

公路桥梁工程勘察测绘中的变形监测技术及预警机制构建

张学利

天津市水务规划勘测设计有限公司 天津 300204

摘要: 公路桥梁在运营中易受多重因素影响引发变形,威胁结构安全。本文聚焦工程勘察测绘环节,系统梳理GNSS、InSAR、光纤传感及机器视觉等变形监测技术,通过多源数据融合实现毫米级精度监测;结合动态阈值设定与AI算法,构建分级预警机制,实现风险实时识别与应急响应。研究为桥梁全生命周期安全管控提供了技术框架,对提升交通基础设施韧性具有重要意义。

关键词: 公路桥梁工程; 勘察测绘; 变形监测技术; 预警机制构建

引言: 公路桥梁作为交通命脉,其结构安全关乎社会经济发展与民生稳定。在长期运营中,桥梁受车辆荷载、环境侵蚀及地质变迁等因素影响,易产生累积变形,若未及时干预可能引发灾难性事故。因此,通过高精度变形监测技术实时感知结构状态,结合智能预警机制实现风险前置管控,已成为保障桥梁安全的核心手段。本文系统梳理监测技术体系,探讨预警机制构建方法,为工程实践提供理论支撑。

1 公路桥梁工程勘察测绘中的变形监测技术基础

1.1 变形监测的核心需求

(1) 桥梁结构类型与变形特征: 梁式桥以梁体为主要承重结构,变形多表现为梁体竖向沉降、跨中挠度,整体变形均匀但局部易出现裂缝;拱桥依靠拱肋承重,变形集中在拱顶沉降、拱脚水平位移,易因受力不均产生拱肋倾斜;悬索桥以主缆和吊索承重,变形主要是主缆垂度变化、塔柱倾斜及桥面水平位移,对外部荷载变化更为敏感。(2) 关键监测参数: 沉降是桥梁基础稳定性的核心指标,反映地基承载力变化;位移包括水平、竖向位移,体现结构整体受力偏移;倾斜主要发生在桥塔、桥墩,易导致结构受力失衡;裂缝监测重点关注宽度、长度变化,是结构破损的直观表现;应力应变监测聚焦承重构件,判断其是否处于安全受力范围^[1]。

1.2 传统监测技术分析

(1) 人工测量法: 水准仪主要用于沉降测量,依赖人工操作,受天气、环境影响大,测量效率低,难以实现实时监测;全站仪用于位移、倾斜测量,需专业人员操作,测量精度易受人为误差影响,且无法满足大跨度桥梁的全方位监测需求。(2) 接触式传感器: 应变计、测斜仪需与桥梁结构直接接触安装,安装过程复杂,对结构有轻微损伤;长期使用中易受环境侵蚀、振动影响,故障率高,定期校准、更换的维护成本较高,不适用于偏远

或复杂工况下的桥梁监测。

1.3 智能化监测技术概述

(1) 定义与分类: 智能化变形监测是通过现代科技手段,实现桥梁变形参数自动采集、传输、分析的监测模式;主要分为三类,基于空间技术的GPS、InSAR监测,基于物联网的传感器组网监测,基于AI的图像识别、数据智能分析监测,三类技术协同可实现全方位、立体化监测。(2) 技术优势: 相较于传统技术,智能化监测可实现数据实时采集、实时传输,及时捕捉结构变形异常;无需人工干预,实现监测全过程自动化,大幅降低人工成本;监测精度可达毫米级,满足复杂桥梁的精准监测需求;非接触式监测模式无需损伤桥梁结构,适配各类桥梁类型,且维护成本更低、使用寿命更长。

2 公路桥梁工程勘察测绘中的变形监测关键技术及应用

2.1 全球导航卫星系统(GNSS)技术

(1) 三维位移监测原理: 在桥梁墩台、主梁关键部位布设GNSS接收机,接收卫星导航信号,结合基准站数据进行差分计算,消除轨道误差、大气折射等干扰,解算监测点三维坐标,通过不同时段坐标对比,获取沉降、水平及竖向位移量,实现变形动态跟踪。(2) 在桥梁墩台沉降与水平位移监测中的应用: 针对高墩、大跨度桥梁,将GNSS接收机固定于墩台顶部及基础部位,实时采集位移数据,捕捉地基沉降、车辆荷载等引发的微小位移,预警墩台倾斜、失稳隐患,为运维提供数据支撑。(3) 北斗/GPS多频点融合提升精度案例: 某跨江大桥监测中,采用北斗三号与GPS多频点融合技术,抵消电离层延迟干扰,将位移监测精度从厘米级提升至毫米级,成功捕捉桥墩0.3mm微小沉降,解决复杂江面监测精度不足难题^[2]。

2.2 合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术

(1) D-InSAR与PS-InSAR技术对比: D-InSAR通过双幅或多幅SAR影像干涉处理,可快速获取变形场,效率高,但易受大气噪声影响,适用于短期快速监测;PS-InSAR选取永久散射体,通过长时间序列影像分析抑制噪声,精度更高、稳定性更强,适配桥梁长期运维监测。

