

# 桥梁健康监测数据分析研究综述

唐浩, 谭川, 陈果

(招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067)

**摘要:** 基于采集到的海量桥梁监测数据, 从信号处理与数据挖掘角度全面系统地阐述已有监测数据的处理方法, 将数据处理流程归纳为“数据预处理”“结构安全预警”“结构状态及损伤识别”“结构综合评估”4 大模块, 并对各模块中现有信号分析方法及其应用实例予以介绍, 为桥梁结构的健康监测数据分析进行概括性总结。

**关键词:** 桥梁健康监测; 预处理; 安全预警; 损伤识别

文章编号: 1009-6477(2014)05-0099-06 中图分类号: U44 文献标识码: A

## Overview of Analysis and Research on Health Monitoring Data of Bridges

TANG Hao, TAN Chuan, CHEN Guo

**Abstract:** Based on the collected massive bridge monitoring data, this paper fully and systematically expatiates handling methods for the existing monitoring data from the viewpoints of signal processing and data mining, concludes the data processing flow as 4 modules, i.e. “data pre-processing”, “structure safety pre-alert”, “identification of structure states and damages” and “comprehensive evaluation of structure”, and introduces the existing signal analysis methods in all modules and application examples so as to present a summary of health monitoring data of bridge structure.

**Key words:** bridge health monitoring; pre-processing; safety pre-alert; damage identification

近年来, 随着我国经济的高速发展, 交通量骤增, 许多既有桥梁的设计荷载已不能满足现行车辆荷载的使用要求, 桥梁结构安全受到严重威胁。为保障桥梁运营期内的结构安全, 必须对桥梁进行健康监测, 建立预警机制, 以防止桥梁垮塌等重大事故发生。进行桥梁健康监测时, 每天会产生大量数据, 因此, 面对海量的监测数据, 有必要采用合适的处理手段从中分析出有价值的信息, 以为桥梁结构运营状态评估提供重要的科学参考依据。本文针对采集到的桥梁各类型监测数据, 从信号处理与数据挖掘角度全面系统地阐述了监测数据的处理方法。表 1

列出了桥梁长期监测中的各类监测项目。

### 1 数据预处理模块

#### 1.1 传感器数据可信度评价

桥梁长期监测中采集到的传感器数据不可避免地会因各种因素导致其精确性下降, 因此, 为了更好地为桥梁安全评估提供依据, 将对数据质量进行评价, 即给出数据的可信度。主要评价方法如下。

1) 通过采集设备返回的状态进行传感器数据可信度判定。

2) 采用时间序列分析方法建立各个传感器数

表 1 桥梁监测项目

序号	1	2	3	4	5	6	7
监测项目	环境风荷载	环境温湿度	地震动	船撞响应	交通荷载(车重、车速、车流量)	位移(包括塔顶位移、加劲梁跨中位移、伸缩缝相对位移等)	挠度
序号	8	9	10	11	12	13	14
监测项目	应力应变	倾斜	结构温度	裂缝	索力	动态振动	钢结构疲劳

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 计划)(2012CB723807); 交通运输部西部交通建设科技项目(2013-364-740-600)

收稿日期: 2014-05-19

作者简介: 唐浩(1983-), 男, 重庆市人, 博士, 高工。

据历史趋势模型,即收集一段时间的数据后,并参照其它桥梁同类数据模型,为每个传感器建立历史趋势模型。根据此模型来预测数据出现的范围,凡不在此范围内的数据将被判定为异常数据。

3) 结合该数据与其它数据的相关性进行判定。为每个截面的各类传感器建立相关模型,判定时,可依据其它数据的变化情况来确定可疑数据<sup>[1]</sup>。

4) 基于相同类型、相近位置的传感器所测数据,采用灰色关联度方法进行相关性分析计算。若关联性分析所得关联度的概率标准差小于阈值,则表明不同传感器所测数据具有较好的相关性,证明传感器工作正常;否则表示数据关联性不好,某一传感器工作异常<sup>[2-4]</sup>。张立涛采用该方法对江阴长江大桥应变传感器进行异常诊断,取得了较好效果<sup>[5]</sup>。

