中北大学学报(自然科学版)
JOURNAL OF NORTH UNIVERSITY OF CHINA(NATURAL SCIENCE EDITION)
2026年 第47卷 第5期(总第229期)
Vol. 47 No. 5 2026(Sum No. 229)

文章编号：1673-3193(2026)05-0669-13 J. North Univ. China, Nat. Sci. Ed., 2026, 47(5): 669-681.

桥梁位移测量技术研究进展

王 鑫，王春生，王 彬
（中北大学 环境与安全工程学院，山西 太原 030051）

摘 要： 桥梁位移是荷载试验、运营监测与安全评估中的重要指标，不同测量任务在观测方向、响应频段、空间覆盖和参考基准等方面存在显著差异。本文以位移信息形成方式为主线，将现有方法归纳为接触式直接位移测量、非接触式位移观测、间接位移重构和多源异构数据融合四类，并从参考基准、响应频段、空间覆盖、主要误差及工程适用性等方面进行比较。研究表明：接触式直接测量量值传递关系清晰，但受参考条件和现场布设限制；非接触式方法具有远距离、多测点和大范围观测优势，但易受观测几何与环境因素影响；间接重构和多源融合能够补充直接位移信息，但其可靠性分别受模型边界和多源时空一致性制约。当前仍需重点解决复杂环境鲁棒性、误差传播与测量不确定度表达以及长期监测质量追溯等问题。

关键词： 桥梁位移测量；安全评估；视觉位移测量；间接位移重构；多源异构数据融合
中图分类号： U446 **文献标识码：** A **doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2026.07.0024
引用格式： 王鑫，王春生，王彬. 桥梁位移测量技术研究进展[J]. 中北大学学报(自然科学版)，2026，47(5)：669-681.
Wang Xin, Wang Chunsheng, Wang Bin. Research progress on bridge displacement measurement technology [J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2026, 47(5): 669-681.

Research Progress on Bridge Displacement Measurement Technology

Wang Xin, Wang Chunsheng, Wang Bin
(School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Bridge displacement is an important indicator in bridge load testing, operational monitoring, and safety assessment. Different measurement tasks vary considerably in terms of observation direction, response frequency band, spatial coverage, and reference datum. Taking the formation mechanism of displacement information as the main framework, this paper classifies existing methods into four categories: contact-based direct displacement measurement, non-contact displacement observation, indirect displacement reconstruction, and multi-source heterogeneous data fusion. These methods are compared in terms of reference datum, response frequency band, spatial coverage, major error sources, and engineering applicability. The review shows that contact-based direct measurement methods provide a clear metrological traceability chain, but are constrained by reference conditions and on-site installation; non-contact methods offer advantages in long-distance, multi-point, and large-area observation, but are susceptible to observation geometry and environmental disturbances; indirect reconstruction and multi-source fusion can supplement directly measured displacement information, but their reliability is constrained by model and boundary assumptions and by spatiotemporal consistency among

收稿日期： 2026-07-27
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(52408350)；山西省基础研究计划资助项目(202403021212160，202403021212154)；山西省回国科教创新资助项目(2025-167)
作者简介： 王 鑫(1995—)，男，副教授，博士，主要从事桥梁结构健康监测与智慧运维方面的研究。E-mail：20240011@nuc.edu.cn。

heterogeneous data sources, respectively. Further research is still needed to improve robustness under complex environmental conditions, clarify error propagation and measurement uncertainty, and strengthen quality traceability for long-term monitoring.

Key words: bridge displacement monitoring; safety evaluation; vision-based displacement measurement; indirect displacement reconstruction; multi-source heterogeneous data fusion

0 引 言

桥梁会在车辆、列车、风、温度以及基础变形或沉降等作用下产生静态位移、准静态位移、动态位移和长期位移变化。位移结果直接关联结构线形、刚度与边界状态，是桥梁荷载试验、运营监测和安全评估的核心依据。然而，稳定参考点的选取与维持、远距离下的观测几何条件、低频位移的稳定性以及动态响应中的相位一致性，难以由单一传感设备同时保证。这一矛盾构成了桥梁位移测量技术多样化发展的根本驱动力。

静态位移与长期位移监测强调低频稳定性和基准的连续可溯，而动态测试则更重视采样率、多通道同步与相位保真；同时，测点数量的增加并不必然保证位移场的空间代表性。已有桥梁实测研究表明，直接位移计、全站仪和非接触方法在观测基准、时间分辨率与现场可达性方面各有边界[1-3]。视觉位移测量、全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System，GNSS)、地基雷达、地面激光扫描和干涉合成孔径雷达(Interferometric Synthetic Aperture Radar，InSAR)已拓展了桥梁位移的测点数量、观测距离与时间尺度；倾角应变、加速度重构及多源异构数据融合则用于补充难以直接获得的响应分量。相关综述和实测研究已覆盖视觉方法、卫星与地基雷达观测以及位移-加速度融合[4-12]。视觉位移测量已由传统模板匹配、数字图像相关(Digital Image Correlation，DIC)和特征跟踪[13-17]，逐步发展为深度目标检测、深度跟踪、稠密光流和图像超分辨率与传统位移求解相结合的混合方法[18-21]。

现有综述主要围绕视觉、雷达或融合等特定技术方向展开；少量多源异构数据融合综述虽讨论多传感器联合估计，但对四类方法间的输出物理量、参考基准、响应频段及验证层级缺少统一比较。这一缺失导致工程选型缺乏依据，交叉验证困难，融合误差难以溯源，不确定度传递路径不明，制约了位移数据在安全评估中的可靠运用。

本文以位移信息形成方式为主线，依次讨论需求与分类、直接与非接触测量、重构方法、多源异构数据融合及工程适用性。比较维度涵盖方向与频段、空间覆盖、参考基准、环境适应性和部署维护条件，并追踪从原始观测到位移输出的处理链与验证依据。区别于既有综述的单一技术视角，本文旨在建立四类方法的横向比较与互补辨析，厘清各自适用条件与局限，为可校准、可维护、可追溯的长期位移监测提供参考。

1 测量需求与技术分类

1.1 桥梁位移响应与测量要求

本文所述位移是指桥梁测点相对于给定参考基准的位置变化，其物理含义与参考基准密切相关。当参考基准独立于桥梁结构且保持稳定时，观测结果可表征测点相对于外部基准的位移；当以支点、相邻构件或结构内部测点作为参考时，所得结果实质上反映两测点之间的相对位移，即结构变形或挠度。因此，工程应用中应明确观测基准及位移的相对性，避免将结构内部相对变形与外部稳定基准下的位移混用。

静态位移强调稳定基准和量值复核，准静态位移关注车辆队列、温度与缓变荷载引起的低频成分，动态位移要求足够的采样率以保证幅值保真度，同时要求严格的时间同步以维持多测点间的相位一致性，长期位移监测的准确性，依赖于多期观测间基准的统一传递以及设备的长期稳定运行。同一时程可能叠加多种成分，评价时需同时考虑目标频段、观测时长和噪声水平。

响应类型直接影响测点布设、测量方向及空间覆盖范围。荷载试验通常关注跨中、四分点或支点附近的竖向相对位移；长跨桥风致或车致响应还涉及横向与扭转运动；基础和桥墩长期变化更关注高程或坐标基准。雷达和InSAR的观测量为视线向(Line-of-Sight，LOS)位移，当实际运动方向与视线不一致时须经几何投影转换，不可直接将观测量称为竖向位移。

采样率、观测时长和空间覆盖之间通常存在权衡。高频接触式传感可保持动态响应细节，却多限于少量测点；图像和点云可扩大空间覆盖，但帧率与扫描周期限制可恢复频段，海量数据亦对处理效率构成挑战。测点应布置在能够代表目标振型或线形的位置，并避免把局部构件运动直接外推为全桥位移。

