

文章编号: 1001-4888(2017)05-0652-12

# 面向桥梁长期健康监测的大数据处理技术及应用<sup>\*</sup>

涂成枫<sup>1</sup>, 刘泽佳<sup>1</sup>, 张舸<sup>1</sup>, 周立成<sup>1</sup>, 陈溢涛<sup>1</sup>, 程楠<sup>1</sup>,  
辜家伟<sup>2</sup>, 董守斌<sup>2</sup>, 邓志华<sup>3</sup>, 王勇<sup>3</sup>, 汤立群<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学 土木与交通学院、亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640;

2. 华南理工大学 计算机科学与工程学院, 广州 510006; 3. 广州珠江黄埔大桥建设有限公司, 广州 511434)

**摘要:** 简要介绍了桥梁长期健康监测系统的应用, 总结了基于桥梁长期健康监测大数据分析技术的研究现状。介绍了基于长期健康监测大数据分析在多尺度关联性分析、异常数据挖掘和分析以及时变可靠度研究三个方面取得的研究进展。通过多尺度关联性分析对各频率组分下的桥梁应变进行了分类, 确定了温度对应变的影响; 发展了利用应变阈值和小波细节系数进行异常信号识别的方法; 提出了局部时变可靠度的计算方法。最后, 对基于云计算的桥梁健康监测服务平台的研制及应用进行了介绍和展望。

**关键词:** 桥梁长期健康监测; 大数据; 关联性分析; 数据挖掘; 时变可靠度; 云计算

**中图分类号:** TB12      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.7520/1001-4888-17-309

## 0 引言

桥梁是陆地交通运输系统的关键组成部分。然而, 桥梁事故会给人民的生命和财产安全造成极大的损失。在长期的交通荷载、环境荷载和意外荷载等众多因素的作用下, 桥梁会发生材料腐蚀和材料退化等一系列结构损伤, 从而导致结构的承载能力降低和使用寿命减短, 给桥梁的安全运营带来严重的挑战。因此, 大型桥梁的安全性、耐久性与正常服役功能受到越来越高的关注。在这样的背景下, 桥梁长期健康监测系统的开发和监测数据分析处理技术也得到了快速的发展。

目前, 国内外新建或正在服役的大型桥梁均增设了长期健康监测系统。例如, 美国的 Sunshine Skyway Bridge 斜拉桥、中国香港的青马大桥、内地的苏通大桥都安装了上百个加速度传感器和应变计, 有些健康监测系统还配备了高精度的 GPS 位移监测系统<sup>[1,2]</sup>。桥梁长期健康监测系统中各类传感器能够对桥梁的振动特性、变形、位移以及环境参数进行实时在线的监测。在健康监测系统的发展已成为完善的背景下, 如何利用桥梁健康监测系统得到的信息对桥梁的运营状态进行准确及时的评估已成为学者们研究的重点和热点问题。目前, 国内外研究者基于桥梁健康监测得到的海量数据进行了大量的研究<sup>[3-8]</sup>。在长期健康监测数据的信号分析和处理技术方面, 目前主要采用快速傅里叶变换、小波分析和 Hilbert-Huang 变换等分析方法。其中小波分析的应用最为广泛, 在处理实时信号并对桥梁的损伤进行识别方面的文献报道屡见不鲜<sup>[9,10]</sup>。但是, 结合桥梁长期健康监测数据进行多尺度关联性分析的研究报道较少。同时, 针对小波分析得到的异常数据, 目前的文献报道缺少结合背景桥梁有限元模型

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2017-07-14; 修回日期: 2017-08-28

**基金项目:** 国家自然科学基金(11602087), 广东省科技计划项目(2015B010131009 和 2015A030308017), 重庆市教委科学技术研究项目(KJ1400333)

**通讯作者:** 汤立群(1966—), 男, 博士, 教授, 博导。主要研究领域包括:(1)结构损伤与长期健康监测;(2)非均质材料微观结构与破坏机理;(3)冲击动力学等。Email: lqtang@scut.edu.cn

的计算分析,因此很难从物理机制上分析异常数据产生的根源。另一方面,研究者基于理论、实验以及桥梁实测数据,发展了不少桥梁健康状态评估的方法,如专家评估法、灰色系统评估法、模糊理论评估法、层次分析法和可靠度评估法等<sup>[11]</sup>。但是,目前大部分方法都将状态评估寄希望于某个固定公式,不能有效结合桥梁的实际情况进行分析。例如,大部分可靠度计算方法在分析过程中的荷载和抗力都取自规范,无法综合材料退化和实际外载荷情况来进行状态评估。在桥梁健康监测系统的开发方面,为充分发挥监测系统的服务功能,云计算作为一种新兴的技术手段也逐渐被引入到桥梁长期健康监测系统的建设之中<sup>[12]</sup>。

本文结合近年来国内外桥梁健康监测的研究现状和发展趋势,将从多尺度关联性分析、异常数据挖掘和分析、时变可靠度研究和基于云计算的桥梁健康监测服务平台研制及应用四个方面,介绍作者团队在桥梁长期健康监测大数据处理技术及应用方面所取得的研究进展。

## 1 长期健康监测数据多尺度关联性分析

桥梁健康监测系统的目标是通过实时获取结构的力学响应信息进而正确评估桥梁的安全状态<sup>[8]</sup>。由传感器所获得的应变数据是桥梁施工监控、运营监测以及安全评估的重要监测数据之一。通过应变可以及时了解桥梁服役过程中的应力分布,有效识别结构的疲劳损伤状态和裂纹信息等。另一方面,常年暴露在大气环境下的大跨度桥梁内部存在着复杂的非稳态和非线性温度场。大气温度的变化如日照温场、气温骤降都会使桥梁内部结构产生复杂的力学响应,因此分析应变监测中的温度效应具有十分重要的工程实际价值和科学研究意义。

近年来,国内外学者在基于实测温度应变或应力数据分析桥梁内部温度场与应变场之间的关联性的研究方面已有了一定的成果。陈夏春等<sup>[13]</sup>基于大量温度和应变样本数据建立了温度场与应变场之间的多元线性回归模型。Brownjohn等<sup>[14]</sup>采用PCA数据处理方法对塔马大桥的实测数据进行处理发现,风速和温度是影响桥梁内部应变场的最为重要的环境因素。由于监测所得的原始数据受外部环境干扰较多,直接采用简单预处理后的数据进行温度效应分析存在较多的不确定性。而且,桥梁内部的应力应变场与实时变化的温度场密切相关。因此,有必要在时域上研究温度对桥梁内部应变的影响效应。小波分析在频域和时域上具有良好的局部化性质,因此适用于分析温度数据和应变数据在时频域上的多尺度关联性。在应用小波分析研究桥梁实测数据方面,Moyo等<sup>[14]</sup>基于小波变换对大跨度桥梁应变数据进行分析,利用小波系数时间序列的变化来识别监测数据中的异常信号;汤立群等<sup>[15]</sup>采用db小波分析混凝土桥梁的应变监测数据发现,合理使用小波基函数和小波分解层数能较精确地识别日温度引起的应变及分离噪声应变。然而,目前有关温度与应变监测数据之间的多尺度关联性分析的文献仍然相对缺乏。针对该问题,本文将基于广州珠江黄埔大桥北汉主桥长期健康监测系统为期10年的监测数据,研究温度与应变数据在时域和频域上的数据特征,并在不同尺度上探讨温度和应变监测数据之间的关联性。

