

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.04.022

# 基于 Matlab-JAVA 融合的桥梁健康监测 数据分析与预警平台

王智文<sup>1</sup>,毛永嘉<sup>2</sup>,丁幼亮<sup>2</sup>

(1.深圳高速工程顾问有限公司,广东 深圳 518000;2.东南大学 土木工程学院,江苏 南京 210096)

**摘要:**桥梁健康监测为桥梁日常运行和养护管理工作提供了重要支撑。为了实时掌握桥梁结构运行状况,防范化解桥梁运行重大安全风险,桥梁健康监测数据的实时分析、评估与预警是提升桥梁监测和安全保障能力的核心要求。该文将传统信号处理、统计分析与现代机器学习、深度学习相结合,开发了基于 Matlab-JAVA 融合的桥梁健康监测数据实时分析与预警平台,包括健康监测数据的在线清洗、特征提取、性能评估与安全预警,实现了监测数据自动分析、结构状况实时评估、异常状态及时报警。最后以聚龙特大桥工程为例,展示了监测数据分析与预警平台的主要功能。实践表明:该平台实现了健康监测数据的快速准确分析,具有优良的数据分析和运行效率。

**关键词:**桥梁健康监测;数据分析;特征提取;性能评估;预警平台

**中图分类号:**U441

**文献标志码:**A

## 0 引言

桥梁是一种重要的构筑物,也是交通网的重要组成部分。桥梁结构的安全性对于交通发展有着重大的意义,而桥梁健康监测又为桥梁结构的安全性以及维修管理工作提供了重要的指导依据<sup>[1]</sup>。近年来,随着中国桥梁建设的飞速发展,桥梁健康监测系统的工程需求日益增加。然而,桥梁健康监测系统理论与技术仍在发展阶段,目前中国的桥梁健康监测系统仍然存在较多的问题<sup>[2]</sup>。其中最显著的一个问题就是由于缺乏准确、高效的数据分析和评估算法,使各测点传感器数据量过大,导致系统长期监测过程中累积了大量监测数据,而对这些数据的实时处理和预警效率低,导致预警缺乏准确性和时效性。因此构建出预测精度高、时效性强的桥梁健康监测数据分析与预警平台,对于桥梁健康监测具有重大意义。

JAVA 是一种面向对象的编程语言,拥有功能全

面和简单易用的优点,能解决很多的复杂编程问题,但在遇到较复杂的编程时,特别是面对数组矩阵的处理时,劣势较为明显,而 Matlab 具有算法开发,数值计算等多种功能,但对于多线程与跨平台实现方面有所不足。如果可以将两者进行融合,发挥两者的优势,可以显著提高计算效率<sup>[3]</sup>。深度学习是一种复杂的机器学习算法,在很多领域已经取得了非常大的成果,解决了很多复杂的模式识别难题,使得人工智能相关技术取得了很大进步<sup>[4]</sup>。这些为构造桥梁健康监测数据实时分析与预警平台提供了坚实基础。

桥梁健康监测数据实时分析与预警平台主要包括数据清洗、特征提取、性能评估与安全预警四项功能。为了实现这四项功能,本文将信号处理、概率统计等理论知识与深度学习相结合,在 Matlab-JAVA 融合环境下开发出数据清洗算法、数据概率分析与预警算法、数据相关性分析与预警算法这几类基本算法,并结合其他辅助算法,构造出快速、准确和高效的预警平台,并实际应用于聚龙特大桥健康监测系统。

收稿日期:2021-05-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51978154);江苏省杰出青年基金资助项目(编号:BK20190013)

