。

4　试验分析

4.1　超高层钢结构变形监测模拟试验

2024 年 5 月在北京建筑大学大型多功能振动台阵实验室开展了地震激励下模拟超高层钢结构变形监测试验。本次试验使用的振动台可模拟三向六自由度地震振动,台面尺寸 5 m×5 m,单台载重 60 t,频率范围 0.1~100 Hz,水平最大加速度 1.5g,垂直最大加速度 1.2g,超高层框架式结构通过固连装置与振动台相连接(见图 6(a))。由于试验在室内环境进行,因此仅使用 IMU 开展变形监测。选用的 IMU 为 ForSense 公司生产的六自由度 IMU,采样频率为 100 Hz,零偏不稳定性为 2 m/s^2,随机游走特性为 0.03 m/s/$\sqrt{\text{h}}$。IMU 通过固体黏合剂固定在框架式钢结构的二楼楼板上(见图 6(b))。

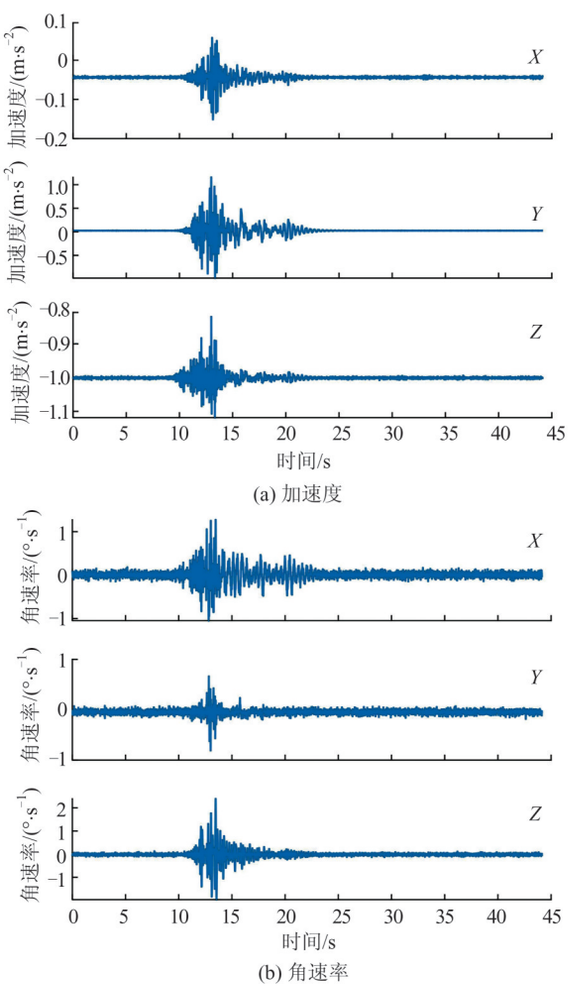
为了计算试件在地震激励下的平移、振动、倾斜、扭转等参数,进行了不同水准地震动作用下的单轴拟动力试验。试验中选取了工程常用的 El Centro Array♯9 台站记录地震振动;振动台模拟 9 度罕遇地震、地震动峰值加速度为 1g 的单轴(Y 轴)地震。地震动加速度和角速度的时程曲线如图 7 所示,其中地震动自 10 s 开始作用,持续时间约为 10 s。由图 7(a)可见,IMU 输出的 Y 轴最大加速度约为 1g,与地震动峰值加速度一致,表明 IMU 可准确监测地震加速度信息;加速度的振动数据由静止状态到振动再到静止,表明加载



(a) 钢结构模拟超高层试件 (b) IMU安装及布局

图6 钢结构模拟超高层试件与IMU安装及布局

Fig. 6 Steel Structure Simulated Super-Tall Test Specimen and IMU Installation and Layout



(a) 加速度

(b) 角速率

图7 地震动作用下的加速度和角速率时程曲线

Fig. 7 Time Series of Acceleration and Angular Velocity in Seismic Motion

状态与IMU设备性能均无异常。对比图7(a)与图7(b)可以看出,Y轴动力试验对IMU输出加速度的Y轴影响较大,对IMU输出角速率的X轴影响较大。

图8展示了通过加速度计积分算法计算得到的Y方向位移。结果显示,峰值位移仅为0.5 mm,当模拟地震事件结束时,试件恢复至初始位置,表明地震激励对模拟超高层钢结构的位移影响微乎其微。原因是该超高层钢结构的柔性特性及其与振动台的稳固连接。

