

现代道桥工程中测量技术的应用与挑战分析

张帆

无锡城市职业技术学院，建筑与环境工程学院，江苏无锡，中国

【摘要】现代道桥工程的高质量建设与安全运维高度依赖精准高效的测量技术。本文系统分析了全球导航卫星系统（GNSS）、无人机航测、三维激光扫描及自动化监测等现代测量技术在道桥工程全生命周期中的关键应用。在勘察设计阶段，无人机航测与GNSS技术显著提升地形测绘与线路规划效率；施工阶段，GNSS实时定位与三维激光扫描技术为路基路面施工、桥梁构件安装提供毫米级精度保障；运维阶段，自动化监测网络实现对结构健康与灾害风险的实时预警。然而，技术应用仍面临复杂环境干扰下的精度衰减、多源异构数据融合困难、高端设备成本高昂、复合型人才短缺及标准规范滞后等严峻挑战。为应对挑战，需推动多技术融合创新、加快标准体系建设、深化BIM/GIS集成应用，并加强跨学科人才培养。

【关键词】道桥工程；工程测量；GNSS；无人机航测；三维激光扫描；应用分析；技术挑战

1. 引言

随着我国经济的发展，交通运输行业的发展也得到了较大程度的提升，道桥工程作为国家基础设施建设的骨干网络，其建设质量与服役安全直接关系到经济社会发展和公共安全。测量技术贯穿于工程勘察、设计、施工、运维全生命周期，是保障工程精度、控制施工误差、实施安全监测的核心手段。由于国内桥梁建设多处于跨度大、地貌多样、地形复杂的施工环境，传统的道桥施工测量技术已无法满足实际施工的要求。随着全球导航卫星系统（GNSS）、无人机遥感、三维激光扫描、自动化传感器网络等现代测量技术的迅猛发展，传统人工测量模式正经历革命性变革，为道桥工程的高效化、智能化、数字化管控提供了强大支撑[1-3]。当前，现代测量技术已在复杂地形测绘、精密施工放样、大型结构安装监控、长期健康监测等场景展现出显著优势。例如，GNSS实时动态定位（RTK）技术极大提升了道路中线放样与桥梁桩基定位的效率，除了具备能够实现覆盖范围广、定位精准度高、测量定位时间少、随时随地实现测量定位、导航优势，还可实现道桥施工方案的修正，有效节约道桥施工成本，提升施工效率[4-5]；无人机航测实现了大范围地形信息的快速获取与土方量精准核算[6]；三维激光扫描技术为异形桥梁结构的竣工检测与逆向建模提供了毫米级精度保障[7-8]；自动化监测系统则实现了对特

大桥梁变形、边坡稳定的全天候预警[9]。这些技术的深度应用，显著提升了工程质量、缩短了工期并降低了安全风险。然而，技术的快速迭代与工程实践的复杂性，也暴露出诸多亟待解决的挑战：在技术层面，复杂环境（如城市峡谷、跨海区域）下的信号干扰、多源异构海量数据的融合处理、高端设备的稳定性与成本制约等问题日益凸显；在应用层面，测量与BIM/CIM平台的集成壁垒、复合型技术人才短缺、相关标准规范更新滞后等瓶颈，限制了技术潜力的充分发挥[10]。系统梳理现代测量技术的应用成效，深入剖析其面临的现实挑战，对推动技术创新、优化工程实践具有重要现实意义。

本文旨在聚焦道桥工程领域，系统归纳GNSS、无人机航测、三维激光扫描及自动化监测等核心现代测量技术的关键应用场景与价值；重点剖析当前应用中存在的技术精度、数据处理、成本控制、标准协同等核心挑战；并针对性提出技术融合创新、标准体系完善、人才培养强化等对策。研究成果可为工程技术人员选型应用提供参考，为行业破解技术瓶颈、迈向“智慧测量”提供思路。

2. 道桥工程测量的特点与要求

道路与桥梁工程是交通基础设施建设的核心组成部分，其测量工作不仅贯穿于规划设计、施工建设和运行维护的全过程，更是保障工程安全性与质量控制的关键环节。道路桥梁建设工程一般施工难度系数大、技术

要求高、施工环境复杂。随着工程建设向高质量发展转型，测量工作所承担的职能不再局限于传统的几何位置获取，其技术体系、数据处理方式及服务模式正发生深刻变革。尤其在数字化施工与智能建造的语境下，道桥工程对测量提出了更为严苛而系统的技术要求。

