

桥梁检测与监测技术及数字化发展方向的对策探讨

文 / 赵琳 上海市建筑科学研究院有限公司

摘要：桥梁安全与寿命的保障显著依赖于检测与监测技术的进步。数字化技术的迅猛发展为桥梁状态的实时监控与评估提供了可能，通过集成高精度传感器、先进的数据分析工具和智能算法。为提升桥梁安全水平，应强化技术研发和人才培养，推进数据收集与处理的标准化流程，并重视安全及隐私保护措施。同时，BIM技术的融入与桥梁监测系统的构建成为数字化转型的重要途径。

关键词：桥梁检测；监测技术；数字化；发展方向；对策

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.08.045

引言

桥梁数量的持续增长及其使用周期的延长，使得检测与监测技术的关键作用日益显著。传统的桥梁检测手段却普遍存在检测周期长、效率低下以及数据处理能力不足等问题。鉴于此，转向数字化发展路径，借助物联网、大数据和人工智能等现代信息技术，成为提高桥梁检测与监测效能的必然趋势。通过构建智能桥梁监测系统，能够实现数据的实时采集与分析，并对潜在风险进行提前预警，为桥梁安全管理提供有力保障，进而为公共安全与交通流畅奠定坚实基础。

一、桥梁检测与监测技术及数字化发展方向研究的意义

桥梁作为关键交通基础设施，其安全与稳固性直接维系着公众生命安全及社会经济的繁荣。故而，桥梁检测与监测技术的深入研究具有至关重要的意义。在传统的桥梁管理框架下，检测手段通常较为基础，周期亦较长，难以实时反映桥梁的真实状况。特别是在遭遇极端气候或突发情况后，桥梁的安全隐患往往难以立即被发现。

数字化技术的进步为桥梁检测与监测技术的创新发展开辟了广阔前景。通过整合现代传感器技术、物联网、大数据分析以及人工智能等前沿技术，实现桥梁健康状况的实时监控成为可能。这种实时监控机制能够在桥梁出现病害或异常时迅速发出预警，有效降低事故发生率，增强桥梁运营的安全性。同时，数据的累积与分析为后续桥梁维护决策提供了科学依据，助力制定更为高效的维护策略，优化资金使用效率。在数字化转型的大背景下，桥梁监测系统的构建成为研究的关键领域^[1]。

二、数字化技术的优势和特点

（一）高精度

数字化技术在桥梁检测与监测领域表现出卓越的高精度能力。以应变监测为例，光纤光栅传感器利用其独特的光学原理，能够精确捕捉桥梁结构细微的应变变化，其精度可达到微应变级别。与传统电阻应变片相比，光纤光栅传感器对环境干扰的敏感性更低，稳定性更强，并能够精确定位结构的薄弱受力点。在位移监测方面，结合全站仪与GPS技术，能够实时监测桥梁的竖向毫米级沉降，同时追踪水平方向的微小位移动态，为评估桥

梁变形趋势提供了可靠的依据。对于裂缝检测，采用高分辨率图像采集设备与数字化图像处理算法，能够精确识别宽度仅为0.1毫米甚至更细的裂缝，其精度远超人眼及传统测量工具，确保了病害的早期发现和精准评估，为桥梁的预防性维护提供了强有力的技术支持。

（二）多样化

数字化技术在桥梁检测与监测中展现了多样化的应用场景。通过集成多种技术手段，如高精度传感、全站仪、GPS以及图像处理算法等，不仅提升了检测的精度和效率，还拓展了检测的范围和深度。这种多样化的应用模式，为桥梁的安全评估和养护提供了全面的技术保障。

数字化技术的应用为桥梁运维提供了多元化手段。首先，检测技术能够监测多种物理量，包括结构应力和应变、位移变形，以及动力特性如振动频率和振型，从而实现对桥梁状态的全面感知。例如，通过在桥梁的关键区域安装不同类型的传感器，能够同步收集车辆荷载、风荷载和温度变化等条件下的多维度响应，从而全面评估桥梁的工作状况。其次，数据采集方法灵活多样，包括接触式传感器如应变片和锚索计，以及非接触式技术如激光雷达和无人机航拍成像。激光雷达能够快速扫描桥梁表面，构建精确的三维模型，直观展示外观病害；无人机则能够灵活地在复杂桥梁结构中穿梭，拍摄高清影像以辅助裂缝等病害的识别。