如图1所示,广州珠江黄埔大桥北汉主桥为主跨383m+322m的独塔双索面钢箱梁斜拉桥,其中七个关键箱梁截面布置有振弦式应变传感器,可以长期实时在线地采集桥梁的温度和应变数据。对实测温度和应变进行快速傅里叶变换,可以通过分析温度和应变信号中的频率组分探索两者之间的关联性。如图2所示,以具有代表性的斜拉桥截面测点所采集的数据为例,可以看出温度和应变数据具有相同的频域区间。结合温度和应变频谱<sup>[16,17]</sup>可以观察到,图2(b)中在第I区域的低频段内的应变分量不仅受到年平均温度和季节性温度变化的影响,而且也和其他恒载有关,因此很难从应变数据中将不同的影响因素区分开来;第II区域和第III区域的温度和应变分量的周期分别对应24h和12h,可以看出这一频率范围内的温度和应变变化主要是受到日温度的影响;第IV和第V区域属于平稳的高频段,对应随机因素以及噪声因素的影响。由此可见,长期健康监测的应变数据是多种影响因素共同作用的结果。而对于钢箱梁桥而言,短期由于钢材蠕变引起的应变成分可忽略。故总应变只受到温度、外载荷和随机因素三部分的影响。

以斜拉桥东测点1月份的监测数据为例,利用小波分析研究不同频段下温度和应变的时域信号。

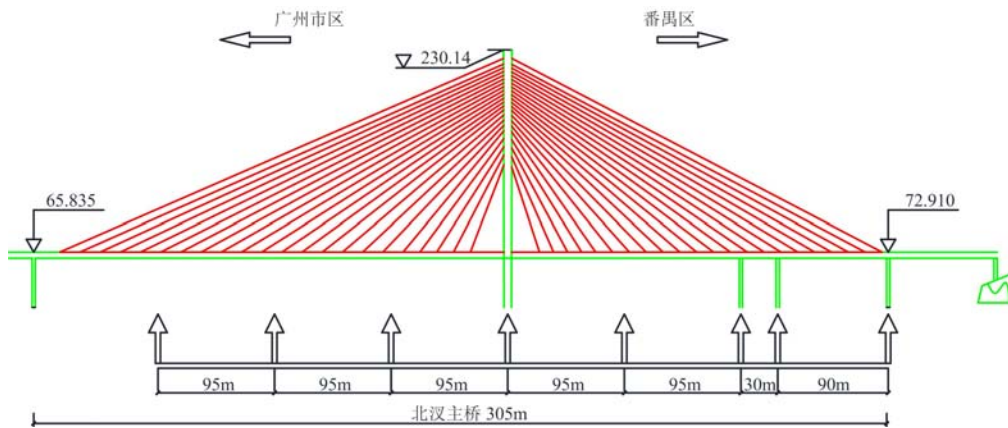


图 1 珠江黄埔大桥北汊斜拉桥传感器布设图

Fig. 1 Schematic diagram of sensor arrangement of north branch of Huangpu Bridge of Pearl River

