

智能传感技术在结构健康监测中的应用

王锦森

中电投工程研究检测评定中心有限公司，北京市海淀区，100142；

摘要：本论文聚焦智能传感技术于结构健康监测领域的应用，进行系统性探究。智能传感技术融合传感器、微处理器及通信技术，凭借高精度、自适应等特性，在桥梁、建筑、大型机械等结构监测中发挥重要作用。例如，在桥梁监测中，光纤光栅传感器可实时捕捉微米级应变变化；在建筑领域，加速度传感器能精准评估超高层结构抗震性能。其数据处理流程涵盖采集、传输、处理与损伤识别，为结构安全评估提供关键依据。然而，应用过程中面临成本高昂、可靠性不足、数据处理能力受限等挑战，如大型项目中智能传感系统设备采购与维护成本达数百万，沿海环境易致传感器性能下降。未来，该技术将朝着传感器小型化高精度化、数据处理智能化、系统自动化及与物联网深度融合的方向发展，有望为结构健康监测领域带来更广阔的发展空间与技术革新。

关键词：智能传感技术；结构健康监测；数据采集；损伤识别

DOI：10.69979/3029-2727.25.05.048

引言

在现代工程建设领域，各类大型结构如桥梁、建筑、大型机械等，承担着重要的功能与使命，其结构健康状况直接关乎公共安全与经济发展。传统的结构健康监测方法，因监测范围局限、数据精度欠佳、实时性不足等问题，难以满足复杂工程结构的监测需求。智能传感技术凭借高精度、高灵敏度、自适应性强等特性，能够实时、精准地获取结构的应力、应变、振动等关键信息，为结构的安全评估与维护决策提供坚实支撑。本文将系统剖析智能传感技术在结构健康监测中的应用实践，深入探讨其优势、挑战与发展前景。

1 智能传感技术概述

1.1 智能传感技术的定义与原理

智能传感技术并非单一技术，而是传感器技术、微处理器技术与通信技术深度融合的产物。在实际运行过程中，它宛如一位不知疲倦的“数据捕手”，能够自动采集被监测对象的各类物理量，像应力、应变、温度、振动等数据，都在其采集范围之内。智能传感器一般由敏感元件、信号调理电路、微处理器和通信接口构成。敏感元件是“感知者”，负责将被测量转换为电信号；信号调理电路如同“优化师”，对电信号进行放大、滤波等处理；微处理器作为“大脑”，对处理后的信号进行分析判断；通信接口则充当“传递员”，将处理结果传输至监测中心，各部分协同工作，实现数据的采集、处理与传输^[1]。

1.2 智能传感技术的特点

相较于传统传感技术，智能传感技术有着显著的优势。其高精度与高灵敏度，让它能够捕捉到极其微小的物理量变化。在桥梁监测中，哪怕桥梁结构出现微米级的应变变化，智能传感技术也能精准捕捉，为结构健康监测提供精确数据。它的自适应性同样出色，可依据不同的监测环境和要求，自动调整工作参数。在复杂多变的工业环境中，智能传感器能根据温度、湿度等环境因素的变化，自动优化监测参数，确保监测的可靠性。同时，它具备强大的数据处理和分析能力，可实时处理采集到的数据，快速判断结构的健康状态。此外，通信功能使智能传感器能够实现远程监测和控制，打破了空间限制。

1.3 智能传感技术的分类

智能传感技术可依据不同标准进行分类。按测量物理量划分，有应力传感器、应变传感器、温度传感器等；按工作原理区分，则包含电阻式、电容式、压电式、光纤式等类型；不同类型的智能传感器特点各异，适用范围也有所不同^[2]。例如，光纤式传感器因其抗电磁干扰能力强、测量精度高，在电磁环境复杂的桥梁和大型电力设施监测中应用广泛；而压电式传感器，凭借其对动态信号响应快的特点，常用于机械振动监测^[3]。在实际的结构健康监测工作中，需根据具体监测需求，精准选择合适的传感器类型。

2 智能传感技术在结构健康监测中的应用

2.1 桥梁结构健康监测

桥梁作为交通网络的关键节点，其结构健康状况至关重要。智能传感技术在桥梁监测领域发挥着不可替代的作用。在桥梁的关键部位，如桥墩、梁体等安装应力、应变、振动传感器，就如同为桥梁安装了“健康监测卫士”，能够实时监测桥梁的受力状态和振动情况^[4]。2023 年，在杭州湾跨海大桥的维护工程中，就应用了光纤光栅传感器。这些传感器高精度地测量桥梁结构的应变变化，哪怕是因温度变化或车辆荷载引起的微小变形，都能被及时捕捉并反馈。同时，智能传感系统还对桥梁周边的温度、湿度等环境因素进行监测，通过分析环境因素与桥梁结构变化之间的关系，为桥梁的维护和管理提供了科学、全面的依据。