2.1 线状工程（道路）测量的特点

道路工程具有典型的线性与带状分布特征，测区范围广，地形变化频繁，对测量的连续性与阶段性精度控制提出较高要求。不同施工阶段对精度的要求存在差异，初期选线侧重宏观控制，施工放样则需实现厘米级甚至毫米级精度。此外，道路施工呈线性推进，要求测量工作具备快速响应和高效布设能力，以适应动态施工节奏。

2.2 点状/结构工程（桥梁）测量的特点

桥梁工程构造复杂、空间几何关系严密，对测量精度要求极高。施工阶段需精确控制索塔、主梁等关键构件的位置与姿态，往往需实现毫米级精度。同时，桥梁测量多涉及三维空间控制，需利用高精度仪器和空间解算算法完成测设。此外，现代桥梁运营期内需开展动态监测，包括挠度、变形和振动等，测量已由静态定位扩展为全生命周期结构感知。表 1 详细介绍了桥梁工程测量的多维特征与技术需求。

表 1.桥梁工程测量的多维特征与技术需求对照表

特征维度	技术需求	典型技术手段
空间精密性	毫米级结构定位	测量机器人(0.5" 测角精度)
隐蔽可测性	水下/内部缺陷探测	多波束声呐+探地雷达
时间延续性	全寿命周期监测	光纤传感器网络
动态耦合性	荷载-环境-结构响应解耦	加速度计+风速仪同步采集

2.3 现代道桥工程对测量的新要求

社会科学技术在社会发展的带动下得到了全面的提升，从而促进了传统测量技术朝着数字化测量的方向迈进，为测量数据的规范化、标准化、准确化的发展创造了良好的基础。现代道桥工程对测量提出四方面的新要求：其一，精度持续提升，尤其在结构控制与形变监测中对误差控制极为严格；其二，效率成为关键，测量需快速部署、实时反馈，适应高速施工节奏；其三，测量系统必须具备实时监测与动态预警能力，用于高风险结

构的施工与运营保障；其四，信息化趋势增强，测量数据需与 BIM、CIM 等平台融合，实现数据共享与智能协同。测量工作已从传统技术操作转向综合性工程信息服务体系，成为现代道桥建设不可或缺的核心环节[11]。

3.核心现代测量技术及其在道桥工程中的应用

3.1 GNSS 技术

GNSS 的广泛应用无疑是现代工程测量的一个重要里程碑。GNSS 通过全球范围内的卫星网络，为地面用户提供实时、高精度的位置、速度和时间信息。在工程测量中，GNSS 广泛用于大地测量、形变监测和施工导航。例如，在公路建设中，GNSS 测量可以精确计算出道路的中心线位置，确保线路的直线度，而在桥梁施工中，GNSS 可以辅助定位桥墩位置，确保结构的准确对齐。

3.2 无人机航测

无人机航测以革命性效率重构测绘流程。无人机 (UAV) 搭载高分辨率的相机或激光雷达 (LiDAR) 设备，通过航拍或激光扫描技术获取地面数据。

(1) 高效覆盖：能够快速覆盖大面积地形，尤其适合难以到达的区域。

(2) 高分辨率：可以获取高分辨率的影像或点云数据，精度高，适用于详细地形分析。

(3) 灵活性强：能够在多种气象条件下工作，但受限于飞行高度、续航能力和天气条件。

某铁路个别路段采用大疆 M300 无人机，在两周内完成传统方法需两月测绘的峡谷地形，险峻区域勘测风险直降 80%。施工管理中，深中通道沉管预制场建立周级航测机制：通过自动航线规划获取 0.05m 分辨率影像，结合 Pix4D 软件生成实景三维模型，同步实现四项关键管控：①土方量动态核算（与实测误差 < 3%）；②施工进度数字化看板生成；③大型设备碰撞预警；④临边防护缺损识别。

3.3 三维激光扫描

三维激光扫描在解决空间复杂度难题上独具优势。激光扫描技术使用激光扫描仪对目标区域进行全面扫描，生成三维点云数据。点云数据反映了目标区域的真实三维形态。

(1) 高精度和高密度：能够生成高密度、高精度的三维数据，适用于建筑物、地形和复杂结构的详细测量。

(2) 全面数据获取：能够全面获取目标

区域的三维数据，适合后期建模与分析。

(3) 处理复杂：点云数据量大，需要专业软件进行处理和分析，数据处理过程较为复杂。

沪苏通长江公铁大桥钢箱梁合龙施工中，Faro X130 设备对 32 个节段实施全过程扫描：

●安装前：获取接口点云，逆向建模修正制造误差；

●吊装中：实时比对设计模型与扫描数据，液压系统动态调整梁体姿态；

●焊接后：全断面扫描检测焊缝变形，200 米跨径合龙误差锁定在 3mm 内。

该技术更推动检测范式革新——秦岭终南山隧道验收时，20 台扫描仪组网作业 72 小时，获取 1.2 亿点/km 的隧道全息模型，智能算法自动识别 37 处隐蔽超挖区（最小面积 0.8m²），较人工检测效率提升 7 倍。

