

无人机与地面机器人协同的桥梁结构检测技术

文 / 张 勇 合肥工大工程试验检测有限责任公司

摘要：为了提高桥梁结构检测的效率和准确性，本文研究了无人机与地面机器人协同的桥梁结构检测技术。通过设计层级化任务分配机制和双频段通信保障体系，确保了检测任务的高效协同执行。在多模态传感器集成方面，结合光谱与力学复合感知，提出了多尺度数据采集策略，并依靠跨平台标定技术提升传感器数据的准确性。为了解决桥梁检测过程中路径规划的挑战，采用了环境感知建模和自适应避障算法，优化了作业路径的动态调整与能源协同管理。智能数据分析体系通过损伤特征提取与结构状态评估，建立了决策支持系统，为桥梁安全评估提供了科学依据。最后，系统的可靠性保障设计，如电磁兼容性设计和故障冗余机制，确保了技术的长期稳定性。

关键词：无人机；地面机器人；协同检测；桥梁结构；智能算法

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.12.050

引言

经济的高速发展，提升了桥梁等交通基础设施的数量和品质。但随着运输车辆载重、密度的急剧增加，也加速了桥梁结构的伤损和劣化速度。桥梁结构病害的集中暴露期是建成投入使用后的20~30年，而我国桥梁中近一半的桥梁已经进入病害暴露期。目前，传统的桥梁结构检测方法多依赖人工操作，存在效率低、覆盖面窄、无法实时监控等问题。近年来，随着智能化技术的不断发展，利用无人机与地面机器人协同进行桥梁结构检测成了一项研究热点。鉴于无人机技术的快速发展及其小型化、灵活、自主、可控的特点，国内外的学者及从业人员越来越多地将其应用于大型基础设施的自动检测领域，尤其是结构表观状态的检测^[1]。无人机能够快速覆盖大范围区域，而地面机器人则能够进行细致入微的局部检测，二者的协同作业可以大大提升桥梁检测的效率和精度。本研究旨在通过设计一种高效的协同作业架构，结合先进的传感器集成与智能算法，优化桥梁结构的检测流程，降低人工成本，同时提高检测结果的精度和可靠性。本文将详细介绍无人机与地面机器人协同检测的核心技术，包括任务分配、传感器集成、路径规划、智能数据分析及系统可靠性保障等内容，为未来智能桥梁检测系统的开发和应用提供理论基础和技术支持。

一、协同作业架构设计

（一）层级化任务分配机制

层级化任务分配机制是无人机与地面机器人协同作业架构的核心组成部分。其设计目标是通过精确分配任务来实现高效的资源利用与工作协调。在该机制下，任务被细分为不同的层级，依据任务的复杂度、时效性与执行主体的特点进行优化分配。对于任务复杂度较高或需要较强处理能力的操作，地面机器人负责执行，而一些简单的监控或传感任务则交由无人机完成。与此同时，层级化机制也能根据任务的优先级进行动态调整，使得系统能够灵活应对环境的变化及作业中的突发状况。例如，当某一设备的能量消耗达到预定值时，任务自动调度到其他设备，确保整体系统的持续运作和任务的高效完成。

（二）双频段通信保障体系

双频段通信保障体系在协同作业中起到了至关重要的作用，尤其是在处理复杂环境中的信号干扰问题时，展现出其独特的优势。该体系通过集成高频和低频两种通信信道，在不同的作业情境下实现通信资源的最优配置。高频段信号主要用于大容量的数据传输，尤其是在实时监控、图像传输等高带宽需求的场景中，能够提供高速、低延迟的服务；而低频段信号则负责传输稳定的控制指令，它具有较强的穿透力，适合在复杂的环境中传递低延迟且可靠的控制信息^[2]。此双频段系统不仅确保了数据和指令的双重需求，还能在极端情况下动态切换频段，以防止频段过载或信号干扰的影响。利用智能调度和优先级划分，系统可以在多变的环境下稳定运行，保证无人机和地面机器人的协同作业不受信号传输质量波动的影响，从而提升整个作业系统的可靠性与安全性。