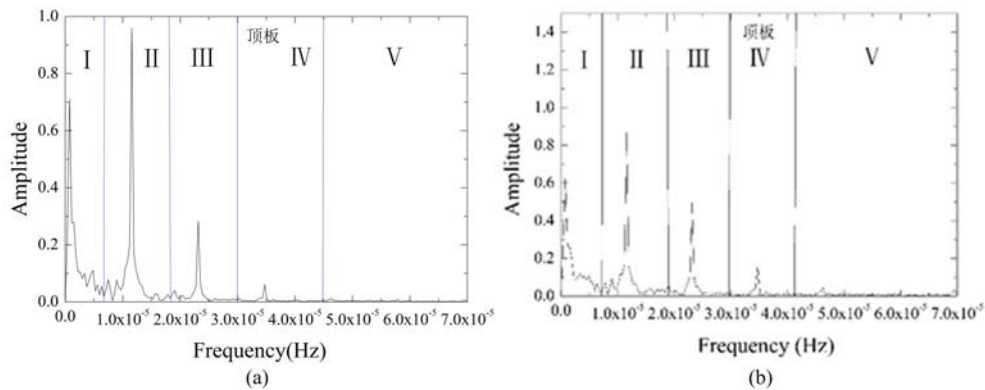


图 2 温度和应变数据的频谱图:(a)温度;(b)应变

Fig. 2 FFT spectra of temperature and strain data; (a) temperature; (b) strain

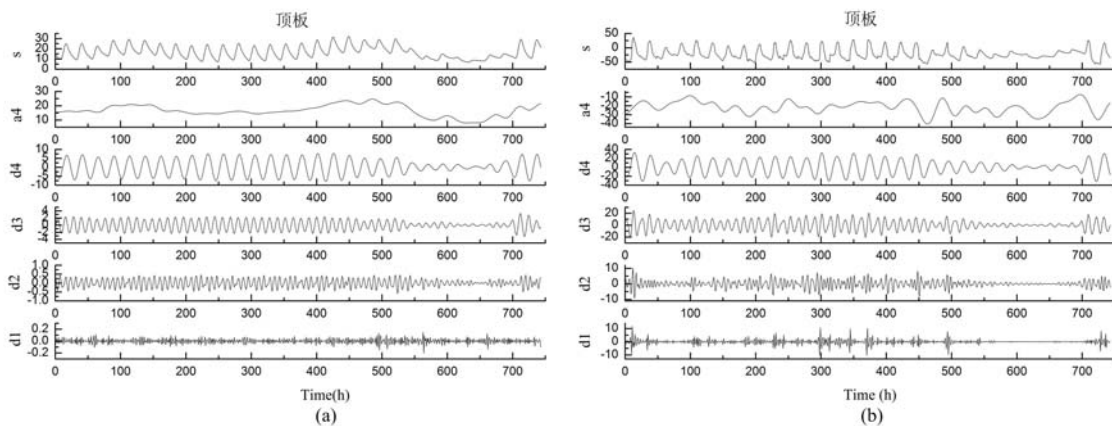


图 3 小波分解图:(a) 温度;(b) 应变

Fig. 3 Wavelet decomposition diagram: (a) temperature; (b) strain

如图 3 所示,其中  $s$  为原始信号, $d1$ 、 $d2$ 、 $d3$ 、 $d4$  和  $a4$  为小波分解信号。温度和应变数据经小波分解后得到  $d4$  和  $d3$  层数据的周期分别为 24h 和 12h,可见其与日照相关; $d2$  和  $d1$  层数据为平稳高频信息,其中存在少量数值较大的应变离散数据点,可能是交通高峰时期的车载或者其他随机荷载作用所致。为进一步探讨温度和应变两者之间的关联性,分别提取测点顶板和底板的温度和应变的  $d4$ 、 $d3$  层数据。如图 4 所示,其中应变和温度数据为顶板和底板对应位置的应变差值和温度差值,可以看出温度和应变数据具有较强的相关性,且当截面顶底板的温度差达到最大时,应变差也达到最大。以上结果表明,应

变数据的 d4 和 d3 层数据变化是由于日照温度场变化引起的,且温度对桥梁的应变具有显著的作用,因此在分析桥梁的应变响应时温度是不可忽略的因素。

综上所述,桥梁长期健康监测应变数据是多种因素共同作用下产生的结果。研究长期健康监测数据的多尺度关联性有助于分析各种不同影响因素对桥梁产生的影响机理,从而可以更好地发挥桥梁长期健康监测系统的服务功能。

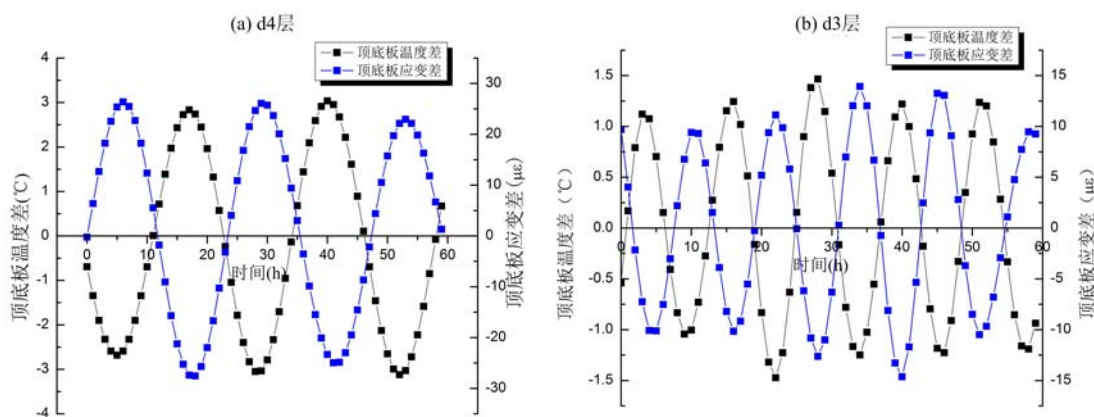


图4 d4和d3层温度与应变分量的关联性

Fig. 4 Correlation between the temperature components and the strain components in the d4 and d3 layers

## 2 长期健康监测大数据的异常数据挖掘与分析

桥梁除了受到正常的交通荷载和环境荷载外,还有可能受到重车、船撞、大风、海浪和其他异常荷载的影响<sup>[18]</sup>。其中,重车异常荷载的识别和统计可为桥梁养护和维修提供依据,是大跨度桥梁健康监测和安全性能评估的一项重要内容。

移动汽车荷载识别是典型结构动力学领域的逆问题,即在已知结构系统参数的情况下,根据测得的结构内部有限点的响应(应变、位移、加速度等)反演作用在结构上的荷载<sup>[19]</sup>。移动荷载求解方法包括时域法、频域法、函数逼近法、小波分析方法以及神经网络法等。时域法和频域法属于逆问题的典型求解方法,主要包括正则化时域法、奇异值解法、基于时域法并结合静态常力轴载特点的简化快速算法等<sup>[20,21]</sup>。这些方法在数值模拟和室内实验中都得到了有效证明,但存在对噪声敏感、车轮上下桥时刻轴载识别误差大、采用弯矩响应识别结果较差等缺点。函数逼近方法也是移动荷载识别的一种有效方法<sup>[22]</sup>,主要是利用三角函数、幂函数等构造新的函数来近似模拟实测位移或应变信号,通过对这些信号处理可以得到速度和加速度响应信号,结合有限元法和结构动力学方程来反演作用于结构上的荷载。此外,小波分析方法<sup>[23]</sup>和神经网络方法<sup>[24]</sup>为桥梁移动荷载识别发展提供了新的思路,在数值仿真计算中都取得了成功。Moyo等<sup>[14]</sup>基于小波变换对应变数据进行分解,通过对小波系数的时间序列进行统计分析来检测异常值,取得了较好的识别效果。直接针对桥梁振动方程,运用逆问题的数学求解方法进行移动荷载识别比较复杂,目前的研究成果基本只用于数值仿真计算、室内模型实验或简支梁等简单模型的移动荷载识别中。因此,一些学者提出了根据实测和有限元计算响应比较来确定移动荷载的方法<sup>[19]</sup>,但是,这种方法的研究计算主要集中于小跨径桥梁,在大型桥梁中的应用研究少见。

重车荷载识别方法的研究成果目前还很难有效应用于大型桥梁中,主要困难包括:(1)大型桥梁模型本身比较复杂,影响因素多;(2)实测的信号并不单纯是移动荷载引起的,还包括温度、风和噪声的影响;(3)大型车桥耦合振动的机理比较复杂,动力学逆问题求解非常困难。另外,大部分基于监测数据的桥梁结构异常行为研究没有单独识别出超重汽车信号,而是与其他偶然事件(大风、地震、撞击等)产生的应变耦合在一起,并且目前对超重汽车荷载的识别主要采用的是交通荷载调查和在桥上埋设称重设备的手段,无法得到超重车对桥梁响应的影响。所以,结合健康监测系统的实测数据,研究一种适合于大跨度桥梁的超重汽车荷载识别方法,可以促进移动荷载识别在大型桥梁健康监测和安全性能评价中



