

## 基于机器学习的桥梁健康监测数据分析方法

姜义海

中交元洋（大连）桥梁水下检测有限公司，辽宁 大连 116000

**[摘要]**桥梁作为重要的基础设施，其安全运行关系重大。近年来，随着传感技术的进步，大量桥梁健康监测数据得以实时采集，为结构安全评估和养护决策提供了重要依据。然而，传统数据分析方法在处理庞杂、多源的数据时存在效率低、精度有限等问题，难以满足现代桥梁智能管理的需求。本研究围绕桥梁健康监测数据的特点与挑战，系统探讨了机器学习在数据处理、特征提取及异常识别等环节的优势与应用。具体而言，将基于机器学习的方法引入健康监测数据分析流程，实现对数据中的潜在模式与变化的自动识别和有效预测。研究结果显示，机器学习方法能够提升桥梁健康状态识别的准确率，并在早期故障诊断及趋势预测方面表现出良好的适应性。文中的研究为桥梁运维管理机制的升级提供了理论支持，对推动结构健康监测领域的智能化转型具有积极意义。

**[关键词]**桥梁健康监测；机器学习；数据分析；故障诊断；智能管理

DOI: 10.33142/ec.v8i9.17995 中图分类号: U45 文献标识码: A

## Machine Learning based Bridge Health Monitoring Data Analysis Method

JIANG Yihai

Zhongjiao Yuanyang (Dalian) Bridge Underwater Inspection Co., Ltd., Dalian, Liaoning, 116000, China

**Abstract:** As an important infrastructure, the safe operation of bridges is of great importance. In recent years, with the advancement of sensing technology, a large amount of bridge health monitoring data can be collected in real-time, providing important basis for structural safety assessment and maintenance decision-making. However, traditional data analysis methods suffer from low efficiency and limited accuracy in handling complex and multi-source data, making it difficult to meet the needs of modern bridge intelligent management. This study focuses on the characteristics and challenges of bridge health monitoring data, and systematically explores the advantages and applications of machine learning in data processing, feature extraction, and anomaly recognition. Specifically, machine learning based methods will be introduced into the health monitoring data analysis process to achieve automatic recognition and effective prediction of potential patterns and changes in the data. The research results show that machine learning methods can improve the accuracy of bridge health status recognition and demonstrate good adaptability in early fault diagnosis and trend prediction. The research in the article provides theoretical support for the upgrading of bridge operation and maintenance management mechanisms, and has positive significance for promoting the intelligent transformation of the field of structural health monitoring.

**Keywords:** bridge health monitoring; machine learning; data analysis; fault diagnosis; intelligent management

### 引言

伴随交通网络的迅猛扩展和城市基础设施的日趋复杂，桥梁身为联结区域经济和社会发展的关键枢纽，它的结构安全与稳定运行转为工程界关注的重点。据《桥梁技术发展白皮书》中国公路学会，2022 统计，目前我国在役桥梁数量已经突破百万座，桥梁病害及安全隐患事件依然时有出现，对交通畅通与社会安全形成潜在威胁。桥梁健康监测体系逐渐完善，分布式、无线传感器技术大量应用，做到了跨结构多源参数的实时采集，对数据驱动型养护管理奠定了丰富基础。海量、多维度、不同来源的监测数据给传统分析方法造成了很大困难，过去常用的统计模型和信号处理方法遇到数据不断变化、各种因素互相影响的情况，往往造成特征提取速度慢、异常判断不够准等问题。没有智能处理手段很难发现数据背后桥梁结构损伤慢

慢发展的规律，这样就限制了桥梁养护决策做到真正科学。机器学习技术依靠强大数据驱动建模能力、处理复杂关系能力和自动提取特征能力，成为结构健康监测领域新的研究热点。现在已经有的研究在异常检测、趋势预测、多源数据融合这些方向获得了不错进展，但还需继续研究机器学习技术用到真实桥梁工程时的适用性和泛化能力。本文以期提高桥梁健康监测数据分析效能为目标，深入研究机器学习方法于数据处理、特征工程和故障诊断内的策略以及作用，意在为桥梁智能养护管理体系的建设与升级给予理论基础和技术支持。