（三）自动化

自动化技术是数字化技术的一大显著优势。在数据采集阶段，依托物联网技术的智能传感网络能够实现无需人工值守的自动采集。传感器按照预设的时间间隔自动收集应变和位移等数据，并实时将这些数据传输至云端。这种方式不仅免除了人工频繁上桥操作的需求，还显著降低了劳动强度和安全隐患。在监测流程中，一旦监测数据达到预设的阈值，自动化预警系统便会迅速启动，通过短信、邮件等多种途径及时通知管理人员。

（四）数据共享与协同合作

数据共享与协同合作推动了桥梁管理的创新，突破了传统界限。通过数字化平台，设计图纸、施工记录、历年检测报告等多源数据得以整合，使得养护、设计、科研等不同部门能够根据实际需求获取所需信息。设

计单位得以依据实时监测到的结构性能变化,对后续桥梁设计进行优化;养护部门则能根据材料性能衰减数据,精确制定维修计划。在大型桥梁群的管理中,各子桥的数据得以集中共享,管理者能够进行对比分析,识别出共性问题与特定风险,从而实现资源的统一调配^[2]。

三、桥梁工程的常见病害类型

(一) 桥梁工程裂缝问题

在桥梁工程领域,裂缝是普遍存在的病害形式,常以表面微裂纹或显著开裂形式显现。此类裂缝的成因多样,涵盖了材料收缩、温度波动、荷载效应及结构变形等多个方面。裂缝不仅损害桥梁的外观,还可能引起水分侵入,进而诱发更为严重的结构损害。对于混凝土桥梁,裂缝的出现往往预示着内部应力的累积,从而影响其承载性能。因此,对裂缝的实时监测与评估显得尤为关键。对于严重的裂缝,可通过灌浆、封闭及加固等手段实施修复,以保障桥梁的安全运行和长期性能。

(二) 钢筋锈蚀与碳化

钢筋锈蚀与碳化系桥梁工程中的常见病害,主要发生于混凝土结构内部。锈蚀主要由混凝土保护层损坏、水分及氯离子侵入引起,进而导致钢筋截面减小,降低其承载性能。碳化过程涉及环境二氧化碳与混凝土的化学反应,削弱混凝土的碱性,促使钢筋锈蚀。这两种病害往往相互交织,对桥梁的耐久性构成严重威胁。为有效预防钢筋锈蚀与碳化,建议在设计初期选用抗腐蚀材

料,强化施工质量监管,并实施定期检测与维护,以延缓桥梁的老化进程。

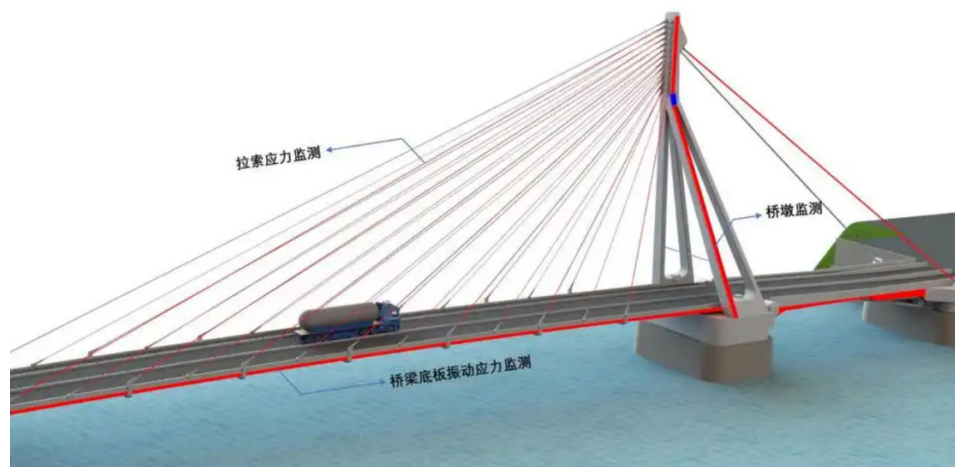
(三) 墩台基础承载力不足

桥梁墩台和基础的承载力不足常常造成严重的安全隐患,主要发生在大量交通荷载与地基沉降的影响下。当桥梁的设计未能合理计算荷载或地基处理不足时,墩台可能无法有效支撑桥梁的重量,导致沉降、倾斜甚至坍塌等事故的发生。尤其是在软土和不均匀地基条件下,承载力不足的问题尤为明显。为了解决这一问题,需进行详尽的地质勘察,合理选用基础形式及尺寸,并加强对基础施工质量的监控^[3]。

