

Research on Bridge Structural Health Monitoring Based on Time Series

Senming Wu

School of Civil and Transportation Engineering, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong, 510006, China

Abstract

Bridge structural health monitoring is very important to ensure bridge safety and extend bridge service life. The main purpose of this study is to explore the principle, technique and application of time series-based structural health monitoring. At present, the bridge structural health monitoring method based on time series mainly collects structural vibration signals in real time by deploying sensors in the bridge structure, and inputs the collected data signals into the machine learning and deep learning models to achieve dynamic assessment of the bridge health status. The results show that this method not only provides a new method for the health status assessment of Bridges, but also points out the for directionthe future development in the field of structural health monitoring. At the same time, it also shows the application potential of time series analysis and artificial intelligence technology in the field of bridge structural health monitoring, and provides a new idea for technological innovation and progress in this field.

Keywords

structural health monitoring; time series; sensor

基于时间序列的桥梁结构健康监测研究

吴森明

广州大学土木与交通工程学院, 中国·广东 广州 510006

摘要

桥梁结构健康监测对于确保桥梁安全和延长使用寿命至关重要。本研究的主要目的是深入探讨基于时间序列的结构健康监测方法的原理、技术和应用。目前, 基于时间序列的桥梁结构健康监测方法主要是通过部署传感器, 实时采集结构振动信号, 并将采集的数据信号输入到机器学习和深度学习的模型当中, 以实现桥梁健康状况的动态评估。结果表明, 该方法不仅为桥梁的健康状况评估提供了新的手段, 也为结构健康监测领域的未来发展指明了方向。同时, 它也展现了时间序列分析与人工智能技术在桥梁结构健康监测领域的应用潜力, 为该领域的技术创新和进步提供了新的思路。

关键词

结构健康监测; 时间序列; 传感器

1 引言

桥梁结构肩负着经济发展的重任。然而, 随着时间的推移和使用频率的增加, 桥梁的安全性和稳定性逐渐受到威胁。根据统计数据, 全球每年因桥梁结构损伤引发的事故不在少数, 这不仅导致了经济损失, 更直接影响了人民的生命安全。尽管桥梁具备特定的设计寿命, 在实际使用中, 环境条件、材料老化及交通荷载等因素会导致其性能逐步劣化^[1]。

因此, 论文的主要目的是通过探讨基于时间序列的桥梁结构健康监测研究, 分析其在实际监测中的应用效果, 以及如何利用这一技术提高桥梁安全性与管理效率。同时, 希望为未来桥梁监测技术的发展提供参考与借鉴, 进一步推动桥梁基础设施在安全管理方面的创新与进步。

【作者简介】 吴森明 (1998-), 男, 中国广东肇庆人, 在读硕士, 从事结构健康监测研究。

2 结构健康监测的背景

2.1 桥梁的功能与安全性

桥梁是现代交通基础设施的重要组成部分, 其主要功能是跨越障碍物, 如河流、峡谷或其他交通网络, 连接不同区域, 促进人流、物流和信息流的畅通。桥梁不仅在城市和乡村的交通网络中发挥着关键作用, 还对经济发展、社会交流及文化传播具有深远影响。无论是高速公路上的高架桥, 还是城市道路上的小型人行天桥, 它们都在不同的使用场景下, 为人们的日常生活和商业活动提供了便利。

桥梁的安全性至关重要。由于桥梁经常承受交通荷载, 包括车辆、行人以及自然环境所带来的动态压力, 如风、雨和地震等, 因此其设计和施工必须遵循严格的工程标准和规范。桥梁的设计不仅要确保其能够承受预期的荷载, 还要考虑材料的物理特性、气候变化对结构的影响以及长期使用中的疲劳性。质量不过关的桥梁不仅可能导致结构损坏, 甚至

可能发生桥梁倒塌等严重事故,从而造成重大经济损失和人员伤亡^[2]。

2.2 传统的结构健康监测方法的局限性

传统方法通常使用少量的离散监测点来获取结构的信息。该方法只能提供有限的信息,无法全面了解结构的整体状况。因此,可能会错过一些潜在的问题或损伤。传统监测方法通常需要人工操作或周期性的数据采集,无法实现实时监测,就意味着无法及时发现结构的变化情况,尤其是在动态载荷下的响应。对于需要及时反馈的应急情况,传统方法可能不够迅速和准确。传统方法生成的数据量大且复杂,需要进行大量的数据处理和分析,对于维护人员和工程师而言,则需要更多的时间和精力,并且可能导致信息的遗漏或误判。传统方法通常需要昂贵的设备和人力资源来进行监测和数据收集,使得传统结构健康监测方法在成本方面具有挑战性,尤其是在大型结构监测需求的情况下。传统方法在监测过程中容易受到环境条件和外部干扰的影响,如温度变化、风力等因素会对监测结果产生一定的干扰,则可能导致误判或不准确的评估。传统方法往往只关注特定的结构参数或局部区域,无法提供对整个结构的全面监测,则可能导致对结构整体状况的理解不够充分,难以及时发现潜在的问题。

