

长大桥梁健康监测系统现状及未来发展趋势

郅修明 李 阳

陕西高速公路工程试验检测有限公司 陕西 西安 710086

摘 要：长大桥梁健康监测系统，包含传感器、数据采集传输、处理分析、预警决策支持等子系统。如今，国内外众多长大桥梁已广泛应用，在传感器精度、数据传输、智能算法及预警决策上成绩显著。然而，它也存在监测体系不完善、数据管理难、评估模型有局限、建设维护成本高的问题。未来，系统将朝着多源融合、智能管控、全寿命周期运维等方向发展，以提升性能，保障桥梁安全。

关键词：长大桥梁；健康监测；系统现状；未来发展趋势

引言

伴随交通基建持续拓展，长大桥梁成为跨越复杂地貌的关键设施。因其结构复杂、投资巨大且服役期漫长，安全与可靠性至关重要。长大桥梁健康监测系统通过实时监测应力、变形、振动等物理量并深度分析数据，能精准洞察结构潜在病害与隐患，为桥梁维护、管理与决策筑牢科学根基。故而，深入探究其现状与未来走向，对确保桥梁稳固、推动交通事业蓬勃发展意义深远。

1 长大桥梁健康监测系统的构成

1.1 传感器子系统

传感器是健康监测系统获取桥梁结构状态信息的关键部件。常见的传感器类型包括应变传感器，用于测量桥梁结构的应力应变情况，以了解结构在荷载作用下的力学响应；位移传感器，可精确监测桥梁的线性位移和转角位移，反映结构的变形状态；加速度传感器则用于捕捉桥梁的振动特性，通过分析振动数据评估结构的动力性能。此外，还有温度传感器、湿度传感器等环境传感器，用于监测桥梁所处环境因素的变化，因为环境因素对桥梁结构的性能也有着不可忽视的影响。传感器的性能直接决定了监测数据的准确性和可靠性，近年来，随着传感器技术的不断发展，新型传感器不断涌现，如光纤传感器，具有抗电磁干扰、精度高、可分布式测量等优点，在长大桥梁健康监测中得到了越来越广泛的应用。

1.2 数据采集与传输子系统

数据采集系统负责按照预定的采样频率和时间间隔，对传感器输出的信号进行采集和数字化处理。为了确保数据的完整性和准确性，采集系统需要具备高精度的A/D转换功能以及可靠的时钟同步机制。数据传输子系统则将采集到的数据实时传输到数据处理中心。传输

方式主要有有线传输和无线传输两种。有线传输如以太网、光纤等，具有传输速率高、稳定性好的优点，但在桥梁现场布线较为复杂，维护成本较高。无线传输技术如蓝牙、Wi-Fi、4G/5G等则具有安装便捷、灵活性强特点，尤其适用于对布线困难的区域进行数据传输。随着通信技术的飞速发展，5G技术凭借其超高的传输速率、超低的延迟和大规模设备连接能力，为桥梁健康监测数据的高效传输提供了更有力的支持，有望实现海量监测数据的实时、稳定传输。

1.3 数据处理与分析子系统

数据处理与分析是健康监测系统的核心环节。数据处理部分首先对采集到的原始数据进行滤波、去噪、异常值剔除等预处理操作，以提高数据质量，为后续分析提供可靠的数据基础。数据分析则运用多种方法对处理后的数据进行深入挖掘。常用的分析方法包括统计分析，通过计算数据的均值、方差、极值等统计特征，对桥梁结构的状态进行初步评估；模态分析，用于识别桥梁结构的固有频率、振型等模态参数，通过监测这些参数的变化来判断结构的健康状况；结构力学分析，基于结构力学原理和有限元模型，对桥梁在各种荷载工况下的力学响应进行模拟分析，并与实测数据进行对比，从而评估结构的工作性能。此外，随着人工智能技术的发展，机器学习、深度学习等智能算法也逐渐应用于桥梁健康监测数据的分析，如利用神经网络进行结构损伤识别和状态预测，能够提高分析的准确性和效率，为桥梁健康监测提供更智能的解决方案。

1.4 预警与决策支持子系统

预警子系统根据数据分析结果，当发现桥梁结构状态参数超出预设的安全阈值时，及时发出预警信号^[1]。预警级别通常分为多个等级，以提醒管理人员采取相应的措施。决策支持子系统则为桥梁的维护管理决策提供科

学依据。它通过对监测数据的长期分析和评估,结合桥梁的设计资料、历史维护记录等信息,运用决策模型和专家系统,为管理人员提供桥梁维护计划制定、维修方案选择、结构加固决策等方面的建议,以实现桥梁的科学管理和高效维护,保障桥梁结构的长期安全运营。