的应用和发展。

目前,在数据异常识别的研究中主要是集中在对健康监测的实时数据的纯信号处理上,结合桥梁有限元物理模型进行分析的研究报道罕见。本文在对超重车等异常信号识别的理论进行分析的背景下,通过在桥梁有限元实体模型上施加临界荷载得到判别超重车信号的应变阈值,提出了基于应变阈值的超重车信号识别方法。首先运用有限元建立了黄埔大桥北汉斜拉桥实体模型;其次将公路二级荷载作为汽车是否超重的评判标准,计算此时公路二级荷载对应的集中荷载作为移动荷载情况下桥梁的应变响应,并将各个监测截面的最大正应变和最小压应变作为判别超重车信号的应变阈值;最后,将经小波变换得到的实测应变数据的高频分量与应变阈值进行对比,超出应变阈值的响应即可以认为是超重车引起的信号。为了提高识别结果的可靠度,本文将基于应变阈值的识别方法和文献报道的基于小波细节系数的识别方法<sup>[14]</sup>结合起来进行超重车信号的识别,该方法的识别流程如图 5 所示。

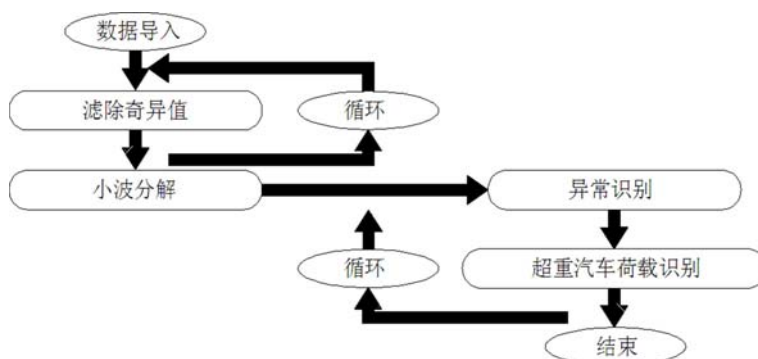


图 5 超重车信号识别流程图

Fig. 5 Flow chart for identification of overweight vehicles

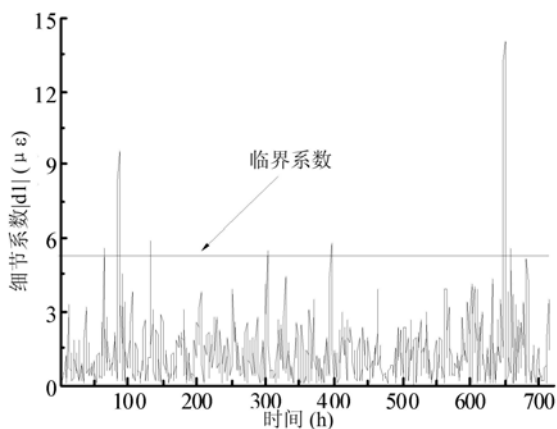


图 6 基于小波细节系数的异常值识别  
Fig. 6 Identification of anomaly by details of wavelet coefficients

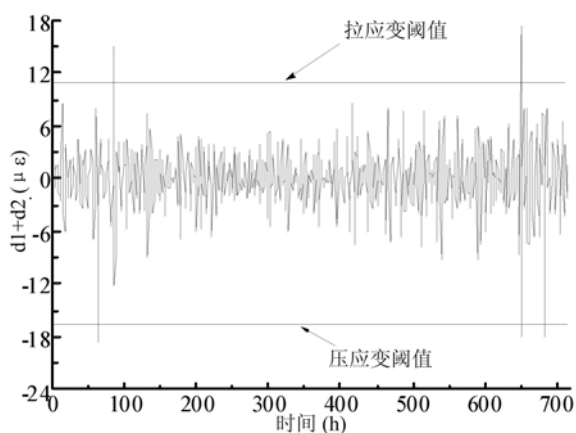


图 7 基于应变阈值的超重车信号识别  
Fig. 7 Vehicle signal recognition based on strain threshold

图 6 所示的是根据已有的小波细节系数的识别方法所识别出的应变突变点在时间轴上的位置,图 7 所示的是利用基于有限元模型的应变阈值识别方法确定的应变突变点在时间轴上的位置。可以将两种识别结果进行对比,最终判定是否为超重汽车荷载异常事件,其判别结果如图 8 所示。从图中的结果可以看出,将有限元模型与纯信号处理方法结合起来,不仅可以初步确定监测点中对超重车较为敏感的位置点,而且可以获得产生超重车信号的高频时间段。为了使基于应变阈值识别法更为精确,可以将有限元模型从简单的桥梁局部模型改进为更符合实际情况的全桥模型,并将计算方法由静荷载作用下的影响线分析改进为在一组含有重车的车队荷载作用下的动力学分析。同时,为了更好地模拟桥上车流运行的真实情况从而获得更加精确的桥梁应变响应,可以利用 CA 模型<sup>[25]</sup>等随机车流模型模拟随机

车流并进行相关动力计算的研究,进一步研究结合有限元计算结果和实测数据进行超重车异常信号识别的方法。

综上所述,结合桥梁的有限元物理模型与已有的纯信号处理方法对桥梁的异常信号进行识别,能够更加准确地对异常信号进行判别与分析,并可为进一步研究异常信号产生的原因提供基础。

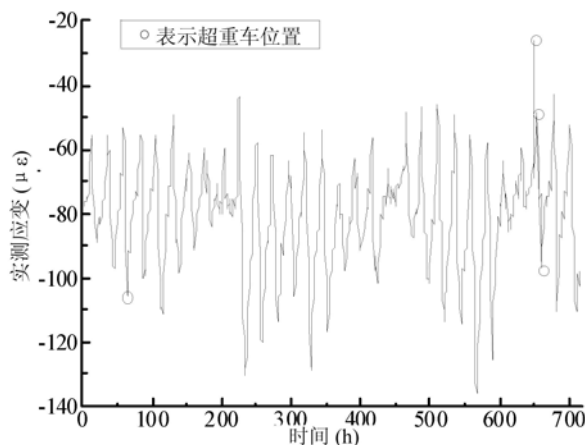


图8 超重汽车识别结果

Fig. 8 Identification results of the overloaded vehicles

### 3 基于桥梁长期健康监测数据分析的时变可靠度研究

可靠指标和安全(或失效)概率是结构(或构件)唯一一致的安全性指标<sup>[26]</sup>。传统的工程结构分析往往把相关信息作为确定性的量来处理。然而,事实上工程结构中存在着诸多不确定因素。为了分析结构的安全性或可靠性,就要从结构的组成材料、使用条件和环境、桥梁的设计、施工、监测等方面研究可能存在的各种随机不确定性,并利用适当的可靠度理论将这种随机不确定性与结构的安全性或可靠性联系起来。结构可靠度分析关键是要确定抗力及荷载各随机变量、随机过程的概率分布规律。桥梁健康监测系统实时、长期地监测、记录桥梁的运营环境、交通荷载、应变、挠度、结构内部温度等信息,这使得从时变结构可靠度角度分析桥梁的运营状态及安全性,即对桥梁结构的状态进行实时评估<sup>[27]</sup>成为可能。如何充分地利用这些监测信息,对桥梁结构抗力和荷载效应的各种数据进行统计分析,并且建立各随机变量的概率分布模型,进行桥梁结构的时变可靠度量化分析,是桥梁工程、结构工程及工程力学领域的学者共同关注的热点之一。