### 1 桥梁健康监测数据概述

#### 1.1 传感器技术发展与数据特点

桥梁健康监测系统能不能做好，主要依靠传感器技术水平有没有跟上步伐。现在微机电系统 MEMS 技术已经

越来越成熟，所以很多精度很高、耗电又很低的传感器已经被大量用到了桥梁监测工作里面，这些传感器种类很多，比如加速度计、倾角仪、应变计、温湿度传感器等等全都有。这些传感器可以长时间可靠运行，一刻不停地即时采集桥梁结构在受力时的各种振动情况以及周围环境温度湿度的变化数据。随着技术一点点往前发展，传感器个头变得越来越小，但是测得准不准、稳不稳却变得越来越好，正是因为这样才给后面拿到准确可靠的监测数据提供了坚实保障。桥梁监测数据最明显的特点就是来源非常多、种类非常杂，而且必须做到随时更新随时都有。桥梁结构非常复杂，包含材料受力情况和周围环境等大量不同种类数据，各种传感器能够实时采集全部数据，把不同传感器采集到的数据融合在一起使用，从而提供一个完整全面的监测视角。采集到的数据具有高频率和大容量的特点，这给数据处理能力提出严峻挑战。数据里面通常包含很多噪声，这些噪声由传感器自身误差或者周围环境干扰造成，会直接影响后面进行的数据分析和模式识别工作。所有这些情况都需要使用更高级的分析方法，才能够快速准确提取出最关键的特征，从而确保桥梁一直处于安全运行状态，做好健康管理工作。

## 1.2 桥梁监测数据的类型与挑战

桥梁监测数据的类型与挑战在桥梁健康监测中极为重要。桥梁结构通过多种传感器采集的大规模、复杂数据，包括加速度、应变、温湿度等数据流，这些数据类型各异、数据量庞大且来源多样。不同传感器采集的数据频率和精度存在差异，造成数据的异构性和不一致性。在进行数据分析时，如何有效整合和协调这些多源数据以形成一个统一的评估框架是一大挑战。传感器数据中的噪声干扰不可避免，部分设备在极端天气或恶劣环境下可能表现不稳定，导致数据质量下降。高频实时数据流需要的存储与计算能力强，并且识别特定桥梁健康状况模式且达成实时响应同样对于数据处理技术带来了更高要求。应对如此严峻的环境，传统的数据分析技术于效率和准确性上表现得捉襟见肘，急需必须借助前沿的算法和分析方法解决此类挑战，以确保桥梁的长久可靠运行。

## 2 机器学习理论基础及相关技术

### 2.1 常用机器学习算法简介

机器学习已经变成现在数据分析最核心的工具，里面算法类型非常多，广泛应用在桥梁健康监测数据的处理和分析工作当中。监督学习算法属于最常用的一类，包括支持向量机 SVM、决策树还有随机森林这些算法。支持向量机在处理高维度数据时表现出来非常强的能力，通过寻找数据之间那条最好的分割超平面，来提高分类的准确程度。决策树用树状结构把整个决策过程清楚展示出来，让人很容易理解和实际使用。随机森林属于决策树的组合方法，通过建立很多棵决策树然后大家一起投票决定答案，这样明显增强模型的稳定程度和准确程度。无监督学习算

法模式识别和聚类分析发挥重要作用。常见算法比如 K 均值聚类和主成分分析 PCA 用来挖掘数据内在结构以及实现降维操作。K 均值聚类通过把数据点分配到 K 个簇方式，识别数据当中隐含模式。主成分分析通过降维方式减少数据复杂程度。最近几年深度学习算法尤其卷积神经网络 CNN 和递归神经网络 RNN，由于出色自主特征提取和学习能力，赢得广泛关注。CNN 图像数据分析领域表现突出，RNN 擅长处理序列数据。机器学习算法能够大幅度提高桥梁健康监测过程中对各种数据的分析能力和精确程度，实际应用效果已经证明它们拥有非常强的潜力以及广阔的发展前景。

