

道路桥梁结构健康监测与评估技术研究

文 / 刘 澍 山东省高速养护集团有限公司

李道秀 济南齐鲁建设项目管理有限责任公司

刁俊才 华安检测集团有限公司

摘要：本文深入研究了道路桥梁结构健康监测与评估技术，首先介绍了研究背景与意义，概述了国内外在该领域的研究现状。接着，详细阐述了道路桥梁结构健康监测技术的分类、原理、系统组成与功能，以及关键技术，包括结构参数监测技术、荷载与环境参数监测技术等。在此基础上，探讨了道路桥梁结构健康评估方法，包括数据处理与分析技术、损伤识别与状态评估等。通过国内外实际案例的分析，展示了健康监测技术在道路桥梁安全管理中的应用效果。最后，展望了道路桥梁结构健康监测技术的未来发展趋势，指出了智能化与自动化监测技术的发展方向，并提出了监测技术面临的挑战与对策。本研究旨在为道路桥梁结构健康监测与评估技术的发展提供理论支持和实践指导，提高道路桥梁的安全性和耐久性。

关键词：道路桥梁；结构健康监测；评估技术；传感器技术；数据分析；智能化监测

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.13.046

引言

研究背景：随着城市化进程的加速和交通需求的不断增长，道路桥梁作为重要的交通基础设施，其建设规模日益扩大，结构形式也日趋复杂。然而，在长期运营过程中，道路桥梁结构受到自然环境、交通荷载等多种因素的影响，容易出现各种损伤和病害，严重威胁着道路交通安全和人民生命财产安全。因此，对道路桥梁结构进行健康监测与评估，及时发现并处理潜在的安全隐患，已成为当前交通工程领域亟待解决的重要课题。

研究意义：开展道路桥梁结构健康监测与评估技术研究，不仅可以提高道路桥梁的安全性和耐久性，降低事故发生风险，还可以为道路桥梁的养护管理提供科学依据，延长其使用寿命，降低维护成本。同时，该技术的研究和应用还有助于推动交通工程领域的科技进步和创新发展，具有重要的理论价值和实际意义。

一、道路桥梁结构健康监测技术概述

（一）健康监测技术的基本概念

健康监测技术，是指通过一系列先进的传感器、数据采集与处理系统，对道路桥梁结构的运行状态进行实时监测、分析和评估的技术手段。它旨在及时发现结构损伤、预测结构性能退化趋势，为结构的维护管理提供科学依据。

（二）健康监测技术的分类与原理

1. 分类

道路桥梁结构健康监测技术主要可分为结构参数监测、荷载与环境参数监测两大类。结构参数监测：主要关注结构的位移、变形、应力、应变等内部参数，通过监测这些参数的变化，可以反映结构的整体健康状况。荷载与环境参数监测：则关注作用于结构上的外部荷载（如交通荷载、风荷载等）以及环境因素（如温度、湿度、腐蚀等）的变化，这些因素对结构的长期性能有着重要影响。

2. 原理

健康监测技术的核心在于传感器技术的应用。传感

器能够实时捕捉结构参数的微小变化，并将这些变化转换为电信号或其他可测量的物理量。随后，通过数据采集系统将这些信号进行收集、存储和传输，再经过数据处理与分析软件的处理，最终得到结构健康状况的评估结果。

（三）健康监测系统的组成与功能

1. 组成

道路桥梁结构健康监测系统通常由传感器网络、数据采集与处理系统、数据传输与存储系统、数据分析与评估系统以及用户界面等部分组成。

传感器网络：负责实时监测结构参数和荷载与环境参数。**数据采集与处理系统：**负责收集传感器数据，并进行初步的处理和滤波，以去除噪声和干扰。**数据传输与存储系统：**负责将处理后的数据实时传输至远程服务器或数据中心，并进行长期存储。**数据分析与评估系统：**利用先进的算法和模型，对收集到的数据进行深入分析，以识别结构损伤、预测性能退化趋势等。**用户界面：**为用户提供直观、易用的操作界面，方便用户查看和分析监测数据。

2. 功能

健康监测系统的主要功能包括实时监测、预警报警、数据分析与评估以及决策支持等。通过实时监测，可以及时发现结构的异常变化；通过预警报警，可以在结构出现严重损伤前及时采取措施；通过数据分析与评估，可以深入了解结构的健康状况和性能退化规律；通过决策支持，可以为结构的维护管理提供科学依据。

三、道路桥梁结构健康监测的关键技术

（一）传感器技术

1. 传感器的作用与分类

传感器技术是道路桥梁结构健康监测的核心。传感器能够实时捕捉结构参数的微小变化，如位移、变形、应力、应变等，并将这些变化转换为电信号或其他可测量的物理量，为后续的数据处理与分析提供基础。根据监测对象的不同，传感器可分为位移传感器、加速度传感器、应力应变传感器、温度传感器等。