（三）时空基准统一方法

时空基准统一方法设计的核心任务是确保各个作业单元在同一时间框架内协调作业。为了使系统在复杂环境中稳定运行，需要解决由于设备位置差异和时间延迟引起的数据同步问题。时空基准统一方法通过设立一个统一的时间基准和空间坐标系，使得所有传感器和执行单元能够在同一个时空框架下进行信息交换与协作。在作业过程中，无人机和地面机器人需要通过实时的空间坐标和时间戳信息进行任务协同，避免因时间或空间错位导致的任务失败或信息误差。

二、多模态传感器集成

（一）光谱-力学复合感知

光谱-力学复合感知技术的提出，标志着传感器融合领域迈出了重要一步。该技术结合了光谱传感与力学传感的优势，在多模态传感器集成的应用中发挥了关键作用。光谱传感器能够捕捉物体表面的光谱特征信息，反映出材料的化学成分、光谱反射率等微观信息，而力学传感器则可以提供关于物体力学性能的数据，如振动、应变等。这两者的有机结合，不仅增强了感知的精准度，

还拓展了应用场景。光谱-力学复合感知为复杂环境下的物体检测提供了一种全新的思路^[3]。例如，在航空航天领域，这一技术可以实时监测航天器表面的微小裂纹或材料疲劳情况，而在农业中，则能够精准评估作物的生长状态与土壤健康情况。其通过对不同感知维度的集成分析，能够从多个角度提供综合性的判断，为决策提供更丰富的信息，从而提升系统整体的感知能力和可靠性。

(二) 多尺度数据采集策略

在多模态传感器系统中，多尺度数据采集策略为实现全方位、高精度的感知奠定了基础。多尺度数据采集策略强调不同感知尺度之间的互补性，能够对物体进行全面、精细的监测（如图1为多尺度数据采集集中不同传感器与数据之间的关系图）。具体来说，传感器在不同的尺度上进行数据采集，一方面可以在宏观层面获取物体的整体信息，另一方面则能在微观层面捕捉更为细致的结构性数据。例如，在建筑物健康监测系统中，大尺度传感器可以监测建筑物的整体位移情况，而小尺度传感器则可以监测墙体的裂缝或地基的沉降情况。分层次、分区域的数据采集方式，使得系统可以动态地调整感知焦点，针对不同区域和状态进行数据的精准获取。

