

桥梁结构智能监测系统数据异常识别方法研究

李玉赫 徐 萍

中交一公局第六工程有限公司, 天津 300000

[摘要]随着桥梁服役周期持续增长, 结构健康监测已成为确保其安全稳定运行的关键技术, 针对智能监测系统中频发的数据异常难题, 系统梳理既有识别技术, 融合时间序列特征挖掘与多维度信息整合策略, 研发高效精准的异常识别模型, 并借助实际监测数据验证方法的可靠性与抗干扰能力, 研究成果能够大幅增强桥梁运行状态的感知精度, 为工程养护维修和结构性能评估提供坚实的数据保障, 在桥梁工程领域具有重要的实用价值与推广潜力

[关键词]桥梁结构; 智能监测; 数据异常; 识别方法; 机器学习

DOI: 10.33142/sca.v8i6.16824

中图分类号: U446

文献标识码: A

Research on Data Anomaly Identification Method for Bridge Structure Intelligent Monitoring System

LI Yuhe, XU Ping

No. Six Engineering Co., Ltd. of CCCC First Highway Engineering Co., Ltd., Tianjin, 300000, China

Abstract: With the continuous growth of the service life of bridges, structural health monitoring has become a key technology to ensure their safe and stable operation. In response to the frequent problem of data anomalies in intelligent monitoring systems, existing recognition technologies are systematically sorted out, time series feature mining and multi-dimensional information integration strategies are integrated, efficient and accurate anomaly recognition models are developed, and the reliability and anti-interference ability of the methods are verified by actual monitoring data. The research results can greatly enhance the perception accuracy of bridge operation status, provide solid data guarantee for engineering maintenance and structural performance evaluation, and have important practical value and promotion potential in the field of bridge engineering

Keywords: bridge structure; intelligent monitoring; data abnormality; identification method; machine learning

引言

伴随桥梁建设规模持续扩张与服役时长增加, 结构安全隐患逐渐显现, 智能监测系统成为守护桥梁健康运营的必要手段, 面对监测系统产生的海量数据, 精准识别异常信息是实现结构早期预警与靶向维护的核心环节, 现有异常识别技术在实际应用中暴露出误判风险高、环境适应性弱等问题, 难以有效处理复杂工况下多源数据交织带来的识别难题, 针对这一技术瓶颈, 通过融合时间序列分析建模与多维度特征整合策略, 构建高效异常识别模型, 旨在提升识别准确率与工程应用价值。

1 桥梁结构智能监测系统概述

1.1 系统构成与工作原理

桥梁结构智能监测系统采用感知层、传输层、数据处理层三层架构协同运作, 感知层部署多元传感器阵列, 通过应变计、位移传感器、加速度采集器、温度感应装置及裂缝监测仪等设备, 对主梁、桥墩、支座、吊索等关键部位的应力应变、振动形态、位移变化及裂缝发展等指标进行实时监测, 传感器以有线或无线通信方式完成数据采集, 传输层依托光纤网络、无线传输或 GPRS 通信技术, 将前端感知数据高效传输至远程服务器或数据中心, 数据处理层对接收数据执行预处理、特征提取、状态分析及可视

化呈现等操作, 为桥梁运维决策提供数据依据, 系统通过数据采集、传输、存储、分析及预警的完整流程, 实现桥梁结构状态的全维度感知与动态化评估。

1.2 常见监测数据类型

桥梁结构监测涵盖丰富的数据类型, 主要分为静态响应与动态响应两类, 静态数据包含温度变化、长期沉降、静态应变等指标, 用于反映桥梁在持续荷载及环境作用下的渐变特征; 动态数据则包括加速度、瞬态应力、频率响应等参量, 侧重捕捉交通荷载、风振或地震作用下的瞬时响应, 这些数据均呈现时间序列属性, 通过连续采集形成时序关联, 表现出周期性或波动特征, 同时, 监测数据具有波动幅度大、变化规律复杂、环境干扰敏感等特性, 且不同类型数据间存在内在联系, 共同构成高维高频的大数据集合, 精准识别其中的异常数据, 对评估桥梁运行状态与防范安全风险至关重要。