2.3 新型结构健康监测技术的崛起

首先是传感器技术的突破。现代传感器技术能够实现高精度和高灵敏度的数据采集,能够在桥梁的各个关键部位部署多种传感器,如应变传感器、位移传感器和温度传感器等。这些传感器能够实时监测桥梁的应力、位移和温度等参数,为结构健康监测提供可靠的数据基础。

其次,物联网技术的应用使得桥梁结构健康监测变得更加智能和互联。通过将大量传感器接入网络,监测数据可以被实时传输和存储,实现集中管理和远程监控。这种技术的集成应用不仅提高了数据收集的速度和效率,还使得监测数据更加及时和准确。

大数据分析技术则为桥梁结构健康监测提供了强大的数据支持。通过对海量监测数据的分析和挖掘,可以揭示桥梁的结构变化规律和损伤模式,从而实现对桥梁健康状况的深入理解。数据挖掘、机器学习和深度学习等技术的应用,使桥梁健康监测能够自动识别异常模式,提高预测和预警的准确性。

此外,云计算与边缘计算技术的结合为桥梁结构健康监测提供了灵活的数据处理能力。云计算平台能够处理和分析大规模数据集,而边缘计算则允许在数据源附近进行实时数据处理,减少数据传输的延迟和成本。

最后,智能监控系统的应用使得桥梁监测更加自动化和智能化。通过视频监控和图像识别等技术,可以实现对桥梁外观损伤的自动检测,结合结构监测数据,可以提供更加全面的监测信息。

3 基于时间序列的特征提取与应用模型

3.1 时间序列的定义和常见的特征提取方法

在结构健康监测中,时间序列分析被广泛应用于评估和预测结构的健康状态。时间序列分析是一种研究随时间变化而变化的数据的统计方法,它通过对结构物的振动、应力、位移等数据进行分析,能够提供有关结构健康状况的重要信息。常见的时间序列特征提取方法有自相关、频谱分析、小波分析等,自相关是指时间序列与滞后版本之间的相关性。通过计算不同滞后值的自相关系数,可以获取时间序列的周期性和相关性信息。自相关函数通常用于检测时间序列中的周期性变化,并估计时间序列的周期或频率。频谱分析是将时间序列转换到频域,以研究其中的频率成分。通过应用傅里叶变换或其他频谱分析方法,可以将时间序列表示为频谱图,显示不同频率上的能量分布情况。频谱分析可以揭示时间序列中的主要频率成分,帮助识别周期性和周期性变化。小波分析是一种多尺度分析方法,可以将时间序列分解为不同尺度的成分。通过应用小波变换,可以提取时间序列中不同尺度上的信号特征。小波分析适用于捕捉时间序列中的突变、局部特征和跨尺度的变化。

除了上述方法,还可以通过计算时间序列的统计参数来提取特征。常见的统计参数包括均值、方差、标准差、偏度和峰度等。从各种参数中可以得到有关时间序列的集中趋势、离散程度和分布形状的信息。

3.2 基于机器学习的时序模型

在结构健康监测领域,常见的机器学习模型包括随机森林、支持向量机、朴素贝叶斯和 K 最近邻等^[3]。随机森林作为一种集成学习算法,能够有效处理高维数据,尤其适合于时间序列特征的提取与分类。该算法通过组合多个决策树,可以实现对复杂时间序列模式的高效识别和预测。支持向量机是一种强大的分类算法,以寻找最佳超平面为基础,旨在区分不同类别的数据。在时间序列分析中,支持向量机被广泛应用于异常值识别、未来趋势预测以及不同类型的结构损伤分类。其在处理非线性问题方面尤为有效,特别在数据维度较高的情况下,能够显著提高模型分类精度。朴素贝叶斯分类器,则基于贝叶斯定理和特征条件独立假设进行分类。该算法在文本分类和异常检测中表现良好,对于特征较少的小数据集尤其有效。在时间序列分析中,朴素贝叶斯可用于预测结构健康状态,尤其在特征维度相对较低时。K 最近邻是一种非参数分类方法,基于数据点之间的相似性进行分类。K 最近邻因其简单性和快速性,在时间序列分析中常用于异常值检测和趋势预测。其直观的操作方式使其成为处理时间序列数据的一个流行选择。

