中国科学: 技术科学 2012 年 第 42 卷 第 8 期: 972 ~ 984
www.scichina.com tech.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

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

李爱群, 丁幼亮*, 王浩, 郭彤

东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 210096
* E-mail: civilding@163.com

收稿日期: 2011-10-08; 接受日期: 2011-12-13
国家杰出青年科学基金(批准号: 50725828)资助项目

摘要 详细介绍了国家杰出青年科学基金项目“结构健康监测”(项目号: 50725828)研究进展. 该项目针对桥梁环境荷载和静动力响应等海量监测数据的处理分析与评估迫切需求, 并紧密结合大跨斜拉桥和悬索桥的结构特点, 系统地研究了大跨斜拉、悬索桥梁服役环境作用监测与效应模拟技术、动力性能监控与异常预警技术以及关键构件状态评估与运营维护技术. 主要包括: ①基于温度、日常风和台风监测数据提出了大跨桥梁服役环境作用模型与模型参数确定方法, 并结合大跨桥梁多尺度基准有限元模拟方法研究了桥梁服役荷载效应模拟技术; ②基于振动监测数据建立了大跨桥梁整体动力特性参数以及斜拉桥拉索索力、悬索桥主缆和吊杆内力的在线识别方法, 形成了“环境条件归一化”的桥梁运营状态监控与异常预警技术; ③基于应变、梁端位移等监测数据开展了服役环境下钢箱梁焊接细节疲劳荷载效应、主梁伸缩缝的温度和车载效应分析方法研究, 形成了桥梁关键构件服役性能监控和寿命评估技术.

关键词
结构健康监测
桥梁
海量数据
状态评估
环境作用

1 引言

随着桥梁服役时间的增长、气候和环境等自然因素的长期作用以及交通量和重车数量的不断增加, 桥梁结构的安全性、适用性和耐久性也必然发生退化, 极端情况下将引发灾难性的突发事故. 因此, 研究建立桥梁结构健康监测与安全评估的理论、方法及其系统, 是桥梁工程可持续发展的必然要求. 自 20 世纪 90 年代起, 国内外重要的大跨桥梁大多设置了结构健康监测系统, 监测内容除了结构本身的状态和行为以外, 还强调对环境条件的监测和记录分析[1]. 很多监测系统具有快速大容量的信息采集、通讯与存储能力. 然而, 很大一部分桥梁的结构健康监测系统在注重测试数据的采集与保存的同时, 忽略了对结构健康状态的评估需求. 虽然国内外不少学者开展了基于整体动力特性的桥梁损伤定位和损伤评估方法研究, 但是由于大跨桥梁结构复杂、体量巨大、冗余度高以及环境因素的影响, 基于动力参数测试的大跨桥梁结构动力损伤诊断技术难以有效地应用于结构状态预警和评估[2, 3]. 桥梁健康监测系统数据没有得到充分应用, 甚至形成了“海量垃圾数据”的局面. 总的看来, 桥梁结构健康监测技术的研究开发尚

英文版发表信息: Li A Q, Ding Y L, Wang H, et al. Analysis and assessment of bridge health monitoring mass data—progress in research/development of “Structural Health Monitoring”. Sci China Tech Sci, 2012, 55: 2212–2224, doi: 10.1007/s11431-012-4818-5

属于基础性的探索, 距离实际工程应用有一定的差距, 而其中一个主要原因为: 监测系统的海量数据未能得到科学处理, 未能通过监测系统数据分析准确把握在役桥梁的复杂工作环境和结构响应行为.

李爱群教授及其科研团队 2008 年承担了国家杰出青年科学基金项目“结构健康监测”(项目批准号: 50725828), 该项目重点开展桥梁健康监测海量数据分析与评估研究, 主要解决 2 个关键问题: ①基于长期监测数据考察大跨桥梁结构在环境荷载作用下的结构行为特征, 研究桥梁环境荷载作用、结构响应及其累积损伤效应的长期变化规律及其相关关系; ②科学处理大跨桥梁整体性态监测信息和局部性态监测信息, 结合悬索桥和斜拉桥的结构特点, 针对主梁、斜拉索、伸缩缝等关键构件和易损部位采集的海量监测信息研究桥梁整体性能监控和关键构件服役状态评估方法. 项目研究成果对于充分发挥桥梁结构健康监测海量数据的作用, 揭示服役期内桥梁的环境作用、结构响应及其累积损伤效应的变化规律, 服务于大桥的养护和运营管理, 并且反馈和改进桥梁结构设计方法等方面具有重要的学术价值和工程应用价值.