1.2　技术分类与评价维度

桥梁位移测量的方法比较应涵盖物理量及方向、频段与采样率、空间覆盖、参考基准、环境适应性、长期稳定性、同步精度、维护成本及主要误差来源等维度。表 1 按以传统工程测量为代表的接触式直接位移测量、非接触式位移观测、间接位移重构和多源异构数据融合归纳各类方法的工程边界，不以单一标称精度代替适用性判断。

不同技术的位移测量精度受量程、观测距离、采样率、环境条件、数据处理方法和参考基准影响，难以采用单一数值进行概括。表 2 给出代表性工程条件下各类方法的典型精度等级[1,3,7-8,20-46]，仅用于辅助方法选型，不替代具体设备标定和独立参考试验。

表 1　不同桥梁位移测量方法的总体比较

Tab. 1　Overall comparison of different bridge displacement measurement methods

类别/方法分支	典型方法	位移基准/信息	适宜响应	主要优势	主要限制及场景
以传统工程测量为代表的接触式直接位移测量	LVDT 等电感式位移传感器、拉线式传感器、百分表、静力水准、位移型FBG、全站仪与水准仪	外部稳定基准下的位移，或结构内部参考点之间的相对位移/变形	静态位移、准静态位移与线形复测	量值传递链清晰，便于校核与溯源	依赖稳定参考点、通视条件或现场支架；测点数量有限
非接触位移观测-视觉	传统视觉混合方法：模板匹配、数字图像相关(DIC)、光流法及深度学习	像素位移经尺度换算形成物理位移	多点动态位移与局部全场变形	空间信息丰富，布设灵活	受成像质量、标定误差、遮挡及观测几何影响
非接触位移观测-GNSS	差分(DGNSS)、精密单点定位(PPP)及高频GNSS	统一地理或工程坐标基准下的三维坐标变化	低频位移、长期位移变化及部分动态响应	可连续获得三维坐标时序，基准统一	受多路径效应、遮挡、大气误差与定位噪声影响
非接触位移观测-雷达与地面扫描	地基干涉雷达(GB-InSAR)、地基合成孔径雷达(GB-SAR)、地面激光扫描(TLS)与星载InSAR	视线向(LOS)位移、几何变形或时序形变	远距离动态观测(地基雷达)、线形复测(TLS)与长期缓慢变形(InSAR)	观测距离远，时间尺度互补，可覆盖秒级动态响应至年际缓慢变化	受观测几何、扫描周期、配准及相干性/配准精度约束
间接位移重构	应变—曲率—位移转换、加速度时频域积分、倾角-位移重构	模型或频段约束下的位移估计	准静态至中高频位移，取决于观测量与重构方法	可利用易布设的应变计、加速度计或倾角仪，在缺乏直接位移基准时估计位移	受结构模型、边界条件、积分漂移、传感器零偏及测点布置影响
多源异构数据融合	GNSS-加速度融合、视觉-加速度融合等	统一时空基准下的联合位移估计	宽频带(准静态至中高频)连续位移响应	弥补单一方法在频段、基准和采样率上的不足	数据同步、坐标对齐、尺度统一及不确定度处理复杂

桥梁运营及荷载试验中的位移和变形通常处于毫米甚至亚毫米量级，测量性能不仅取决于传感器标称精度，还受到量程、观测距离、参考基准、环境条件和现场布设方式的共同影响。提高测量精度往往需要缩小视场、增加稳定参考设施、提高设备性能或加强环境控制，而这些措施又会增加现场布设和维护难度。因此，工程选型的关键并非单纯追求最高标称精度，而是在目标位移幅值、测量范围、环境适应性和操作可行性之间取得平衡。

评价宜按“物理量与方向—基准—频段—空间—误差—维护”的顺序进行：先确认输出是否对应工程关注的方向与测点，再核查目标响应是否落在可观测频段，随后比较空间覆盖、主要误差和长期可维护性。能够提供统一坐标或全场信息的方法，也可能因噪声、时间分辨率或观测几何而不适合微小动态位移（如毫米级甚至亚毫米级的振动响应）。

以上 4 类方法可进一步归纳为 4 种位移信息形成方式：接触式直接测量中，传感器或机械转换机构直接获得测点相对位移，全站仪、水准仪等则通过坐标、高程或距离变化建立位移基准；视觉测量、GNSS、地基雷达与地面激光扫描、星载 InSAR 等均属于非接触式位移观测；倾角、应变或加速度需要结构关系、边界条件或频段约束才能重构位移；多源异构数据融合则在不同观测之间完成时间同步、坐标对齐、尺度统一与误差传播建模。图 1 概括了各技术方向及其相互关系。

表2 不同桥梁位移测量方法的主要性能与工程适用性比较

Tab. 2 Comparison of major performance and engineering applicability of bridge displacement measurement methods

方法	典型精度	测量与覆盖特性	主要误差源	现场可操作性	微小位移测量主要矛盾
LVDT/百分表	亚毫米级	受传感器量程限制	支架、温度、零漂	精度高，但需稳定参考架和接触布设	高精度与现场安装难度
拉线位移计	亚毫米～毫米级	量程较大	拉线张力、附加振动	安装简单，但需可达测点	量程与微小位移分辨能力
静力水准	亚毫米级	适合竖向相对变形	温度、液面波动、基准漂移	适合长期布设，但管路施工要求高	长期稳定性与现场布设
视觉	亚毫米～毫米级	受视场、距离和像素尺度影响	标定、相机运动、光照、热浪	非接触、多点，但要求通视和稳定成像	远距离便利性与小像素位移精度
GNSS	毫米～厘米级	无传统机械量程限制	多路径、遮挡、大气误差	长期连续、无需地面参考架	现场便利性高但微小位移噪声较大
地基雷达	亚毫米～毫米级	适于远距离LOS测量	观测几何、反射条件	非接触、远距离，但设备要求高	远距离高精度与设备成本
TLS/InSAR	毫米级	大范围空间/长期监测	配准、大气、相干性	空间覆盖大	空间覆盖与时间分辨率
间接重构	毫米～厘米级	取决于传感器及模型	模型、边界、积分漂移	易布设，但依赖算法	可布设性与模型误差

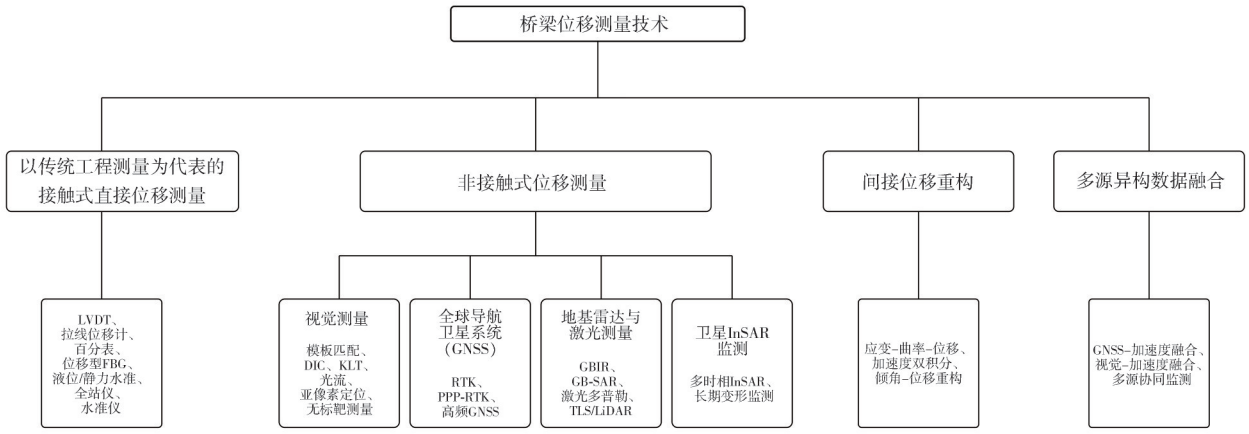


图1 桥梁位移测量技术分类与分析框架

Fig. 1 Classification and analytical framework of bridge displacement measurement technologies