3.4 自动化监测

自动化监测体系作为工程安全的神经末梢，正经历从“单点布控”向“智慧物联”的质变。如图 1 所示，某大桥的监测系统最具代表性——1268 个传感器（含 GNSS、光纤应变计、静力水准仪）组成感知网络，该系统日均处理 10 万+数据流，2023 年台风“泰利”过境期间成功预警东人工岛 2.7mm 异常位移。而在广州地铁某深基坑工程中，布设于支护结构的自动化测斜仪以 1 次/分钟采样频率持续工作 126 天，累计触发 11 次预警，直接避免 3 起可能发生的坍塌事故。这种“无人值守、风险先知”的模式，标志着工程安全管理进入智能时代。

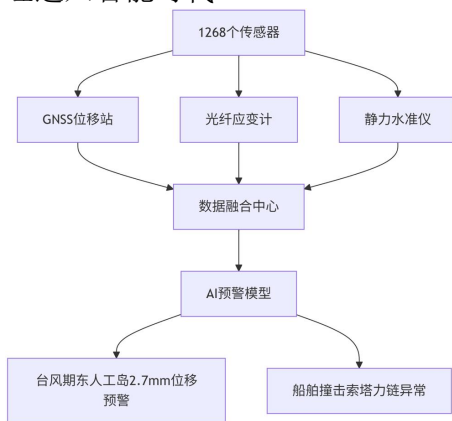


图 1. 某大桥工程安全监测范式

4. 现代测量技术应用面临的主要挑战

近年来，测量技术在道桥工程中的应用不断向智能化、自动化和信息化方向发展，新兴技术如三维激光扫描、无人机航测、GNSS 网络、SLAM（同步定位与建图）等正

逐步替代传统手段，成为复杂工程建设的重要支撑。然而，实践表明，尽管技术体系不断更新，测量工作的实际应用仍面临诸多限制和挑战。这些问题不仅影响测量精度和作业效率，更制约了测量成果在工程决策与管理体制中的落地能力，亟需从技术、管理、标准和人才多维度加以回应。

4.1 技术精度与可靠性瓶颈

在理想实验条件下，多种现代测量技术已能达到较高精度水平，但实际工程环境往往充满不确定性。城市峡谷、高架桥、隧道等区域存在大量 GNSS 信号遮挡与多路径效应，导致定位精度大幅下降，成为 GNSS 在密集交通工程中普及应用的主要障碍。同时，无人机航测和激光扫描虽在效率与建模能力方面优势显著，但对气象条件异常敏感，强风、低温、高湿等天气因素会显著干扰数据采集质量，影响成果稳定性。另一方面，自动化监测系统广泛部署后，传感器的长期稳定性成为新的技术瓶颈。一旦出现漂移、故障或环境扰动，将导致数据失真甚至误导工程判断，然而其校准与维护成本高、周期长，在大规模应用中难以实现持续保障。对于新兴技术如 SLAM，其在室内、狭小空间表现良好，但在桥隧、异形结构等复杂环境中的精度表现尚未形成稳定范式，缺乏足够的工程验证和适用性边界评估，限制了其在道桥领域的广泛推广。

4.2 数据处理与管理困境

测量技术的迭代带来了数据类型和规模的急剧扩张，其所产生的海量数据需要进行有效的整理、存储和分析，以提供决策支持和工程管理。此外，点云与连续监测所产生的海量数据给存储、传输与计算带来巨大压力，尤其在带宽受限或设备配置不足的工程现场，常出现数据积压与处理延迟。因此，如何建立高效的数据管理系统、开发智能化的数据处理工具，成为工程测量领域亟待解决的问题。