(2) 大范围桥梁群变形监测:某跨海大桥群监测中,采用PS-InSAR技术覆盖全桥及周边地基,通过长期监测,获取各桥梁变形数据及周边地基沉降规律,实现结构与地质环境协同监测,为安全评估提供全面依据。

2.3 光纤传感技术(FBG/BOTDR)

(1) 光纤光栅传感器原理与布设方案:FBG传感器基于光纤光栅的波长调制特性,当桥梁结构发生应变、位移时,光纤光栅波长发生偏移,通过解调仪检测波长变化,换算得到应变、位移数据;布设时,将光纤光栅传感器沿桥梁主梁、拱肋等承重构件轴线粘贴,裂缝监测区域采用阵列式布设,确保全面覆盖关键监测部位,同时避免传感器布设对桥梁结构造成损伤。

(2) 分布式应变监测与裂缝预警:BOTDR分布式光纤传感技术可实现桥梁全长范围内的应变监测,结合FBG传感器的点式监测,形成“分布式+点式”协同监测模式,当桥梁应变超过安全阈值或裂缝宽度达到预警值时,系统可实时发出预警信号,及时提醒工作人员开展维修加固,避免裂缝进一步扩展^[3]。

2.4 机器视觉与激光扫描技术

(1) 3D激光点云建模与形变分析:通过3D激光扫描仪对桥梁进行全方位扫描,获取桥梁结构的三维点云数据,构建高精度三维模型,对比不同时段的点云模型,可精准分析桥梁结构的形变差异,识别出主梁挠度、桥墩倾斜等微小变形,尤其适用于复杂造型桥梁的变形监测。

(2) 计算机视觉在裂缝识别中的应用:采用基于深度学习的YOLO算法,通过摄像头采集桥梁表面图像,算法可自动识别裂缝的位置、宽度、长度,识别精度可达0.1mm,相较于人工裂缝检测,效率提升5倍以上,且可实现24小时不间断监测,有效解决了人工检测漏判、误判的问题。

2.5 物联网与多源数据融合

(1) 无线传感器网络(WSN)架构设计:构建“感知层-传输层-应用层”三级WSN架构,感知层整合各类传感器,采集位移、应变、裂缝等数据;传输层采用无线通信技术,实现数据实时传输,适配偏远、复杂桥梁的监测需求;应用层对数据进行存储、分析、可视化展示,为工作人员提供直观的监测结果与预警信息。

(2) GNSS+InSAR+传感器数据协同处理:通过多源数据融合算法,

将GNSS的单个高精度数据、InSAR的大范围变形数据、光纤传感器的应变数据进行协同分析,弥补了单一技术的短板,实现了“点-面-线”全方位监测,可更精准地判断桥梁结构的变形规律与安全状态,为桥梁长期运维提供科学、全面的决策依据。

3 公路桥梁工程勘察测绘中的变形预警机制构建方法

3.1 预警指标体系设计

(1) 阈值设定依据:阈值设定需遵循三重依据,一是严格参照公路桥梁相关规范标准,明确沉降、位移、裂缝等核心指标的安全限值,确保符合行业要求;二是依托长期监测积累的历史数据,分析桥梁正常服役状态下的变形波动范围,排除正常变形干扰;三是通过建立桥梁结构力学模型,模拟不同荷载、地质条件下的变形规律,结合模型计算结果优化阈值,避免阈值过高漏报、过低误报。

(2) 多级预警分类:采用三级预警分类模式,贴合工程实际运维需求。黄色预警为一般预警,对应变形量达到阈值的60%-80%,提示结构出现轻微异常,需加强监测频率;橙色预警为较重预警,对应变形量达到阈值的80%-90%,提示结构存在明显变形风险,需开展现场排查;红色预警为严重预警,对应变形量超过阈值90%或出现突变,需立即启动应急处置,暂停桥梁通行^[4]。

3.2 风险评估模型构建

(1) 基于层次分析法(AHP)的权重分配:采用层次分析法构建递阶层次结构,将桥梁变形风险作为目标层,沉降、位移、裂缝等预警指标作为准则层,各指标具体监测值作为方案层;通过专家打分、两两对比判断矩阵,计算各指标权重,突出沉降、应力应变等核心指标的影响,同时兼顾倾斜、裂缝等辅助指标,确保权重分配贴合桥梁结构受力特性。

(2) 模糊综合评价与蒙特卡洛模拟结合:采用模糊综合评价法,将定性评价与定量数据结合,解决变形风险评估中的模糊性问题,对各预警指标的风险等级进行综合判定;结合蒙特卡洛模拟技术,模拟不同荷载、环境因素下的变形概率分布,预测桥梁变形风险的发生概率,弥补单一评价方法的局限性,提升风险评估的精准度。

