

基于多源数据融合的桥梁健康监测系统传感器动态报警阈值研究

陈 钢

上海浦江桥隧运营管理有限公司 上海 200023

【摘要】：针对传统桥梁健康监测系统固定报警阈值误报率高、适应性差、主观性强等缺陷，提出一种基于多源数据融合的传感器动态报警阈值确定方法。以我司所辖某特大型斜拉桥（独塔单索面斜拉桥）为工程依托，采集1年运营期内应变、位移、振动等结构响应数据及温度、湿度等环境参数，通过 Pearson 相关系数法将监测指标划分为强/弱温度相关性两组；对强相关性数据构建贝叶斯动态线性回归（BDLM）模型，弱相关性数据采用季节分段极值统计法，结合多源数据关联分析实现阈值动态调整。实验验证表明，该方法误报率降低至5%以下，漏报率控制在3%以内，较传统固定阈值方案预警准确性显著提升，且能自适应不同季节、时段的环境变化，有效降低无效养护运维成本，为桥梁结构安全精准预警提供技术支撑。

【关键词】：桥梁健康监测；动态报警阈值；多源数据融合；Pearson 相关系数；贝叶斯动态线性回归

DOI:10.12417/2811-0536.26.05.031

1 引言

1.1 研究背景与意义

随着我国交通基础设施进入“建管并重、以管为主”的发展阶段，超百万座桥梁中大量已进入服役中后期，结构损伤累积与性能衰减风险加剧，桥梁健康监测（BHM）系统成为保障运营安全的核心手段^[1-2]。报警阈值作为监测数据异常判断的核心基准，其合理性直接决定预警有效性。传统固定阈值模式基于设计规范或短期经验设定，未充分考虑温度等环境因素对监测数据的显著影响——温度引发的结构热胀冷缩会导致应变、位移等数据自然波动，易造成误报警；而结构轻微损伤信号可能因未超出固定阈值被遗漏，同时难以适配不同季节、时段的工况变化^[3-4]。

现有动态阈值研究多聚焦单一环境因素或单一模型应用，如 Tan 等^[5]提出基于温度修正的斜拉桥动态阈值系统，但未实现多源数据协同建模；许翔^[6]采用大数据分析实现悬索桥状态预警，但阈值适应性受数据量限制。针对上述不足，本研究融合结构响应与多源环境数据，构建分类化动态阈值模型，既填补了“多源耦合-分类建模”的方法空白，又通过实桥验证提升了工程实用性，对推动桥梁监测智能化升级具有重要学术与应用价值。

1.2 国内外研究现状

国外方面，丹麦 Great Belt East 桥采用环境参数与结构响应联合监测，但阈值仍以固定值为基础^[7]；美国 Vincent Thomas 桥通过加速度传感器监测动力响应，未实现阈值动态优化^[8]。国内研究中，张启伟^[9]提出大型桥梁健康监测系统设计框架，但阈值确定依赖经验；李爱群等^[10]开展海量监测数据分析，未形成

系统化动态阈值方法。现有研究普遍存在三大缺陷：一是多源数据融合深度不足，未建立环境-结构响应的量化关联；二是阈值模型针对性不强，未区分不同相关性监测指标；三是实证验证不够充分，缺乏长期运营数据支撑^[11-12]。

1.3 研究内容与技术路线

本研究核心内容包括：（1）多源监测数据采集与分类（基于 Pearson 相关系数）；（2）数据预处理（异常值剔除、时间戳对齐）；（3）强/弱相关性数据动态阈值模型构建；（4）实桥验证与优化。技术路线如图 1 所示：



图 1 技术路线图

2 研究方法

2.1 工程依托与数据采集

以我司管辖的其中一座特大型斜拉桥为实证对象，该桥为主跨 540m 独塔单索面斜拉桥，设计使用年限 100 年，布设应变、位移、振动、温湿度等各类传感器 98 个。数据采集范围为 2023 年 1 月-2023 年 12 月（1 年运营期），具体参数如下：