## 1.2 异常数据处理

对于原始桥梁监测信号,其往往需借助统计学方法去除数据中的粗差<sup>[1,6-8]</sup>,此时得到的信号总是与各种噪声混杂在一起,因此只有再经过滤波处理将信噪分离后,才能较准确地提取有用信息。常见简单滤波算法有算术平均值滤波、加权平均值滤波、滑动平均值滤波、中值滤波、限幅滤波、低通滤波、复合滤波等。小波及小波包技术近年来也被用于滤波消噪,并展现出良好的性能<sup>[6,9-10]</sup>,如:何旭辉<sup>[11]</sup>采用小波技术对南京长江大桥的几种典型信号进行了滤波处理。表2总结了桥梁监测中易出现的几种异常情况及其应对方法。

## 1.3 数据插补

剔除异常数据后,为便于后续信号分析,还需进行前期数据插补工作,常用方法有:特殊值填补(如均值)、插值(如拉格朗日插值法在曾家沟大桥挠度数据插补上的应用<sup>[12]</sup>)、多项式曲线拟合、时间序列自适应移动平均模型<sup>[13-14]</sup>、支持向量机插补<sup>[15]</sup>、神经网络插补<sup>[13-14]</sup>等。

## 2 结构安全预警模块

预警指标可以用基于统计数据的无模型方法设定,也可以采用基于有限元模型的方法设定,还可以根据经验、标准、规范直接设定。桥梁监测中,单一预警条件(单项指标预警)受偶然因素影响较大,容易出现误报,故推荐采用组合预警条件(多项指标预警)联动触发报警。图1示出一种连续3次超限才触发预警的报警方式,其一定程度上可以减小误报率。

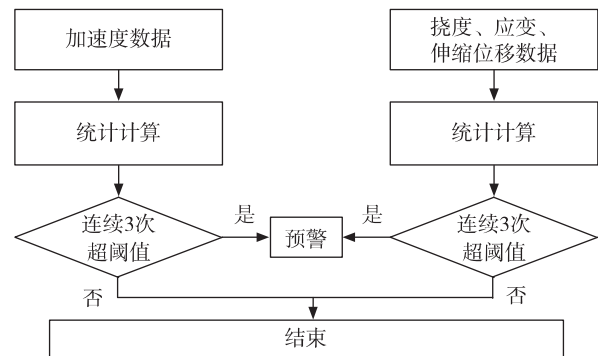


图1 桥梁监测预警流程

统计得到的最大(最小)值、均值、方差、标准差、变化幅值等常作为初级预警输入值。对桥梁进行监测时,需针对不同的监测参数,采用不同的统计区段:对于静态参量,其实时性要求相对较低,可以“天”为时间尺度,将其作为一个统计区段;对于动态参量,因其采样频率较高,故可以“分钟”为时间尺度,即针对每min采集的数据生成一个统计值,并将每h内的统计值进行2次统计等。

## 3 结构状态及损伤识别模块

### 3.1 模态参数识别

桥梁结构模态参数主要指桥梁结构的频率、振

表2 桥梁监测数据异常情况及处理方法

异常情况	处理方法
传感器基准值改变	基准值偏移方法: 实际值 = 测试值 - 基准值
超量程数据	设定阈值, 剔除超量程数据, 数据插补
空通道数据	硬件自身检测或由技术员凭经验判断
多次重复的高精度数值	根据实际情况编程剔除, 数据插补
仪器温漂或零漂引起的趋势项	硬件或软件去除
突变数据(未知因素引起, 虽在量程内, 但明显不可能的数据)	统计分析后剔除, 数据插补
白噪声数据或白噪声占优数据	滤波、消噪(小波阈值去噪等)
典型受干扰数据	滤波

型、阻尼模态参数反映了结构的系统特性。目前研究者们已经提出了多种较成熟的基于白噪声激励的模态参数识别方法,主要包括<sup>[16-18]</sup>:随机子空间法、环境激励法(特征系统实现法)、频域分解法、峰值拾取法、自回归移动平均模型建模、随机减量法、ITD法、最小二乘复指数法及多参考点复指数法。

