

桥梁监测大数据分析与管理方法研究

张鑫¹ 尉青青¹ 王海荣²

1. 陕西高速公路工程试验检测有限公司 陕西 西安 710086

2. 陕西高速星展科技有限公司 陕西 西安 710086

摘要: 桥梁作为交通网络关键节点,其安全运营关乎国计民生。随着传感器技术与物联网的发展,桥梁监测产生海量数据,如何有效分析与统计这些数据成为保障桥梁安全的核心问题。通过融合传感器技术、数据传输与存储技术实现数据采集,综合运用机器学习、关联规则、异常检测等分析方法,结合描述性、推断性及时间序列统计方法,深度挖掘数据价值,为桥梁结构健康评估、风险预警提供科学依据,助力桥梁安全管理的智能化与精准化发展。

关键词: 桥梁监测;大数据分析;统计方法

引言

随着交通基础设施建设规模扩大,桥梁结构日趋复杂,服役环境愈加恶劣,传统监测手段已难以满足桥梁安全管理需求。大数据技术的兴起为桥梁监测带来新契机,海量监测数据蕴含丰富结构健康信息,但也对数据处理方法提出更高要求。本文围绕桥梁监测大数据的全生命周期,系统研究其采集技术,深入探讨机器学习、关联规则等前沿分析方法,结合统计学理论构建科学统计体系,旨在突破传统监测分析局限,提升桥梁安全评估与风险防控能力。

1 桥梁监测大数据概述

桥梁监测大数据是指通过在桥梁结构关键部位部署各类传感器,实时采集桥梁运营过程中的多维度数据所形成的海量数据集。这些传感器涵盖应变计、位移计、加速度计、温度传感器等,能够获取桥梁的应力、变形、振动、温度等物理参数,以及交通荷载、环境作用等外部影响因素数据。数据采集频率从秒级到小时级不等,单座桥梁每日产生的数据量可达GB级,形成典型的高频、多源、异构数据流。监测大数据的典型特征表现为数据规模庞大、类型复杂且价值密度低。以某跨海大桥为例,其健康监测系统部署了超过2000个传感器,年数据存储量超过10PB。数据中既包含反映桥梁结构状态的时序数据,也包含环境监测的时空数据,同时存在设备故障导致的异常噪声、传感器漂移引发的系统误差等干扰信息。这些数据经过预处理后,通过特征提取与模式识别技术,可转化为反映桥梁性能退化、损伤演化的关键指标。在桥梁全生命周期管理中,监测大数据发挥着核心支撑作用。通过构建数字孪生模型,可实现桥梁受力状态的实时映射与损伤发展的动态预测;利用机器学习算法对监测数据进行趋势分析,能够提前6-12个

月预警桥梁关键构件的性能劣化;基于多源数据融合技术,可量化评估交通荷载、环境侵蚀等因素对桥梁耐久性的综合影响。这些应用显著提升了桥梁运维的精准性与主动性,为基础设施安全保障提供了新型技术范式。

2 桥梁监测大数据采集技术

2.1 传感器技术

桥梁监测传感器技术依托先进的传感原理,实现对桥梁结构状态和环境参数的精准感知。应变计通过电阻应变效应,将桥梁结构的微小变形转化为电阻值变化,经过电桥电路转换为电压信号,可精确测量桥梁关键部位的应力分布情况,为结构强度评估提供基础数据。位移计采用激光测距、光纤传感等技术,能够实时捕捉桥梁在荷载作用下的位移变化,对于大跨度桥梁的挠度监测尤为重要,可有效判断桥梁的线形是否发生异常。加速度计基于惯性原理,能够敏锐感知桥梁在交通荷载、风荷载等激励下的振动响应,通过对振动频率、幅值等参数的分析,可识别桥梁结构的动力学特性,判断是否存在损伤或异常振动。温度传感器利用热电偶、热敏电阻等元件,精确测量桥梁结构温度场分布,结合热胀冷缩原理,分析温度变化对桥梁结构的影响,避免因温度应力导致的结构破坏。不同类型的传感器协同工作,从多维度获取桥梁运营数据,为桥梁健康监测提供丰富的数据源。

2.2 数据传输技术

数据传输技术构建起传感器与数据中心之间的信息通道,确保监测数据的高效、可靠传输。无线传输技术中,LoRa凭借其远距离、低功耗的特性,适用于偏远地区桥梁传感器数据的回传;4G/5G通信技术则以高带宽、低延迟的优势,满足大量监测数据实时传输的需求,能够快速将桥梁动态响应数据传输至数据处理平台。光纤

