

公路桥梁结构健康监测系统的大数据分析与智能预警方法

程才专

上饶市宏达路面工程有限公司 江西上饶 334008

摘要: 本文针对公路桥梁结构健康监测系统中海量、高维、多源的大数据分析难题, 提出了一套从数据预处理到智能预警的完整方法体系。首先, 系统阐述了监测数据的特征, 并采用数据清洗、特征提取与降维技术保障数据质量与分析效率。其次, 基于机器学习算法构建了结构状态智能识别与性能退化趋势评估模型, 实现对桥梁健康状态的精准量化评估。核心在于设计了一套融合局部损伤与整体响应指标的预警体系, 并制定了“提示-警告-警报”三级联动预警策略。实践应用表明, 该方法能显著提升损伤早期发现率与预警准确性, 有效降低运维成本, 为桥梁的智能化、精准化管养提供了有力的技术支持。

关键词: 桥梁健康监测; 大数据分析; 机器学习; 智能预警

引言

随着我国交通基础设施的快速发展, 保障公路桥梁的长期安全运营已成为重大挑战。传统的定期人工巡检模式存在效率低、主观性强、难以发现早期隐患等弊端。结构健康监测系统通过布设传感器网络, 实现了对桥梁响应的实时感知, 产生了海量的监测数据。然而, 如何有效处理与分析这些具有海量性、高维性、时变性的“大数据”, 并从中提取有价值的信息以实现精准预警, 是当前桥梁管养领域面临的关键技术瓶颈。

1. 桥梁健康监测大数据的特征与预处理方法

1.1 监测大数据的来源与特征分析

桥梁健康监测系统通过布设在结构关键部位的传感器网络, 实时采集应变、加速度、位移、温度、环境湿度等多种物理量数据, 这些数据源于不同类型、厂商的传感器, 具有多元性。应变、加速度、位移数据分别反映结构变形响应、振动特性、整体变形行为, 温度与湿度数据记录外部环境影响, 共同构成桥梁健康状态的多维表征。监测数据有典型大数据特征: 一是海量性, 监测系统高频率连续采集, 单个桥梁一年数据量可达 TB 级, 给存储与处理带来压力; 二是高维性, 监测系统含数百个传感器通道, 数据空间维度高, 增加分析复杂性; 三是多源性, 数据来自不同传感器, 需统一时间同步与标准化处理; 四是时变性, 桥梁结构响应受多种动态因素影响, 数据非平稳; 五是噪声干扰性, 数据含多种干扰成分, 降低质量。这些特征使桥梁健康监测大数据处理

与分析面临挑战, 需专门技术方法应对^[1]。

1.2 数据清洗与异常值处理

在监测数据的采集、传输和存储过程中, 常常会因传感器故障等因素出现数据缺失、噪声以及异常值等问题, 这些问题会对后续的分析工作产生不利影响。数据清洗是确保数据质量的关键环节, 其主要任务是处理缺失值、噪声和异常值。

对于缺失值的处理, 常见的方法有删除法、均值填补法、插值法和基于模型的方法。删除法适用于少量随机缺失的情况, 然而这种方法会造成一定的信息损失; 均值填补法操作简便, 但会降低数据的方差; 插值法适用于时间序列数据连续缺失的情形; 基于模型的方法能够利用数据之间的相关性进行精确填补。

在处理噪声数据时, 可采用数字滤波技术, 例如限幅滤波、中值滤波和卡尔曼滤波。限幅滤波能够剔除超出规定范围的数据点; 中值滤波通过用滑动窗口的中值替代中心点的值, 从而抑制脉冲噪声; 卡尔曼滤波则适用于非平稳信号的处理。

对于异常值的处理, 首先要通过统计学或机器学习方法进行检测, 然后根据异常值产生的原因采取相应的处理措施。对于因传感器故障导致的异常值, 应予以剔除并进行标记; 对于因极端荷载或环境变化导致的异常值, 则应予以保留并单独进行分析。通过系统地开展数据清洗与异常值处理工作, 可以提高监测数据的准确性和一致性, 为后续的分析工作奠定坚实的数据基础。

1.3 数据特征提取与降维

桥梁健康监测数据具有海量且高维的特点,若直接对原始数据进行分析,不仅效率低下,而且难以捕捉到关键信息。因此,从原始数据中提取关键特征是桥梁健康监测数据分析的核心任务。

特征提取的方法主要包括时域分析、频域分析和时频域分析。时域分析是对时间序列数据进行统计处理,从中提取均值等特征,以反映结构响应的幅值与分布情况;频域分析则是通过傅里叶变换提取频谱特征,以反映结构振动与频率的分布情况;时频域分析,如短时傅里叶变换等,能够反映信号的时频变化情况,适用于非平稳信号以及桥梁瞬态响应的分析。