2 长大桥梁健康监测系统的现状

2.1 系统应用情况

目前,国内外众多长大桥梁都已安装了健康监测系统。在国内,像苏通长江大桥、港珠澳大桥等标志性桥梁,其健康监测系统涵盖了全面的监测参数和先进的技术手段,对桥梁结构的安全运营起到了重要的保障作用。这些系统能够实时监测桥梁在车辆荷载、风荷载、温度变化等多种因素作用下的结构响应,为桥梁的日常维护和管理提供了丰富的数据支持。在国外,如日本的明石海峡大桥、丹麦的大贝尔特桥等也都拥有成熟的健康监测系统,经过多年的运行和不断完善,积累了大量宝贵的监测数据和实践经验。总体而言,健康监测系统在长大桥梁工程中的应用已较为普遍,成为保障桥梁安全的重要基础设施。

2.2 技术水平现状

(1) 传感器技术。传感器的精度、可靠性和耐久性不断提高。除了传统的传感器类型不断改进外,新型传感器不断涌现并应用于实际工程。例如,分布式光纤传感器能够实现对桥梁结构沿长度方向的连续监测,获取更全面的结构状态信息,其测量精度和稳定性已达到较高水平。同时,微机电系统传感器由于具有体积小、成本低、功耗低等优点,在桥梁振动监测等方面也得到了广泛应用。(2) 数据采集与传输技术。数据采集设备的采样频率和精度能够满足大多数桥梁监测的需求,并且具备良好的抗干扰能力。在数据传输方面,有线与无线传输技术相互补充,共同构建稳定可靠的数据传输网络。特别是无线通信技术的快速发展,使得远程、实时的数据传输更加便捷高效。一些先进的监测系统已经实现了通过4G/5G网络将监测数据实时传输至云端服务器,方便用户随时随地进行数据访问和管理。(3) 数据处理与分析技术。传统的数据处理与分析方法已较为成熟,能够对监测数据进行常规的处理和分析,为桥梁状态评估提供基本依据。近年来,随着人工智能技术的发展,机器学习、深度学习等智能算法在桥梁健康监测领域的应用取得了显著进展。通过对大量历史监测数据的学习和训练,智能算法能够自动识别桥梁结构的损伤模式和特征,实现更准确的结

构健康评估和病害预测,提高了监测系统的智能化水平。

(4) 预警与决策支持技术。预警指标体系和阈值的确定

逐渐科学化、规范化,能够根据桥梁结构的特点和实际运行情况制定合理的预警规则^[2]。决策支持系统也在不断完善,通过融合多源数据和先进的决策模型,能够为桥梁维护管理提供更具针对性和可操作性的决策建议,辅助管理人员做出科学合理的决策。

2.3 存在的问题

(1) 监测系统的完整性和可靠性有待提高。部分桥梁的健康监测系统存在传感器布置不合理、监测参数不全面的问题,导致无法全面准确地反映桥梁结构的真实状态。此外,传感器故障、数据传输中断等情况时有发生,影响了监测系统的可靠性和数据的连续性。(2) 数据管理与共享困难。随着监测数据的不断积累,数据量呈指数级增长,如何有效地管理和存储这些海量数据成为一个难题。同时,由于不同部门和单位之间的数据格式不统一、接口不兼容等原因,导致数据共享困难,无法充分发挥监测数据的价值。(3) 健康评估模型的准确性和适应性不足。目前的桥梁健康评估模型大多基于特定的结构类型和工况条件建立,其通用性和适应性有限。当桥梁结构发生复杂的病害或处于特殊的运行环境时,现有的评估模型可能无法准确地评估结构的健康状况,导致评估结果与实际情况存在偏差。(4) 系统建设和维护成本高。长大桥梁健康监测系统的建设需要投入大量的资金用于传感器采购、设备安装、软件开发等方面。在系统运行过程中,还需要定期对传感器进行校准和维护,对数据进行处理和分析,这些都增加了系统的维护成本。对于一些资金有限的地区或单位来说,高昂的建设和维护成本可能会影响健康监测系统的推广和应用。

3 长大桥梁健康监测系统的未来发展趋势

3.1 多源数据融合与智能感知

除了传统的结构响应监测数据外,还将融合卫星定位数据、地理信息数据、气象数据、交通流量数据等多源信息,从更全面的角度反映桥梁的运行状态。通过建立多源数据融合模型,能够充分挖掘不同类型数据之间的内在联系,提高监测系统对桥梁结构健康状况的感知能力。同时,随着物联网技术的发展,大量的智能感知设备将应用于桥梁监测领域,实现对桥梁结构及周边环境的全方位、实时、智能感知,为桥梁健康监测提供更丰富、准确的数据支持。