作者简介:王智文,男,硕士,工程师.E-mail:346355318@qq.com

# 1 基于 Matlab-JAVA 融合的数据分析与预警平台

## 1.1 Matlab-JAVA 融合平台

在 Matlab 与 JAVA 融合的过程中,需要解决的主要问题是不同的数据在不同软件以及不同编程语言中的传递。主要采用的方法是在 JAVA 中调用 Matlab 程序,以此来发挥出 Matlab 程序在处理复杂数据尤其是数组矩阵之类的数据中的巨大优势,此方法较为简单,可操作性强。具体原理:利用预先安装在计算机中的 JAVA 开发程序,即 JDK (Java Development Kit),将已经完成编译的 Matlab 文件对象保存,利用 JDK 进行 Matlab 编译文件的接收。具体方法:① 在计算机中安装 JDK 程序;② 在 Matlab 程序中编译相关算法并进行调试与修改,并保存为 m 文件;③ 将 Matlab 程序编译 m 文件为 JAVA 包。如图 1 所示。



图 1 Matlab 程序编译 m 文件为 JAVA 包

## 1.2 数据清洗算法

由于桥梁健康监测是由一系列复杂的软件和硬件组成,在实际监测过程中会出现各类失真数据。失真数据如果不能被及时发现和剔除,将影响健康监测数据分析的准确性,尤其是容易引起桥梁健康监测系统中的虚假报警<sup>[5]</sup>。因此,需要开发相应的清洗算法对失真数据进行修复。目前常见的数据失真类型有缺失(即缺失数据或恒为某常数值)、跳点、漂移、噪声以及趋势异常。数据清洗算法的基本原理是:对以上 5 类失真数据类型进行识别,通过插值或拟合方法、支持向量机方法、移动平均滤波方法、广义  $3\delta$ -Super Smoother 方法、数据基准位置补偿方法、Long Short Time Memory (LSTM) 分类方法和 Generative Adversarial Networks (GAN) 回归方法等实现数据清洗<sup>[6-7]</sup>。

## 1.3 数据概率分析和预警算法

数据概率分析与预警是桥梁健康监测数据实时分析与预警平台的一个重要功能,其基本原理是高斯混合概率建模结合累积分布函数(CDF)分析。高斯分布又称正态分布,而高斯概率模型就是用高斯概率密度函数精确量化事件的模型,它将一个事物分解为若干条高斯概率分布曲线。一维高斯函数的表达式为:

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

式中: $\mu$ 为均值; $\sigma$ 为标准差。

则高斯混合模型的数学表达式为:

$$p(x) = \sum_{k=1}^k w_k g(x|\mu_k, \sum k) \quad (2)$$

式中: $k$ 为混合模型中的成分个数; $w_k$ 为权重系数,满足: $0 \leq w_k \leq 1, \sum_{k=1}^k w_k = 1$ ;  $g(x|\mu_k, \sum k)$ 为第  $k$  个高斯分布, $x$ 为高斯分布维度,本平台中  $x$  取 1。

累积分布函数是概率密度函数的积分,它可以完整描述一个随机变量的概率分布情况,对于随机事件  $x$ ,具体表达式如下:

$$F_x(x) = P(X|x \leq 1) \quad (3)$$

基于上述概率论与统计学知识,该算法的工作原理如下:

(1) 利用小波包分解方法,将响应时程数据中的温致响应部分与车致响应部分分离出来,提取需要的响应部分(图 2)。

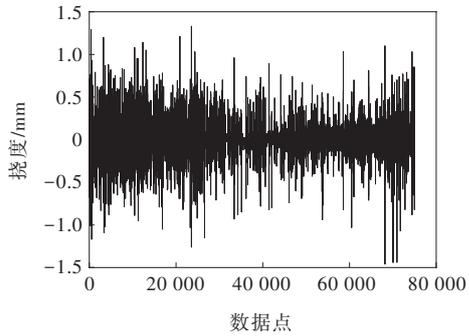
(2) 对提取出来的响应进行直方图 bin 计数,得到响应的频数直方图,并进行高斯混合模型曲线拟合(图 3)。