2.2 建筑结构健康监测

在建筑领域，尤其是高层建筑、大跨度建筑等复杂结构中，智能传感技术同样大显身手。智能传感器可以实时监测建筑结构的位移、倾斜、振动等参数，为建筑的安全运行保驾护航。在 2022 年竣工的深圳平安金融中心南塔，就部署了一套先进的智能传感监测系统。系统中的加速度传感器能够敏锐监测建筑在地震、强风等极端荷载作用下的振动响应，通过对振动数据的分析，评估建筑的抗震性能和风致振动安全性。此外，智能传感技术还能对建筑结构的裂缝发展情况进行长期监测，一旦发现裂缝有异常扩展趋势，就能及时发出预警，帮助相关人员发现潜在安全隐患。通过长期的监测和数据分析，还可以为建筑建立详尽的健康档案，实现建筑全寿命周期的精细化管理。

2.3 大型机械结构健康监测

大型机械如起重机、盾构机等是工业生产和工程建设的“得力干将”，其运行状态直接影响工程进度和生产安全。智能传感技术能够对大型机械的关键部件进行精准健康监测。在 2023 年在广州地铁 18 号线北延段建设项目建设中，施工方为盾构机安装了振动传感器和温度传感器。这些传感器可以实时监测盾构机刀盘、轴承等关键部件的运行状态，一旦监测到部件出现异常振动或温度升高，系统就会及时发出警报，提示工作人员部件可能存在磨损、疲劳等故障。同时，智能传感系统还对机械工作环境的温度、湿度、粉尘浓度等进行监测，综合分析环境因素对机械性能的影响。通过这种预防性维护方式，有效减少了机械故障的发生，提高了机械的可靠性和使用寿命。

3 智能传感技术在结构健康监测中的数据处理与分析

3.1 数据采集与传输

数据采集是智能传感技术应用的基础环节。传感器将采集到的物理量转换为电信号，经信号调理电路处理后，传输至数据采集模块。数据采集模块对信号进行数字化处理，并存储数据，为实现实时监测，采集的数据需及时传输到监测中心，目前，有线传输和无线传输是常用的数据传输方式^[5]。有线传输以稳定性高、抗干扰能力强著称，在对数据传输稳定性要求极高的核电站结构监测中，多采用有线传输方式，但它存在布线复杂、成本较高的问题。无线传输则凭借安装方便、灵活性强的优势，在一些难以布线的古建筑结构监测中广泛应用，不过其信号易受干扰、传输距离有限的缺点也不容忽视。在实际应用中，需综合考虑监测环境、成本等因素，选择最合适的数据传输方式。

3.2 数据处理与特征提取

从传感器采集到的原始数据往往夹杂着大量噪声和冗余信息，若直接使用，会影响监测结果的准确性，因此必须进行数据处理和特征提取。数据处理通过滤波、插值、拟合等方法，去除噪声、平滑数据，提升数据质量。以 2023 年武汉杨泗港长江大桥的振动监测数据处理为例，由于车流、水流及环境因素干扰，原始数据呈现出大量不规则波动，犹如杂乱无章的信号“噪点”。技术人员通过傅里叶变换滤波算法，有效剔除了环境噪声干扰，使数据曲线变得平滑清晰，为后续分析奠定基础。

3.3 损伤识别与评估

损伤识别与评估是结构健康监测的核心目标。基于提取的特征参数，可采用多种方法进行损伤识别。基于模型的方法需要先建立结构的力学模型，再通过对比模型响应与实际监测数据来判断损伤。在 2022 年杭州奥体中心体育馆的健康监测项目中，就运用了基于模型的方法，通过建立体育馆的三维力学模型，将实际监测数据代入模型分析，成功发现了部分结构构件的潜在损伤。基于信号处理的方法直接对监测信号进行分析提取损伤特征；基于机器学习的方法则利用大量监测数据训练模型，实现结构损伤的自动识别和评估。随着技术发展，机器学习方法因其高效性和准确性，在损伤识别领域的应用愈发广泛，为结构的维护和修复提供了科学的决策