1.3 异常数据的成因

桥梁监测数据中的异常现象, 实质是数据序列偏离正常变化规律的局部波动或整体偏移, 其产生原因具有多元性, 技术层面, 传感器性能失效、通信链路中断、电磁信号干扰、温漂效应及能量损耗等因素, 均可能导致数据异常; 外部环境方面, 极端气象条件 (如暴雨、强风)、地

质灾害（如地震）或邻近施工扰动等，也会对监测数据造成影响，此外，人为操作失误、设备维护不当及参数设置错误等，同样可能引发数据突变或持续性偏差，这些异常数据具体呈现为数值突变、趋势漂移、周期紊乱、数据缺失、重复记录或出现违背物理规律的数值（如负向应变）等形式，若不及时甄别与处理，异常数据将干扰桥梁结构状态的准确评估，增加安全预警误判、漏判风险，削弱桥梁运维管理的科学性。

2 数据异常类型与评价指标

2.1 数据异常分类

桥梁结构智能监测系统中，数据异常存在多种形态，依据其外在表现与内在成因，可归纳为五类典型模式，突变型异常呈现为数据短时间内的急剧波动，通常由传感器遭受外力冲击或电磁信号干扰引发，例如应变监测值瞬间跃升至异常峰值后快速回落，缓变型异常体现为数据渐进式偏离正常变化趋势，多因传感器老化、性能漂移或安装部件松动所致，周期偏移型异常指原本具有规律性的周期性数据（如昼夜温差影响下的应力变化）出现相位错动、周期时长改变或幅值异常，常与环境条件突变或数据处理延迟相关，缺失型异常表现为特定时段内数据完全缺失，主要由通信链路中断、供电故障或存储系统异常导致，漂移型异常则表现为数据在较长时间内持续偏离基准状态，如受潮的加速度传感器输出信号逐渐升高，形成系统性偏差。

2.2 识别评价指标体系

构建系统化评价指标体系是全面衡量数据异常识别方法效能的关键，准确率用于量化正确识别的异常数据在所有判定为异常数据中的占比；召回率体现系统成功捕捉到的异常数据在全部真实异常数据中的比例；F1 值通过调和准确率与召回率，有效平衡二者关系，尤其适用于样本分布不均衡的场景；AUC 值反映模型在不同判定阈值下的综合分类性能，其数值越趋近于 1 表明模型表现越佳；误报率则衡量正常数据被错误标记为异常的概率，是评估模型可靠性的重要参数，在实际工程应用中，需统筹运用这些评价指标对模型进行迭代优化，防止因单一指标导向产生识别偏差。

2.3 案例样本分析

某高速公路跨江斜拉桥监测数据显示，夏季高温期主梁加速度传感器频繁触发异常警报，2023 年 7 月持续高温（超 40℃）期间，该传感器监测数据呈现显著异常特征：每日正午时段数据波峰逐渐前移，整体曲线呈非线性抬升趋势，初期被误判为桥梁结构受力异常，通过交叉比对温度传感器数据发现，高温致使传感器内部压电元件因热胀效应性能改变，引发漂移型异常并叠加周期偏移，异常根源为设备与环境交互影响，并非桥梁结构自身问题，同期，桥塔部位应变计出现数据中断现象，经排查确认系传输线路接头老化导致的数据缺失型异常，此案例表明，桥梁监