### 2.2 特征提取与数据预处理方法

特征提取和数据预处理在机器学习用来做桥梁健康监测数据分析时特别关键。特征提取目的就是从海量数据里挑出最有用的信息，把复杂数据变得简单清楚，这样后面分析起来就不费力。常用的好方法有主成分分析 PCA、线性判别分析 LDA 和独立成分分析 ICA，这几种方法都能挖出数据深层的规律和各个部分之间的关联性。数据预处理主要负责把原始数据收拾干净，确保质量过硬，具体会做去噪、填补缺失值、把数据尺度调均匀这些工作。去噪就是用滤波器或者信号处理技术把那些乱七八糟的随机噪音去掉，让有用信号变得更平滑更可靠。填补缺失值可以采用插值或者其他聪明办法，把数据补得整整齐齐，避免因为缺东少西导致分析出错。归一化就是把所有特征的数值范围调整到差不多水平，避免某些特征太大或太小影响公平，这样后面训练模型的时候每项特征都能公平发挥作用，模型学得更好。通过把上面这些技术一步步做好，就能让数据变得更干净更有代表性，最后模型分析得更准，预测结果也更加靠谱准确。

## 3 桥梁健康监测数据中的模式识别与异常检测

### 3.1 数据驱动的模式识别流程

桥梁健康监测工作中，模式识别是分析和解读传感器数据最核心的部分。整个数据驱动的模式识别过程主要包括数据采集、数据预处理、特征提取和模式分类四个大步骤。技术人员通过提前安装桥梁结构上面的各种传感器，实时收集桥梁健康状态数据。这些传感器记录下来来源多样、维度很高的数据，必须先进行预处理，把噪声和异常值全部去除干净，这样才能大大提高数据的干净程度和可信程度。完成数据预处理以后，特征提取就成为整个模式识别过程中非常关键的一步。技术人员只要使用适宜的特征提取方法，就可以从海量数据里面提炼出最能代表桥梁状态的核心特征，这样就能显著提升模型准确识别桥梁问题的能力。常见特征提取技术包含时域分析和频域分析，还有利用小波变换或者傅里叶变换更复杂方法。把提取完特征数据直接送入已经训练好机器学习模型里面去做模式分类，这个步骤目的就是要把数据里面隐藏模式全部找

出来,这样就能清楚体现桥梁现在健康状况。机器学习算法比如支持向量机、随机森林还有深度学习这些工具在做模式分类时候都表现出来色性能和适用能力。靠这些算法就能完成对桥梁健康状况准确判断,进而给桥梁日常维护管理给出充分数据支持和科学根据。这种完全靠数据驱动模式识别流程明显提升桥梁健康监测自动化程度和决策速度。

### 3.2 异常状态自动识别机制

异常状态自动检测功能在桥梁健康监测数据分析过程中起到非常重要的作用。工程师使用机器学习算法,能够快速清楚地区分桥梁正常运行时候的状态和出现问题时候的状态,还可以通过已经训练好的数据模型提前预测将来可能会出现的异常情况。这个功能主要依靠对大量复杂监测数据里面的各种特征模式进行深入分析,从而快速发现异常情况。现在大家经常使用的方法包括支持向量机、随机森林和神经网络这些算法。工程师运用这些算法建立起专门用来检测异常的模型,然后对海量桥梁监测数据进行深度挖掘,发现隐藏的异常特征,同时立刻进行评估,这样就能很好地保证桥梁整体结构一直保持安全。这个功能既大大提升了异常检测的准确程度,又显著加强了提前发现桥梁结构可能存在隐患的能力,为桥梁日常维护保养提供了非常可靠的数据依据,有力促进了整个桥梁检测工作向智能化方向快速发展。