传输技术以其抗电磁干扰能力强、传输速率高、传输距离远的特点，成为桥梁监测数据传输的重要方式，尤其适用于对数据传输稳定性要求极高的跨海大桥等大型桥梁工程。在传输架构上，采用边缘计算与云平台相结合的模式，边缘设备对传感器采集的原始数据进行初步处理和筛选，减少无效数据传输，降低网络带宽压力，再将关键数据上传至云端进行深度分析和存储，有效提高数据传输效率和系统整体性能^[1]。

2.3 数据存储技术

桥梁监测大数据存储面临数据量大、类型多、时效性强等挑战，需采用针对性的存储技术。时序数据库针对桥梁监测数据的时间序列特性进行优化，能够高效存储和查询按时间顺序产生的应力、位移、振动等数据，通过数据压缩算法和索引技术，在保证数据完整性的前提下，大幅减少存储空间占用，提升数据读写速度。分布式存储系统将数据分散存储在多个节点上，通过冗余备份机制确保数据安全性，同时支持水平扩展，可轻松应对桥梁监测数据持续增长的需求。对于非结构化的图像、视频等数据，采用对象存储技术进行管理，通过元数据描述数据特征，方便数据的检索和调用。在存储策略方面，根据数据的重要性和使用频率，将近期监测数据存储在高性能存储设备中，便于实时分析和处理；将历史数据迁移至低成本存储介质进行长期保存，为桥梁全生命周期管理提供数据积累。

3 桥梁监测大数据分析

3.1 机器学习与深度学习分析方法

(1) 在桥梁监测大数据处理中，机器学习算法可通过监督学习构建数据模型，以历史监测数据的应力、位移等参数为输入，结合已知桥梁结构状态标签进行训练。以支持向量机(SVM)为例，其通过寻找最优超平面，在高维空间分类数据样本，从而识别桥梁是否存在损伤。(2) 无监督学习算法则适用于挖掘数据中的潜在模式，无需预先设定标签。K-均值聚类算法能够对桥梁监测的多维数据进行聚类分析，将相似的结构响应数据划分为同一类，进而发现数据中隐藏的异常数据簇，为桥梁异常状态预警提供依据。(3) 深度学习凭借其强大的特征自动提取能力，在桥梁监测领域发挥重要作用。卷积神经网络(CNN)通过卷积层、池化层等结构，对桥梁振动信号、图像数据等进行特征提取，能够有效识别桥梁表面裂缝、结构异常振动等细微特征，相比传统方法具有更高的精度和鲁棒性。(4) 递归神经网络(RNN)及其变体长短时记忆网络(LSTM)，则特别适合处理桥梁监测的时序数据。它们能够捕捉数据随时间

变化的动态特征，对桥梁结构性能的长期演变趋势进行预测，如提前预判桥梁关键构件的疲劳损伤发展情况，为桥梁运维提供科学决策支持^[2]。

3.2 关联规则分析方法

桥梁监测数据中包含着多种因素之间的复杂关系，关联规则分析方法旨在挖掘这些因素之间的潜在关联。通过对桥梁应力、位移、交通荷载、环境温度等多源数据进行分析，利用Apriori算法等经典关联规则挖掘算法，计算不同数据项集之间的支持度和置信度。支持度反映了数据项集在数据集中出现的频率，置信度则体现了在一个数据项出现的情况下，另一个数据项也出现的概率。例如，在桥梁监测数据中，通过关联规则分析可能发现当环境温度达到一定阈值且交通荷载超过某一数值时，桥梁某些部位的应变会出现显著变化。这些关联规则的挖掘，能够帮助运维人员更全面地理解桥梁结构响应与外部因素之间的内在联系，为制定针对性的维护策略提供参考，从整体上提升桥梁的运维效率和安全性。

3.3 异常检测分析方法

异常检测是保障桥梁安全运营的关键环节，其核心在于识别监测数据中偏离正常模式的数据点或数据序列。基于统计的方法通过计算数据的均值、标准差等统计量，构建正常数据的分布模型，当新数据超出该模型的正常范围时，判定为异常。例如，设定桥梁振动幅值的正常波动范围，若某次监测的振动幅值显著偏离该范围，则视为异常。基于密度的异常检测算法，如DBSCAN算法，通过计算数据点的密度，将低密度区域的数据点识别为异常点，能够有效检测出数据中的局部异常。基于机器学习的异常检测模型，通过训练正常数据样本，学习正常状态下的模式特征，当输入新数据时，通过计算与正常模式的差异来判断是否为异常。这些异常检测方法能够及时发现桥梁结构的突发异常或潜在损伤，为桥梁的应急处理和预防性维护争取宝贵时间，避免事故发生。