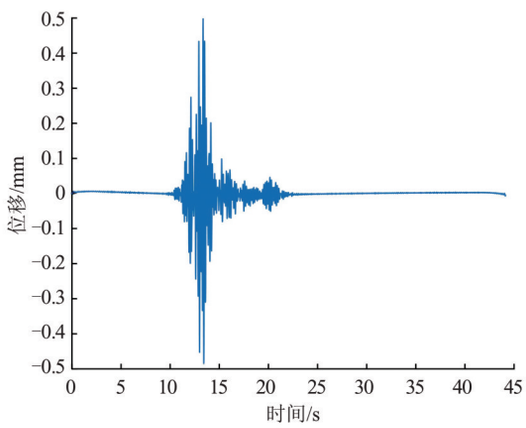


图8 模拟超高层钢结构模拟地震激励下的平移

Fig. 8 Translation of Simulated Super-Tall Steel Structure Under Simulated Seismic Excitation

通过互补滤波解算的倾角和扭转角变化情况如图9所示,其中倾角1为X方向的倾角,倾角2为Y方向的倾角。从图9可以看出,地震发生时,倾角逐渐增大,表明模拟超高层结构发生倾斜,随着地震强度的减弱,倾角逐步恢复到地震前状态。然而,在模拟地震激励过程中产生了0.02°的扭转角,未完全恢复到地震前状态。

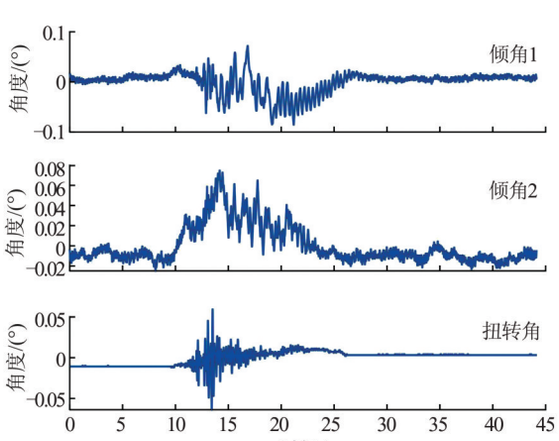


图9 模拟超高层钢结构模拟地震激励下的倾角与扭转角

Fig. 9 Tilt and Torsion Angles of Simulated Super-Tall Steel Structure Under Simulated Seismic Excitation

综上所述,本次模拟罕遇地震的试验表明,超高层钢结构在地震过程中产生了位移、振动、倾斜及扭转等多种变形。在地震结束后,超高层钢结构的倾斜和位移均恢复至初始状态,但仍存在0.02°的扭转角。试验结果验证了基于IMU的加

速度计积分模型基于Mahony互补滤波的扭转监测模型的可靠性,以及IMU在超高层建筑振动监测中的有效性,实现了对超高层建筑变形的监测。

4.2　超高层监测实例

超高层建筑在施工过程中受自身结构运动及环境因素(如风载、震载等)影响,容易产生一定程度的动态变形。本文采用GNSS多源融合监测技术,对某超高层建筑施工阶段的爬升模架进行了实时动态监测。监测项目采用“2+4”的安装部署模式,即在建筑周围对称设置2台GNSS基准站,并在爬升模架的四角分别安装4台GNSS监测站。基准站位于建筑两侧开阔的低层楼顶,确保信号接收的稳定性和精度。所使用的GNSS设备为团队自研的GNSS集成IMU监测设备,具备高精度的位移和振动监测功能(见图10)。