2. 传感器技术的发展趋势

随着科技的进步，传感器技术正朝着高精度、高灵敏度、低功耗、智能化等方向发展。例如，光纤传感器因其抗电磁干扰、耐腐蚀、长距离传输等优点，在桥梁健康监测中得到了广泛应用。此外，智能传感器的发展也使得传感器能够具备自诊断、自校准等功能，提高了监测的准确性和可靠性。

(二) 数据采集与传输技术

1. 数据采集技术

数据采集技术是将传感器捕捉到的信号进行收集、转换和存储的过程。在桥梁健康监测中，数据采集系统需要能够实时、准确地采集传感器数据，并将其转换为数字信号进行存储和传输。为了提高数据采集的效率和准确性，通常采用多路复用技术、模数转换技术等。

2. 数据传输技术

数据传输技术是将采集到的数据从传感器或数据采集系统传输至远程服务器或数据中心的过程。在桥梁健康监测中，数据传输技术需要保证数据的实时性、完整性和安全性。常用的数据传输方式包括有线传输和无线传输。无线传输因其灵活性高、易于部署等优点，在桥梁健康监测中得到了广泛应用。

(三) 数据处理与分析技术

1. 数据处理技术

数据处理技术是对采集到的数据进行预处理、滤波、

降噪等处理，以提高数据的准确性和可靠性。在桥梁健康监测中，常用的数据处理技术包括信号处理技术、数字滤波技术、模式识别技术等。这些技术能够去除数据中的噪声和干扰，提取出有用的结构状态信息。

2. 数据分析技术

数据分析技术是对处理后的数据进行深入分析，以识别结构损伤、预测性能退化趋势等。在桥梁健康监测中，常用的数据分析技术包括统计分析、机器学习、深度学习等。这些技术能够利用历史数据和实时监测数据，建立结构健康评估模型，对结构的健康状况进行定量评估。

(四) 损伤识别与预警技术

1. 损伤识别技术

损伤识别技术是通过分析处理后的数据，识别出结构中的损伤位置和程度。在桥梁健康监测中，常用的损伤识别技术包括基于振动的损伤识别、基于声发射的损伤识别等。这些技术能够利用结构振动、声发射等信号的变化，判断结构中是否存在损伤以及损伤的位置和程度。

2. 预警技术

预警技术是在识别出结构损伤后，根据损伤程度和发展趋势，及时发出预警信号，以便采取相应措施进行修复或加固。在桥梁健康监测中，预警技术通常与数据分析技术相结合，通过设定预警阈值、建立预警模型等方式，实现对结构健康状况的实时监测和预警。

(五) 数据表格示例

技术类别	技术名称	性能指标
传感器技术	位移传感器	精度：±0.1mm；测量范围：0-1000mm
	加速度传感器	精度：±0.01g；测量范围：±10g
数据采集与传输技术	有线传输	传输速率：1Mbps；传输距离：1000m
	无线传输	传输速率：2.4GHz；传输距离：500m
数据处理与分析技术	信号处理技术	滤波效果：≥90%；降噪效果：≥80%
	机器学习算法	准确率：≥95%；训练时间：≤1小时
损伤识别与预警技术	基于振动的损伤识别	识别准确率：≥90%；预警时间：≤1小时
	预警模型	预警准确率：≥98%；误报率：≤2%

四、道路桥梁结构健康评估方法

(一) 基于可靠度的评估方法

1. 方法概述

基于可靠度的评估方法是通过计算结构的失效概率来评估其健康风险。该方法考虑了结构材料、几何尺寸、荷载等因素的不确定性，以及这些因素对结构性能的影响。通过构建结构的极限状态方程，可以确定结构的极限荷载、临界荷载和临界强度，进而得出相应的失效概率、可靠度及可靠性指标。