2 桥梁位移测量技术路径

2.1 接触式直接位移测量

本节介绍LVDT、拉线位移计、百分表、静力水准、位移型FBG等传感器类直接测量，以及全站仪、水准测量等通过坐标或高程建立位移基准的传统工程测量。

LVDT、拉线位移计、百分表、静力水准和位移型FBG等可获得测点相对于参考点的局部相对位移。当参考点位于桥梁支点或结构内部时，其结果主要表征结构局部变形或挠度；只有当参考点与桥梁结构力学独立且具有稳定外部基准时，才能进一步解释为测点相对于外部基准的位移。不同装置各有现场限制：拉线张力和布线路径影响读数，机械仪表需控制支架变形，静力水准需处理温度与液面波动，位移型FBG需校核转换机构。标定、重复观测和冗余布设比单次高精度读数更能保证结果可信。

参考基准应与待测构件力学相对独立。支架、桥墩或地面参考点随温度、车辆荷载和基础变化产生的运动会叠加至读数；跨水、高墩或桥下净空受限时，长支架与拉线易引入附加振动。全站仪和水准测量通过坐标或高程描述桥梁线形与位移，可用于施工控制、荷载试验和长期复测，但受通视、测站稳定和观测周期限制，采样率低，仅适用于静态或准静态观测，不宜将离散测点高程变化解释为连续动态位移。

工程测量应通过稳定控制点、往返闭合观测和多测回结果检查基准稳定性。全站仪的棱镜识别、视准长度与气象改正，以及水准测量的视距平衡和路线闭合，均影响跨时相比较；自动化设备虽可提高观测频率，仍需保留独立控制点和周期性人工复核。跨水、跨线、高墩及不中断交通

时，布设与维护难度会增加。校核记录应包含加载时刻、初始零点、卸载恢复与重复工况差异，以及长期布设中的零点复核、传感器更换和温度补偿情况。位移型FBG直接测量应与应变反演位移区分[22-24]，后者需经应变－曲率－位移转换。

2.2　非接触式位移观测

2.2.1　视觉位移测量

桥梁视觉位移测量经历了由人工标靶与二维图像处理向无标靶、多测点及复杂环境鲁棒测量的发展过程。早期研究主要利用摄影测量和数字图像处理获取桥梁动态位移，Olaszek[13]较早将计算机视觉用于桥梁动态特性测试；随后，Jáuregui等[14]开展了桥梁竖向挠度的非接触摄影测量，Lee等[15]进一步建立了面向桥梁动态位移的实时远程视觉测量系统。Ye等[16]和Ribeiro等[17]随后将视觉方法用于长跨桥和铁路桥的动态位移测量。此后，随着高分辨率相机和图像处理算法的发展，研究逐步扩展至模板匹配、数字图像相关、特征点跟踪和光流等方法，并由人工标靶逐渐向自然纹理和无标靶测量发展。近年来，研究重点进一步转向复杂环境下的目标重检测、相机运动补偿、深度学习辅助跟踪、图像超分辨率及多测点位移测量，以提高远距离、遮挡、光照变化及低像素尺度条件下的测量鲁棒性。

视觉位移测量通过目标匹配、DIC或特征跟踪获得图像域位移，亚像素算法可进一步提高图像坐标定位分辨能力。图像域位移经尺度标定和坐标转换后获得物理位移，基本流程见图2。

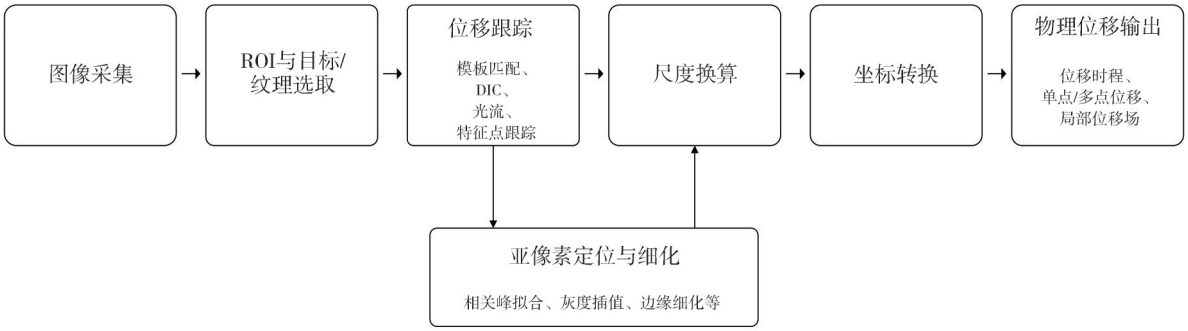


图2　桥梁视觉位移测量基本流程

Fig. 2　Basic workflow for vision-based bridge displacement measurement

平面尺度可由已知长度建立[14,16-17]，像素位移与物理位移的基本关系为

$$s=\frac{L}{l},\ \Delta d=s\Delta p, \tag{1}$$

式中：s为尺度系数；Δp和Δd分别为图像域像素位移和对应的物理位移。亚像素定位能力反映图像坐标域的数值估计能力，并不等同于最终物理位移测量精度。当运动方向与像平面不平行时，需依据相机内外参数或结构方向完成投影转换，不能仅依赖单一尺度系数。

视觉物理位移测量主要受像素定位、尺度标定、相机标定与位姿以及环境成像扰动影响。Wen等[47]分析了相机姿态、观测距离及温湿度等因素对桥梁视觉位移测量不确定度的影响。上述误差来源可概括为[48]

$$u_{\Delta d}^2=(\Delta p\cdot u_s)^2+(s\cdot u_{\Delta p})^2+u_{\mathrm{cal}}^2+u_{\mathrm{pose}}^2+u_{\mathrm{env}}^2, \tag{2}$$

式中各项分别表示尺度换算、像素定位、相机标定、位姿及环境成像因素引入的不确定度。该式用于概括视觉物理位移测量的主要误差来源，不作为本文提出的严格计量模型。

模板匹配通过目标区域相关性实现位移跟踪，方法简单，但易受模板退化、遮挡和尺度变化影响。Pan等[49]通过自然纹理区域匹配与IC-GN亚像素迭代实现目标位移跟踪，并结合成像几何校正提高非正视拍摄条件下的位移测量可靠性。Wu等[50]利用TAM提取桥梁主体、缩小搜索区域，沿桥纵向移动匹配窗口并拟合尺度系数，实现多位置位移测量。Wang等[51]提出梯度投票匹配（GMV）方法，通过梯度特征与像素投票机制提高目标特征缺失条件下的匹配鲁棒性。另外，Wang等[52]进一步结合高效匹配裁剪（EMS）策略，通过提前终止低得分候选匹配及局部搜索降低计算开销，提高了实时测量效率。

DIC利用散斑或稳定纹理实现亚像素级局部或全场测量[53-57]，其性能受子区设置、面外运动和光照变化影响；局部观测不能直接外推为全桥位移。

KLT及光流方法适用于连续动态跟踪[58-61]，但在大位移、运动模糊、光照变化和遮挡条件下稳定性会下降。

深度学习辅助方法主要改善目标检测、跟踪、重检测、稠密光流或图像增强[18-21]，通常不能替代尺度标定、亚像素求解和物理量转换，其输出仍须由可追溯参考设备验证。这4项研究的证据层级不同。Pan等[18]在两层钢框架试验中训练YOLOv3-tiny并在KLT失效时重检标靶；Nguyen等[19]将ToMP跟踪预测与KLT互补融合，现场试验未报告独立参考RMSE。Cao等[21]在模型试验中将低分辨率KLT的RMSE由0.42 mm降至0.30 mm；Tan等[20]在32 m铁路桥现场相对LVDT得到0.037 mm的RMSE。上述结果对应特定距离、尺度、成像条件和参考设备，不能脱离工况横向比较。