2　项目总体进展

本项目以润扬大桥悬索桥和润扬大桥斜拉桥健康监测海量数据(主要包括风、温度等环境作用数据以及主梁梁端位移、应变和振动等结构响应数据)为主要研究对象, 研究解决大跨斜拉、悬索桥梁健康监测海量数据处理分析与评估各项关键技术, 力求在理论和方法研究、关键技术和工程应用等方面取得全面突破, 形成系统的桥梁健康监测海量数据分析和评估理论、方法和技术体系, 提升我国在桥梁结构健康监测和安全评估的科技水平. 项目总体思路如图 1 所示, 分为 3 个研究专题, 分别为桥梁服役环境作用监测与效应模拟技术、桥梁动力性能监控与异常预警技术、桥梁关键构件状态评估与运营维护技术.

2.1　桥梁服役环境作用监测与效应模拟技术

① 研究温度、日常风和台风长期监测数据分析方法, 建立桥梁服役环境作用的统计模型与模型参数确定方法.

② 研究大跨桥梁多尺度基准有限元模型的建立与修正技术, 建立大跨桥梁温度效应、日常风/台风效应模拟方法.

2.2　桥梁动力性能监控与异常预警技术

① 研究基于非平稳振动响应的桥梁结构模态频率识别方法, 提高模态频率识别精度, 实现桥梁模态频率以及斜拉索索力和吊杆内力等长期自动在线识别.