四、桥梁工程检测技术的应用

(一) 光纤传感技术

在桥梁工程实践中,光纤传感技术得到了广泛应用。以跨海大桥为例,此类桥梁所处环境复杂,海水的侵蚀和强烈的风浪冲击对桥梁结构的损害尤为严重。光纤光栅传感器被布置在桥梁的关键部位,如桥墩、箱梁内部的主筋和斜拉索等,利用其卓越的灵敏度,能够实时监测结构的应变变化,其精度可达微应变级别。这种方法能够及时探测到细微裂缝的萌生迹象。在温度监测方面,光纤传感系统能够区分环境温度与结构温度的异常变化,从而避免因热胀冷缩引起的结构附加应力被忽视。在某大型跨海大桥的运营期间,光纤传感系统多次成功发出局部结构应变异常的精准预警,养护团队迅速响应并排查,发现是由于船舶撞击造成的轻微损伤,并及时进行了修复,确保了桥梁的长期安全运行。



(二) 探地雷达监测技术

探地雷达在桥梁检测领域发挥着至关重要的作用。对于地基稳定性至关重要的桥梁,尤其是那些建立在软土地基上的高架桥,其基础的稳定性尤为关键。探地雷达通过发射高频电磁波,穿透地表及基础结构,并依据反射波的特性绘制地下结构图像。该技术能够清晰地展现桩基础的混凝土完整性,并精确地定位空洞、缩颈等缺陷的位置,其深度探测能力可达数米。在老桥改造工程中,探地雷达对旧桥桥台基础进行扫描,发现部分桥台底部因地下水冲刷而产生空洞。如果不及时处理,可

能会导致桥台沉降和桥梁坍塌。施工团队根据雷达探测结果,精确制定加固方案,向空洞注入高强度灌浆料,从而恢复基础的承载能力,确保改造后的桥梁稳固如初,有效降低了潜在的风险。

(三) 超声波检测技术

超声波检测技术在桥梁混凝土构件质量监控中占据核心地位。在新建桥梁的施工阶段,特别是对桥墩、梁体等关键混凝土浇筑区域,必须确保其内部结构的密实性及无缺陷。通过在构件两侧对称安装超声波检测探头,发射高频声波穿透混凝土,根据接收到的声波速度、振

幅和频率的变化,可准确判断内部状况。若混凝土内部存在蜂窝、麻面或空洞等缺陷,声波传播将受到阻碍,导致信号特征发生改变。

(四) 无线电检测技术

无线电检测技术为桥梁检测带来新视角。在大跨度斜拉桥、悬索桥缆索检测方面表现突出。由于缆索高空架设、长度大,常规检测难。无线电检测设备发射特定频率无线电波,沿缆索传播,通过分析反射回来的波信号,判断缆索内部钢丝断丝、锈蚀情况。以某著名悬索桥为例,其主缆直径超1米、长度千米级,采用无线电检测,定期巡检能快速发现主缆个别钢丝锈蚀引发的信号衰减异常点,精准定位问题部位,养护人员借助专业设备攀爬检修,更换锈蚀钢丝,维持缆索力学性能,确保桥梁主体结构安全,大大提升此类复杂桥梁关键构件的检测效率^[4]。

五、数字化技术在桥梁检测和监测中的对策研究

(一) 技术开发和人才培养

在技术研发领域,产学研一体化至关重要。以同济大学与上海建工集团及相关科研机构的合作为例,共同应对滨海地区桥梁面临强风、高湿度和盐雾严重侵蚀的挑战,成功研发了智能防腐涂层监测传感器。该传感器被嵌入桥梁钢结构表面,能够实时监控涂层厚度的变化,并检测涂层破损处的锈蚀速度,为精确的防腐维护提供关键数据支持。在人才培养层面,专业机构应发挥其引领作用。中铁大桥局与专业培训机构携手合作,设立了桥梁数字化运维特营,课程内容涉及物联网传感器应用、大数据处理、人工智能故障诊断等前沿理论和实践技能。