近年来,一些基于非平稳响应数据的模态参数识别技术逐渐被提出,主要包括:1) 希尔伯特-黄变换<sup>[19-20]</sup>,如其在北京立水西大桥<sup>[21]</sup>、南京长江大桥<sup>[11]</sup>、贵阳红枫湖大桥<sup>[22]</sup>监测分析中的应用;2) 经验模态分解<sup>[23-24]</sup>,如其在北京立水西大桥<sup>[21]</sup>、贵阳红枫湖大桥<sup>[22]</sup>、上海东海大桥<sup>[25]</sup>监测分析中的应用;3) 基于 Gabor 展开和重构的模态参数识别方法;4) 基于小波分析技术的模态参数识别方法。

### 3.2 特征提取与数据降维

特征参数的适当选择与提取常常包含各类经典和现代的信息处理方法与技术。文献[26-29]介绍了部分可用于桥梁损伤识别的特征参数构建方法。此外,小波及小波包技术、希尔伯特-黄变换、自适应移动平均技术等也可用来构建损伤识别的输入特征。

当构建的输入特征数量较多时,若直接将全部特征作为损伤识别算法的输入向量,则有时可能会因为信息的冗余而导致维数灾难,从而将降低损伤识别算法的效率与精度。针对这一情况,可采用主分量分析、核主分量分析等方法对输入特征向量进行降维,并将约减后起主要作用的主成分作为识别算法的输入向量<sup>[27,30-33]</sup>。

### 3.3 结构损伤识别

#### 3.3.1 基于模型修正理论的结构损伤识别方法<sup>[16,34]</sup>

该方法利用静力及振动试验模态分析结果,修改理论有限元模型的刚度矩阵、质量矩阵等参数,使修正后的有限元模型静力分析结果及振动模态参数与试验值相吻合。该方法主要有:模态柔度法、最优矩阵修正法、基于灵敏度的矩阵修正法、特征结构分配法、测量刚度的变化、综合模态参数法等。

#### 3.3.2 损伤动力指纹法<sup>[16,34]</sup>

该方法利用结构振动测试直接得到的振动响应时程参数(位移、速度、加速度)或经过模态分析变换所得到的结构动力学参数作为损伤指示信息(动力指纹)来识别结构损伤的位置及程度。根据对动力测试信息利用状态的不同,其可分为:基于频率变化的方法、基于模态振型变化的方法、基于模态振型曲率<sup>[35]</sup>和应变模态变化的方法<sup>[36]</sup>、基于测量振动

柔度的方法等。对于时程动力指纹,常采用结构损伤前后的加速度频率响应函数波形进行损伤识别。

#### 3.3.3 神经网络识别法

神经网络具有很强的非线性映射能力及高度的容错性能,对参数的准确性要求不高,在处理模糊信息及模拟专家推理方面也显示出巨大潜力,它不但能较准确地识别损伤位置,还可以对损伤程度作出合理评价。当然,该方法也存在一些不足,如:最常用的BP网络收敛较慢,易陷入局部极小值;在神经网络构造、损伤指标选取、输入向量及输出目标确定等方面还存在一些问题。

文献[9,22,26-27,37-50]将神经网络方法用于桥梁结构的损伤识别,包括江阴长江大桥<sup>[27]</sup>、香港青马大桥<sup>[37,50]</sup>、西宁北川河大桥<sup>[43]</sup>、贵阳红枫湖大桥<sup>[22]</sup>、青岛丹山水库桥<sup>[46]</sup>等。

#### 3.3.4 无模型的信号分析方法<sup>[34]</sup>

这类方法不需要结构有限元模型,也不需要原始桥梁结构的静、动响应信息,其通过对检测到的桥梁结构信号进行分析处理,直接得到构件的损伤信息。主要包括:基于小波的结构损伤识别法<sup>[51-56]</sup>、统计模式识别法、时频分布法以及高阶统计量法,其中应用最广泛的是小波分析技术,其在滨州黄河公路大桥<sup>[16]</sup>、宜宾金沙江中坝大桥<sup>[57]</sup>、秦皇岛山东堡大桥<sup>[58]</sup>、新开河大桥<sup>[58]</sup>、排洪河桥<sup>[58]</sup>、江苏润扬长江大桥<sup>[59]</sup>上都得到应用。