随着结构可靠性评估理论的发展,国内外很多学者开始对桥梁结构的可靠度进行研究。可靠度计算重点在于随机变量的概率化和可靠指标的计算。通过对随机变量的统计分析,采用合适的概率模型进行拟合,获取相应的统计特征。目前采用较多的概率模型主要有正态分布和对数正态分布。不同的概率模型得到的统计特征不同,计算得到的可靠指标也不一样。可靠指标的计算是学者们研究最多的问题,已有的可靠指标计算方法主要有:一次二阶矩法、二次二阶矩法(高次高阶矩法)、蒙特卡罗法、响应面法和随机有限元法。一次二阶矩法概念清晰,简单易用,因此得到了广泛应用。但它没有考虑功能函数在设计验算点附近的局部性质,当功能函数的非线性程度较高时将导致较大误差。而二次二阶矩法除利用非线性功能函数的梯度外,还通过计算其二阶导数来考虑极限状态曲面在验算点附近的凹向、曲率等非线性性质,因此提高了可靠度的分析精度。但因二次二阶矩法繁琐且不易求解,并未得到广泛应用。蒙特卡罗模拟法求解可靠度不受条件约束,可得到精确值,一般将其结果作为验证标准,但直接应用蒙特卡罗模拟法会受计算效率的影响。响应面法是统计学的综合实验技术,采用推断的方法对极限状态方程在验算点附近进行重构,当结构随机变量维度较高时,为满足精度要求,所需样本量均会逐渐增大,从而降低计算效率甚至使算法不可用。随机有限元法是随机分析理论与确定性有限元法相结合的产物,它的基本思路是对随机变量的样本使用有限元程序反复计算,再对结果进行统计,其本质是蒙特卡罗法。

对于桥梁结构,由于抗力的退化和荷载的随机性,因而造成了结构可靠度的时变性<sup>[28]</sup>。退化结构的抗力和功能函数都是时变非平稳随机过程,相应的问题也成为时变可靠度问题。目前大部分可靠度研究主要是针对设计结构而言,荷载效应的计算大都是直接套用设计规范中的公式,抗力大都是直接取用规范规定的允许值,难以充分利用既有结构自身的信息,也不能很好地描述和处理正常使用失效准则的不确定性<sup>[29]</sup>。桥梁健康监测数据记录了结构应力、应变等历史信息,为研究桥梁时变可靠度提供了数据保障。基于桥梁健康监测信息的可靠度研究有助于更加真实地了解桥梁结构的时变性能。

从寻找桥梁的抗力、恒载、活载等方面的诸多随机变量的统计规律出发,定量分析结构的时变可靠度,以明确在设计基准期内桥梁可靠度的变化幅度和趋势,为桥梁管理者提供足够多的信息用于优化桥梁检测和维护,帮助桥梁管理者最优分配资源用于检测、维护和加固结构,实现监测系统的价值。目前,在桥梁时变可靠度方向上,以肇庆西江大桥为研究对象已经完成了不少的研究工作<sup>[30-33]</sup>。包括:

(1) 利用监测系统涵盖混凝土浇筑、凝固、施工和营运全过程的特点,提出了由监测应变数据直接换算出桥梁内部混凝土当前应力的算法;

(2) 基于多年的应变监测数据,提出了一种局部时变可靠度评估方法,即以混凝土应力和强度作为桥梁局部可靠度功能函数中的荷载效应  $S$  与结构抗力  $R$ ;

(3) 实现了基于长期健康监测的荷载概率分布及其随时间变化规律(5 年)的测量。通过对该桥各监测点的局部时变可靠度分析,客观地评估了桥梁在监测点附近的可靠度,以及这些可靠度随时间的变化。结果表明提出的局部时变可靠度评估方法可行,并且能够帮助桥梁工程师和桥梁管理者制定相应的桥梁检查和维护策略;

(4) 分别采用一次二阶矩法和蒙特卡罗法进行可靠度指标的计算,通过对比计算结果,讨论了一次二阶矩法对于实测数据可靠度计算的适用性以及精确性问题。结果表明,对监测数据进行数据拟合,根据统计规律采用一次二阶矩法进行可靠度的简化计算基本上能满足实际工程可靠度计算的需要;

(5) 考虑混凝土碳化、混凝土强度的经时变化以及钢筋锈蚀等结构抗力衰减影响因素,并采用函数关系来描述它们的影响,依此建立了在役钢筋混凝土桥梁的结构抗力时变衰减模型,求出了时变抗力弯矩  $R(t)$ 。根据长期健康监测数据,计算出荷载效应弯矩,并将原始离散型荷载效应弯矩进行概率化处理,得到桥梁的荷载效应概率模型,求出时变荷载效应弯矩  $S(t)$ ;基于现役桥梁长期健康监测数据,得到桥梁荷载弯矩概率分布符合高斯分布。以箱梁的截面弯矩荷载效应  $S(t)$  与抗力效应  $R(t)$  构建可靠度功能函数,实现了桥梁荷载变化、抗力衰减影响对结构时变可靠度的评估,总结了一种结构时变可靠度评估方法;

(6) 将荷载效应和抗力作为随机过程,评估了背景桥梁在统计区间时间段的结构时变可靠度。利用分析的样本,拟合得到较为合理的桥梁时变可靠度曲线,为预测桥梁剩余使用寿命提供了相应的参考模型;基于时变可靠度寿命预测模型为桥梁后期的维护与加固提供了优化方法。

局部时变可靠度计算方法的流程图如图 9 所示。首先对某一时段的应变监测数据进行预处理,扣除与结构应力无关的应变,包括减去传感器初值、减去收缩徐变引起的应变、减去热膨胀引起的应变、删除奇异值。然后通过混凝土弹性阶段应力应变关系将应变数据转化为应力数据,再对应力数据进行统计分析,通过高斯分布拟合获取应力数据的均值和标准差,如图 10 所示,即为荷载效应的统计分析和高斯分布拟合。另

一方面,结构抗力的均值和标准差可以通过查阅规范或现场材料实验获取,结合材料强度的经时变化模型计算对应时间段的均值和标准差。最后,将荷载效应和结构抗力的均值和标准差代入可靠度计算公