(二) 数据搜集与解析

在桥梁检测与监测领域,确保数据收集与分析的卓越质量是至关重要的成功要素。这不仅要求构建先进的传感器网络,以实现桥梁全面且多角度的数据采集,还必须采用科学的工作流程和标准化准则,以维护数据的可靠性及完整性。鉴于自然环境、荷载条件以及材料特性等多样因素,需制定适宜的监测策略。随着数据量的迅猛增长,提升数据分析能力成为迫切需求。

(三) 安全与隐私防护

在桥梁检测与监测领域,数据安全与隐私保护构成关键环节。伴随着数字化技术的广泛应用,监测系统可能遭受网络攻击、信息泄露及数据篡改等威胁。为此,构建健全的安全防护体系势在必行,并采取强有力的加密手段,以保障敏感数据安全,确保信息传输与存储不受干扰。

(四) 桥梁监测系统构建技术要求

为确保系统在各种环境条件下均能持续稳定运行,其设计必须融入高稳定性和可靠性。这要求设计中包含冗余系统和容错机制,从而保障数据采集与传输的安全。同时,监测系统需具备良好的扩展性,以适应未来传感器或设备的增配,而不会干扰现有系统功能。系统还需具备强大的数据处理能力,能够实时处理与分析大量数据,并呈现清晰直观的信息^[5]。

六、桥梁检测及监测数字化系统未来发展方向

(一) 集约化管理

桥梁检测及监测数字化系统的未来发展方向之一是实现集约化管理。集约化管理意味着将多个桥梁的检测和监测数据集中到一个统一的平台上进行管理。这种方式可以通过建立多桥梁信息管理系统,实现在同一平台下对全国甚至区域内桥梁的实时监测和数据分析。通过集约化管理,可以提高资源的利用效率,减少重复检查与数据采集劳动力,降低管理成本。

(二) 传感器布置

在桥梁检测及监测数字化系统中,传感器的布置是关键因素。未来的发展将会强调智能和高效的传感器布局,利用先进的传感器技术如光纤传感器、无线传感器网络等,实现对桥梁结构健康的全面监测。合理的传感器布置可以有效捕捉桥梁在不同环境下的动态性能,如荷载、温度、位移和裂缝情况等。通过优化传感器的数量和位置,可以最大限度减少数据冗余,同时提升监测精度。

(三) 计算模型修正与优化

未来桥梁监测系统的发展将侧重于计算模型的改进与优化。通过融合实时监测数据与计算模型,实现动态更新和修正,从而提升模型对桥梁实际状态的准确反映。依托大数据分析和机器学习技术,系统能够自主学习并调整模型参数,显著增强结构健康评估的精确度。模型的优化不仅有助于工程师深入理解桥梁结构行为和预测其未来性能,还能评估维修措施的效果,为未来的养护决策提供可靠的数据支撑^[6]。

结语

桥梁检测与监测技术在确保交通安全和基础设施长期可持续性方面发挥着核心作用。鉴于桥梁结构的日益复杂化及其使用环境的不断演变,传统的检测手段已不足以满足现实需求。因此,数字化转型的推进成为不可或缺的趋势。通过集成物联网、大数据以及人工智能等前沿技术,实现了桥梁的实时监测与精确评估。

参考文献

- [1] 刘涛敏. 桥梁检测与监测技术及数字化发展方向的对策研究[J]. 运输经理世界, 2024, (07): 64-67.
- [2] 于洋. 新时期公路桥梁检测质量控制与检测技术应用研究[J]. 工程建设与设计, 2024, (02): 191-193.
- [3] 马思航. 桥梁检测与监测技术及数字化发展方向的对策探讨[J]. 交通科技与管理, 2023, 4(14): 14-16.
- [4] 石雪飞, 许琪. 大型桥梁建管养中的检测监测技术[J]. 中国公路, 2022, (09): 57-60.
- [5] 唐昊. 桥梁检测与监测技术的发展在桥梁养护中的重要性[J]. 运输经理世界, 2021, (22): 96-98.
- [6] 陈龙进. 公路桥梁检测技术的重要性与工程应用研究[J]. 居舍, 2021, (05): 172-173.

基金项目: 国家重点研发课题“大规模桥隧群安全运维云边端协同监测技术研究”2023YFC3805705-03。