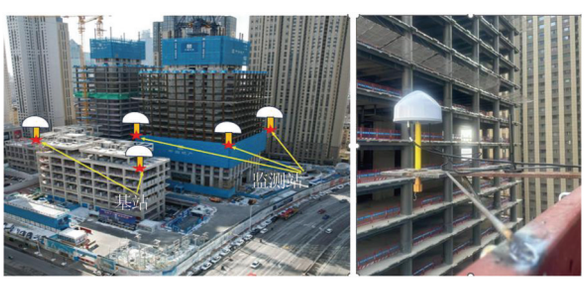


图10　监测设备安装示意图

Fig. 10　Schematic Diagram of Monitoring Equipment Installation

1)GNSS数据分析

4台监测站在施工过程中爬升高度的变化如图11所示,超高层建筑在施工过程中一次爬升高度的变化情况表明,建筑的爬升过程稳定且精确,一次爬升高度均值为4.59 m,与激光测距实际爬升高度(4.60 m)一致。爬升过程中的各项参数均保持在设计要求范围内,且无异常现象发生,验证了GNSS多源融合监测技术在超高层建筑施工中的应用效果。

2)IMU振动监测

为评估施工振动对爬升模架的影响,采用IMU设备进行振动监测。通过在施工现场模拟小幅度走动与大幅度跳动的方式,测得了不同振动情况下的加速度数据。监测结果显示,在1.8×10^4 s附近,小幅度走动时最大加速度峰值为0.02 m/s^2,而在1.9×10^4 s附近,大幅度跳动时峰值增至0.04 m/s^2(见图12)。表明IMU不仅能够准确感知施工振动,还能有效辨识振动强度的变化,为施工过程中的振动安全提供了可靠依据。

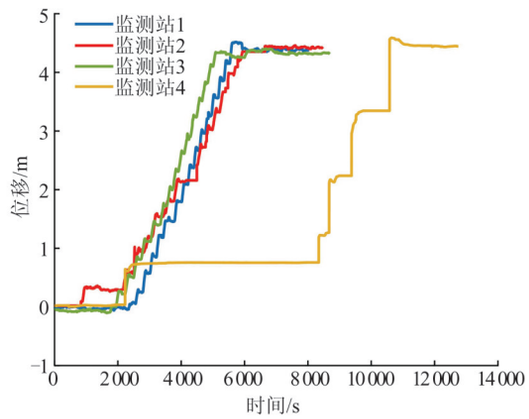


图11　4台监测站在施工过程中爬升高度的变化

Fig. 11　Variation in Elevation of Four Monitoring Stations During the Climbing Process in Construction

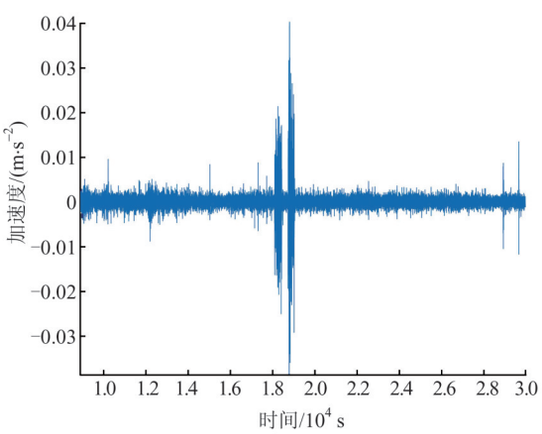


图12　施工振动环境模拟与IMU数据分析结果

Fig. 12　Construction Vibration Environment Simulation Test and IMU Data Analysis Results