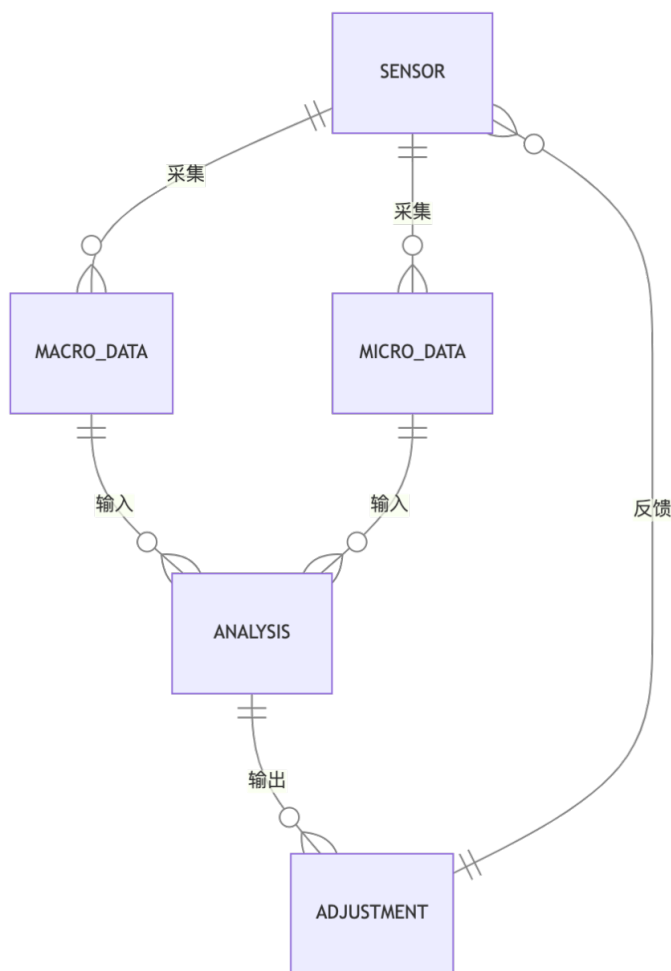


图1 多尺度数据采集集中不同传感器与数据之间的关系图

(三) 跨平台标定技术

跨平台标定技术是确保不同类型的传感器能够在多模态系统中协调工作的关键技术之一。该技术的核心在于不同传感器平台之间的互操作性与一致性，它通过对传感器的标定过程进行精确控制，消除了因平台差异、传感器误差或环境因素导致的误差，使得各类传感器能够在统一的坐标系下进行数据融合。随着多模态传感器技术的不断发展，如何准确地对来自不同设备和平台的传感数据进行标定，已成为提高感知系统精度和可靠性的关键所在。跨平台标定技术可以在多个设备之间实现数据同步，尤其是在涉及无人机、地面机器人以及其他移动平台的协同工作时，能够确保系统各个部分的高度一致性^[4]。例如，在遥感数据采集过程中，无人机与地面机器人可能使用不同的传感器平台，标定技术能够使这些设备的感知数据处于同一基准下，从而保证数据融合的准确性。

三、动态路径规划方法

(一) 环境感知建模

在动态路径规划的研究中，环境感知建模则是通过对环境的全面感知与精确建模，系统能够实时评估环境中的各种动态变化，并基于此优化路径规划决策。环境感知建模不仅仅依赖于传统的传感器数据采集，还需要融入多种感知技术，如视觉、激光雷达、声呐等。这些传感器的多样性和互补性为环境建模提供了丰富的数据源。通过对环境中障碍物、行驶区域、交通标志等因素的详细建模，系统能够形成一个动态的、时刻更新的环境地图^[5]。此类建模技术能够应对复杂环境下的突发事件，比如道路塌方、交通事故等，确保路径规划的灵活性与应急响应能力。

(二) 自适应避障算法

自适应避障算法是动态路径规划中的一个核心组成部分，尤其在实时环境中，避障能力的自适应性显得尤为重要。此类算法通过分析环境感知模型中实时更新的障碍信息，能够自动调整避障策略，从而避免潜在的碰撞风险。与传统的静态避障算法相比，自适应避障算法更为灵活和高效。它能够根据不同的环境条件和障碍物类型做出适时的反应。比如在复杂的城市环境中，避障算法能够根据交通状况、行人密度等因素动态调整避障策略，确保车辆或机器人能安全且高效地完成任任务；另外，随着计算能力的提升和机器学习技术的发展，现代避障算法不仅能够处理静态障碍，还能应对动态障碍物的变化。例如，通过动态规划和局部最优路径搜索的结合，系统可以在高速行驶或复杂地形下依然保持较高的避障能力。其自适应机制大大增强了路径规划系统的鲁棒性，使其能够应对更加复杂和不确定的操作环境^[6]。

四、智能数据分析体系

(一) 损伤特征提取

在结构健康监测中，损伤特征提取技术为识别与评

估结构损伤是通过对传感器数据的深度分析,结合信号处理算法,可以提取出与结构损伤相关的特征信息。这些信息包括振动信号的频率响应、应变变化、位移变化等。在智能数据分析体系中,损伤特征的提取不仅是对传统感知数据的简单分析,而是通过结合多种算法,如小波变换、傅里叶变换、时频分析等,实时捕捉和分析结构变化的微小迹象。借助于先进的机器学习技术,系统能够从海量数据中识别出隐含的损伤模式,及时发现结构的潜在故障^[7]。此提取方法的关键在于其高精度和高效性,能够通过微小的结构变动识别出损伤,而不必依赖人工检查,提升了结构监测的自动化水平与准确性。

(二) 结构状态评估

结构状态评估的目标是基于采集到的数据,对结构的健康状况做出科学、准确的判断。此过程通常依赖于一系列的数据处理与评估模型,包括但不限于统计分析模型、机器学习模型和深度学习模型。这些模型通过分析传感器收集到的动态数据,建立起结构响应与损伤状态之间的映射关系。例如,通过分析结构在不同载荷下的振动特征,评估其承载能力是否存在隐患。结构状态评估不仅仅停留在损伤检测层面,更重要的是通过多次测量数据的比对与分析,判断结构的耐久性、疲劳性等长周期特征。其过程的精准性和实时性直接影响到结构安全性预警系统的效果。