#### 3.3.5 支持向量机识别法

支持向量机(SVM)是基于结构风险最小化原则的统计学习方法,其对小样本数据具有良好的分类识别能力,且在桥梁结构损伤识别领域中已得到应用<sup>[39-40,60]</sup>,如:江苏江阴长江大桥<sup>[30-31,33]</sup>、香港汀九大桥<sup>[61]</sup>等。

### 3.4 参数优化

结构损伤识别过程中,往往需要通过调节控制参数来使识别结果达到最优。常用的参数优化方法包括:最小二乘法、交叉验证法、遗传算法(GA)<sup>[42,55]</sup>、粒子群算法(PSO)<sup>[40]</sup>等,如:文献[34]介绍了采用遗传算法对芜湖长江大桥动力分析模型进行了修正,文献[62]阐述了在宁波招宝山大桥上采用遗传算法对其损伤位置和程度进行识别。

## 4 结构综合评估模块

### 4.1 趋势分析

趋势分析只能是在长时间、大量数据的基础上,

通过数理统计、数据拟合等多种方法,了解结构变化状态,作出桥梁健康发展趋势的估计。常用趋势分析方法有:1)插值;2)多项式曲线拟合;3)时域波形平滑,观测趋势<sup>[6,63]</sup>,如其在山西风陵渡黄河大桥<sup>[64]</sup>中的应用;4)时间序列 ARMA 模型<sup>[32,65-67]</sup>,如:重庆高家花园嘉陵江大桥挠度长期监测数据预测<sup>[68]</sup>、重庆大佛寺长江大桥应变预测<sup>[69]</sup>、国道主干线(GZ40)上的某特大公路桥<sup>[70]</sup>、重庆马桑溪大桥挠度预测<sup>[71]</sup>等;5)灰色模型<sup>[72-73]</sup>;6)神经网络,如重庆马桑溪大桥跨中挠度数据预测<sup>[65]</sup>;7)支持向量机。

#### 4.2 相关分析

某些监测数据或特征结果间存在联系,如温度与结构动力特性、伸缩缝位移、结构空间变位之间即存在较大的相关性,故对这些数据进行相关性分析具有重要意义。针对同一类型不同测点的监测量,或针对同一测点不同类型的监测量进行相关性、相似性分析,并利用分析结果建立回归模型,当某一传感器发生故障时,还可利用该模型进行数据插补或趋势预测,其在江苏润扬长江大桥<sup>[74-75]</sup>、重庆马桑溪长江大桥<sup>[65]</sup>、重庆大佛寺长江大桥<sup>[76]</sup>以及上海东海大桥<sup>[33]</sup>上均得到应用。

#### 4.3 关联分析

采用关联分析挖掘桥梁结构参数或环境参数间的内在联系,比如温度与湿度的关联、温度与加速度或者应变的关联、挠度与纵向(横向)倾斜度的关联等。当桥梁结构发生变异时,关联规则产生的支持度、置信度与正常样本集产生的规则的支持度、置信度相比会发生较大偏离<sup>[69]</sup>。关联分析已在重庆马桑溪长江大桥<sup>[65,71]</sup>及湖南湘西某大桥<sup>[49]</sup>上得到应用。

### 5 结语

本文针对采集到的桥梁各类监测数据,从信号处理与数据挖掘角度全面系统地综述了监测数据处理方法,按照信号分析流程划分出“数据预处理”“结构安全预警”“结构状态及损伤识别”和“结构综合评估”4大模块。面对海量的桥梁监测数据,由于现阶段还没有比较完善的处理手段,使得大量数据积聚堆砌,无法利用。分析表明:在安全预警模块,现有的预警方法基本仅限于“使用度指标”预警,还没有其它比较可靠的监测数据实时预警办法;在损

伤识别模块,虽然已经提出了不少诊断辨识方法,但各种方法都有自己的局限性,在工程实际中的应用效果较差,还无法进行智能化、结论性的诊断;在综合评估模块,目前现有的数据分析方法严重不足。

因此,本文在归纳整理各模块现有的信号分析方法基础上,为桥梁结构的健康监测数据分析作了总结性梳理,期望未来在这一领域引入更多更实用的数据处理技术,使得海量监测数据得以充分利用,为桥梁的安全运营提供可靠保障。