3)GNSS/IMU融合位移监测

为评估本文的GNSS/IMU融合位移监测算法,选取超高层建筑施工过程中的GNSS和IMU多源在非爬升阶段的监测数据,如图13所示。

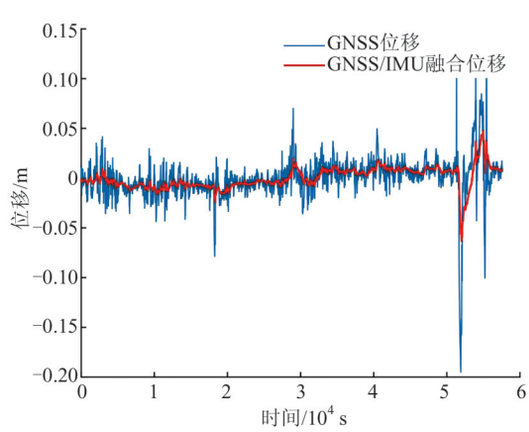


图13　GNSS/IMU融合位移监测

Fig. 13　Displacement Monitoring of GNSS/IMU Fusion

融合后位移更平滑,削弱异常点干扰,可以看出GNSS位移在非爬升阶段有较多毛刺噪声,通过GNSS/IMU融合处理,噪声被有效消除,同时有效削弱了异常信号的干扰。

4)监测预警系统研发

为进一步提升施工安全监测的实时性与智能化,笔者团队开发了建筑施工安全北斗+监测系统(见图14)。该系统集成了超高层建筑施工过程的三维模型展示、监测数据分析、监测站基础信息管理与存储、监测预警预报等功能,实现了施工过程的全方位安全监控,有效保障了施工的安全性与稳定性。



图14 建筑施工安全监测大屏展示系统

Fig. 14 Construction Safety Monitoring Display System

5 结 语

GNSS多源融合变形监测技术作为保障超高层建筑安全的重要手段,其重要性已经不言而喻。本文提出了一体化的GNSS/IMU多源传感器融合变形监测解决方案,并基于某超高层建筑施工安全监测实例,验证了该方案在变形监测中的实际应用效果。展望未来,GNSS多源融合技术在超高层建筑变形监测中的潜力巨大,但如何在复杂环境中提高监测精度、优化数据融合模型,并降低监测成本仍然是关键挑战。通过进一步的理论创新与技术实践,可以提升GNSS的可用性,并为未来高精度变形监测提供更加全面和可靠的技术支持。随着GNSS多源融合监测技术的进步,如何更好地服务于智慧城市建设和城市安全发展,也是值得深入研究的方向。

参 考 文 献

[1] GUO J J, GE S J. Research of Displacement and Frequency of Tall Building under Wind Load Using GPS [C]//The 10th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation(ION GPS), Kansas City, USA, 1997.

[2] 郭稳,王国权,鲍艳,等. 顾及季节性变形的GNSS高层建筑倾斜和沉降观测方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2020,45(7):1043-1051.
GUO Wen, WANG Guoquan, BAO Yan, et al. Tilt and Settlement Monitoring of High-Rise Buildings Using GNSS Precise Point Positioning and Seasonal Ground Deformation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(7): 1043-1051.

[3] CHEN Z S, ZHOU X, WANG X, et al. Dynamic Behavior of Super High-Rise Building: Deployment of Smart Monitoring System and Analysis[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146(4): 05020001.

[4] 单伽锃,张茜,吕西林,等. 多元特征驱动的超高层建筑变形状态智能学习与预测[J]. 建筑结构学报,2024,45(3):101-112.
SHAN Jiazeng, ZHANG Xi, LÜ Xilin, et al. Multi-feature Driven Intelligent Learning and Prediction of Deformation State of Super-Tall Buildings [J]. *Journal of Building Structures*, 2024, 45(3): 101-112.

[5] 王帅,尹川,孙昱,等. 融合GNSS和加速度计的超高层建筑动态形变分析[J]. 测绘通报,2024(8):66-72.
WANG Shuai, YIN Chuan, SUN Yu, et al. Dynamic Deformation Analysis of Super High-Rise Buildings by Integrating GNSS and Accelerometers [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2024(8): 66-72.

[6] 中国测绘学会. 超高层建筑施工测量规范:T/CS-

GPC 001－2022[S]. 北京:测绘出版社,2022.
Chinese Society of Surveying and Mapping. Code for Construction Surveying of Super High-Rise Buildings: T/CSGPC 001－2022[S]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2022.

[7] ZALKA K A. Maximum Deflection of Asymmetric Wall-Frame Buildings Under Horizontal Load[J]. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2014, 58(4): 387-396.

[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑变形测量规范: JGJ 8—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Deformation Measurement of Building and Structure: JGJ 8—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.

[9] BREUER P, CHMIELEWSKI T, GÓRSKI P, et al. Application of GPS Technology to Measurements of Displacements of High-Rise Structures Due to Weak Winds[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, 90(3): 223-230.

[10] BREUER P, CHMIELEWSKI T, GÓRSKI P, et al. The Stuttgart TV Tower—Displacement of the Top Caused by the Effects of Sun and Wind[J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(10): 2771-2781.