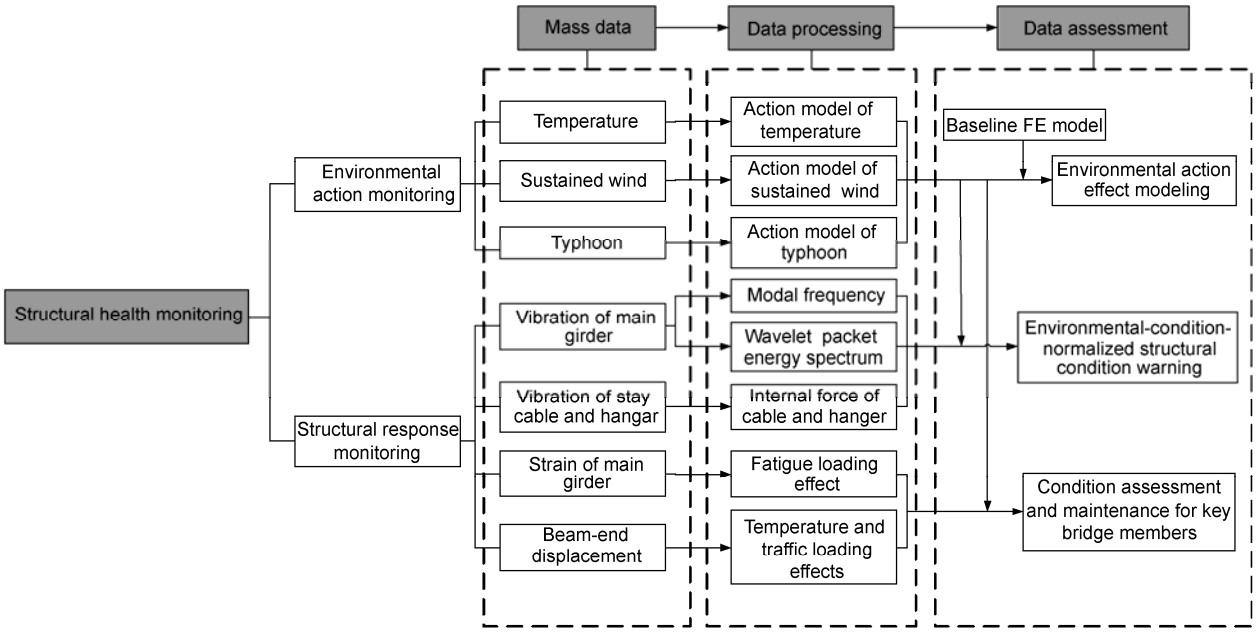

图 1　项目研究总体思路

② 引入小波包分析、数据融合技术等先进信号分析和数据处理方法研究环境激励下基于小波包能量谱的结构动力参数识别方法及其损伤预警技术.

③ 研究桥梁结构整体动力特性参数以及斜拉索索力和吊杆内力等与环境条件(风、温度、车辆荷载)的相关性特征, 建立“环境条件归一化”的桥梁运营状态监控与异常预警技术.

2.3 桥梁关键构件状态评估与运营维护技术

① 研究服役环境作用下钢箱梁焊接细节等复杂应力部位的疲劳荷载效应, 建立考虑温度和车辆增长的疲劳寿命评估方法以及疲劳监测重点部位确定方法.

② 研究温度和车辆荷载作用下桥梁梁端位移的长期变化规律, 建立运营状态下伸缩缝性能监控与预警技术.

项目研究历时近四年(2008~2011 年), 已出版学术专著 2 部; 发表 SCI 收录论文 25 篇; 授权国家发明专利 10 项; 获全国优秀博士学位论文提名奖 1 篇和江苏省优秀硕士论文 1 篇. 下面分 3 个专题介绍代表性研究成果.

3 桥梁服役环境作用监测与效应模拟

3.1 扁平钢箱梁温度场监测数据分析技术

扁平钢箱梁温度场实测研究相比混凝土箱梁而言非常少, 并且国内外大多数规范不考虑钢箱梁顶板横向温差, 例如我国《公路桥涵设计通用规范(JTGD60-2004)》对带混凝土桥面板的钢结构竖向温差进行了简单规定, 英国《钢桥、混凝土桥及组合桥设计规范(BS5400)》给出了不同形式主梁竖向温差的详细说明, 但未对钢箱梁的横向温差做出相应的规定.

本项目基于润扬大桥斜拉桥和悬索桥钢箱梁温度场监测数据, 借助非线性最小二乘估计、假设检验等数学方法, 研究钢箱梁不同测点的温度随时间的变化规律, 建立扁平钢箱梁各测点之间温差的概率分布模型, 得到扁平钢箱梁横向和竖向正温差和负温差的标准值, 并进一步提出扁平钢箱梁的温差模式. 基本实施方案如下.

① 基于长期温度数据(2005～2010 年)研究了润扬大桥斜拉桥和悬索桥扁平钢箱梁各测点温度随时间的变化规律, 分析结果表明: 扁平钢箱梁底板横向温差较小, 可认为底板横向温度均匀分布; 顶板横向存在正温差和负温差; 顶板和底板之间的竖向温差随着日照的增强而增强.

②通过对多个分布模型的拟合优度比较, 选用 1 个 Weibull 分布和 1 个正态分布的加权和来描述扁平钢箱梁横截面正温差和负温差的概率分布函数, 其计算公式为:

$$\begin{aligned} f(T) &= \alpha W(a,b) + \beta N(\sigma,\mu) \\ &= \alpha\left[ba^{-b}T^{b-1}\mathrm{e}^{-(\frac{T}{a})^b}\right] + \beta\left[\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{\frac{-(T-\mu)^2}{2\sigma^2}}\right], \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $f(T)$ 表示扁平钢箱梁温差的分布函数, $W(a,b)$ 表示 Weibull 分布函数, $N(\sigma,\mu)$ 表示正态分布函数, α 和 β 分别表示 Weibull 分布和正态分布的权重, 且 $\alpha+\beta=1$.