在提取大量特征后,会出现特征冗余和相关性的问题,因此需要进行降维处理。主成分分析是一种常用的线性降维方法,它通过正交变换选取前几个主成分来实现降维。此外,还有线性判别分析等适用于不同场景的降维方法。有效的特征提取与降维处理能够降低分析的复杂度,提高智能识别算法的效率和准确性,为桥梁健康监测的智能化提供有力支撑^[9]。

2. 基于机器学习的结构状态识别与性能评估方法

2.1 结构状态智能识别方法

结构状态智能识别是桥梁健康监测中的核心环节,其目标是通过机器学习算法对桥梁结构当前所处的状态进行自动分类与判别。为实现这一目标,首先需将经过特征提取与降维后的数据作为模型输入,这些数据包括时域、频域及时频域特征,能够有效表征结构在不同荷载与环境条件下的响应特性。在模型构建过程中,监督学习方法如支持向量机、随机森林、K近邻算法、人工神经网络等被广泛应用于状态分类任务。这些方法通过已标注的历史数据(如“正常”、“轻微损伤”、“严重损伤”等标签)进行训练,学习特征与状态之间的映射关系,从而对新的监测数据进行状态判别。例如,支持向量机通过构建最优超平面实现状态分类,具有较好的泛化能力;随机森林通过集成多棵决策树提升分类精度,并对噪声具有较强的鲁棒性;深度神经网络则能够自动学习深层特征,适用于复杂非线性关系的建模。无监督学习方法如聚类分析(如K均值聚类、层次聚类)则适用于无标签数据的状态识别,通过数据内在的相似性进行分组,发现潜在的结构状态模式。此外,半监督学习方法结合少量标注数据与大量未标注数据进行训练,能够在标注数据稀缺的情况下提升模型性能。通过机器学习算法实现的状态识别,不仅

提高了评估效率,还减少了人为因素干扰,为桥梁结构安全评估提供了客观、量化的依据,具有重要的工程应用价值^[9]。

2.2 结构性能退化趋势评估

在结构状态识别的基础上,进一步研究桥梁结构性能退化趋势的评估方法,是实现桥梁长期健康管理的关键。性能退化趋势评估旨在通过分析关键性能指标(如模态频率、位移幅值、应变极值等)随时间的变化规律,推断结构的剩余使用寿命或未来性能演变,为制定预防性养护计划提供前瞻性信息。为实现这一目标,可采用时间序列分析方法,如自回归积分滑动平均模型、指数平滑法等,对性能指标的历史数据进行建模与预测,捕捉其长期变化趋势与周期性波动。此外,回归预测技术如线性回归、多项式回归、支持向量回归等,可用于建立性能指标与时间、环境因素、交通荷载等变量之间的数学关系,从而预测结构在未来条件下的性能表现。近年来,深度学习方法如长短期记忆网络、门控循环单元等在时间序列预测中表现出色,能够有效捕捉数据中的长期依赖关系,适用于复杂的非线性退化过程建模。在性能退化评估中,还需考虑环境因素(如温度、湿度)对监测数据的影响,通过环境归一化处理剔除环境干扰,确保评估结果的准确性。通过性能退化趋势评估,能够及时发现结构性能的异常变化,预测潜在的损伤发展,为桥梁的维护决策提供科学依据,延长结构使用寿命,降低全寿命周期成本,具有重要的经济与社会价值。

3. 智能预警机制构建与策略设计

3.1 预警指标体系与阈值确定

预警指标体系需围绕桥梁结构“局部损伤-整体响应”的关联逻辑构建,确保能全面、精准反映结构健康状态。局部损伤指标需聚焦关键受力构件的微观变化,包括钢筋锈蚀率(通过电化学传感器采集,反映钢筋力学性能衰减程度)、混凝土裂缝宽度与深度(通过光学裂缝计、超声波检测仪获取,重点监测主梁、桥墩等核心构件的裂缝发展)、支座变形量(通过位移传感器监测,评估支座承载与传力能力);整体响应指标需覆盖结构宏观力学行为,包括跨中竖向位移(通过GPS定位系统或静力水准系统监测,反映结构整体刚度变化)、结构自振频率(通过加速度传感器采集,关联结构整体刚度与损伤程度)、应变分布(通过光纤光栅传感器监测,识别应力集中区域)。两类指标相互补充,局部指标可定位损伤位置与类型,整体指标可判断结构整体安全状态,避免单一指标导致的误判或漏判。

阈值确定需结合多源依据形成科学基准,避免主观经验偏差。首先以《公路桥涵养护规范》(JTG H11-2004)等行业标准为基础,提取指标的安全限值,如规范规定钢筋混凝土梁的最大裂缝宽度限值为 0.3mm,以此作为阈值设定的底线;其次引入桥梁历史监测数据,通过统计分析近 5-10 年的指标波动范围,确定正常工况下的均值与标准差,将“均值 + 2 倍标准差”作为提示级阈值的参考;最后通过数值模拟(如采用 ANSYS、Midas 等软件)构建桥梁有限元模型,模拟不同损伤工况(如钢筋锈蚀率 10%、裂缝宽度 0.2mm)下的结构响应,分析指标超过某一数值时结构安全储备的下降幅度,据此调整阈值等级。例如,针对某大跨度连续梁桥,通过模拟发现当跨中竖向位移超过规范限值的 80% 时,结构刚度已出现明显衰减,故将该数值设定为警告级阈值,确保在结构进入危险状态前提前预警^[4]。