五、系统可靠性保障

(一) 电磁兼容设计

电磁兼容性(EMC)设计是确保系统在复杂电磁环境中稳定运行的关键环节。在现代高科技应用中,设备频繁受到电磁干扰(EMI),尤其是在传感器、控制系统等敏感电子元件之间相互作用时,电磁干扰可能会引发性能不稳定或故障。为了有效解决这一问题,电磁兼容设计需要综合考虑电磁辐射的控制、抗干扰能力的提升和设备的电磁屏蔽。在设计过程中,应确保所有电子组件均符合电磁兼容性要求,通过合理布局、选用屏蔽材料、加装滤波器等措施,将电磁干扰降低至最低^[8]。

(二) 故障冗余机制

故障冗余机制的设计是保障系统可靠性和容错能力的重要手段。随着技术的不断发展,现代系统在复杂的工作环境中面临着越来越多的潜在风险,单一组件的故障可能会对整个系统的运行产生灾难性影响。为了避免这一情况,故障冗余机制通过引入多余的、功能相同或相似的组件,在主系统发生故障时自动切换至备用组件,从而确保系统不受影响地继续运行。冗余设计通常包括硬件冗余、软件冗余和数据冗余等多个方面。例如,硬件冗余可以通过双电源供电、双路径信号传输等方式,避免因某一电源或传输通道失效导致系统瘫痪;而软件冗余则通过算法容错技术和数据备份等方式,在系统发生运行异常时实现自我修复。

(三) 环境适应性验证

环境适应性验证是确保系统在实际应用中能够适应不同外部环境变化的重要步骤。在现实场景中,系统常常面临着复杂且多变的工作环境,包括温度波动、湿度变化、振动冲击以及各种气候条件等。因此,在系统设计与测试阶段,必须进行充分的环境适应性验证。通过模拟不同环境条件下的工作状态,验证系统的运行稳定性和耐久性。这一验证过程通常包括温度循环试验、湿热试验、振动试验等多个环节,旨在模拟可能出现的极端环境,以评估系统在这些条件下的适应能力与长期工作表现;在高湿度或低湿度的条件下,系统内部的电路和元件也应能够有效防止因潮湿造成的电气故障。

结语

本文提出的无人机与地面机器人协同的桥梁结构检测技术,通过精确的任务分配机制和高效的双频段通信体系,解决了传统检测方法中的低效与局限性问题。在多模态传感器集成方面,光谱与力学感知技术的结合,不仅提升了数据采集的多样性,也提高了检测结果的准确性。通过跨平台标定技术的应用,确保了不同传感器之间的数据兼容性,为后续的智能分析提供了可靠的数据支持。智能数据分析体系通过深度学习方法提取损伤特征,准确评估桥梁的健康状态,支持决策者对桥梁的安全进行科学评估。最重要的是,系统设计中的电磁兼容性和故障冗余机制,确保了系统在复杂环境下的高可靠性。因此,本文提出的技术方案为智能桥梁检测系统的实际应用提供了可行的解决方案,为未来相关领域的研究与实践奠定了坚实的基础。

参考文献

- [1] 陈禹历. 基于无人机的桥梁结构裂缝自动检测及其状态识别与预测[J]. 海峡科技与产业, 2022, 35(06): 70-72+82.
- [2] 罗利刚. 桥梁结构检测常用技术[J]. 交通世界, 2019, (13): 114-115.
- [3] 熊汉江, 杨丽丽. 桥梁结构检测技术研究[J]. 运输经理世界, 2020, (05): 94-96.
- [4] 刘超星. 对桥梁结构检测与加固处理的探究[J]. 黑龙江交通科技, 2019, 42(04): 108-109.
- [5] 罗旭, 梁倬蹇. 无人机在山区桥梁结构健康检测中的应用[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018, 14(10): 280-281.
- [6] 张延林. 分析桥梁检查与桥梁结构的检测技术[J]. 建设科技, 2018, (07): 138.
- [7] 丁兆斌. 桥梁结构检测与评估技术的研究和应用[J]. 科技展望, 2015, 25(08): 41.
- [8] 冯亮洪. 试析桥梁结构检测与加固处理[J]. 中国建材科技, 2013, 22(01): 16-18.