视觉位移测量通常采用RMSE、MAE、重复性以及动态响应的峰值、幅值、主频和相位误差等指标评价测量结果[20-21]，并应以LVDT、激光位移计、位移台或其他独立参考设备进行验证。

图像相关系数、目标跟踪置信度和像素残差属于算法或输入质量指标，不能直接替代物理位移精度。验证时应记录标定时刻与参数版本。

模型是否需要现场再训练取决于任务与数据。Pan等[18]和Cao等[21]使用自建了场景数据，Nguyen等[19]和Tan等[20]部署了已训练模型；未在桥梁现场重新训练不等于模型未经训练。域偏移与跨场景泛化、计算量和错误重检测会影响长期部署，模型输出置信度也不能替代测量不确定度。预训练权重在通用目标上的跟踪能力不能直接证明其对远距离、小像素尺度桥梁目标的测量性能，部署前仍需按目标外观、成像距离和环境变化进行验证。

视觉位移测量的误差形成链包括图像采集、目标或特征跟踪、尺度与坐标转换三个环节。曝光不足、噪声、热浪、运动模糊和滚动快门效应会改变图像观测；误匹配与特征丢失会造成轨迹突变；镜头畸变、相机位姿扰动、相机自运动、尺度误差和面外运动则可把非结构运动传递到物理位移。稳定支架、背景参考点、定期尺度复核和异常轨迹筛选应作为系统组成，而非事后补充。

无标靶方案可利用自然纹理减少现场干预，多测点和多相机方案能够扩展空间覆盖，但纹理质量、相机间同步和坐标统一会增加处理复杂度。无人机或移动平台便于难接近区域的短时观测，但自身运动会引入伪位移。Zhang等[62]针对无标靶UAV视觉测量提出两阶段修正方法，利用稳定参考点与信号分解来降低该误差；稳定背景、自参考特征、多视几何和惯性信息也是移动平台运动补偿的重要依据。传统视觉方法与深度学习-传统视觉混合方法的适用条件和主要误差见表3[63-65]。

表3 视觉位移测量典型方法与主要误差

Tab. 3 Typical vision-based displacement measurement methods and major errors

方法类型	图像观测对象	主要输出	适用条件	主要误差	工程定位
模板匹配	标靶或稳定自然纹理	单点或多点位移轨迹	尺度变化较小，目标外观稳定	模板退化、遮挡、光照变化、相关峰误差	实现简单，适合常规标靶或局部目标监测
DIC	散斑或纹理子区	局部或全场位移、变形	纹理质量较好，成像条件稳定	子区尺寸、面外运动、光照变化、形函数设置	适合局部全场变形和多测点同步测量
特征点与稀疏光流跟踪	角点或局部特征点	稀疏多点动态轨迹	自然纹理明显，特征可持续识别	特征丢失、误匹配、尺度变化和累计漂移	适合自然纹理条件下的动态多点跟踪
稠密光流法	像素灰度或连续图像运动场	稠密像素运动场，可按ROI汇总为像素位移	帧间运动连续，亮度变化较小	运动模糊、亮度变化、大位移和遮挡	适合连续动态响应及局部运动场估计
深度学习-传统视觉混合方法	标靶、自然纹理或学习特征	目标轨迹、像素位移或增强后的图像特征；经尺度换算形成物理位移	背景复杂、目标外观或尺度变化、短时遮挡或传统特征稳定性不足	域偏移与跨场景泛化不足、跟踪漂移、错误重检测、标定与尺度误差	增强复杂环境下的目标定位与跟踪，通常仍与传统位移求解和尺度标定结合

近期视觉位移测量研究进一步由单纯提高图像匹配精度转向复杂现场条件下的系统误差控制。一方面，无标靶自然特征跟踪、深度学习辅助检测与跟踪以及图像超分辨率等方法被用于改善远距离、小尺度目标和复杂背景下的特征识别能力；另一方面，相机自身运动及移动平台引入的伪位移逐渐成为研究重点，通过稳定背景、自参考特征、多视几何或惯性信息实现相机运动补偿。同时，视觉测量研究开始由单一精度指标向测量不确定度分析发展，将观测距离、相机姿态、镜头畸变及环境变化等因素纳入误差传播过程，为桥梁视觉位移结果的可追溯评价提供了依据。

2.2.2 GNSS位移测量

GNSS获得测点三维坐标时序，其相对于基准时刻的坐标变化可转换至桥梁结构坐标系[25,28]

$$\Delta x_b = \boldsymbol{R}[x(t)-x(t_0)], \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{R}$为地理或工程坐标系至桥梁结构坐标系的转换矩阵，据此获得桥梁纵向、横向和竖向位移分量。应用时应明确天线安装方向和测点位置；RTK、PPP-RTK及高频GNSS的适用性仍取

决于视野、采样率和目标频段。

部分代表性研究利用GNSS时序分离了台风作用下的准静态与动态分量，或提取了长跨悬索桥的趋势与振动成分；另一些研究则探索了PPP-RTK、多模态识别以及位移-姿态联合确定等方法[25-29]。武汉二七长江大桥监测从融合时序中识别出了中塔的0.172 Hz主频；还有长跨悬索桥研究基于168 h数据来分析其趋势与动态成分。这些频率参数和分析时长均对应特定的桥梁、测点及工况。需要指出的是，用于监测的定位时序本身同时包含结构真实运动、环境缓变和观测误差，因此在解释频率或趋势时，必须结合温度、风和交通等环境与运营工况。

多路径、卫星遮挡、大气误差、天线安装和定位噪声是影响GNSS定位精度的主要限制。反射面和钢构件会使多路径随卫星几何周期变化，局部遮挡还会降低可用卫星数并改变解算质量。小幅高频响应接近噪声水平时，滤波可能同时削弱真实低频成分；早期GPS桥梁监测研究亦表明，趋势和周期分量需结合观测环境分析[30]。因此，GNSS的采样率、坐标重复性和噪声水平应与目标频段、位移幅值及监测时长共同评价。

2.2.3　地基雷达、激光扫描与InSAR观测

地基干涉雷达以相位变化获得视线向（Line-of-Sight，LOS）位移，其基本关系为[31-32]

$$\Delta d_{\mathrm{LOS}}=\frac{\lambda\Delta\varphi}{4\pi},\tag{4}$$

式中：λ为雷达波长；$\Delta\varphi$为相位变化；Δd_{LOS}为视线向位移。雷达直接输出LOS分量，只有观测几何和结构实际运动方向明确时，才可转换为竖向或其他结构方向位移。GBIR适于远距离动态观测，GB-SAR通过空间扫描扩展观测覆盖范围。刘德煜[31]与黄声享等[32]分别开展了微波干涉测量与GPS的桥梁动态位移对比研究，分析了不同测量方法的适用性。Liu等[33]进一步融合地基干涉雷达与惯性视觉测量数据，通过时空对齐及加权融合来实现桥梁多方向动态变形监测。

激光多普勒测量可在明确视线和反射条件下获得局部动态响应[34]。地面激光扫描（Terrestrial Laser Scanning，TLS）是地面平台激光雷达的典型应用，通过点云配准和曲面拟合复测空间几何与线形。铁路桥试验表明，点云噪声、点密度、测站重复性和多时相配准是主要误差来源[35]。

InSAR利用多时相卫星影像获取稳定散射点的视线向时序形变，适合桥梁周边沉降、基础环境和长期位移变化分析[7-8,36]，其重访周期、散射相干性与大气改正条件决定其不能替代桥梁本体高频传感器；地基雷达与InSAR的视线向结果只有在运动方向和观测几何明确时才能转换为竖向或空间位移；TLS则侧重多时相几何复测。三者不宜用含义宽泛的“激光或雷达测量”概括。