③ 基于上述概率分布函数计算桥梁设计基准期内钢箱梁横截面正温差和负温差标准值, 并结合时间相关性分析方法, 得出扁平钢箱梁不同测点之间的温差模式.

图 2 给出了润扬大桥悬索桥钢箱梁顶板横向正温差、负温差和顶板、底板竖向温差的概率分布函数, 表 1 给出了钢箱梁不同截面的温差标准值及其与英国 BS5400 规范的比较.

3.2 桥梁风速、风向监测数据分析技术

现有的桥梁风环境参数分析方法一般不考虑风作用方向, 直接利用实测风速仪数据进行平均风特性和脉动风特性计算, 一般只给出极大值、平均值和方差等几个简单的统计量. 这种方法忽视了桥梁风致响应会随着风作用方向的不同而发生变化这一事实, 也忽视了实际桥梁地区不同方向风场特性参数的差异.

本项目研究以桥梁主梁纵向作为虚拟正北方向进行风向划分, 进而基于桥梁日常风监测数据和多次台风监测数据建立大跨桥梁桥址静力风参数(包括平均风速)和脉动风特性参数(包括紊流强度、阵风因子、湍流积分尺度和脉动风功率谱密度函数)的概率分布模型, 为建立桥梁全寿命期风场模型提供重要的基础数据和分析方法[4~6]. 基本实施方案如下.