4.3 成本与人才缺口

先进测量技术虽然带来显著性能提升，但高昂的投入成本成为工程项目普及应用的重要阻力。现代测量技术的设备，如高精度激光扫描仪和无人机，价格昂贵。在复杂地形的项目中，需要多种设备的配合使用，导致总体投资较大。激光扫描仪、地面雷达、高精度 GNSS 接收器等设备动辄数十万元甚至更高，加之长期运行所需的维护、升级与

备件更换,往往超出常规项目预算负担,尤其对于中小型企业而言更是望而却步。与此同时,测量行业面临的人才瓶颈也日益突出。工程测量技术的快速发展也带来了对技术人才的新要求。现代工程测量需要工程师具备跨学科的知识技能,能够灵活运用多种测量技术,并且具备数据处理和分析能力。当前从业人员多数仍以传统测量背景为主,缺乏对 BIM 建模、GIS 空间数据管理、编程与数据可视化等新技术的掌握,而土木工程专业人才对测量技术的理解也多停留在表层。如何培养适应现代工程测量需求的专业人才,也是当前工程测量领域面临的挑战之一。复合型技术人才的缺位直接影响了新技术在工程现场的实际转化效率。此外,新技术培训周期长、成本高,企业难以建立完善的持续教育机制,导致人才结构与技术演进严重脱节。

4.4 标准规范滞后

测量技术更新速度快于行业标准体系的调整步伐。许多工程实践中采用的新设备、新流程、新算法尚未纳入现行国家或行业规范,相关的精度评定、误差控制与数据处理方法缺乏统一标准。这种滞后性使得新技术在工程应用中常处于“无法可依”的状态,既影响了数据质量,也为验收与审计工作带来不确定性。

当前测量行业尚未形成统一的数据格式与处理标准,特别是在点云精度评定、影像建模精度控制、结构监测数据质量判定等方面,不同项目单位多采用自有标准或依赖设备厂商提供的方法,造成数据缺乏可比性和互操作性,严重制约了成果共享、重复利用和跨项目协同。标准规范滞后已成为技术落地的系统性阻碍。

4.5 应用实践挑战

测量工作的现场适应性依然是现实制约之一。施工现场常伴随振动、高强电磁干扰、设备遮挡等复杂因素,影响仪器的稳定性和数据的完整性。尤其在连续测量和实时监测过程中,这些干扰往往不可预测,容易造成数据断档、误差积累,增加工程安全风险。

测量成果如何高效转化为工程管理与施工指导,仍存在“测量与决策脱节”的现象。部分项目中,测量数据虽然精准详尽,但缺乏可视化手段和决策接口,未能被施工管理团队及时理解与采用。更值得注意的是,部分老旧工程由于缺乏完整的原始测量与建模

数据,在进行信息化改造或 BIM 接入时面临“无据可依”的窘境,严重制约了新技术的落地。

5. 应对挑战的对策与发展趋势

在面对技术适应性不足、数据管理困境、标准缺失及人才结构失衡等问题的同时,道桥工程测量领域也正迎来新一轮的技术革新与体制优化期。积极应对这些挑战,不仅有助于提升测量工作的精度与效率,也将为基础设施建设的信息化、智能化转型提供有力支撑。以下从三个层面提出相应对策与发展方向。

5.1 技术融合与创新

技术融合已成为提升测量系统稳定性和适应性的关键路径。面对城市峡谷、桥下空间、遮挡频繁等复杂环境,单一技术手段难以有效覆盖。应鼓励发展 GNSS、惯性导航系统(INS)、激光扫描与摄影测量的多源融合方案,通过紧耦合解算与多传感器协同定位,实现高稳定性和高精度兼容。跨海桥梁监测中,GNSS+光纤惯导(INS)紧耦合技术将风振干扰下的定位精度提升 82%,港珠澳大桥东人工岛应用该方案后,台风期位移数据异常率从 15%降至 3%。激光扫描与摄影测量的动态融合更具革命性——大疆 L2 无人机搭载 Livox 激光雷达,在深圳某城市立交扫描中实现植被穿透点云获取,有效点云率从 63%跃至 89%。

5.2 完善标准与管理体系

测量技术的可持续发展离不开规范体系的同步升级。加快修订/制定标准,将激光扫描、无人机航测、连续监测等新技术及高精度测量、动态监控、数据处理纳入统一评价框架。测量数据的格式与管理体系需实现标准化。当前存在数据源杂乱、元数据缺失、模型难对接等问题,制约了 BIM、CIM 等信息平台的全面集成。应推进统一的数据交付标准,包括坐标系、精度指标、文件结构、时间戳管理等,建立以工程生命周期为主线的测量数据规范体系。建立基于云的全生命周期数据管理平台,集成采集、传输、分析、存储、共享功能,贯通项目多阶段与多参与方数据,提升数据价值与决策支撑。