[11] TAMURA Y, MATSUI M, PAGNINI L C, et al. Measurement of Wind-Induced Response of Buildings Using RTK-GPS[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, 90(12/13/14/15): 1783-1793.

[12] 钱稼茹, 过静珺, 陈志鹏. 地王大厦动力特性及大风时楼顶位移和加速度实测研究[J]. 土木工程学报, 1998, 31(6): 30-39.
QIAN Jiaru, GUO Jingjun, CHEN Zhipeng. Measurement Researches on Dynamic Property and on Top Displacement and Acceleration During Large Wind for Diwang Plaza[J]. *China Civil Engineering Journal*, 1998, 31(6): 30-39.

[13] 过静珺, 商瑞斌, 葛胜杰, 等. 利用GPS监测高大建筑物动态位移法研究[J]. 工程勘察, 1997, 25(3): 48-51.
GUO Jingjun, SHANG Ruibin, GE Shengjie, et al. Big Building Displacement Monitoring with GPS[J]. *Geotichnical Investigation and Surveying*, 1997, 25(3): 48-51.

[14] 李征航, 张小红, 朱智勤. 利用GPS进行高精度变形监测的新模型[J]. 测绘学报, 2002, 31(3): 206-210.
LI Zhenghang, ZHANG Xiaohong, ZHU Zhiqin. A New Model of High Accuracy Deformation Monitoring with GPS[J]. *Acta Geodaetica et Cartographic Sinica*, 2002, 31(3): 206-210.

[15] 张小红, 李征航, 徐绍铨. 高精度GPS形变监测的新方法及模型研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2001, 26(5): 451-454.
ZHANG Xiaohong, LI Zhenghang, XU Shaoquan. A New Model for High Accuracy Deformation Monitor with GPS[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001, 26(5): 451-454.

[16] 余学祥, 徐绍铨, 吕伟才. 三峡库区滑坡体变形监测的似单差方法与结果分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2005, 30(5): 451-455.
YU Xuexiang, XU Shaoquan, LÜ Weicai. Similar Single-Difference Methodology and Results Analysis for Slop Objects Deformation Monitoring in Three Gorge Area[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(5): 451-455.

[17] 邱卫宁, 陈永奇. 用载波相位宽巷组合高精度确定大数值变形[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2004, 29(10): 889-892.
QIU Weining, CHEN Yongqi. Carrier Phase Wide Lane Combination for High Precision Deformation Monitoring[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(10): 889-892.

[18] 刘志平, 何秀凤, 张书毕, 等. 结构变形监测的单频GPS动态三差法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(7): 1074-1078.
LIU Zhiping, HE Xiufeng, ZHANG Shubi, et al. Dynamic Triple-Difference Method for Single Frequency GPS Deformation Monitoring[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2011, 39(7): 1074-1078.

[19] 文锐, 刘万科, 吴明魁, 等. 基于TDCP历元间位置变化量的GNSS地质灾害快速变形识别[J]. 大地测量与地球动力学, 2024, 44(10): 1034-1039.
WEN Rui, LIU Wanke, WU Mingkui, et al. Identification of Rapid Deformation in GNSS Geological Hazard Monitoring Based on the Between-Epoch Position Variation with TDCP[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2024, 44(10): 1034-1039.

[20] YIGIT C O, GURLEK E. Experimental Testing of High-Rate GNSS Precise Point Positioning (PPP) Method for Detecting Dynamic Vertical Displacement Response of Engineering Structures[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2017, 8(2): 893-904.

[21] GENG T, SU X, FANG R X, et al. BDS Precise

Point Positioning for Seismic Displacements Monitoring: Benefit from the High-Rate Satellite Clock Corrections[J]. *Sensors*, 2016, 16(12): 2192.

[22] SHU Y M, SHI Y, XU P L, et al. Error Analysis of High-Rate GNSS Precise Point Positioning for Seismic Wave Measurement[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 59(11): 2691-2713.

[23] YIGIT C O, COSKUN M Z, YAVASOGLU H, et al. The Potential of GPS Precise Point Positioning Method for Point Displacement Monitoring: A Case Study[J]. *Measurement*, 2016, 91: 398-404.