## 4 状态趋势预测与早期故障预警应用

### 4.1 健康状态趋势建模

桥梁健康监测最重要的是能提前准确预测桥梁状态变化趋势,这样才能更好提升管理效率和桥梁安全。通过认真分析过去积累的大量监测数据,可以清楚发现桥梁结构性能随时间变化的规律,从而对桥梁未来的健康状况做出靠谱预测。使用机器学习技术可以快速处理来自不同传感器的大量复杂数据,大大提高预测结果的准确度。整个预测建模过程主要包括以下几个环节,先把传感器采集到的原始数据彻底清理干净,去除干扰噪声和明显错误的异常数值,确保剩下数据干净可靠。接着通过特征选择方法,从众多数据指标里面挑出那些真正能反映桥梁结构健康状况的关键指标,这样既减少了计算量,又能让后续模型训练和计算速度变得更快更高效。应用的机器学习算法如时间序列分析、神经网络和支持向量机等,可以识别数据里的非线性关系,实现多步预测。训练好的模型借助导入新的监测数据,能产生桥梁健康状态的趋势预测结果,有利于及早发现潜在风险。这种预测方法不但提升了故障预警的及时性,而且对桥梁维护策略的优化给予了科学依据,有利于降低由于突发事件引发的维护成本与安全隐患,促进桥梁管理的智能化发展。

### 4.2 早期故障识别机制

桥梁健康监测里边,最重要的工作就是提前发现问题

并且预测可能出现的隐患,这样才能避免出现大的事故。机器学习技术给这个工作提供了非常好用的工具,它能够快速分析海量的传感器实时数据,从里面找出真正有用的异常信号。这一节主要给大家讲清楚怎么用机器学习算法来完成高效的故障识别过程。具体的做法是,先拿过去积累的大量桥梁健康数据去训练模型,让模型学会哪些情况属于正常、哪些情况属于异常。一旦现在采集到的传感器数据突然偏离正常范围,模型就会立刻发出警报,及时通知维护人员赶快去检查处理。在这个过程中,异常检测算法发挥了特别关键的作用,它能准确抓住那些还没有被标记出来、但已经暗示早期故障的风险模式和数据里的明显突变情况。具体方法包含采用监督学习和无监督学习技术,以便迅速检测数据中的异常情况。质量预测模型可以预先识别结构性问题的发生,依据分析结果拟定的预警计划,能明显减少桥梁故障对公共安全的影响。机器学习方法不但提升了早期故障识别的准确性,而且加强了系统的响应速度,促进桥梁管理从被动维护向主动预防转型。

## 5 结束语

本文针对桥梁健康监测数据分析领域,系统引入并验证了基于机器学习的方法,从数据处理、特征提取到异常识别等环节,显著提升了结构健康状态的识别准确率。研究证明,机器学习技术能够深入挖掘海量、多源监测数据中的潜在模式,在早期故障诊断和趋势预测方面表现出优异的适应性与预警能力,为桥梁运维管理提供了科学、智能的决策依据。该方法有效解决了传统分析手段在效率与精度上的不足,推动了桥梁健康监测向自动化与智能化方向迈进。然而,目前研究仍存在若干局限性。例如,机器学习模型对传感器数据完整性与质量较为敏感,极端环境下的鲁棒性亟待加强;算法性能在不同桥型及非结构性数据中的泛化能力有待进一步考察。

## [参考文献]

- [1]龙跃飞,李泽滔.基于机器学习的医疗数据分析[J].智能计算机与应用,2020,10(12):18-20.
- [2]李建荣,王胜.基于机器学习的油藏生产监测数据分析与预警方法[J].油气井测试,2023,32(5):8-13.
- [3]魏鑫.基于 COM GIS 的桥梁健康监测数据分析[J].铁道勘测与设计,2023(4):29-33.
- [4]杜强,李冬冬,解峰.基于监测数据分析的大跨度桥梁健康状态评估方法研究[J].科学技术创新,2023(27):153-156.
- [5]李特,张家驹,赵炜,侯泽鹏.基于机器学习的用电数据分析[J].河北电力技术,2020,39(5):17-21.

作者简介:姜义海(2000.8—),男,汉族,辽宁省大连市人,学历本科,研究方向:桥梁检测