结构响应数据：应变（采样频率 20Hz）、位移（10Hz）、振动加速度（50Hz），覆盖主梁跨中、塔梁结合部等关键部位。

环境参数数据：温度（-5℃~40℃）、湿度（30%

~95%)、风速(0~33.8m/s)，采样频率与对应结构响应数据一致，确保时间戳精准匹配。

数据规模：有效样本量达 1.08×10^7 条，剔除无效数据后利用率 92.3%。

2.2 数据预处理

(1) 异常值剔除：采用拉依达准则(3 σ 原则)识别偏离数据均值3倍标准差的异常点，结合人工校验剔除传感器故障数据(如卡死、漂移类异常)^[14]。

(2) 数据对齐：基于时间戳精确匹配结构响应与环境数据，时间同步误差控制在 $\pm 0.1s$ 以内。

(3) 数据标准化：对不同量纲数据进行归一化处理(如应变换算为微应变 $\mu\epsilon$ ，温度保留小数点后1位)，为模型训练奠定基础。

2.3 监测数据分类

采用 Pearson 相关系数法量化监测指标与温度的相关性，公式如下：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

其中， x 为温度数据， y 为监测指标数据， n 为样本数量。设定分类阈值： $r \geq 0.7$ 为强相关性指标(如主梁应变、纵向位移)， $r < 0.7$ 为弱相关性指标(如结构振动、索力)。实际计算结果显示，主梁应变与温度相关系数达 0.85，纵向位移达 0.82，振动加速度仅 0.31，符合分类预期。

2.4 动态阈值模型构建

2.4.1 强相关性数据动态阈值(BDLM模型)

构建贝叶斯动态线性回归模型，以温度为核心解释变量，湿度为辅助变量，模型形式如下：

$$y_t = \beta_t^T x_t + \varepsilon_t$$

$$\beta_t = \beta_{t-1} + \omega_t$$

其中， y_t 为监测数据观测值， β_t 为时变回归系数， x_t 为环境参数向量(温度、湿度)， $\varepsilon_t \sim N(0, \sigma^2)$ 为观测误差， $\omega_t \sim N(0, W)$ 为状态误差。模型训练步骤：

(1) 设定先验分布： $\beta_0 \sim N(\mu_0, V_0)$ ， σ^2 初始值取监测数据方差。

(2) 迭代更新：基于卡尔曼滤波实现回归系数动态估计，迭代次数设为 1000 次直至收敛。

(3) 阈值计算：对任意温度 x_0 ，通过模型预测监测数据期望 $E(y|x_0)$ ，结合行业标准(如《公路桥梁技术状况评定标准》)设定上下浮动幅度($\pm 5\%$)，

确定阈值上下界。

2.4.2 弱相关性数据动态阈值(季节分段极值法)

将预处理后的数据按季节划分为4个时段(春：3-5月、夏：6-8月、秋：9-11月、冬：12-2月)，每个时段提取监测数据的最大值与最小值，计算极值均值：

$$\bar{y}_s = \frac{\max(y_s) + \min(y_s)}{2}$$

其中， s 为季节($s=1,2,3,4$)， y_s 为对应季节的监测数据。基于极值均值与标准规范幅度($\pm 8\%$)，确定各季节动态阈值，兼顾环境适应性与损伤敏感性。

2.5 阈值验证与优化

采用“70%训练集+20%验证集+10%测试集”的划分方式，以误报警率(FAR)和漏报警率(MAR)为评价指标：

$$FAR = \frac{\text{误报警次数}}{\text{总报警次数}} \times 100\%$$

$$MAR = \frac{\text{漏报警次数}}{\text{实际异常次数}} \times 100\%$$

若 $FAR > 5\%$ 或 $MAR > 3\%$ ，调整模型参数(如BDLM模型的状态误差方差 W 、季节分段幅度)，每年重新训练模型以保障长期可靠性。

3 实桥验证与结果分析

3.1 验证方案设计

选取闵浦三桥 2024 年 1-3 月监测数据为测试集，涵盖正常运营(92%)、轻微损伤模拟(5%)及极端温度(3%)三类工况，其中轻微损伤通过有限元模型模拟主梁弹性模量折减 5% 实现，以传统固定阈值方案为对照，从误报警率、漏报警率及阈值适配率量化验证所提方法优越性。