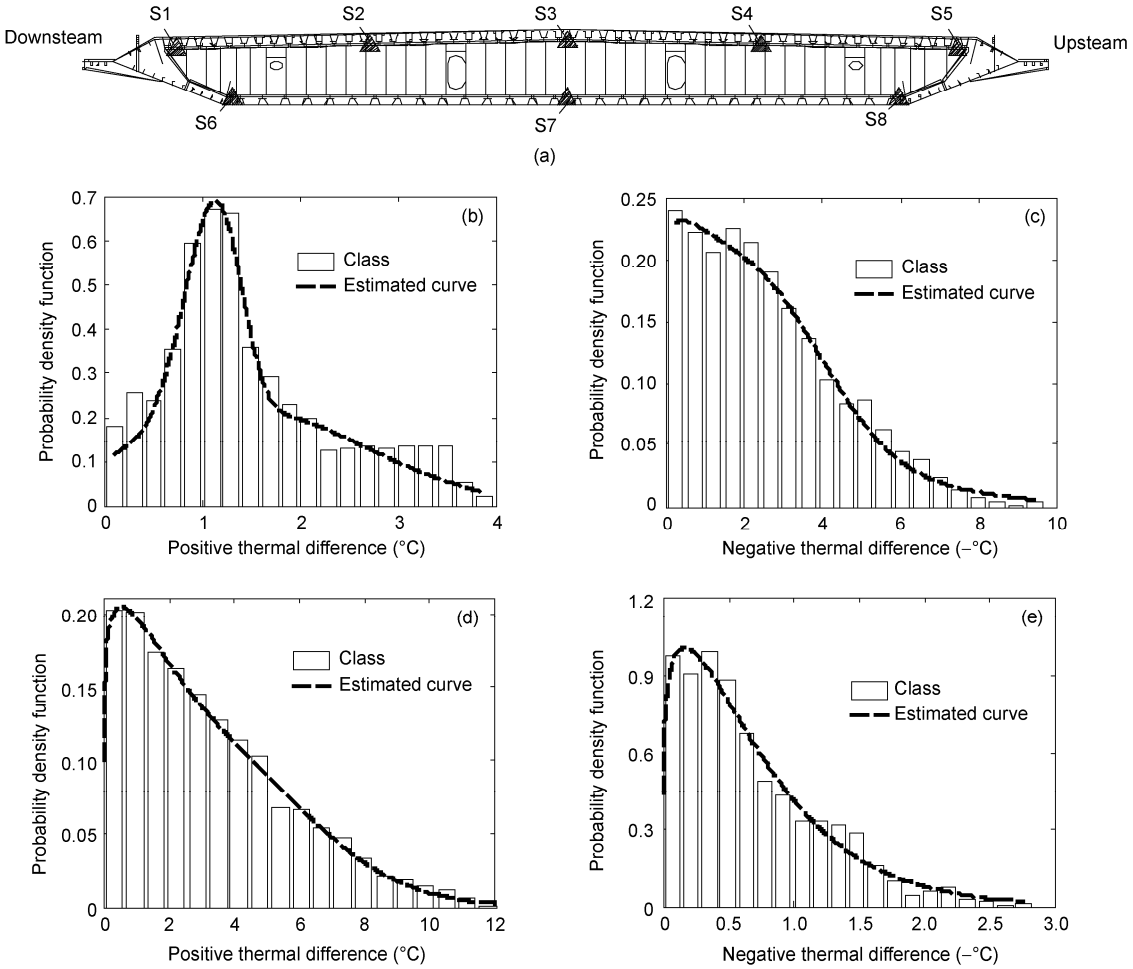

图 2　扁平钢箱梁顶板横向正温差、负温差和顶板、底板竖向温差的概率分布函数

(图中 $T_{ij}=T_i-T_j$, 表示温度传感器 S_i 与 S_j 的实测温度 T_i 与 T_j 之差, i, j=1, 2, 3, ⋯, 7, 8)

(a) 典型横断面温度传感布置图; (b) T_{31}^{+} 数据和概率分布; (c) T_{31}^{-} 数据和概率分布; (d) T_{37}^{+} 数据和概率分布; (e) T_{37}^{-} 数据和概率分布

表 1　扁平钢箱梁不同截面的温差标准值(单位: °C)

Temperature difference	1/4 middle section		1/8 middle section		BS5400	
	Positive value	Negative value	Positive value	Negative value	Positive value	Negative value
T_{76}	0	0	0	0	0	0
T_{12}	4.28	−13.43	4.26	−13.46	0	0
T_{23}	22.31	−4.36	22.28	−4.39	0	0
T_{31}	5.82	−19.11	5.89	−19.18	0	0
T_{37}	18.01	−5.73	18.20	−5.74	24.00	−6.00

① 根据桥梁主梁轴线, 确定风荷载作用的 8 个区域, 计算每个区域的角度范围. 对健康监测系统实测的大量风场数据, 包括瞬时的水平风速、水平风向、垂直风速和垂直风向, 按照瞬时水平风向的数值将实测数据归为上述 8 个区域.

② 利用矢量分解法对每个区域内的数据进行计算, 得出标准时段(如 1 min, 10 min 或 1 h)的水平向平均风速、水平向平均风速对应的风向、垂直向平均风速和垂直风向, 进而计算出每个区域内的 3 个方向(顺风向、横风向和垂直向)的脉动风速.

③ 计算每个区域内的 3 个方向的脉动风场特性参数, 包括紊流强度、阵风因子、紊流积分尺度和脉

动风功率谱.

④ 针对每个区域内的每个方向的每一种风场特性参数和功率谱密度函数参数的大量样本, 将最大值和最小值之间的区域分为 20 个间距相等的区间, 计算样本落在每一区间内的概率, 并绘制概率分布直方图.

⑤ 选取正态分布、对数正态分布和 Log-logistic 分布作为基本的概率密度函数, 对选取的概率密度函数进行线性组合, 形成一种新的概率密度函数作为风场特性参数和功率谱密度函数参数的概率分布函数, 其形式为:

$$f(x)=\alpha_1 f_1(x)+\alpha_2 f_2(x)+\alpha_3 f_3(x), \tag{2}$$

其中 $\alpha_1+\alpha_2+\alpha_3=1$. 式中 $f(x)$ 表示参数 x 的概率密度函数, α_i 表示选取的概率密度函数 $f_i(x)$ 的权重 ($i=1,\cdots,3$), $f_1(x)$, $f_2(x)$ 和 $f_3(x)$ 分别表示正态分布、对数正态分布和 Log-logistic 分布的概率密度函数.

图 3 给出了润扬大桥悬索桥主梁纵向方向日常风的纵向湍流度、横向湍流度、纵向湍流积分尺度、横向湍流积分尺度的概率分布函数.