3.3 动态预警算法实现

(1) 时间序列分析:采用两种算法协同实现变形趋势预测,ARIMA算法适用于平稳性变形数据的短期预测,通过分析历史监测数据的时间相关性,预测短期内桥梁变形规律;LSTM神经网络适用于非线性、非平稳变形数据的长期预测,可有效捕捉温度、荷载等复杂因素对变形的影响,精准预测长期变形趋势,为提前预警提供支撑。

(2) 实时数据与历史基线对比:构建桥梁变形历史

基线数据库，整合正常服役状态下的监测数据，形成标准参考区间；将实时监测数据与历史基线进行实时对比，通过 3σ 原则识别异常值，当实时数据超出参考区间且持续波动时，判定为变形异常，触发对应等级预警，避免因瞬时干扰导致的误报。

3.4 预警系统架构设计

(1) 边缘计算层：部署于桥梁监测现场，负责对各类传感器采集的实时数据进行预处理，过滤噪声、修正误差，提取有效监测数据；同时实现数据的本地缓存，避免网络中断导致的数据丢失，为后续分析提供高质量数据支撑，提升预警响应速度。(2) 云平台层：作为系统核心，承担数据存储、深度分析与可视化展示功能；采用云端数据库存储海量监测数据与历史基线数据，通过内置的风险评估模型与动态预警算法，对预处理后的数据进行实时分析，判定预警等级；通过可视化图表展示变形趋势、预警信息，方便工作人员直观掌握桥梁状态。(3) 用户终端层：实现预警信号的多终端推送，工作人员可通过PC端实时查看详细监测数据与预警报告，通过移动端接收短信、APP推送的预警通知，无论身处何地均可及时获取桥梁变形异常信息，快速启动应急处置流程，最大限度降低安全风险^[5]。

4 公路桥梁工程勘察测绘中变形监测与预警的挑战与对策

4.1 技术挑战

(1) 复杂环境干扰：桥梁多处于交通繁忙、周边电磁环境复杂区域，高压线路、通信设备产生的电磁干扰，会干扰GNSS信号传输；同时桥梁主体、周边建筑物会产生多路径效应，导致GNSS接收机接收虚假信号，降低位移监测精度，易引发预警误判。(2) 多源数据融合的算法复杂度：变形监测涉及GNSS、InSAR、光纤传感等多类数据，各类数据的格式、精度、监测维度存在差异，现有融合算法难以高效处理异构数据，易出现数据冗余、冲突问题，增加了数据处理难度，影响预警响应效率。

4.2 管理挑战

(1) 数据安全与隐私保护：监测过程中会产生大量桥梁结构参数、地基地质、监测数据等敏感信息，部分工

程未建立完善的数据安全防护体系，易出现数据泄露、篡改问题，威胁桥梁工程安全与工程隐私。(2) 跨部门协同机制缺失：桥梁设计、施工、运维分属不同单位，各单位数据存储、管理标准不一，缺乏有效的协同共享机制，形成数据壁垒，导致监测数据无法高效互通，影响变形风险的综合研判与预警处置。

4.3 应对策略

(1) 抗干扰技术优化：针对环境干扰问题，采用GNSS差分定位技术，通过基准站与监测站数据协同计算，抵消电磁、多路径效应干扰，提升监测精度；对InSAR监测数据进行大气校正处理，消除大气噪声影响，保障大范围监测数据的可靠性。(2) 制定行业数据共享标准与安全规范：统一桥梁变形监测数据的格式、存储、传输标准，打破跨部门数据壁垒，推动设计、施工、运维单位数据协同共享；同时制定完善的数据安全规范，建立数据加密、访问权限管控机制，防范敏感信息泄露、篡改，保障数据安全。

结束语

公路桥梁变形监测与预警机制的构建，是保障结构安全、延长使用寿命的关键举措。通过集成GNSS、InSAR、光纤传感等先进技术，结合多源数据融合与智能算法，实现了对桥梁变形的毫米级精准感知与动态预警。未来需持续优化抗干扰能力、完善数据共享标准，推动监测技术向智能化、标准化方向发展，为公路桥梁全生命周期安全运维提供更坚实的技术支撑。

参考文献

- [1]钟志伟.道路桥梁工程沉降段路基施工技术应用[J].工程技术研究,2025,10(16):102-104.
- [2]邓宏伟.公路桥梁工程项目施工管理优化分析[J].建筑结构,2023,53(16):170-172.
- [3]朱继宗.公路桥梁工程施工风险评估与安全管理策略[J].建筑工人,2023,44(07):27-30.
- [4]王冲.公路桥梁项目施工阶段安全风险评估及控制分析[J].交通科技与管理,2023,4(13):162-164.
- [5]潘家平.测量及测绘新技术在桥梁工程测量中的应用分析[J].企业科技与发展,2021,(11):105-107.