(3) 进行高斯混合模型的概率建模。

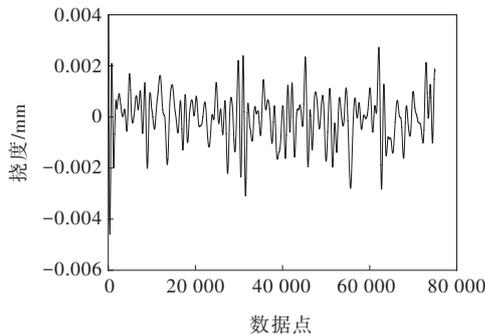
(4) 对高斯混合模型曲线最外数据簇进行 CDF 分析,取最外数据簇高斯概率模型 CDF 函数的 95% 保证率对响应值作为预警指标。

## 1.4 数据相关性分析和预警算法

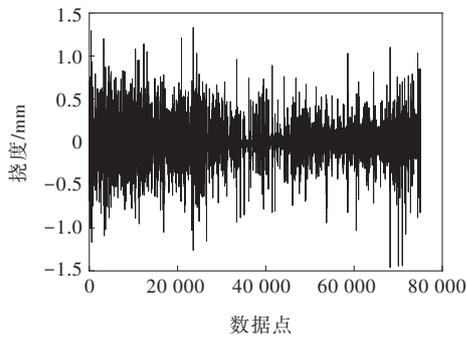
数据相关性分析和预警是桥梁健康监测数据实时分析与预警平台的又一个重要功能。相关研究表明:建立荷载与响应、响应与响应之间的相关性模型,利用模型残差的变化进行损伤识别,并基于大数据样本的统计指标作为预警值的预警方法具有较高的准确性<sup>[8-9]</sup>。因此该平台基于上述研究结果,开发出一套数据相关性分析以及预警算法,其工作原理



(a) 响应原始数据



(b) 温致响应数据



(c) 车致响应

图2 小波包分解提取响应

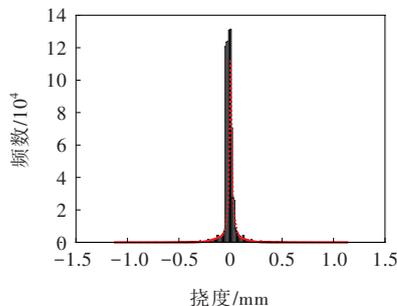


图3 直方图高斯曲线拟合

是:对荷载-响应以及响应-响应数据建立多元回归模型或者深度学习模型,得到响应数据回归值,用真实值减去回归值得到相应的残差,利用大数据样本的统计值得到相应的残差预警阈值。

## 2 工程应用

### 2.1 聚龙特大桥工程概况

聚龙特大桥为整体式路基双幅桥,主桥上部结构为变截面预应力混凝土连续箱梁,下部结构采用薄壁空心墩,基础为桩基础<sup>[10]</sup>。随着运营时间的增加,聚龙特大桥出现了不同程度的病害。为此,建设聚龙特大桥结构健康监测系统,用以监测和评估大桥在运营期间结构的承载能力、运营状态和耐久性能,从而确保桥梁的使用安全与延长桥梁的使用寿命,为今后桥梁病害防治及维修加固决策制定提供科学可靠的依据。

### 2.2 数据分析与预警平台架构

桥梁健康监测数据实时分析与预警平台主要包括数据清洗、特征提取、性能评估与安全预警四项功能。数据清洗的主要工作内容为各类监测数据在线清洗,包含的算法有插值或拟合算法、支持向量机算法、移动平均滤波器算法、广义3dSuper Smoother算法、数据基准位置补偿算法、LSTM分类算法、GAN回归算法。

特征提取的工作内容为荷载与响应特征参数提取,荷载响应提取包含的算法有概率统计建模算法、极值分析算法、聚类分析算法;温致响应提取的算法有温致应变响应分离算法、温致挠度响应分离算法、概率统计建模算法、极值分析算法、聚类分析算法;车致响应提取的算法有车致应变响应分离算法、车致挠度响应分离算法、自编码神经网络非平稳数据提取算法、概率统计建模算法、极值分析算法。