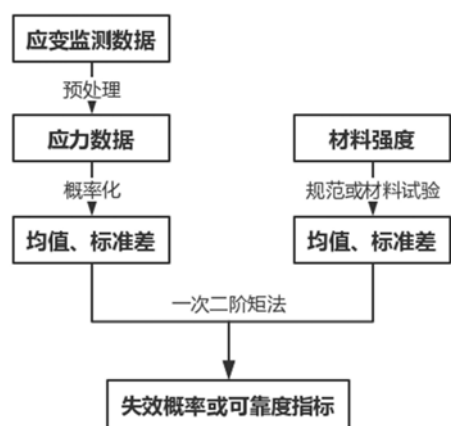


图 9 局部时变可靠度计算流程图

Fig. 9 Calculation process diagram of localized time-dependent reliability

式,即可计算出该时间段的可靠度。通过对肇庆西江大桥多年的温度数据统计分析发现,季节温度概率分布呈现两个主峰,如图11。故而将一年划分为两个时间段,夏季段(5月至10月)和冬季段(11月至次年4月),所有统计分析都按照这个时间划分进行。这样,对于每个时间段都能计算得到一个可靠度指标,将多年的可靠度指标整合起来就能考察其变化规律。因此,局部时变可靠度可以反映埋设的传感器周围的局部可靠度状态,且能够反映可靠度的时变性,为桥梁安全状态的评估提供了一种更科学和更可靠的手段。

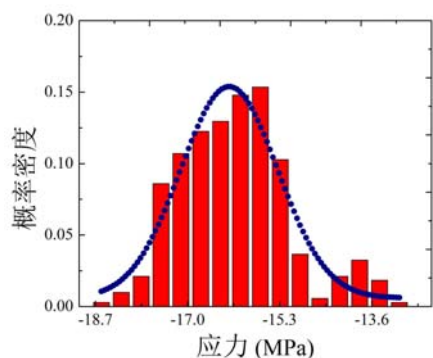


图10 应力分布统计和高斯分布拟合

Fig. 10 Stress distribution statistics and Gaussian distribution fitting

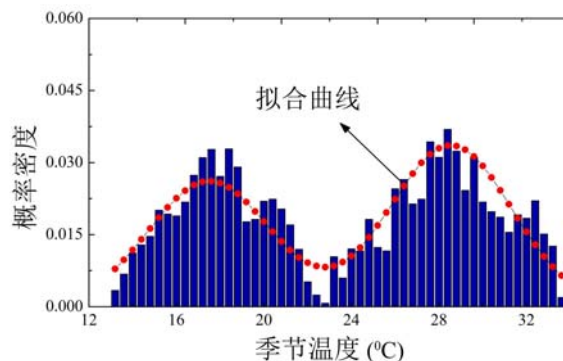


图11 季节温度概率分布图

Fig. 11 Probability distribution diagram of seasonal temperature

#### 4 基于云计算的桥梁长期健康监测服务平台研制及应用

目前桥梁长期健康监测也面临着诸多问题,例如传统的离线监测系统无法胜任海量数据的存储、管理和分析等数据处理功能,且桥梁损伤识别和模型修正的计算规模大且复杂<sup>[2]</sup>,因此需要发展数据存储、处理和计算的高效的计算方法。

云计算作为一种可以利用互联网实现随时随地、便捷、按需访问共享资源池(如网络、服务器、存储设备和应用程序等)的计算模式<sup>[34]</sup>,具有能够提供动态资源池、虚拟化和高可用性等优点<sup>[35]</sup>。通过云计算,用户可以根据需求快速地申请和释放资源并对使用的资源付费,让用户在享受高质量服务的同时也省去了运维成本<sup>[36]</sup>。所以云计算受到了工业界和学术界越来越多的关注,在智能交通、物流和信息资源管理等领域的应用也日益广泛<sup>[37-39]</sup>。目前,已有研究者将云计算引入了桥梁健康监测当中。朱仕村等<sup>[40]</sup>提出利用第三方提供的云计算服务来解决桥梁健康监测中海量数据的存储和管理、以及大规模专业计算的问题。YU等<sup>[12]</sup>基于云计算对结构进行时间序列分析从而进行损伤识别,提高了计算效率。但是,已有基于云计算下桥梁健康监测的大数据分析也存在一些局限:(1)一般桥梁监测都只针对一个或几个工程,缺乏公共平台融合数据信息,也难以将该平台与其他平台衔接;(2)所提出的云平台或大数据分析的方法,未实际应用桥梁健康监测所得的海量数据;(3)目前的结构健康监测研究偏重于监测内容和技术,缺乏对数据处理方法的分析。

因此,本团队依托早期建立的、基于高性能计算平台的集中式桥梁健康监测平台,正在发展基于云计算的综合大数据基础分析平台。基于云计算的桥梁长期健康监测服务平台在前期的基于高性能计算平台的集中式长期健康监测系统研发、对多座不同类型桥梁以小时为颗粒度和长达10年长期健康监测数据获取与分析、桥梁有限元仿真分析、基于卫星定位的位移测量终端设备研制等基础上,针对桥梁安全与维护等实际需求,构建基于云计算的桥梁健康监测大数据分析平台及桥梁健康监测服务平台。该平台研制的框架图如图12所示。在分析各类型数据的多尺度特征、探索数据之间或者数据的频域、小波层次之间的关联性和协同性基础上,根据构建监测数据的多维度模型,开发了挖掘异常数据与桥梁可靠度计算的引擎,结合分布式数据处理架构Hadoop和Spark、分布式数据库HBase、机器学习工具Mahout等大数据处理技术,考虑平台的可扩展性、海量数据处理能力和运行的可靠性,研制可扩展的、健壮的和