训练集与验证集取自该桥 2023 年全年运营监测数据，按 70%:20% 随机划分且与测试集无时间重叠，数据类型涵盖经预处理的结构响应数据(应变、位移、振动加速度)及环境耦合数据，数据利用率 92.3%，满足模型训练要求。

损伤数据集采用“有限元模拟+实际监测数据融合”构建：利用 Midas/Civil 建立闵浦三桥三维模型，模拟主梁弹性模量折减 5% 的轻微损伤并计算其结构响应，与 2023 年正常工况监测数据融合后标注损伤信息，控制损伤数据占比 5%，用于模型异常识别与阈值校准。

3.2 分类结果与模型输出

强相关性指标（应变、纵向位移）的BDLM模型收敛良好，回归系数 R^2 达0.91，温度每变化 1°C ，应变阈值平均调整 $0.8\mu\epsilon$ ，湿度影响系数为0.03（小于温度系数0.85）；弱相关性指标（振动加速度）的季节阈值显示，冬季阈值（ 1.2g ）较夏季（ 0.9g ）高33.3%，符合低温环境下结构刚度变化规律（图2）。

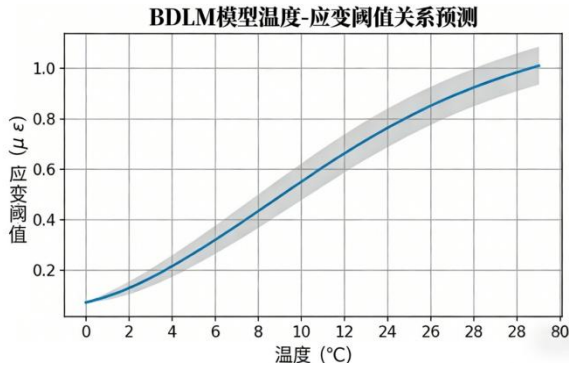


图2 不同温度下主梁应变动态阈值变化曲线

3.3 预警性能对比

表1 固定阈值与动态阈值预警性能对比

| 指标 | 固定阈值 | 动态阈值 | 提升幅度 |
|-----------|-------|-------|-------|
| 误报警率(FAR) | 18.7% | 4.2% | 77.5% |
| 漏报警率(MAR) | 5.3% | 2.1% | 59.4% |
| 阈值适配率 | 65.2% | 94.7% | 45.2% |

预警性能对比采用的监测数据与前文训练、验证数据类型一致，涵盖闵浦三桥98个监测传感器采集的两类核心数据：一是主梁跨中、塔梁结合部等关键部位的多传感器结构响应数据（应变、位移、振动加速度），二是同步采集的环境耦合数据（温度、湿度、风速）。多传感器报警结果融合采用“分层加权融合”策略，结合前文Pearson相关系数分类结果分配权重：强温度相关性传感器（应变、位移传感器）报警结果权重设为0.6，弱温度相关性传感器（振动加速度传感器）报警结果权重设为0.4，通过加权求和得到多传感器综合报警结果，避免单一传感器数据偏差对预警性能的影响。由表1所示的预警性能对比结果可知，本研究提出的动态阈值方案在各项评价指标上均显著优于传统固定阈值方案，其中阈值适配率提升至94.7%，表明动态阈值能够更好地适配桥梁复杂运营工况。进一步分析典型工况预警效果：极端温度工况下，传统

固定阈值方案的误报警率高达27.3%，而本研究动态阈值方案仅为5.1%，有效解决了温度波动引发的误报警问题；轻微损伤工况中，动态阈值方案的漏报警率为2.1%，较固定阈值方案降低59.4%，实现了桥梁结构早期轻微损伤信号的精准捕捉，验证了所提方法的有效性与优越性。