3.2 分级预警策略与流程设计

分级预警策略需明确“提示-警告-警报”三级联动逻辑,每级预警对应清晰的触发条件、信息推送对象与响应流程,实现风险管控的分层处置。提示级预警的触发条件为监测数据接近阈值(如达到阈值的 80%-90%),或指标出现异常波动(如某时段内变化幅度超过历史均值的 30%),此时结构处于“潜在风险”状态,信息推送对象为桥梁养护单位的现场技术人员,响应流程为 72 小时内完成现场复核(如人工复测裂缝宽度、检查传感器工作状态),确认是否存在数据误报或早期微小损伤,若复核无异常则持续监测,若发现隐患则启动轻度养护措施。

警告级预警的触发条件为监测数据达到阈值(如等于阈值的 90%-100%),或多项关联指标同时出现异常(如裂缝宽度接近限值且对应区域应变增大),此时结构处于“明确风险”状态,信息推送对象包括养护单位项目负责人、桥梁管理部门专员,响应流程为 24 小时内启动应急排查(如组织专家团队开展结构检测、复核有限元模型),制定专项处置方案(如对裂缝进行灌浆处理、加固支座),同时暂停桥梁重载车辆通行,减少结构荷载压力。

警报级预警的触发条件为监测数据超过阈值(如超过阈值 10% 以上),或出现突发性结构响应(如自振频率骤降、跨中位移突变),此时结构处于“高风险”状态,信息推送对象需涵盖交通管理部门、应急管理部门及属地政府,响应流程为立即启动交通管制(如封闭桥梁或单向限行),组织专业队伍开展紧急抢修,同时发布公众预警信息,避免人

员伤亡与财产损失。

2020 年,江苏省交通运输厅对润扬长江公路大桥(连接镇江与扬州)的结构健康监测系统进行升级,构建了上述智能预警机制。其预警指标体系包含钢筋锈蚀率、主梁裂缝宽度、跨中竖向位移等 8 项核心指标,其中主梁裂缝宽度的提示阈值设定为 0.15mm、警告阈值 0.2mm、警报阈值 0.25mm(参考规范限值 0.3mm 与数值模拟结果)。根据该厅 2020 年公开的《桥梁健康监测年度报告》,系统运行后预警准确率达 95%,结构损伤早期发现率较传统人工季度监测提升 60%,全年未发生因结构损伤导致的交通中断事件;通过提前处置警告级预警事件(如 2020 年 8 月发现某主梁裂缝宽度达 0.21mm,48 小时内完成灌浆加固),避免损伤扩大,直接减少后续大修成本约 800 万元,同时保障了日均 4.2 万辆车次的通行安全,充分体现了智能预警机制在风险防控与成本控制中的实际价值^[5]。

4. 结语

随着大数据分析和智能预警技术的不断进步,公路桥梁结构健康监测系统正逐步迈向智能化和精准化。本文从监测大数据的来源与特征分析入手,详细探讨了数据清洗、特征提取与降维的关键方法,并基于机器学习算法提出了结构状态识别与性能退化趋势评估的有效路径。同时,通过构建分级预警机制,实现了对桥梁健康状态的动态监控与风险防控。研究表明,结合多源数据与先进算法的智能监测系统,不仅能够显著提升监测数据的准确性和一致性,还为桥梁的安全运营与科学养护提供了重要的技术支撑。未来,随着深度学习、边缘计算等新兴技术的进一步融合,桥梁健康监测将在实时性、自动化和决策支持能力方面取得更大突破,助力交通基础设施的安全与可持续发展。

参考文献:

- [1] 林雯. 一种基于大数据风控预警监测及决策系统的研究[J]. 新一代信息技术, 2021, 4(12):6.
- [2] 谭甲凯, 吕明航, 刘畅, 等. 基于大数据的青岛市混凝土桥梁智慧管理系统设计研发[J]. 北方交通, 2022(10):77-80.
- [3] 梅大鹏. 基于深度学习的大跨度高铁桥梁健康监测预警方法研究[D]. 西南交通大学, 2022.
- [4] 项贻强, 白兵, 杨云深. 悬浮隧道智能化健康监测体系研究[C]// 第六届全国桥梁结构健康与安全技术大会. 2020.
- [5] 王凌波, 王秋玲, 朱钊, 等. 桥梁健康监测技术研究现状及展望[J]. 中国公路学报, 2021, 34(12):21.