从观测尺度看，GBIR更接近单视线的高时间分辨率动态测量，GB-SAR和TLS通过扫描换取空间信息，InSAR则以重访周期换取区域和历史时序覆盖。工程应用应依据目标响应速度、测点范围和可接受观测周期选择技术，并利用棱镜、水准点、GNSS或其他地面观测核查视线分量、点云配准和长期趋势。

2.3　间接位移重构

应变反演位移先由上下缘应变求解曲率，再结合边界条件进行空间积分[22-24]

$$\kappa(x)=\frac{\varepsilon_{t(x)}-\varepsilon_{b(x)}}{h},\ \frac{\mathrm{d}^2w(x)}{\mathrm{d}x^2}=\kappa(x),\tag{5}$$

式中：ε_{t}、ε_{b}为截面上下缘应变；h为两测点间距；κ为曲率；w为位移。重构结果依赖截面参数，并受温度应变、测点布置和边界条件影响。稀疏测点条件下，插值结果不能等同于直接观测。

加速度重构可在频域表示为[38,40]

$$D(\omega)=-\frac{A(\omega)}{\omega^2},\tag{6}$$

式中：$A(\omega)$和$D(\omega)$分别为加速度与位移的频域表示。除以ω^2会显著放大低频零偏和噪声，因此加速度适合恢复中高频动态位移，难以单独获得可靠的静态和长期位移；滤波截止频率、积分窗口及初始条件需由独立位移观测共同验证[37-40]。

倾角与位移曲线的关系为[41-42]

$$\theta(x)=\frac{\mathrm{d}w(x)}{\mathrm{d}x},\ w(x)=\int\theta(x)\mathrm{d}x+C。\tag{7}$$

倾角位移重构通过转角场的空间积分获得位移，并利用支点位移等边界条件确定积分常数C。传感器零偏可在积分中累积，测点布置和安装姿态也会影响结果[41]。倾角与应变联合估计可提高连续桥梁位移重构的稳定性[42]。

总体而言，应变位移重构依赖曲率关系、结构参数和空间积分；加速度位移重构依赖时间积分、初始条件和频段处理；倾角位移重构依赖转角场、测点布置和位移边界条件。相关研究应明确原始观测量、模型假设、可恢复频段及独立校核方式，并在结构状态或处理参数变化后重新验证重构关系。

2.4 多源异构融合位移测量

2.4.1 位移与加速度融合

该技术利用GNSS或视觉位移提供中低频位移信息和绝对基准约束，并由加速度补充高采样率动态响应。多速率Kalman滤波、互补滤波及分解融合等方法，通过状态估计或频段重组策略抑制积分误差。基于GPS/RTK-GPS-加速度融合的研究已在亨伯桥和永宗大桥完成现场验证，多速率滤波亦形成了通用估计框架[11-12,43]；后续工作进一步扩展到GNSS多路径处理和长跨桥位移-转角监测[44-45]。

视觉-加速度融合适合需要多测点局部位移和较高动态采样率的场景，相关研究采用多尺度滤波、加速度辅助视觉和自适应多速率Kalman滤波[46,66-67]。其中，部分验证对象为一般结构，不能视作桥梁现场结论；4层钢筋混凝土结构的变分模态分解融合也仅提供方法参考[68]。与GNSS组合相比，视觉组合更依赖尺度标定、共同测点和相机稳定，而GNSS组合更依赖天线环境与坐标基准。

融合算法的选择取决于噪声特性和采样关系。状态空间方法便于显式描述位移、速度和加速度关系，互补滤波适合频带边界明确的实时处理，分解融合可在非平稳信号中重组不同尺度成分，但分解参数会影响结果。现场验证应使用独立位移观测，分别报告低频趋势、峰值、相位或频谱误差，不能只以融合曲线更平滑作为有效性依据。

2.4.2 多源异构数据融合策略

多源异构融合首先完成时间同步、测点对应、坐标与尺度统一，再依据不同传感器的噪声特性采用Kalman滤波、互补滤波或频段重组等方法进行联合估计[43,67,69-70]。其可靠性主要取决于前端数据质量、同步误差、噪声模型及异常观测处理，而非不同传感器时程的简单叠加。

融合结果应通过独立位移参考校核，并说明不确定度传播路径。

在进行质量评价时，应区分原始观测状态、算法拟合程度和最终位移不确定度。图像相关系数、目标跟踪置信度、GNSS解状态、雷达相干性和点云配准残差可作为输入质量指标，但不能直接互换或简单合成为统一精度。融合模型需说明噪声协方差、权重更新和失效观测剔除规则，并检查异常处理是否改变真实峰值和相位。

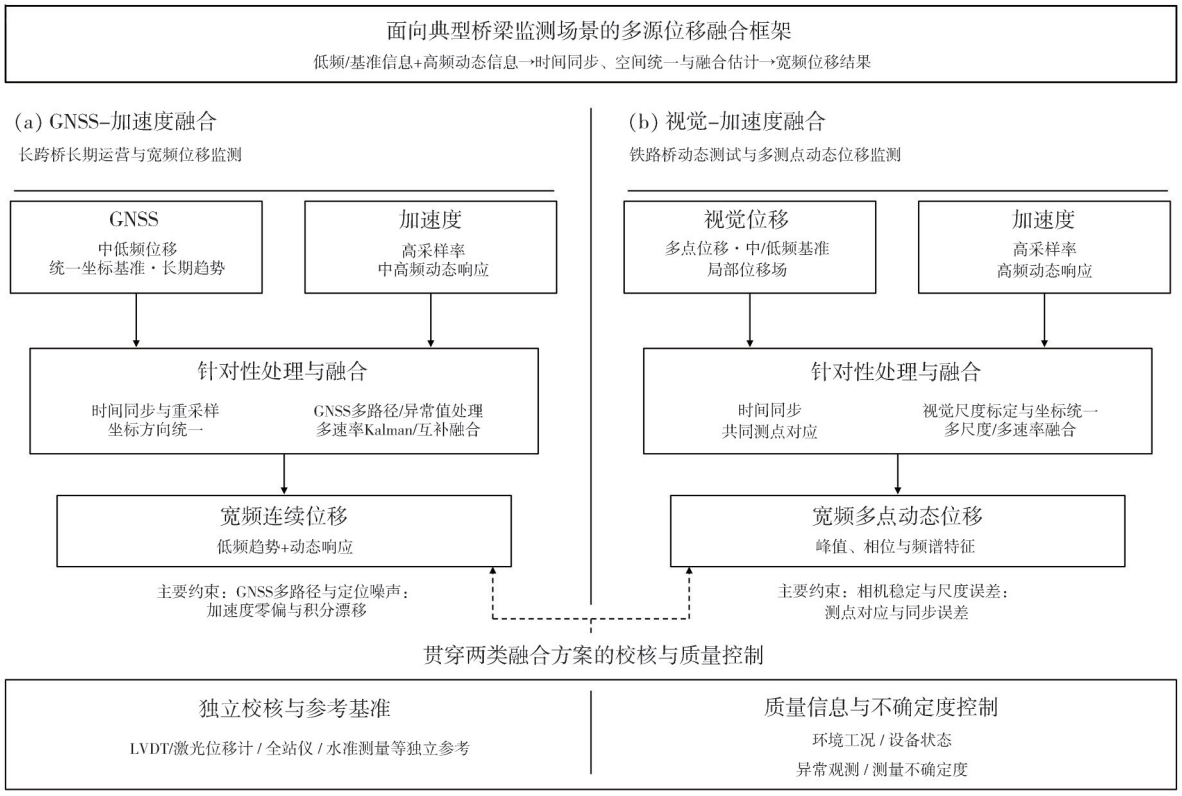


图3 面向典型桥梁监测场景的多源位移融合框架

Fig. 3 Multi-source displacement fusion framework for typical bridge monitoring scenarios