性能评估主要进行开裂状态、承载能力、变形能力以及动力特性4个方面的评估。开裂状态评估包含车致应变重车簇建模算法、聚类分析算法、极值分析算法、裂缝趋势分析算法;承载能力评估包含温度-应变相关性分析算法、温致应变残差提取算法;变形能力评估包含温度-挠度相关性分析算法、温度基准线形提取算法、LSTM回归分析算法;动力特性评估包含模态频率识别算法、频率-温度相关性分析算法、环境条件归一化分析算法。

安全预警主要针对极端或突发事件报警以及长期性能退化报警。极端或突发事件报警包含动态阈值更新算法;长期性能退化报警包含开裂动态预警算法、刚度退化预警算法、承载能力退化预警算法、动力特性异常预警算法。

### 2.3 数据分析与预警平台展示

针对聚龙特大桥健康监测系统的监测内容和监测需求,在平台算法库的基础上选择适当算法定制开发了聚龙特大桥健康监测数据分析与预警平台,平台展示如图4所示。

该平台的主要特色包括:

(1) 实现了监测数据在线清洗,针对缺失、跳点、噪声、漂移和趋势异常的清洗率可分别达到100%、100%、100%、99.96%和99.97%。

(2) 实现了桥梁特征提取和性能评估的在线分析以及重车荷载效应的实时监控。

(3) 建立了“环境荷载—局部响应—整体响应”的三级预警体系,并且针对每个传感器建立了个性化两级预警阈值。

(4) 采用内存优化和缓存清空技术,实现了海量数据分析的高效率运行。

(5) 采用轻量化和可更新算法技术,平台功能今后可以持续优化提升。



图4 聚龙特大桥健康监测数据分析与预警平台展示

## 3 结语

桥梁健康监测数据实时分析与预警平台将传统信号处理、统计分析与现代机器学习、深度学习相结合,预警结果具有高度的精确性以及时效性;该平台基于 Matlab-JAVA 融合,结合了 Matlab 程序与 JAVA 语言的优点,使得预警过程更为高效;该平台采用了内存优化以及算法更新等有效手段,使平台功能在投入使用后可持续优化。对比传统的桥梁健康监测手段,基于 Matlab-JAVA 融合的桥梁健康监测数据实时分析与预警平台是一种更精确、更高效、实用性更强的预警平台。

### 参考文献:

- [1] 杜彦良,孙宝臣,吴智深,等.关于建立健全交通基础设施长寿命安全保障体系的战略思考[J].中国工程科学,2017,19(6):1-5.
- [2] LI H N, LI D S, REN L, et al. Structural health monitoring of innovative civil engineering structures in mainland china[J]. Structural Monitoring and Maintenance, 2016, 3(1): 1-32.
- [3] 杨晓霞,候锐锋. VISUAL C#. NET, DELPHI, JAVA 与

MATLAB 接口技术的研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2008(S2): 247-249.

- [4] HU W H, SAID S, ROHRMANN R G, et al. Continuous dynamic monitoring of a prestressed concrete bridge based on strain, inclination and crack measurements over a 14-year span[J]. Structural Health Monitoring, 2018, 17(5): 1073-1094.
- [5] 涂成枫,刘泽佳,张舸,等.面向桥梁长期健康监测的大数据处理技术及应用[J].实验力学,2017,32(5):652-663.
- [6] 任普.基于大数据的桥梁监测数据清洗方法研究[D].南京:东南大学,2019.
- [7] CATBAS F N, SUSOY M, FRANGOPOL D M. Structural health monitoring and reliability estimation: Long span truss bridge application with environmental monitoring data [J]. Engineering Structures, 2008, 30(9): 2347-2359.
- [8] DING Y L, ZHAO H W, DENG L, et al. Early warning of abnormal train-induced vibrations for a steel-truss arch railway bridge: Case study[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(11): 05017011.
- [9] DENG Y, LI A Q, CHEN S R, et al. Serviceability assessment for long-span suspension bridge based on deflection measurements[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(11): e2254.
- [10] 胡奇宇.广州市北二环高速公路聚龙特大桥设计[J].铁道勘测与设计,2004(4):59-62.