[24] TANG X, ROBERTS G W, LI X X, et al. Real-Time Kinematic PPP GPS for Structure Monitoring Applied on the Severn Suspension Bridge, UK[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 60(5): 925-937.

[25] 李子申, 王宁波, 李亮, 等. 北斗高精度高可信PPP-RTK服务基本框架[J]. 导航定位与授时, 2023, 10(2): 7-15.
LI Zishen, WANG Ningbo, LI Liang, et al. Basic Framework of BDS-Based High-Precision and High-Credibility PPP-RTK Service [J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2023, 10(2): 7-15.

[26] 赵齐乐, 陶钧, 郭靖, 等. 广域瞬时厘米级精密单点定位和服务系统[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7): 1058-1069.
ZHAO Qile, TAO Jun, GUO Jing, et al. Wide-Area Instantaneous cm-Level Precise Point Positioning: Method and Service System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(7): 1058-1069.

[27] 柳絮. MEMS IMU动态变形监测模型及应用研究[D]. 北京:北京建筑大学,2022.
LIU Xu. Research on Dynamic Deformation Monitoring Model and Applications of MEMS IMU [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2022.

[28] XU P L, SHI C, FANG R X, et al. High-Rate Precise Point Positioning (PPP) to Measure Seismic Wave Motions: An Experimental Comparison of GPS PPP with Inertial Measurement Units [J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87(4): 361-372.

[29] WANG J, LIU X, LI W, et al. Time - Frequency Extraction Model Based on Variational Mode Decomposition and Hilbert - Huang Transform for Offshore Oil Platforms Using MIMU Data[J]. *Symmetry*, 2021, 13(8): 1443.

[30] LIU X, WANG J, LIU F, et al. Spectrum Feature Extraction Method Combining Allan Variance, VMD, and PSD[J]. *Science Report*, 2024, 14(1): 10990.

[31] MORENCY T. Measurand Invited to Inaugural Canada Turkey Infrastructure & Energy Forum [EB/OL]. (2018-10-22) [2025-04-27]. https://measurand.com/blog/measurand-invited-to-inaugural-canada-turkey-infrastructure-energy-forum/.

[32] 徐春莺. 基于MEMS 9轴传感阵列的水下地形沉降机理与监测系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
XU Chunying. Research on the Mechanism of Underwater Terrain Settlement and Monitoring System Based on MEMS 9-Axis Sensor Array[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.

[33] ZHU C Q, JIA Y G, WANG Z H, et al. Dynamics of Bottom Boundary Layers in the Yellow River Subaqueous Delta Based on Long-Term In-Situ Observations[J]. *Acta Geologica Sinica — English Edition*, 2017, 91(1): 369-370.

[34] 陈卓, 任久春, 朱谦. 基于梯度下降的自适应姿态融合算法[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(3): 124-126.
CHEN Zhuo, REN Jiuchun, ZHU Qian. Adaptive Attitude Fusion Algorithm Based on Gradient Descent [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2019, 38(3): 124-126.

[35] 汪俊, 许胜强, 程楠, 等. 基于多传感器的运动姿态测量算法[J]. 计算机系统应用, 2015, 24(9): 134-139.
WANG Jun, XU Shengqiang, CHENG Nan, et al. Orientation Estimation Algorithm for Motion Based on Multi-sensor[J]. *Computer Systems & Applications*, 2015, 24(9): 134-139.

[36] WANG W, HAN H, LIU L, et al. Performance Analysis of GNSS/MIMU Tight Fusion Positioning Model with Complex Scene Feature Constraints[J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, 2021, 4(2): 1-13.

[37] 崔先强, 杨元喜, 高为广. 多种有色噪声自适应滤波算法的比较[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, 31(8): 731-735.
CUI Xianqiang, YANG Yuanxi, GAO Weiguang. Comparison of Adaptive Filter Arithmetics in Controlling Influence of Colored Noises[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(8): 731-735.

[38] GENG J H, WEN Q, CHEN Q J, et al. Six-Degree-of-Freedom Broadband Seismogeodesy by Combining Collocated High-Rate GNSS, Accelerometers, and Gyroscopes [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(2): 708-716.