#### 参考文献

- [1] 李毅. 基于城市桥梁集群监测平台的系杆拱桥健康监测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [2] 杨锦园. 桥梁健康监测系统数据处理分析的研究[J]. 数采与监测, 2008, 24(1): 87-89.
- [3] 陈宏玉, 黄腾, 李桂华. 基于灰关联 GM(1, N) 模型的特大跨径桥梁挠度变化分析[J]. 测绘通报, 2009(1): 31-33.
- [4] 胡顺仁, 陈伟民, 章鹏. 桥梁监测系统多传感器测点之间的关联分析[J]. 土木工程学报, 2009, 42(3): 81-86.
- [5] 张立涛. 大型桥梁健康监测系统传感器异常诊断方法研究[J]. 现代交通技术, 2011, 8(4): 36-39.
- [6] 吴巨峰. 大型桥梁结构健康监测系统的技术研究与应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- [7] 边磊. 超大型群桩基础安全监测中的异常识别及分析技术研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [8] 胡顺仁, 陈伟民. 光电挠度测量系统单点失真数据滤波方法[J]. 光电工程, 2009, 36(5): 88-92.
- [9] 高占凤. 大型结构健康监测中信息获取及处理的智能化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [10] 张福荣, 王涛. 自适应 Kalman 滤波在 GPS 变形监测数据处理中的应用[J]. 甘肃科技, 2011, 27(2): 27-28.
- [11] 何旭辉. 南京长江大桥结构健康监测及其关键技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2004.
- [12] 周海亮. 拱桥挠度监测数据的插补分析[J]. 山西建筑, 2009, 35(21): 337-338.
- [13] 昝昕武, 平春蕾, 符欲梅. 基于神经网络及时间序列混合模型的桥梁健康监测系统缺失数据填补[J]. 重庆理工大学学报, 2011, 25(4): 79-85.
- [14] 平春蕾. 基于 SARIMA 与神经网络混合模型的桥梁健康监测系统缺失数据填补[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [15] 符欲梅, 朱芳, 昝昕武. 基于支持向量机的桥梁健康监测系统残缺数据填补[J]. 传感技术学报, 2012, 25(12): 1706-1710.