依据。

4 智能传感技术在结构健康监测中应用面临的挑战

4.1 成本问题

智能传感技术的应用成本是制约其大规模推广的重要因素。一方面，大量传感器和数据采集设备的购置需要高额资金投入；另一方面，传感器的安装和后期维护也需要持续的费用支出。在一些大型桥梁建设项目中，仅智能传感系统的设备采购费用就高达数百万元，加上安装调试和定期维护成本，整体投入巨大。对于一些资金有限的项目来说，这样的成本难以承受。因此，如何通过技术创新降低传感器生产成本，优化系统设计减少设备数量，提高智能传感技术的性价比，成为亟待解决的问题。

4.2 可靠性问题

智能传感系统在长期运行过程中，面临着诸多可靠性挑战。环境因素如高温、高湿、强电磁干扰等，会对传感器性能产生不良影响，导致数据传输中断或数据失真。此外，传感器自身的老化和故障也难以避免，一旦某个关键传感器出现问题，可能会影响整个监测系统的数据准确性和完整性。在一些沿海地区的桥梁监测中，由于长期受海风、盐雾侵蚀，部分传感器出现性能下降的情况，影响了监测数据的可靠性。因此，提高智能传感系统的抗干扰能力，加强传感器的耐久性设计，建立完善的故障诊断和冗余备份机制，是确保系统长期稳定运行的关键。

4.3 数据处理与分析能力问题

随着智能传感技术的不断发展，监测数据呈爆炸式增长，如何高效处理和分析这些海量数据成为一大难题。目前的数据处理和分析方法在处理复杂数据时，存在效率低、准确性不足等问题^[6]。而且，既精通结构工程知识，又擅长数据分析的专业人才相对匮乏，导致很多数据无法得到充分挖掘和利用。在一些大型城市基础设施监测项目中，每天产生的数据量高达数TB，但由于缺乏有效的处理和分析手段，很多有价值的信息被埋没。因此，亟须研究和改进数据处理和分析算法，同时加强相关专业人才的培养，以提高数据处理和分析能力。

5 结论与展望

5.1 结论

智能传感技术在结构健康监测领域展现出了巨大的应用价值，通过实时、准确地获取结构信息，为结构的安全评估和维护决策提供了有力支持。在桥梁、建筑、大型机械等领域的应用实践中，也取得了显著成效。然而，成本过高、可靠性不足、数据处理与分析能力有限等问题，依然制约着智能传感技术的进一步发展和广泛应用。

5.2 展望

展望未来，智能传感技术在结构健康监测领域将迎来新的发展机遇。在传感器技术方面，有望开发出更小型化、高精度、高可靠的传感器，满足复杂环境下的监测需求。数据处理和分析技术将借助机器学习和人工智能的快速发展，实现更高效、准确的数据分析。智能传感系统将朝着智能化、自动化方向迈进，能够自动诊断结构健康状态并提出维护建议。此外，与物联网、云计算等技术的深度融合，将实现结构健康监测的远程化和网络化，让监测数据能够实时共享，为结构的全生命周期管理提供更强大的技术支撑。随着这些技术的不断进步，智能传感技术在结构健康监测领域的应用前景将更加广阔。

参考文献

- [1] 谢百煌, 李旭辉. 基于物联网和传感器技术的电网二次设备信息智能移动系统[J]. 制造业自动化, 2023, 45(08): 12-16+27.
- [2] 何义华. 智能传感技术与应用[J]. 电子技术, 2022, 51(12): 188-189.
- [3] 刘芹, 贾连芹, 闫青. 智能传感技术及应用研究[J]. 电子世界, 2020, (21): 171-172.
- [4] 赵亮. 基于大数据的桥梁结构健康监测技术研究[J]. 交通世界, 2025, (09): 129-131.
- [5] 李君. 智能传感技术在桥梁结构健康监测中的应用研究[J]. 智能建筑与智慧城市, 2024, (11): 167-169.
- [6] 姚小杰. 智能传感技术在机电系统监测与保护中的应用研究[C]//广西网络安全和信息化联合会. 第一届工程技术管理与数字化转型学术交流会论文集. 陕西北斗恒星科技发展有限公司; , 2024: 120-123.

作者简介: 王锦森, 出生年月: 1986.03, 性别: 男, 民族: 汉族, 籍贯: 河南周口, 学历: 硕士研究生, 已取得职称: 高级工程师, 研究方向: 建筑结构安全鉴定等。