2. 评估流程

(1) 收集数据：包括结构的设计资料、施工记录、历史监测数据等。

(2) 建立模型：根据收集的数据，建立结构的仿真模型。

(3) 确定极限状态：根据规范或经验，确定结构的极限状态。

(4) 计算失效概率：利用概率统计方法，计算结构在给定荷载和环境条件下的失效概率。

(5) 评估结果：根据失效概率的大小，评估结构的健康风险。

(二) 基于性能的评估方法

1. 方法概述

基于性能的评估方法通过分析结构在极端事件（如地震、强风等）下的性能表现来评估其健康风险。该方法更侧重于结构的整体性能和功能，而不仅仅是结构的强度或稳定性。

2. 评估流程

(1) 确定性能目标：根据结构的用途和重要性，确定其在极端事件下的性能目标。

(2) 建立性能模型：利用有限元分析等方法，建立结构的性能模型。

(3) 施加极端荷载：在模型中施加模拟的极端荷载，分析结构的响应。

(4) 评估性能：根据结构的响应，评估其是否满足性能目标。

(5) 提出改进建议：如果结构不满足性能目标，提出相应的改进建议。

(三) 基于专家系统的评估方法

1. 方法概述

基于专家系统的评估方法借助专家的知识 and 经验，通过模拟专家的决策过程来评估结构的健康风险。该方法结合了人工智能技术和专家经验，能够处理复杂的评估问题。

2. 评估流程

(1) 知识获取：从专家那里获取关于结构评估的知识和经验。

(2) 建立知识库：将获取的知识和经验整理成知识库，供评估系统使用。

(3) 输入数据：将待评估结构的相关数据输入评估系统。

(4) 模拟决策过程：利用知识库中的知识和经验，模拟专家的决策过程，得出评估结果。

(5) 输出结果：将评估结果以易于理解的方式呈现给用户。

(四) 数据表格示例

以下是一个简单的数据表格示例，展示了道路桥梁结构健康评估过程中的部分关键数据：

评估方法	评估指标	评估值	评估标准
基于可靠度的评估	失效概率	0.001	≤ 0.01 (可接受范围)
	可靠度指标	4.5	≥ 4.0 (合格标准)
基于性能的评估	最大位移	10mm	≤ 20mm (允许范围)
	残余变形	2mm	≤ 5mm (允许范围)
基于专家系统的评估	专家评分	85分	≥ 80分 (合格标准)
	维修建议	加固桥梁支座	-

道路桥梁结构健康评估方法的选择应根据结构的实际情况、评估目的和可用资源来确定。基于可靠度、性能和专家系统的评估方法各有优缺点，可以相互补充，共同为道路桥梁结构的安全、可靠运行提供有力保障。通过科学的评估方法和准确的数据分析，我们可以及时发现结构中的潜在问题，并采取相应的措施进行修复或加固，从而确保交通基础设施的长期稳定运行。

五、道路桥梁结构健康监测的实际应用案例

(一) 桥梁温度监测与融雪除冰应用

1. 案例背景

在某地区，持续性低温雨雪冰冻天气对桥梁通行安全构成了严重威胁。为了保障群众出行安全，该地区采用了桥梁结构健康监测系统，实时监测桥面铺装层温度，为融雪除冰应急处置提供科学决策依据。

2. 监测内容与效果

通过桥梁结构健康监测系统，实时监测了桥面铺装层的温度数据。在低温雨雪冰冻天气期间，系统准确捕捉到了桥面温度的变化趋势，为管养单位提供了及时、准确的桥面通行情况信息。根据系统提供的数据，管养单位科学研判和调度，及时高效地进行除雪、除冰工作，有效保障了桥梁的通行安全。

该案例表明，桥梁结构健康监测系统在低温雨雪冰冻天气下，能够实时监测桥面温度，为融雪除冰应急处置提供科学依据，有效提升了桥梁的通行安全性和可靠性。

(二) 主梁竖向位移监测与超载控制应用

1. 案例背景

某大桥位于交通繁忙的通道上，重载货车通行频次高，对桥梁结构安全构成了严重威胁。为了保障桥梁的安全运行，该地区采用了轻量化监测系统，实时监测主梁竖向位移，有效控制超载现象。

2. 监测内容与效果

通过轻量化监测系统，实时监测了主梁的竖向位移

数据。系统准确捕捉到了重载货车通行时主梁的位移变化，为交通执法部门提供了及时、准确的执法依据。根据系统提供的数据，交通执法部门加大了对重载货车通行时间段的执法力度，使超载现象得到了有效控制，保障了桥梁的安全运行。

该案例表明，桥梁结构健康监测系统在重载货车通行频次高的桥梁上，能够实时监测主梁竖向位移，为交通执法部门提供科学依据，有效控制超载现象，提升了桥梁的安全性和耐久性。

结语

随着我国交通基础设施建设的快速发展，道路桥梁的安全性、可靠性和耐久性日益受到广泛关注。通过对“道路桥梁结构健康监测与评估技术研究”的深入探讨，我们不仅梳理了相关的监测技术和评估方法，还通过实际应用案例展示了这些技术在保障桥梁安全中的重要作用。从传感器技术到数据采集与传输，再到数据处理与分析，以及损伤识别与预警，每一步都为桥梁健康监测提供了坚实的支撑。同时，基于可靠度、性能和专家系统的评估方法，为桥梁健康评估提供了多元化的视角和科学依据。未来，随着监测技术的不断进步和评估方法的进一步完善，我们有理由相信，道路桥梁结构健康监测与评估技术将更好地服务于交通基础设施的长期稳定运行，为人民群众的安全出行提供更加坚实的保障。

参考文献

[1] 李强, 张伟. 道路桥梁结构健康监测技术综述 [J]. 公路交通科技, 2018, 35 (5): 1-10.
 [2] 王立, 刘洪涛. 基于可靠度理论的桥梁结构健康评估方法研究 [J]. 土木工程与管理学报, 2019, 16 (2): 55-61.
 [3] 张军, 刘海鹰. 道路桥梁结构健康监测系统设计及实现 [J]. 电子测量技术, 2020, 43 (10): 27-32.
 [4] 陈小明, 赵永彪. 基于智能算法的桥梁结构损伤识别技术研究 [J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 38 (2): 24-30.