3.2 基于大数据与人工智能的监测与评估

通过对海量监测数据的存储、管理和快速检索,利用大数据分析技术能够挖掘数据中的潜在规律和特征,发现传统方法难以察觉的结构病害迹象。人工智能技术,特别是深度学习算法,将进一步提升桥梁健康监测

系统的智能化水平。深度学习模型能够自动学习桥梁结构在不同工况下的复杂特征,实现高精度的结构损伤识别、病害预测和健康评估。例如,利用卷积神经网络对桥梁结构的图像数据进行分析,可快速检测结构表面的裂缝等病害;基于循环神经网络的时间序列预测模型能够对桥梁结构的关键参数进行准确预测,提前预警潜在的安全风险。

3.3 全寿命周期监测与管理

从桥梁的规划设计阶段开始,就将健康监测系统纳入整体考虑,实现对桥梁全寿命周期的监测与管理^[3]。在设计阶段,通过模拟分析为监测系统的传感器布置和监测参数选择提供优化方案,确保监测系统能够全面准确地反映桥梁在不同阶段的结构状态。在施工阶段,利用监测系统对桥梁的施工过程进行实时监控,保障施工安全和质量,同时为后续的运营监测积累数据和经验。在运营阶段,持续的监测数据将为桥梁的维护管理提供科学依据,根据结构的实际健康状况制定合理的维护计划,延长桥梁的使用寿命。通过全寿命周期监测与管理,实现桥梁工程的全生命周期价值最大化。

3.4 监测系统的智能化与自动化

智能化体现在系统能够自动识别桥梁结构的状态变化、诊断病害原因,并根据预设的策略自动采取相应的措施,如启动备用监测设备、调整预警级别等。自动化则表现在数据采集、传输、处理和分析的全过程无需人工干预,能够按照预定的程序自动运行。例如,利用智能传感器实现数据的自动采集和预处理,通过自动化的数据传输网络将数据实时传输至数据处理中心,采用自动化的数据分析软件对数据进行快速准确的分析,并生成可视化的监测报告和决策建议,大大提高了监测系统的运行效率和管理水平。

3.5 远程监测与云平台应用

随着互联网和云计算技术的发展,远程监测将成为长大桥梁健康监测的主要方式之一。通过云平台,用户可以随时随地通过互联网访问桥梁的监测数据和分析结果,实现对桥梁的远程监控和管理。云平台还能够提供

强大的计算和存储能力,支持大规模监测数据的实时处理和长期存储。同时,基于云平台的桥梁健康监测系统便于实现不同地区、不同部门之间的数据共享和协同工作,促进桥梁健康监测技术的交流与发展,为桥梁的跨区域管理和维护提供便利。

3.6 监测系统的标准化与规范化

为了提高长大桥梁健康监测系统的质量和可靠性,促进监测技术的推广和应用,制定统一的监测系统标准和规范势在必行。未来将在传感器选型与安装、数据采集与传输、数据处理与分析、健康评估方法、预警指标与阈值等方面建立完善的标准体系,使不同桥梁的健康监测系统具有可比性和兼容性^[4]。标准化和规范化的监测系统将有助于提高系统建设和维护的效率,降低成本,同时也为监测数据的质量控制和管理提供依据,保障桥梁健康监测工作的科学、有序开展。

结束语

总体而言,长大桥梁健康监测系统已历经发展并取得一定成绩,在技术与应用层面均有突破。但现存问题不容忽视,严重阻碍其进一步发展。为紧跟多源数据融合、智能化变革等未来趋势,需加大研发资源投入,全力促进技术创新与落地实践,全面完善系统各个环节。唯有如此,才能为长大桥梁安全运营保驾护航,助力交通运输事业稳健前行,更好契合社会发展需求。

参考文献

- [1]杨建喜,张利凯,李韧等.联合卷积与长短记忆神经网络的桥梁结构损伤识别研究[J].铁道科学与工程学报,2020,17(08):1893-1902.
- [2]赵煜,李冉冉,周勇军等.基于BP神经网络的桥梁移动荷载识别精度[J].科学技术与工程,2021,21(15):6446-6453.
- [3]唐启智,辛景舟,周建庭等.基于AR-GP模型的结构损伤识别方法[J].振动与冲击,2021,40(09):102-109.
- [4]王海波,叶如珊,杜武.一种基于EMD和小波阈值的桥梁振动信号混合去噪方法[J].公路,2021,66(12):110-116.