图3以GNSS-加速度和视觉-加速度两类典型组合为例，展示不同桥梁监测场景下的信息互补、针对性融合及独立校核与质量控制要求。

传感器更换、设备重启、坐标更新和数据缺测

会改变长期时序的一致性，因而标定参数、同步状态、坐标版本和数据筛选记录应与结果共同保存，且融合结果的连续性不能掩盖单源观测失效。

3　工程适用性与发展趋势

3.1　工程选型与关键误差

测量任务首先决定方向、频段、基准和空间覆盖。荷载试验重视静态位移与可追溯校核，铁路桥动态测试重视采样率和相位，长跨桥运营监测重视三维坐标时序与连续性，跨水跨线场景强调远距离观测几何，沉降和线形复测则要求跨时相基准延续。选型还需判断目标幅值是否高于现场噪声、测点能否代表关键结构位置以及观测周期是否覆盖荷载过程。上述需求在频段、基准、空间覆盖和观测周期上各有侧重且往往相互制约，因此不存在同时覆盖全部任务的单一技术。

复杂环境与长期运行会使实际测量性能偏离标称值：视觉位移测量受光照、雨雾、热浪、遮挡和运动模糊影响，GNSS受多路径与遮挡影响，雷达和InSAR受相干性与大气条件影响，TLS受点云质量和配准影响，接触式装置还需维持支架、连通条件和防护。误差随天气、季节和设备状态变化时，单次标定不足以代表整个监测周期。

时间偏差会引入动态响应的幅值与相位误差，坐标和测点不一致会使不同方向的时程失去可比性，前端标定误差则会沿重构或融合链传播。对不同采样率数据，应记录时钟来源、重采样方式和滤波相位特性；对跨时相结果，应记录坐标转换参数及其版本。方案设计还应给出观测方向、传感器位置、尺度关系，并通过稳定控制点、重复观测或独立传感器建立核查路径。

工程报告除位移曲线外，还应说明数据筛选、异常处理、主要误差来源和适用频段，并附有设备状态日志与维护记录。像素定位、GNSS定位、雷达相位、点云配准或模型残差等算法指标需转换到目标物理量后再评价，置信区间也应对应明确的随机模型或重复试验。原始数据、处理参数、中间结果和质量标签共同构成可追溯链，不能只保存最终平滑曲线。表 4 按典型桥梁任务给出可选方法与组合校核关系。选型应先保证关键响应有明确观测来源，再依据现场可达性、运行周期和数据用途增加互补观测。荷载试验可侧重局部基准，长期监测则更重视基准延续、设备状态和缺测处理。推荐组合不是固定配置，传感器数量增加也不能替代基准核查和误差控制。

表 4　不同位移响应类型与工程任务下的测量方法选型

Tab. 4　Method selection for different displacement response types and engineering tasks

响应类型/工程任务	典型工程场景	核心测量要求	主测/可选方法	补充与校核方式	主要选型约束
静态位移测量	桥梁静载试验、支座或局部构件位移	稳定基准、较高测量精度、加载前后可复核	LVDT、拉线位移计、全站仪、水准仪、视觉位移测量等	接触式位移计与视觉/全站仪交叉验证；必要时重复测量或复核稳定基准	参考点、支架稳定、加载工况
准静态与低频位移测量	温度、车流队列、缓变荷载引起的位移	低频稳定性、较长连续观测、基准保持	静力水准、GNSS、视觉位移测量等	倾角/应变重构补充低频信息；以水准、全站仪或直接位移测量周期校核	零漂、温度、低频滤波、基准连续性
动态位移测量	车辆、列车、风致振动及动力荷载试验	较高采样率、幅值与相位保真、多测点同步	高速视觉、GBIR、高频GNSS等	加速度补充高频响应并与视觉/雷达融合；必要时用独立位移传感器校核峰值、相位及频谱	采样率、同步、运动模糊、观测方向
长期位移与线形变化	桥梁运营监测、基础沉降、长期线形演化	跨时相统一基准、长期稳定性、连续性	GNSS、静力水准、InSAR、TLS、水准测量等	GNSS/InSAR与地面水准、全站仪或TLS周期复测结合，校核跨时相基准与趋势	重访周期、环境变化、基准延续、设备维护

具体选型应由监测任务驱动：先明确目标响应的物理量与方向、参考基准、频段和空间覆盖，再核查环境条件、现场实施及维护要求。主测方法负责形成主要位移结果；补充观测用于扩展频段、空间或信息覆盖；独立校核用于验证基准和结果可靠性。同一技术的角色随目标位移幅值、监测时长和现场条件变化，不设置固定技术等级。

除测量精度外，桥梁位移测量技术的工程适用性还受到观测范围、时间与空间分辨率、现场布设及长期维护等因素影响。不同技术路径在测量能力、部署条件和工程成本方面存在明显差异：接触式方法局部测量精度较高，但测点增加会同步增加传感器、支架及布线需求；非接触方法可扩大观测距离和空间覆盖范围，但对观测环境、设备性能及数据处理提出更高要求。表 5 从技术特征、部署维护和工程经济性等方面，对主

要桥梁位移测量技术路径进行了比较。

代表性工程应用进一步体现了不同技术路径的适用边界。视觉位移测量已用于32 m铁路桥现场动态测试，Tan等以LVDT为参考获得0.037 mm的RMSE；GNSS已用于武汉二七长江大桥等长跨桥连续监测，并从监测时序中识别出结构动态响应；在多源融合方面，GPS/RTK-GPS与加速度联合测量已在亨伯桥和永宗大桥开展了现场验证[11-12,20,25-29,43]。

此外，TLS适用于桥梁几何与线形复测，InSAR则已用于高速铁路桥及桥梁周边长期形变监测[8,35-36]。

表5 桥梁位移测量主要技术路径的技术经济性比较

Tab. 5 Technical and economic comparison of major bridge displacement measurement approaches

方法	设备投入	现场布设复杂度	长期维护需求	数据处理复杂度	多测点扩展能力	典型适用场景
LVDT/拉线/静力水准	低～中	中～高	中～高	低	低～中	荷载试验、局部位移
全站仪/水准测量	中	中	中	低～中	低	静态复测、基准校核
视觉位移测量	低～中	低～中	中	中～高	高	多点动态、难接近测点
GNSS	中～高	中	中	中	中～高	长跨桥、长期三维位移
地基雷达	高	低～中	中	中～高	中～高	远距离动态监测
TLS/InSAR	中～高	低～中	低～中	高	高	空间几何/长期形变
应变/加速度/倾角重构	中	中	中	高	中	直接位移难布设场景
多源融合	高	高	高	高	高	宽频、长期综合监测

3.2 发展趋势

未来桥梁位移测量可沿“单源观测可靠性提升—多源数据时空与质量统一—长期自主监测”逐步推进。近期应完善复杂环境下的误差建模、现场复核与在线校准，并提高数据驱动方法的跨场景泛化能力；中期应重点解决多源数据的时间同步、坐标统一、质量评价和异常观测处理；长期则需实现观测数据、标定参数、设备状态与不确定度信息的协同管理，形成可持续维护和结果可追溯的长期监测体系。

4 结 论

本文以位移信息形成方式为主线，对桥梁位移测量的主要技术路径及工程适用性进行了比较，主要结论如下：

1）不同技术的主要差异不仅体现在测量精度，还体现在输出物理量、参考基准、响应频段和空间覆盖等方面。工程选型应首先明确目标位移方向、幅值、频段及参考条件，再综合考虑现场噪声、部署条件和长期维护需求，不宜以单一标称精度作为方法选择依据。

2）直接与非接触观测适用于不同基准、距离和空间覆盖需求，间接重构则通过结构关系或频段约束补充难以直接获取的位移信息。各类结果均存在明确的适用边界，算法精度或局部观测结果不能直接等同于最终工程位移精度，仍需结合观测几何、边界条件和独立参考进行解释与校核。

3）多源异构融合的核心并非简单增加传感器，而是利用了不同观测在基准、采样率和频段上的互补性，并保证时间同步、坐标统一、数据质量和误差传播过程可控。后续研究应重点关注复杂环境下的在线校准、多源观测不确定度统一表达及长期监测结果的质量追溯。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献：

[1] Lee J, Jeong S, Kim H, et al. Comparative study of long-term displacement measurement methods - Focusing on a Pre-stressed concrete bridge under construction[J]. Measurement, 2022, 201: 111691.