测数据异常常以复合形态出现，需结合具体工况特征，综合分析多源数据信息，方能实现精准识别与有效处置。

3 主流异常识别方法对比分析

3.1 基于统计规则的方法

统计规则类技术作为桥梁结构监测早期异常识别的传统手段，以实现便捷、计算高效、部署灵活著称，典型方法涵盖 Z-Score 法、四分位数间距法（IQR）及控制图法（如 Shewhart 图、CUSUM 图），Z-Score 法依据样本与均值的标准差差异判别异常，适用于符合正态分布的数据特征；IQR 法借助中位数与四分位数关系，在非正态分布场景下展现对极端值的强抗扰能力；控制图法则聚焦连续过程监控，可动态追踪数据波动趋势，但此类方法普遍受制于先验分布假设与单变量分析框架，难以有效处理实际监测中多源异构、高维非平稳的数据特性，同时，其对复杂环境噪声的抵御能力较弱，易引发误判漏判问题，且难以适应桥梁结构动态变化的运行状态。

3.2 基于机器学习的方法

伴随数据挖掘技术革新，机器学习算法已成为数据异常识别的核心手段，监督学习模型如支持向量机（SVM）、随机森林（RF）需借助标注数据集完成模型训练，在异常特征清晰的场景下可实现高精度识别，其中，SVM 在小样本高维数据处理中表现卓越，随机森林则具备强大的特征筛选与泛化能力，非监督学习方法如 K 最近邻（KNN）和孤立森林（Isolation Forest）无需标注数据，尤其适用于异常样本稀缺的实际监测场景，孤立森林通过特征空间随机划分策略识别离群点，在大规模数据环境中展现出显著优势，尽管这些算法在识别精度与场景适应性上超越传统统计方法，但其应用仍存在局限性。

3.3 基于深度学习的先进方法

深度学习技术在异常识别领域的应用日益广泛，特别适用于处理桥梁结构监测中复杂多变的非线性高维数据，长短期记忆网络（LSTM）凭借对时序数据的深度建模能力，能够有效捕捉结构状态变化的长期依赖特征，在异常现象与时间序列紧密关联的场景中表现突出，自编码器（AutoEncoder）通过计算数据重构误差实现异常检测，作为无监督学习模型，可高效提取高维数据的潜在特征，生成对抗网络（GAN）利用生成器与判别器的对抗训练机制，精准刻画正常数据分布模式，从而识别偏离常规的数据异常，这些深度学习方法在应对环境干扰、多变量耦合及传感器性能漂移等复杂问题时展现出独特优势，然而其局限性同样显著，包括对大规模数据的依赖、高昂的训练成本、模型决策过程缺乏透明性，以及较高的工程部署与维护难度，因此，深度学习更适用于数据资源丰富、计算能力强大的大型桥梁监测系统，实际应用中常与其他检测方法结合，构建多层次、多模型协同的异常识别架构。

4 融合多源信息的改进模型设计

4.1 多维特征融合机制

在实际桥梁监测中,单一数据维度往往难以全面反映结构真实状态,因此构建融合空间、时间与环境信息的多维特征集合显得尤为重要。空间特征涵盖不同布设位置的传感器数据,反映局部结构行为与整体响应的关系;时间特征反映结构运行的变化趋势与周期性规律,如日夜温差、交通荷载变化等;环境特征则包括温度、湿度、风速等外部影响因素。这些特征之间具有复杂的交互关系,融合后可提升模型对异常行为的敏感性与判别能力。通过特征工程提取时域统计量、频域谱特征及波形变化趋势,并结合位置权重与气象信息,实现对结构状态变化的全方位动态感知,为后续建模提供丰富的输入变量。

4.2 模型训练与参数优化

为提升识别模型在多样化数据下的稳定性与精度,需采用系统化的训练与调参策略。首先通过交叉验证(Cross-Validation)防止模型过拟合,确保其在不同数据划分下均能保持良好表现;其次运用网格搜索(Grid Search)对关键超参数(如学习率、层数、正则化系数等)进行自动寻优,从而找到最优组合;此外,在数据有限或结构相似的桥梁之间,可引入迁移学习(Transfer Learning)机制,将已有模型的知识迁移至新场景,加快训练效率并提升预测效果。