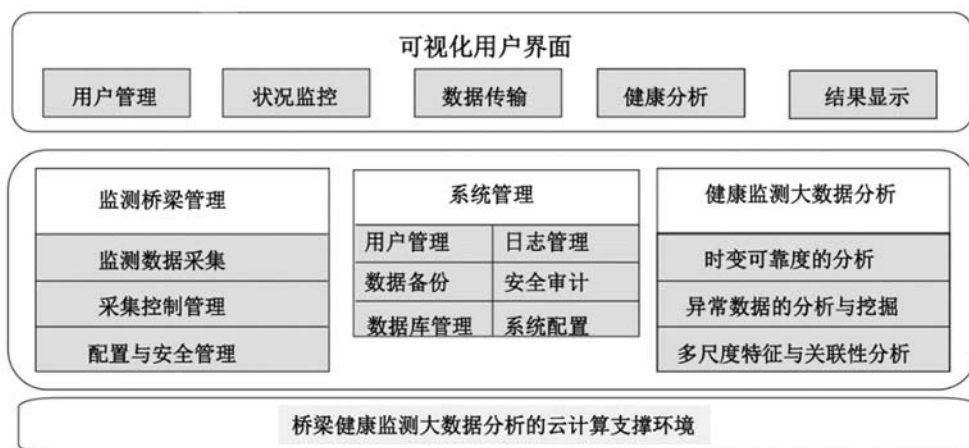


图 12 平台研制框架图

Fig. 12 Platform design framework

高性能的桥梁长期健康监测服务平台。

## 5 结论

本文探讨了大数据处理和分析技术在桥梁长期健康监测中的应用,从监测数据的多尺度关联性分析、异常数据挖掘和分析以及桥梁时变可靠度研究三个方面介绍了国内研究现状及课题组所取得的研究进展,并对基于云计算的桥梁健康监测服务平台的研制及应用进行了介绍和展望。针对健康监测系统所采集的海量数据,如何利用大数据分析手段对其不同类型数据进行关联性分析、如何结合有限元分析方法和大数据计算方法从海量数据中挖掘和识别异常信号、如何利用海量数据进行时变可靠度分析仍然是未来研究的重点和难点问题。同时,结合新兴的云计算技术手段建立桥梁长期健康监测服务平台,从而实现对海量数据进行高效地存储、管理和分析将是桥梁长期健康监测系统未来的发展趋势。

### 参考文献:

- [1] 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, 29(1):65—69 (ZHANG Qiwei. Conception of long-span bridge health monitoring and monitoring system design[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2001, 29(1):65—69 (in Chinese))
- [2] 李惠, 周文松, 欧进萍, 等. 大型桥梁结构智能健康监测系统集成技术研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(2):46—52 (LI Hui, ZHOU Wensong, OU Jingping, et al. A study on system integration technique of intelligent monitoring systems for soundness of long-span bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(2):46—52 (in Chinese))
- [3] 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 (LI Aiqun, DING Youliang, WANG Hao, et al. Analysis and assessment of bridge health monitoring mass data—progress in research/development of “Structural Health Monitoring”[J]. SCIENCE CHINA Technological Sciences, 2012, 42(8):972—984 (in Chinese))
- [4] Catbas F N, Susoy M, Dan M F. Structural health monitoring and reliability estimation: Long span truss bridge application with environmental monitoring data[J]. Engineering Structures, 2008, 30(9):2347—2359.
- [5] Chan T H T, Yu L, Tam H Y, et al. Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: Background and experimental observation[J]. Engineering Structures, 2006, 28(5):648—659.
- [6] 刘逸平, 李英华, 汤立群, 等. 基于长期温度监测的华南地区混凝土连续刚构桥梁温度变化规律研究[J]. 公路, 2013(2):118—122 (LIU Yiping, LI Yinghua, TANG Liqun, et al. Research on temperature variations of a concrete continuous rigid-frame bridge in South China based on long-term temperature monitoring[J]. Highway, 2013(2):118—122 (in Chinese))
- [7] 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 (WU Jian, ZHANG Yufeng, YUAN Shenfang, et al. Abnormal data feature library construction for bridge health monitoring system[J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 2012, 32(2):287—291 (in Chinese))
- [8] 黄方林, 王学敏, 陈政清, 等. 大型桥梁健康监测研究进展[J]. 中国铁道科学, 2005, 2(2):1—7 (HUANG Fanglin, WANG Xuemin, CHEN Zhengqing, et al. Research progress made on the health monitoring for large-type bridges[J]. China Railway Science, 2005, 2(2):1—7 (in Chinese))
- [9] 廖锦翔, 袁明武, 张劲泉. 小波变换在桥梁结构损伤识别中的应用[J]. 公路交通科技, 2004, 21(11):30—34 (LIAO Jinxiang, YUAN Mingwu, ZHANG Jinqian. Application of wavelet transform on damage detection of bridge structure[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(11):30—34 (in Chinese))
- [10] Hester D, González A. A wavelet-based damage detection algorithm based on bridge acceleration response to a vehicle[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2012, 28(2):145—166.
- [11] 贾布裕, 余晓琳, 颜全胜. 基于离散动态贝叶斯网络的桥梁状态评估方法[J]. 桥梁建设, 2016, 46(3):74—79 (JIA Buyu, YU Xiaolin, YAN Quansheng. Method of bridge condition assessment based on discrete dynamic Bayesian networks[J]. Bridge Construction, 2016, 46(3):74—79 (in Chinese))
- [12] Yu L, Lin J C. Cloud computing-based time series analysis for structural damage detection[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2015, 143(1):C4015002.
- [13] 陈夏春, 陈德伟. 多元线性回归在桥梁应变监测温度效应分析中的应用[J]. 结构工程师, 2011, 27(2):120—126 (CHEN Xiachun, CHEN Dewei. Application of multiple linear regression model in analysis of temperature effect on strain monitoring for bridge structures[J]. Structural Engineers, 2011, 27(2):120—126 (in Chinese))
- [14] Moyo P, Brownjohn J M W. Detection of anomalous structural behaviour using wavelet analysis[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2002, 16(2-3):429—445.
- [15] Tang L, Liu Z, Jiang B, et al. Features of long-term health monitored strains of a bridge with wavelet analysis[J]. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2011, 1(5):27—30.
- [16] 姜增国, 瞿伟廉, 闵志华. 基于小波包分析的结构损伤定位方法[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(11):94—97 (JIANG Zengguo, QU Weilian, MIN Zhihua. Damage localization of structures by wavelet packet analysis[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(11):94—97 (in Chinese))
- [17] 王振林, 聂国华. 曲率模态和小波包变换在结构损伤识别中的应用[J]. 振动与冲击, 2008, 27:124—126 (WANG Zhenlin, NIE Guohua. A method for structure damage detection based on curvature mode and wavelet packet transformation[J]. Journal of Vibration & Shock, 2008, 27:124—126 (in Chinese))
- [18] 殷武. 基于可靠度的特重车过桥荷载限值确定方法研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2012 (YIN Wu. The method research of determing limited load value for overweight vehicles cross bridges based or reliability theory[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2012 (in Chinese))
- [19] 陈敏. 桥上移动荷载识别问题的研究现状[J]. 北方交通, 2008(1):126—127 (CHEN Min. Current situations of studying the distinguishing of moving load on bridge[J]. Northern Communications, 2008(1):126—127 (in Chinese))
- [20] Law S S, Chen T H T, Zhu X Q, et al. Regularization in moving force identification[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2001, 127(2):136—148.
- [21] 余岭, 朱军华, 陈敏中, 等. 基于矩量法的移动荷载识别[J]. 振动工程学报, 2006, 19(4):509—513 (YU Ling, ZHU Junhua, CHEN Minzhong, et al. Moving force identification based on method of moments[J]. Journal of Vibration Engineering, 2006, 19(4):509—513 (in Chinese))
- [22] 袁向荣, 卜建清, 满红高, 等. 移动荷载识别的函数逼近法[J]. 振动与冲击, 2000, 19(1):58—60 (YUAN Xiangrong, BU Jianqing, MAN Honggao, et al. Function approaching method in moving load identification[J]. Journal of Vibration & Shock, 2000, 19(1):58—60 (in Chinese))
- [23] 黄林, 袁向荣. 小波分析在桥上移动荷载识别中的应用[J]. 铁道学报, 2003, 25(4):97—101 (HUANG Lin, YUAN Xiangrong. Application of wavelet analysis in identification of moving loads on a bridge[J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(4):97—101 (in Chinese))
- [24] 金虎, 楼文娟, 陈勇. 基于自适应 BP 神经网络的桥梁结构荷载识别[J]. 浙江大学学报, 2005, 39(10):1596—