- [16] 侯立群.大型斜拉桥基于健康监测的模型修正、损伤诊断与预警方法[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [17] 郭鑫,黄方林.时域模态参数识别在南京长江大桥安全监测中的应用[J].湖南交通科技,2011,37(2):70-73.
- [18] 吴春利.基于应变模态桥梁健康监测关键技术研究[D].长春:吉林大学,2012.
- [19] 赵丹,袁朝庆,贺有丰,等.识别简支梁桥结构损伤的新方法[J].黑龙江科技信息,2007(6):164.
- [20] Norden Huang, Kang Huang.基于希尔伯特-黄变换的铁路桥梁结构健康监测[J].中国铁道科学,2006,27(1):1-7.
- [21] 程辉,李振东.希尔伯特-黄变换联合分析法在桥梁健康监测模态参数识别中的应用[J].世界桥梁,2010(4):54-57.
- [22] 谢晓尧.红枫湖大桥健康监测系统关键技术研究[D].武汉:武汉理工大学,2007.
- [23] 袁朝庆,赵丹,才英俊.基于EMD识别简支梁桥模型损伤位置[J].大庆石油学院学报,2007,31(5):88-90.
- [24] 袁朝庆,赵丹,才英俊.基于经验模态分解法及波形指数识别简支梁桥损伤位置[J].无损检测,2007,29(2):77-79.
- [25] 周毅,孙利民,闵志华.斜拉桥主梁应变监测数据分析[J].振动与冲击,2011,30(4):230-235.
- [26] 张雨,徐进伏.基于遗传优化神经网络和频率变化平方比的简支梁桥损伤识别技术[J].北方交通,2012(11):82-83.
- [27] 吴键,张宇峰,袁慎芳,等.桥梁健康监测系统的异常数据特征库构建[J].振动、测试与诊断,2012,32(2):287-291.
- [28] Li Zhijun, Li Aiqun, Han Xiaolin. Operational modal identification of suspension bridge based on structural health monitoring system [J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2009, 25(1): 104-107.
- [29] 项贻强,周畅,李毅,等.桥梁结构在线健康监测预警系统II—损伤识别的信号分析及提取方法[J].交通科学与工程,2009,25(2):33-39.
- [30] 袁慎芳,梁栋,高宁,等.基于结构健康监测系统的桥梁数据异常诊断研究[J].电子科技大学学报,2013,42(1):69-74.
- [31] 梁栋,张宇峰,袁慎芳,等.桥梁数据异常诊断方法在伸缩缝监测中的应用[J].数据采集与处理,2011,26(5):579-584.
- [32] 吕冀.桥梁监测数据处理与可视化方法研究[D].西安:长安大学,2010.
- [33] 梁栋,张宇峰,袁慎芳,等.基于异常识别和关联分析的桥梁数据复合诊断[J].振动、测试与诊断,2012,32(3):402-407.
- [34] 张瑞云.大型桥梁结构健康监测与评估技术的研究与应用[D].南京:东南大学,2008.
- [35] 张鹏,刘林,雷全立.基于曲率模态法桥梁结构损伤识别的敏感参数研究[J].市政技术,2005,23(Z1):123-131.
- [36] 刘钰杰,张克波,李胡生.桥梁预警系统中两种损伤识别方法的对比分析[J].上海应用技术学院学报,2008,8(3):220-225.
- [37] 刘石.基于GIS的桥梁健康监测与安全评估研究[D].南京:东南大学,2005.
- [38] 赵洪波,闫淑杰.基于RBF神经网络的简支梁桥损伤识别[J].公路交通科技,2011(6):223-225.
- [39] 马辉.基于计算智能方法的简支梁桥损伤识别研究[D].长春:吉林大学,2010.
- [40] 于繁华.基于计算智能技术的桥梁结构损伤识别研究[D].长春:吉林大学,2008.
- [41] 刘寒冰,焦峪波,程永春,等.基于模态曲率理论及神经网络的简支梁桥损伤识别[J].吉林大学学报,2011,41(4):963-967.
- [42] 王英.基于人工智能方法的预应力混凝土梁式桥损伤识别研究[D].成都:西南交通大学,2009.
- [43] 易伟建.桥梁结构动力损伤诊断方法研究[D].长沙:湖南大学,2001.
- [44] 吴大宏.基于遗传算法与神经网络的桥梁结构健康监测系统研究[D].成都:西南交通大学,2003.
- [45] 张治国.基于模态分析理论和神经网络的桥梁损伤识别方法研究[D].武汉:武汉理工大学,2005.
- [46] 张刚刚.基于RBF神经网络的桥梁损伤识别方法研究[D].西安:长安大学,2004.
- [47] 魏锦辉.基于神经网络的桥梁损伤识别[D].成都:西南交通大学,2007.
- [48] 张育智.基于神经网络与数据融合的结构损伤识别理论研究[D].成都:西南交通大学,2007.
- [49] 刘锋.基于数据挖掘的桥梁监测数据分析[D].长沙:长沙理工大学,2012.
- [50] 王柏生,倪一清,高赞明.青马大桥桥板结构损伤位置识别的数值模拟[J].土木工程学报,2001,34(3):67-73.
- [51] 孙增寿,韩建刚,任伟新.基于曲率模态和小波变换的简支梁桥损伤识别方法[J].郑州大学学报,2005,26(3):24-27.
- [52] 蔡正东.基于小波分析的桥梁结构损伤识别方法研究[D].武汉:武汉理工大学,2007.
- [53] 刘钰杰,徐玉晓,刘云龙.桥梁预警系统中的预警指标研究及模型试验[J].山东交通学院学报,2010,18