[2] Cosser E, Roberts G W, Meng X, et al. Measuring the dynamic deformation of bridges using a total station[C]// Proceedings of the 11th International FIG Symposium on Deformation Measurements, 2003: 25-28.

[3] 文雪中. 大型桥梁挠度监测的方法比较及实践[J]. 测绘地理信息, 2016, 41(5): 70-73.
Wen Xuezhong. Comparison and practice of deflection monitoring methods in the long-span bridge[J]. Journal of Geomatics, 2016, 41(5): 70-73. (in Chinese)

[4] Luo K, Kong X, Zhang J, et al. Computer vision-based bridge inspection and monitoring: a review[J]. Sensors, 2023, 23(18): 7863.

[5] Xu Y, Brownjohn J M W. Review of machine-vision based methodologies for displacement measurement in civil structures[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2018, 8(1): 91-110.

[6] Huang J, Shao X, Yang F, et al. Measurement method

and recent progress of vision-based deflection measurement of bridges: a technical review[J]. Optical Engineering, 2022, 61(7): 1-26.

[7] Vorwagner A, Kwapisz M, Leopold P, et al. Verformungsmonitoring von Brücken mittels berührungsloser satellitenradarmessungen[J]. Beton- und Stahlbetonbau, 2024, 119(9): 636-647.

[8] Kim W, Lee C, Kim B K, et al. Leveraging multi-temporal InSAR technique for long-term structural behaviour monitoring of high-speed railway bridges[J]. Remote Sensing, 2024, 16(17): 3153.

[9] Chen Y W, Huang Q H, Zhang T B, et al. Measurement refinements of ground-based radar interferometry in bridge load test monitoring: comprehensive analysis on a multi-span cable-stayed bridge[J]. Remote Sensing, 2024, 16(11): 1882.

[10] Wu T, Tang L, Lang L, et al. Data fusion techniques for structural displacement monitoring: From concept to application A review[J]. Measurement, 2026, 273: 121153.

[11] Xu Y, Brownjohn J M W, Hester D, et al. Long-span bridges: Enhanced data fusion of GPS displacement and deck accelerations[J]. Engineering Structures, 2017, 147: 639-651.

[12] Kim K, Choi J, Chung J, et al. Structural displacement estimation through multi-rate fusion of accelerometer and RTK-GPS displacement and velocity measurements[J]. Measurement, 2018, 130: 223-235.

[13] Olaszek P. Investigation of the dynamic characteristic of bridge structures using a computer vision method[J]. Measurement, 1999, 25(3): 227-236.

[14] Jáuregui D V, White K R, Woodward C B, et al. Noncontact photogrammetric measurement of vertical bridge deflection[J]. Journal of Bridge Engineering, 2003, 8(4): 212-222.

[15] Lee J J, Shinozuka M. A vision-based system for remote sensing of bridge displacement[J]. NDT & E International, 2006, 39(5): 425-431.

[16] Ye X W, Ni Y Q, Wai T T, et al. A vision-based system for dynamic displacement measurement of long-span bridges: algorithm and verification[J]. Smart Structures and Systems, 2013, 12(3/4): 363-379.

[17] Ribeiro D, Calçada R, Ferreira J, et al. Non-contact measurement of the dynamic displacement of railway bridges using an advanced video-based system[J]. Engineering Structures, 2014, 75: 164-180.

[18] Pan X, Yang T Y, Xiao Y F, et al. Vision-based real-time structural vibration measurement through deep-learning-based detection and tracking methods[J]. Engineering Structures, 2023, 281: 115676.

[19] Nguyen X T, Jeon G, Vy V, et al. A hybrid approach for vision-based structural displacement measurement using transforming model prediction and KLT[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 223: 111866.

[20] Tan S, Zhu L, Li J H, et al. Non-contact vibration displacement measurement method for railway bridges based on computer vision[J]. Structures, 2025, 80: 109803.

[21] Cao M Y, Ye X J, Zheng W Z, et al. Accuracy enhancement for vision-based displacement measurement by deep learning-based image super-resolution[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2026, 177: 114847.

[22] 邹家盛, 田磊, 田石柱. 基于FBG位移传感器的中小型桥梁挠度测量研究[J/OL]. 激光与光电子学进展, 2026-03-06. https://link.cnki.net/urlid/31.1690.TN.20260305.2042.099.

[23] You R Z, Yi T H, Ren L, et al. Equivalent estimation method (EEM) for quasi-distributed bridge-deflection measurement using only strain data[J]. Measurement, 2023, 221: 113492.

[24] Zhang Q Q, Li R X, Yuan H J. Novel measurement method for full-field bridge strain and displacement with limited long-gauge strain sensors[J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(2): 025002.

[25] Han H Z, Wang J, Meng X L, et al. Analysis of the dynamic response of a long span bridge using GPS/accelerometer/anemometer under typhoon loading[J]. Engineering Structures, 2016, 122: 238-250.

[26] Luo L F, Shan D S, Zhang E H. Component extraction method for GNSS displacement signals of long-span bridges[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2023, 13(2): 591-603.

[27] He L Y, Chen H, Chen Q S, et al. Displacement monitoring and multimodal frequency identification of long-span bridges utilizing PPP-RTK[J]. Measurement Science and Technology, 2025, 36(5): 056309.

[28] An X D, Meng X L, Hu L L, et al. GNSS integrated displacement and attitude determination for structural health monitoring of long-span bridges[J]. Satellite Navigation, 2025, 6(1): 19.

[29] Niu Y B, Xiong C B, Li Z. GNSS-RTK data denoising and displacement-based blind modal analysis of a long-span bridge[J]. GPS Solutions, 2024, 29(1): 43.

[30] Kaloop M R, Hussan M, Kim D. Time-series analysis of GPS measurements for long-span bridge movements