- 1602 (JIN Hu, LOU Wenjuan, CHEN Yong. Load identification for bridge structures based on self-adaptive BP neural networks[J]. Journal of Zhejiang University, 2005, 39(10):1596—1602 (in Chinese))
- [25] Chen S R, Cai C S. Equivalent wheel load approach for slender cable-stayed bridge fatigue assessment under traffic and wind: feasibility study[J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12(6):755—764.
- [26] Frangopol B D M, Kong J S, Gharaibeh E S. Reliability-based life-cycle management of highway bridges[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2001, 15(1):27—34.
- [27] 周奎, 王琦, 刘卫东, 等. 土木工程结构健康监测的研究进展综述[J]. 工业建筑, 2009, 39(3):96—102 (ZHOU Kui, WANG Qi, LIU Weidong, et al. A summary review of recent advances in research on structural health monitoring for civil engineering infrastructures[J]. Industrial Construction, 2009, 39(3):96—102 (in Chinese))
- [28] 刘月飞. 考虑失效模式和验证模式相关性的桥梁结构体系可靠度分析[D]. 哈尔滨工业大学, 2015 (LIU Yuefei. System reliability analysis of bridge structures considering correlation of failure modes and proof modes[D]. Harbin Institute of Technology, 2015 (in Chinese))
- [29] 樊学平. 基于验证荷载和监测数据的桥梁可靠性修正与贝叶斯预测[D]. 哈尔滨工业大学, 2014 (FAN Xuepin. Reliability updating and bayesian prediction of bridges based on proof loads and monitoring data[D]. Harbin Institute of Technology, 2014 (in Chinese))
- [30] Zejia Liu, Yinghua Li, Liqun Tang, et al. Localized reliability analysis on a large-span rigid frame bridge based on monitored strains from the long-term health monitoring system[J]. Smart Structures and Systems, 2014, 14(2): 209—224.
- [31] 李英华. 基于长期健康监测的连续刚构梁桥的性能分析与演化规律研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012 (LI Yinghua. Performance analysis and evolution of continuous rigid frame bridge based on long-term health monitoring[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012 (in Chinese))
- [32] 王震. 基于桥梁长期健康监测的数据特征分析与可靠度计算[D]. 广州: 华南理工大学, 2014 (WANG Zhen. Characteristics analysis and reliability calculation based on long-term bridge health monitoring data [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014 (in Chinese))
- [33] 雷秀强. 基于桥梁长期健康监测数据的时变可靠度分析与寿命预测[D]. 广州: 华南理工大学, 2015 (LEI Xiuqiang. The time-varied reliability analysis and service life prediction of the bridge structure based on long-term health monitoring data[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015 (in Chinese))
- [34] Mell P, Grance T. The NIST definition of cloud computing[J]. Communications of the Acm, 2010, 53(6):50.
- [35] 陈康, 郑纬民. 云计算:系统实例与研究现状[J]. 软件学报, 2009, 20(5):1337—1348 (CHEN Kang, ZHENG Weimin. Cloud computing: system instances and current research[J]. Journal of Software, 2009, 20(5):1337—1348 (in Chinese))
- [36] 罗军舟, 金嘉晖, 宋爱波, 等. 云计算:体系架构与关键技术[J]. 通信学报, 2011, 32(7):3—21 (LUO Junzhou, JIN Jahui, SONG Aibo, et al. Cloud computing: architecture and key technologies [J]. Journal on Communications, 2011, 32(7):3—21 (in Chinese))
- [37] 石建军, 李晓莉. 交通信息云计算及其应用研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11(1):179—184 (SHI Jianjun, LI Xiaoli. Research on traffic information cloud computing and its application [J]. Journal of Transportation Systems Engineering & Information Technology, 2011, 11(1):179—184 (in Chinese))
- [38] 田冉. 基于云平台的汽车物流服务价值链协同技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015 (TIAN Ran. Research on collaborative techniques for automobile logistics service value chain based on cloud platform[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015 (in Chinese))
- [39] 杨善林, 罗贺, 丁帅. 基于云计算的多源信息服务系统研究综述[J]. 管理科学学报, 2012, 15(5):83—96 (YANG Shanlin, LUO He, DING Shuai. Survey on multi-sources information service system based on cloud computing[J]. Journal of Management Sciences in China, 2012, 15(5):83—96 (in Chinese))
- [40] 朱仕村, 张宇峰, 张立涛, 等. 面向长大桥梁结构健康监测物联网的云计算[J]. 现代交通技术, 2011, 8(1):24—27 (ZHU Shicun, ZHANG Yufeng, ZHANG Litao, et al. Cloud computing research based on the Internet of things for long-span bridge structure health monitoring[J]. Modern Transportation Technology, 2011, 8(1):24—27 (in Chinese))

## Processing Technique and Application of Big Data Oriented to Long-term Bridge Health Monitoring

TU Cheng-feng<sup>1</sup>, LIU Ze-jia<sup>1</sup>, ZHANG Ge<sup>1</sup>, ZHOU Li-cheng<sup>1</sup>, CHEN Yi-tao<sup>1</sup>, CHENG Nan<sup>1</sup>,  
GU Jia-wei<sup>2</sup>, DONG Shou-bin<sup>2</sup>, DENG Zhi-hua<sup>3</sup>, WANG Yong<sup>3</sup>, TANG Li-qun<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Transportation, State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. School of Computer Science & Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 3. Huangpu Bridge of Pearl River in Guangzhou, Guangzhou 511434, China)

**Abstract:** The application of bridge long term health monitoring system is briefly introduced in this paper, as well as the research status of big data analysis technology based on bridge long-term health monitoring is also summarized. Based on long term health monitoring, this paper focuses on following three aspects of research progress in big data analysis: multi-scale correlation analysis and multi-dimensional modeling, anomaly data mining and analysis, and time-dependent reliability study, and the development and application of the bridge health monitoring service platform based on cloud computing are introduced and prospected.

**Keywords:** bridge long-term health monitoring; big data; correlation analysis; data mining; time-dependent reliability; cloud computing