3.3 基于深度学习的时序模型

在深度学习领域,卷积神经网络和长短期记忆网络是两种常见的时间序列模型。卷积神经网络主要用于图像处理,但其结构同样适用于时间序列数据分析。在结构健康监

测中,卷积神经网络利用卷积层和池化层的组合,能够提取时间序列数据中的局部模式和频率特征,从而实现分类、诊断和预测功能。

长短期记忆网络作为改进的循环神经网络模型,具备较强的记忆能力和长期依赖建模能力,能够有效处理长时间依赖的数据。在结构健康监测方面,长短期记忆网络被广泛应用于结构健康状态的预测和异常检测,表现出良好的效果与潜力。

综上所述,基于机器学习和深度学习的时间序列模型在结构健康监测中展现出良好的性能和潜力^[4]。然而,在应用这些模型时,需充分考虑数据质量、特征提取方法的选择以及模型参数的调整等因素,以确保模型的准确性和可靠性。

4 时间序列在桥梁健康监测中的应用

4.1 数据采集与数据处理

数据采集是桥梁健康监测的第一步,也是最为关键的一步。在桥梁健康监测中,选择合适的传感器对收集高质量数据至关重要。常用的传感器包括:加速度传感器,用于监测桥梁结构的动态响应,能实时捕捉到由交通荷载、风力和地震等因素引起的振动信息。位移传感器,用于监测桥梁的位移变化,能够提供有关结构稳定性和变形的关键信息。应变计,用于测量桥梁材料在荷载作用下的应变,帮助评估结构的受力状态。温度传感器,监测环境温度变化,了解温度对桥梁结构材料性能的影响。

传感器的部署位置应集中在桥梁的关键部位,例如主梁、支座和连接点,以确保数据的全面性和有效性。合理的传感器布局能够提供有针对性的数据支持,确保在不同的荷载和环境条件下都能收集到准确的信息。

数据采集后,经过预处理与清洗是必不可少的步骤。使用滤波器去除传感器数据中的噪声,以提高信号的质量。处理数据集中缺失的时间点,采用线性插值或样条插值等方法填补空缺,保持数据的连续性。对数据进行标准化或归一化,以消除不同量纲之间的影响,使分析结果更具可比性。经过这些处理后,数据的质量将大幅提高,为后续的时间序列分析奠定基础。

4.2 结构健康监测应用实例

在某城市的桥梁监测项目中,某个团队结合时间序列

分析与深度学习技术,对长期收集的桥梁健康数据进行了深入分析^[5],项目团队进一步将这些数据输入到卷积神经网络中进行训练和评估。卷积神经网络模型通过其卷积层和池化层结构,能够自动提取时间序列数据中的局部特征,并识别出与裂缝或腐蚀相关的振动模式。最终,监测团队成功地将这些特征与桥梁的健康状态关联起来,显著提高了潜在损伤的检测效率。

通过以上实例,可以看出,此种结合时间序列分析与深度学习的方法,不仅提升了对结构变化的实时监控能力,还能够迅速发现潜在的损伤问题,从而大大提高了桥梁的维护效率。通过实时监测和数据分析,团队得以及时做出决策,确保桥梁的安全性和服务性能。

5 结语

随着科学技术的不断进步,基于时间序列的桥梁结构健康监测方法的应用将得到进一步提升。传感器是结构健康监测的核心组成部分之一。未来的研究将致力于开发更先进、更智能的传感器技术,如纳米材料传感器和多功能传感器等。新型传感器能够实时收集结构的各种数据,并通过云端存储和处理进行分析。随着数据采集能力的提高,将产生大量的结构健康监测数据。因此,如何有效地分析这些数据并提取有价值的信息,将成为一个重要的研究方向。人工智能技术被应用于结构健康监测数据的处理和分析,以实现自动化识别、预测和决策。结构健康监测通常需要多种监测方法相互配合,才能全面了解结构的状态。未来的研究也可以关注多模态监测方法的开发和集成,结合传感器网络、图像处理、声波检测以及振动分析等技术,以提供更全面、准确的结构健康信息。

参考文献

- [1] 汤东婴,魏晓斌,孙正华,等.结构健康监测系统综述研究[J].智能建筑与智慧城市,2023(6):6-11.
- [2] 周颖,孟诗乔,孔庆钊,等.建筑结构损伤智能检测与响应智能预测研究综述[J].建筑结构学报,2024,45(6):107-132.
- [3] 徐彦刚.数据挖掘算法研究综述[J].电脑知识与技术,2024,20(24):64-66+69.
- [4] 任利强,贾舒宜,王海鹏,等.基于深度学习的时间序列分类研究综述[J].电子与信息学报,2024,46(8):3094-3116.
- [5] 罗旭欣,陈龙,梁韬,等.基于迁移卷积神经网络的桥梁结构损伤识别方法[J].铁道科学与工程学报,2024,21(9):3888-3899.