5.3 加强人才培养与协作机制

新技术的落地离不开具备跨领域知识结构的人才支持。当前行业面临的主要问题并非技术不可及,而是技术懂得太少、用得太多,应从教育源头出发推动专业结构调整:

1) 高校设置“测量+土木+信息技术”复合课程,培养精通测量原理、数据处理与开发的人才;

2) 企业可通过设立联合高校/科研机构共建实验室与实训计划,促进技术从实验室到工程应用。

应鼓励企业探索设备租赁、测量服务外包、联合应用实验室等运营模式。这样不仅可有效降低测量技术的进入门槛,也有助力中小企业应用先进技术。建立起高效的“产-学-研-用”协作链条。依托重大工程试点,推动新技术“验证-应用-推广”迭代发展,实现技术与工程深度融合。

6. 结论

现代测量技术通过 GNSS 高精度定位、无人机航测、三维激光扫描及自动化监测系统的深度整合,全面革新了道桥工程全生命周期管理范式,显著提升了勘察设计阶段的大范围地形建模效率、施工建造阶段的毫米级结构控制能力以及运维阶段的安全风险主动防控水平;然而其规模化应用仍受制于复杂电磁环境下的系统性测量偏差、海量异构数据融合的算力瓶颈、高端设备投入与跨学科人才断层叠加的普及壁垒以及标准规范滞后引发的技术实践脱节等核心矛盾。破解困局需构建技术-制度-人才三维协同机制:技术上发展多传感器紧耦合系统(GNSS/INS/激光扫描)与环境动态补偿算法以增强鲁棒性,制度上建立覆盖数据采集精度分级、传输协议与平台接口的全链条标准框架,人才上培育融合测量工程、信息科学及土木工程知识的复合主体。未来将呈现智能化、集成化、实时化三重趋势,推动工程管理从被动响应向基于毫米级精度控制的主动防控范式战略转型,最终实现交通基础设施全生命周期本质安全——这一进程不仅依赖多学科技术突破,更需重构标准体系、教育生态与应用场景的协同进化,标志着工程测量从辅助工具向决策中枢的学科地位跃迁。

参考文献

- [1] 张国伟.桥梁工程测量技术现状与发展趋势研讨[J].安防科技, 2021, 000(005): 147-147.
- [2] 吴飞.工程测量技术的发展现状研究[C]//华东六省一市测绘学会第十一次学术交流会.[2025-07-28].
- [3] 李嘉成.浅谈工程测量技术发展现状与展望[J].Water Conservancy & Electric Power Technology & Application, 2024, 6(2).
- [4] 何万峰.GPS技术在道路桥梁工程测量中的应用[J].建筑工程与管理, 2023, 5(6): 40-42.
- [5] 孙赓.分析GPS测量技术在路桥工程测量中的应用[J].现代工程项目管理, 2024, 3(7): 148-150.
- [6] 刘欣怡, 张永军, 范伟伟, 王森援, 岳冬冬, 刘梓航, 贾琛, 景慧莹, 钟佳辰.无人机倾斜摄影三维建模技术研究现状及展望[J].时空信息学报, 2023, 30(10): 41-48.
- [7] 范伟, 陈亮.面向无人机航测与三维激光扫描的三维地形测绘技术[J].项目工程, 2025, 3(2): 187-189.
- [8] Kavaliauskas, P., Fernandez, J. B., McGuinness, K., & Jurelionis, A. Automation of Construction Progress Monitoring by Integrating 3D Point Cloud Data with an IFC-Based BIM Model[J]. Buildings, 2022, 12(10): 1754.
- [9] Jianliang Zhang, Jian Zhang, Zhishen Wu. Long-Short Term Memory Network-Based Monitoring Data Anomaly Detection of a Long-Span Suspension Bridge [J]. Sensors, 2022, 22(16): 6045.
- [10] Yuchen Yang, Yung Tsang Chen, Craig Hancock, Nicholas A. S. Hamm, Zhiang Zhang. A Novel Approach for As-Built BIM Updating Using Inertial Measurement Unit and Mobile Laser Scanner[J]. Remote Sensing, 2024, 16(15): 2743-2743.
- [11] 魏钧楠.道路桥梁工程新型检测技术现状及应用意义[J].现代交通与路桥建设, 2024, 3(2): 49-51.