- (2): 36-41.
- [54] 石春香, 李胡生, 刘钰杰. 桥梁预警系统中小波包能量变异极值指数预警指标的可行性研究[J]. 上海应用技术学院学报, 2009, 9(4): 274-277.
- [55] 荆龙江. 预应力混凝土斜拉桥损伤识别理论及应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [56] 孙 磊. 小波分析在桥梁健康监测中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [57] 姚昌荣, 李亚东. 小波包变换频率混淆的消除及其在桥梁健康监测中的应用[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(5): 58-64.
- [58] 刘海亮. 小波变换在旧桥实时监测系统中应用研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2007.
- [59] 孙 君. 运营状态下大跨悬索桥结构损伤预警方法及其应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2009.
- [60] 付春雨, 单德山, 李 乔. 基于车致振动响应的铁路桥梁损伤位置识别[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(5): 719-725.
- [61] 樊可清, 倪一清, 高明赞. 基于 SVM 的桥梁状态监测方法[J]. 公路交通科技, 2004, 21(1): 67-70.
- [62] 朱劲松, 肖汝诚. 基于定期检测与遗传算法的大跨度斜拉桥损伤识别[J]. 土木工程学报, 2006, 39(5): 85-89.
- [63] 伍山雄, 李 芳. 大跨斜拉桥结构健康监测系统数据处理方法研究[J]. 施工技术, 2009, 38(2): 94-96.
- [64] 谢海龙. 桥梁健康监测中的应力数据分析[J]. 公路交通科技, 2011(5): 1-3.
- [65] 杨建喜. 基于非线性混沌动力学理论的在役桥梁状态分析研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [66] 周 潇. 基于自回归移动平均模型的梁桥损伤识别研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [67] 张 建. 时间序列分析在大跨度桥梁施工监测中的应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [68] 潘东宏. 基于桥梁挠度长期监测值的动态预测[J]. 西部交通科技, 2009(10): 62-66.
- [69] 张 鹏. 基于神经网络的桥梁监测数据挖掘[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [70] 王 凯. 基于时间序列分析的桥梁损伤预警研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
- [71] 董 辉. 桥梁健康监测数据的数据挖掘模型[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [72] 戈 铭, 孙泽信. 大跨度预应力混凝土箱梁的挠度监测与预测研究[J]. 现代交通技术, 2010, 7(5): 37-40.
- [73] 陈世民. 桥梁监测系统中海量数据分析理论与应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [74] 邓 扬, 李爱群, 丁幼亮, 等. 基于长期监测数据的大跨桥梁结构伸缩缝损伤识别[J]. 东南大学学报, 2011, 41(2): 336-341.
- [75] 邓 扬, 李爱群, 丁幼亮. 大跨悬索桥梁端位移与温度的相关性研究及其应用[J]. 公路交通科技, 2009, 26(5): 54-58.
- [76] 梁宗保, 陈伟民, 符欲梅, 等. 混凝土桥梁结构应变监测的温度效应分离方法研究[J]. 混凝土, 2005(12): 3-5.

(上接第 98 页)

结果, 当行车道宽度为 7.0 m 时, 可取偏载系数为 1.2; 当行车道宽度为 9.0 m 时, 可取偏载系数为 1.3; 当行车道宽度为 12.0 m 时, 可取偏载系数为 1.4。

### 参 考 文 献

- [1] 陈天本. 桁式组合拱桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [2] 贵州省交通科学研究所. 桁式组合拱桥调研报告[R]. 贵阳: 贵州省交通科学研究所, 2005.
- [3] 刘基正. 既有桁式组合拱桥的力学性能分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2007.
- [4] 重庆交通学院建设工程质量检测站. 贵州省贵黄高等级公路花鱼洞大桥桥梁检测报告[R]. 重庆: 重庆交通学院建设工程质量检测站, 2006.
- [5] 重庆交通学院建设工程质量检测站. 贵州省茅台至习水公路两河口大桥桥梁检测报告[R]. 重庆: 重庆交通学院建设工程质量检测站, 2007.
- [6] 重庆交通学院建设工程质量检测站. 贵州省平坝县至织金县公路斯拉河大桥桥梁检测报告[R]. 重庆: 重庆交通学院建设工程质量检测站, 2006.
- [7] 重庆交通学院建设工程质量检测站. 贵州省贵毕高等级公路西溪干沟大桥桥梁检测报告[R]. 重庆: 重庆交通学院建设工程质量检测站, 2006.
- [8] 重庆交通学院建设工程质量检测站. 剑河大桥实桥试验研究报告[R]. 重庆: 重庆交通学院建设工程质量检测站, 2008.