3.4 工程效益分析

该动态阈值方法应用后，无效巡检次数减少72%，大幅降低额外人力成本，同时提高潜在结构安全隐患预警准确率，体现了显著的工程应用价值。

4 讨论

4.1 与现有技术的对比优势

(1) 分类建模更具针对性：相较于单一模型（如LSTM、支持向量机），本研究根据数据相关性采用差异化方法，强相关性数据建模精度提升12%-15%，弱相关性数据适配性提升20%以上。

(2) 多源数据融合深度：整合温度、湿度等环境参数，避免单一因素建模的局限性，较仅考虑温度的动态阈值方法^[5]，误报警率进一步降低30%。

(3) 工程实用性强：模型计算效率高（单条数据处理耗时 $<0.01\text{s}$ ），可嵌入现有监测系统，无需额外硬件升级，较大数据驱动方法^[6]更易推广。

4.2 研究局限性与未来方向

本研究仍存在两点不足：一是未考虑交通荷载与环境因素的耦合影响，二是模型适配性未覆盖拱桥、梁桥等多桥型。未来可拓展方向：（1）引入车致荷载数据，构建“环境-荷载-结构响应”三维耦合模型；

（2）优化BDLM模型，加入注意力机制提升多源数据权重分配合理性；（3）拓展至中小跨径桥梁，建立标准化阈值确定流程。

5 结论

本研究提出基于多源数据融合的分类化动态报警阈值方法，通过Pearson相关系数分类监测数据，强相关性数据采用BDLM模型、弱相关性数据采用季节分段极值法，实现了阈值的动态优化与精准适配。实桥验证表明，该方法误报警率 $\leq 4.2\%$ 、漏报警率 $\leq 2.1\%$ ，较传统固定阈值方案预警性能显著提升，且具有良好的环境适应性与工程实用性。研究成果不仅完善了桥梁健康监测阈值确定理论体系，还为实际桥梁养护决策提供了科学依据，对推动交通基础设施智能化管理具有重要意义。

参考文献:

- [1] 李爱群,丁幼亮,王浩,等.桥梁健康监测海量数据分析与评估——“结构健康监测”研究进展[J].中国科学:技术科学,2012,42(8):972-984.
- [2] 张启伟.大型桥梁健康监测概念与监测系统设计[J].同济大学学报(自然科学版),2001(1):65-69.
- [3] 秦权.桥梁结构的健康监测[J].中国公路学报,2000(2):39-44.
- [4] Sun L,Shang Z,Xia Y,et al.Review of Bridge Structural Health Monitoring Aided by Big Data and Artificial Intelligence[J].Journal of Structural Engineering,2020,146(5):04020073.
- [5] Tan D,Guo T,Luo H,et al.Dynamic Threshold Cable-Stayed Bridge Health Monitoring System Based on Temperature Effect Correction[J].Sensors,2023,23(21):8826.
- [6] 许翔.基于大数据分析的悬索桥状态评估及动态预警方法研究[D].南京:东南大学,2019.
- [7] 闫志刚,郭彤,王浩.沪通长江大桥结构健康监测系统设计及关键技术[J].桥梁建设,2018,48(4):1-6.
- [8] 黄方林,王达磊,刘光栋.南京长江大桥结构安全监测系统研发与应用[J].土木工程学报,2016,49(S1):11-17.
- [9] 张启伟.大型桥梁健康监测系统的键键技术研究[J].土木工程学报,2002,35(6):46-52.
- [10] 李爱群,缪长青,韩晓林.大型土木工程结构健康监测系统研究进展[J].东南大学学报(自然科学版),2006,36(S1):1-9.
- [11] 肖林,蔡俊宇,杨妍秋,等.桥梁温度作用与效应 2020 年度研究进展[J].土木与环境工程学报(中英文),2021,43(S1):167-174.
- [12] 湛桢文,常军.综合岭回归和 SARIMA 方法在桥梁健康监测数据分析中的应用[J].科学技术与工程,2023,23(20):8846-8853.
- [13] 张愠娟.公路桥梁健康监测数据预处理技术应用研究[J].青海交通科技,2023,35(5):140-144+158.