4 桥梁监测大数据统计方法

4.1 描述性统计方法

描述性统计方法通过汇总和概括桥梁监测大数据的关键特征，直观展现数据的基本分布与内在规律。在桥梁监测场景中，针对应力、位移、振动等数值型数据，运用集中趋势度量指标，如均值能反映桥梁关键部位在一定时间段内的平均受力状态；中位数可规避极端数据干扰，准确刻画数据中间水平；众数则体现数据中出现频率最高的值。离散程度度量指标如方差和标准差，用于量化数据波动程度，帮助分析桥梁结构响应稳定性。

标准差较大,意味着桥梁结构响应差异显著,可能存在潜在问题。利用频数分布和频率分布表,梳理数据在各区间分布情况,结合直方图、箱线图等可视化工具,可直观呈现数据分布形态,快速识别异常值与离群点,为后续分析提供依据。对于多维度数据,计算相关系数矩阵,能量化各变量间的线性关联程度,揭示桥梁结构响应与环境因素、交通荷载等变量间的相互作用关系,辅助理解桥梁结构受力机制与响应特性。这一系列描述性统计方法,为桥梁监测数据的深入分析奠定了坚实基础^[3]。

4.2 推断性统计方法

推断性统计方法基于桥梁监测的样本数据,运用概率理论对总体特征进行科学推断,为桥梁结构性能评估提供统计依据。在实际监测中,由于难以获取桥梁结构响应的全部数据,常通过随机抽样获取具有代表性的样本。参数估计作为推断性统计的重要手段,分为点估计和区间估计。点估计利用样本统计量对总体参数进行单一数值估计,如以样本均值作为总体均值的估计值;区间估计则通过构建置信区间,给出总体参数在一定置信水平下的取值范围,反映估计结果的不确定性。例如,在评估桥梁某部位的长期平均应力水平时,通过区间估计可得到包含真实均值的概率区间,为结构安全评估提供更稳健的依据。假设检验则用于判断样本数据所反映的特征是否与预先设定的假设相符,在桥梁监测中常用于验证桥梁结构性能是否发生显著变化。通过设定原假设和备择假设,基于样本数据计算检验统计量,并与临界值比较,从而判断是否拒绝原假设。例如,检验桥梁加固前后关键部位的位移变化是否显著,可有效评估加固措施的实际效果,为桥梁运维决策提供量化支撑。

4.3 时间序列统计方法

时间序列统计方法聚焦于桥梁监测数据随时间演变的规律,深入挖掘数据中的动态特征与趋势模式。桥梁监测数据具有显著的时间序列特性,其结构响应、环境参数等指标均随时间连续变化。趋势分析是时间序列统

计的基础,通过拟合多项式、指数函数等数学模型,可分离并量化数据中的长期趋势成分,揭示桥梁结构性能的演变方向。如桥梁挠度若呈现持续增大的线性趋势,可能预示结构变形累积,需排查潜在损伤。季节性分析针对受周期性因素影响的数据,如温度、交通流量等,提取其季节性波动规律,剥离季节效应后,可更清晰观察桥梁结构响应的真实变化。在时间序列预测方面,自回归滑动平均模型(ARMA)及其扩展模型,通过分析序列自身历史数据相关性,建立动态预测模型。结合差分运算,可将非平稳时间序列转化为平稳序列,提升模型预测精度。例如,利用ARIMA模型对桥梁振动加速度数据进行预测,能提前捕捉结构响应的变化趋势,为桥梁安全预警提供可靠的时间序列预测信息,辅助运维人员制定科学合理的维护计划^[4]。

结语

综上所述,本文通过对桥梁监测大数据分析 with 统计方法的系统性研究,构建了涵盖数据采集、分析与统计的完整技术体系。研究成果有效提升了桥梁监测数据处理效率与分析精度,为桥梁结构健康状态评估和风险预警提供了可靠支持。未来,随着人工智能与大数据技术的持续发展,将进一步深化多源数据融合分析,探索更智能、高效的桥梁监测方法,推动桥梁安全管理向智能化、智慧化方向迈进。

参考文献

- [1]刘强.桥梁监测大数据分析 with 统计方法研究[J].山东交通科技,2024(4):138-141.
- [2]向阳,杜君.桥梁健康监测系统中的大数据分析 with 研究[J].铁路计算机应用,2020,29(1):44-48,54.
- [3]孙文瑞,郑正南,朱立伟.桥梁结构监测数据分析算法平台设计及实现[J].物联网技术,2023,13(11):106-108.
- [4]殷鹏程,谭曼丽莎,曹阳梅,等.基于迁移学习图像识别的桥梁监测数据异常检测方法[J].大连交通大学学报,2024,45(3):106-113.