using wavelet and model prediction techniques [J]. Advances in Space Research, 2019, 63(11): 3505-3521.
[31] 刘德煜. GPS与微波干涉测量在桥梁动挠度测量中的对比分析[J]. 桥梁建设, 2009, 39(3): 81-84.
Liu Deyu. Comparative analysis of GPS measurement and microwave interference measurement applied to measurement of bridge dynamic deflection[J]. Bridge Construction, 2009, 39(3): 81-84. (in Chinese)
[32] 黄声享, 罗力, 何超. 地面微波干涉雷达与GPS测定桥梁挠度的对比试验分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(10): 1173-1176.
Huang Shengxiang, Luo Li, He Chao. Comparative test analysis for determining bridge deflection by using ground-based SAR and GPS[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(10): 1173-1176. (in Chinese)
[33] Liu Y H, Wu S B, Zhang B C, et al. Multi-dimensional dynamic deformation monitoring of long-span railway bridges using GBIR and IVM data fusion[J]. Geo-spatial Information Science, 2025, 28(6): 3057-3073.
[34] 董振升. 激光多普勒远程测试仪在高速铁路桥梁挠度测试中的应用[J]. 铁道建筑, 2016, 56(7): 42-44.
Dong Zhensheng. Application of remote laser Doppler tester in measuring high speed railway bridge deflection [J]. Railway Engineering, 2016, 56(7): 42-44. (in Chinese)
[35] Zhou Y, Zhu J Y, Zhao L D, et al. High-precision monitoring method for bridge deformation measurement and error analysis based on terrestrial laser scanning[J]. Remote Sensing, 2024, 16(13): 2263.
[36] Selvakumaran S, Rossi C, Marinoni A, et al. Combined InSAR and terrestrial structural monitoring of bridges[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(10): 7141-7153.
[37] Gindy M, Nassif H H, Velde J. Bridge displacement estimates from measured acceleration records [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2007, 2028(1): 136-145.
[38] Zheng W H, Dan D H, Cheng W, et al. Real-time dynamic displacement monitoring with double integration of acceleration based on recursive least squares method [J]. Measurement, 2019, 141: 460-471.
[39] Jin Z B, Xia H D, Ni W B, et al. Reference point-free measurement of bridge dynamic deflection by fusing hydraulic leveling and accelerometer signals[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2023, 2023: 3203261.
[40] Morichika S, Sekiya H, Zhu Y, et al. Estimation of displacement response in steel plate girder bridge using a single MEMS accelerometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(6): 8204-8208. [LinkOut]
[41] Li S L, Wang X, Liu H Z, et al. Dynamic deflection monitoring of high-speed railway bridges with the optimal inclinometer sensor placement[J]. Smart Structures and Systems, 2020, 26(5): 591-603.
[42] Sun L M, Li Y X, Zhang W. Experimental study on continuous bridge-deflection estimation through inclination and strain[J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(5): 04020020.
[43] Smyth A, Wu M L. Multi-rate Kalman filtering for the data fusion of displacement and acceleration response measurements in dynamic system monitoring [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(2): 706-723.
[44] Shen N, Chen L, Chen R Z. Multi-route fusion method of GNSS and accelerometer for structural health monitoring[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2023, 32: 100442.
[45] Qu X Y, Ding X L, Xu Y L. Simultaneous monitoring of displacement and rotation of a long-span bridge based on innovative integration of GNSS and accelerometer measurements[J]. Engineering Structures, 2025, 338: 120518.
[46] 吴桐, 周志祥, 唐亮. 加速度与计算机视觉多尺度滤波融合的桥梁位移响应监测方法[J]. 土木工程学报, 2025, 58(4): 58-74.
Wu Tong, Zhou Zhixiang, Tang Liang. Bridge displacement monitoring approach using multi-scale filtering fusion of acceleration and computer vision[J]. China Civil Engineering Journal, 2025, 58(4): 58-74. (in Chinese)
[47] Wen H F, Dong P Z, Dong R K. The uncertainty analysis of bridge displacement in computer vision[J]. Measurement, 2023, 221: 113559.
[48] JCGM 100: 2008 (E) Evaluation of measurement data: Guide to the expression of uncertainty in measurement[S].
[49] Pan B, Tian L, Song X L. Real-time, non-contact and targetless measurement of vertical deflection of bridges using off-axis digital image correlation[J]. NDT & E International, 2016, 79: 73-80.
[50] Wu T, Zhu S Q, Yuan Q, et al. A moving window template matching method for vision-based full-field displacement measurement of bridges by tracking natural features[J]. Structures, 2026, 90: 112407.
[51] Wang M M, Ao W K, Bownjohn J, et al. A novel gradient-based matching via voting technique for vision-

based structural displacement measurement [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 171: 108951.

[52] Wang M M, Xu F Y, Koo K Y, et al. Real-time displacement measurement for long-span bridges using a compact vision-based system with speed-optimized template matching [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2024, 39 (13): 1988-2009.

[53] Tijani I A, Wakjira T G, Alam M S, et al. Digital image correlation (DIC) for structural health monitoring of bridge systems: a state-of-the-art review with future research directions [J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2026, 33(3): 4325-4341.

[54] Acikgoz S, DeJong M J, Soga K. Sensing dynamic displacements in masonry rail bridges using 2D digital image correlation [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(8): e2187.

[55] Ri S, Wang Q, Tsuda H, et al. Deflection measurement of bridge using images captured under the bridge by sampling moiré method[J]. Experimental Techniques, 2023, 47(5): 1085-1095.

[56] 陈潋文, 严盛龙, 王磊, 等. 基于DICM的桥梁变形非接触测量方法[J]. 软件导刊, 2018, 17(10): 169-173.
Chen Lianwen, Yan Shenglong, Wang Lei, et al. The non-contact measurement mehtod of bridge deformation based on digital image correlation method[J]. Software Guide, 2018, 17(10): 169-173. (in Chinese)

[57] 杜文康, 雷冬, 白鹏翔, 等. 基于TM-DIC方法的桥梁动态响应测量[J]. 计算机仿真, 2024, 41(8): 175-181.
Du Wenkang, Lei Dong, Bai Pengxiang, et al. Dynamic response measurement of bridge based on TM-DIC method[J]. Computer Simulation, 2024, 41(8): 175-181. (in Chinese)

[58] Zhu J S, Lu Z Y, Zhang C. A marker-free method for structural dynamic displacement measurement based on optical flow[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2022, 18(1): 84-96.

[59] Chen S H, Luo Y P, Liao F Y. Computer vision-based displacement measurement using spatio-temporal context and optical flow considering illumination variation[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2024, 14 (8): 1765-1783.

[60] Guo J, Zhu C A. Dynamic displacement measurement of large-scale structures based on the Lucas - Kanade template tracking algorithm[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 66/67: 425-436.

[61] Weng Y, Quek S T, Ker-Wei Yeoh J. Robust vision-based sub-pixel level displacement measurement using a complementary strategy[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 223: 111898.

[62] Zhang C, Lu Z Y, Li X T, et al. A two-stage correction method for UAV movement-induced errors in non-target computer vision-based displacement measurement[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 224: 112131.

[63] 叶肖伟, 张小明, 倪一清, 等. 基于机器视觉技术的桥梁挠度测试方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48 (5): 813-819.
Ye Xiaowei, Zhang Xiaoming, Ni Yiqing, et al. Bridge deflection measurement method based on machine vision technology [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(5): 813-819. (in Chinese)

[64] 黎强. 基于机器视觉技术的桥梁位移监测系统研发及应用[J]. 铁道工务, 2025, 3(2): 36-39.

[65] 董晨阳, 田永丁, 向晖, 等. 基于计算机视觉的结构多测点位移与振动特性非接触测量方法[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(21): 9104-9110.
Dong Chenyang, Tian Yongding, Xiang Hui, et al. Noncontact measurement of multipoint displacement and vibration properties of structure with computer vision technology[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(21): 9104-9110. (in Chinese)

[66] Niu Y B, Li Z, Li J B, et al. Accelerometer-assisted computer vision data fusion framework for structural dynamic displacement reconstruction[J]. Measurement, 2025, 242: 116021.

[67] Ma Z X, Choi J, Liu P P, et al. Structural displacement estimation by fusing vision camera and accelerometer using hybrid computer vision algorithm and adaptive multi-rate Kalman filter[J]. Automation in Construction, 2022, 140: 104338.

[68] Jin Z F, Chen G Y, Niu Y B, et al. Variational mode decomposition-based multirate data-fusion framework for estimating structural dynamic displacement by integrating vision- and acceleration-based measurements [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024, 211: 111252.

[69] Hai L, Wang B R, Zhang T T, et al. Multi-modal sensing data fusion for bridge displacement estimation: a review [J]. Intelligent Transportation Infrastructure, 2025, 4: liaf023.

[70] 余加勇, 黄河滨, 戴吾蛟, 等. 基于自适应多速率卡尔曼滤波的桥梁振动位移抗差估计与数据融合[J/OL]. 中国公路学报, 2026-05-08. https://link.cnki.net/urlid/61.1313.u.20260508.0942.002.