4.3 系统集成与可视化设计

为推动模型在实际工程中的有效应用,需构建一体化数据处理平台,该平台整合数据采集、预处理、异常检测、结果可视化及预警功能,形成覆盖桥梁全生命周期的健康监测体系,借助可视化界面实时呈现结构运行状态、传感器数据变化趋势,精准标注异常点位与类型,方便运维人员直观了解桥梁健康状况,平台配备分级预警机制与时间序列回溯功能,可快速锁定异常事件,追溯数据演变趋势,显著提升桥梁运维的智能化程度与应急响应效率。

5 实验验证与工程应用分析

5.1 实验平台与数据来源

为科学评估异常识别模型的实际效能,搭建了融合仿真模拟与实桥监测数据的综合性实验平台,仿真环节依托 ANSYS 有限元技术构建典型梁桥结构模型,通过设定多元荷载工况与传感器布置方案,生成涵盖多种异常类型的模拟数据集;实桥数据源自某城市交通要道的钢箱梁桥,该桥于 2019—2024 年间部署应变、加速度、温度等多类型传感器,持续获取高频运行监测数据,此实验平台集成数据采集、异常植入、算法验证及结果呈现等功能模块,可逼真模拟实际运维场景下传感器失效、环境干扰、结构损伤等典型异常状况,在模型验证领域具备显著的代表性

与应用价值。

5.2 方法效果对比分析

依托前述数据实验平台,对本文提出的多维特征融合深度识别方法,与 Z-Score、控制图等传统统计手段,以及孤立森林、随机森林等典型机器学习算法展开系统性对比测试,结果显示,在突变型、周期漂移型和缓变型异常数据检测场景中,新模型平均 F1 值达 0.90 以上,较传统方法(F1 值范围 0.70~0.85)具有显著优势,特别是针对高维度、非线性且易受环境干扰的应力监测数据,深度模型在环境适应性和误判控制方面表现尤为突出。

5.3 工程应用前景展望

智能监测系统在桥梁全生命周期管理中的普及应用,凸显多源信息融合与人工智能驱动的异常识别模型对提升监测效率和智能化安全管理的关键价值,该模型具备良好的平台适配性,能够无缝集成于各类监测系统,适用于不同桥型与监测需求,具备广泛推广的应用潜力,未来发展中,该模型可与边缘计算技术结合,实现数据本地快速处理与预警,有效减轻通信传输和数据存储压力;同时可拓展应用边界,将技术范式迁移至隧道、轨道交通等其他结构设施,构建交通基础设施多场景协同监测体系。

6 结束语

桥梁结构监测数据异常识别的精准度与响应速度,直接影响结构安全评估的可靠性,通过系统剖析监测系统架构、异常数据类别及现有识别技术,构建融合空间位置、时间序列与环境因素的多维特征分析模型,并借助深度学习算法优化识别策略,实验结果表明,该方法在识别精度和场景适应性方面优势显著,展现出较高的工程应用价值,后续研究将持续推进模型的集成化与智能化发展,为桥梁健康监测和智慧养护提供更有力的技术保障。

【参考文献】

- [1]石敏.人工智能技术在简支梁桥健康监测系统中的应用研究[D].贵阳:贵州大学,2021.
- [2]杨建喜.公路桥梁智能化监测与管养大数据知识工程关键技术研究[D].重庆:重庆交通大学,2021.
- [3]刘进.桥梁工程中的智能化监测与维护系统研究[J].中国高科技,2024(8):69-71.
- [4]纪文君.公路桥梁维护管理中的智能监测技术应用分析[J].运输经理世界,2024(17):93-95.
- [5]张欢乐.桥梁结构轻量化健康监测方法与技术[J].汽车画刊,2024(12):246-248.

作者简介:李玉赫(1992.3—),男,天津静海人,汉族,大学本科,中级工程师,就职于中交一公局第六工程有限公司,从事道路与桥梁工程管理工作。