3.3 大跨桥梁多尺度基准有限元模拟技术

由于测量模态的不完整与测试误差以及桥梁结构可观测的动力参数对局部构件参数变化的不敏感导致大跨桥梁模型修正过程往往是病态的, 甚至是非唯一解的逆问题. 此外, 桥梁结构整体分析大多采用空间骨架模型, 同时对关键构件的局部分析仅是“单向”计算, 不能反映局部构件特性对整体响应的影响, 计算误差较大.

本项目根据斜拉桥和悬索桥的结构特点与测试信息的有限性, 研究面向桥梁结构状态评估的有限元模拟基本原则、分析目标与技术要求, 并结合斜拉桥和悬索桥的结构特点制定详细的桥塔、斜拉索/主缆/吊杆与主梁的有限元建模与修正方案. 在此基础上研究大跨桥梁结构多尺度有限元模拟方法, 建立全桥整体尺度结构与细节尺度构件之间“双向”的关系, 实现桥梁体结构与局部构件的多尺度耦合分析[7~12]. 以润扬大桥斜拉桥为例, 基本实施方案如下.

① 斜拉桥索塔的有限元模型修正分为 3 个阶段: 模型阶次误差修正(单元数确定方法)、模型结构误差

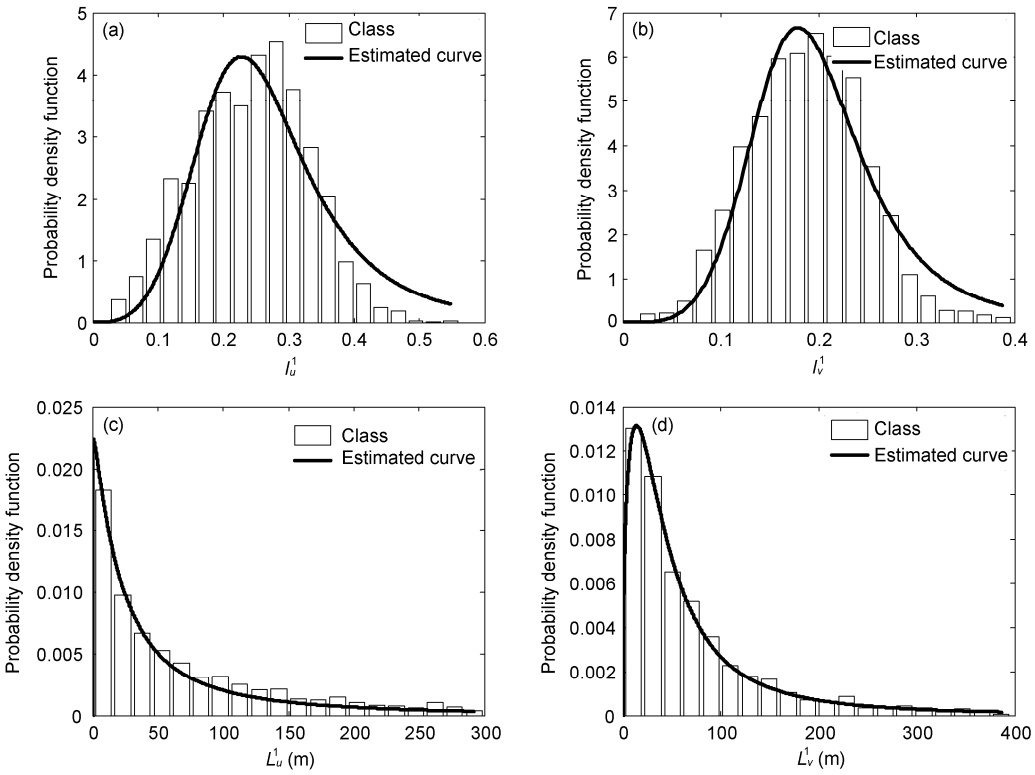

图 3 润扬大桥悬索桥主梁纵向方向的概率分布函数

(a) 纵向湍流度; (b) 横向湍流度; (c) 纵向湍流积分尺度; (d) 横向湍流积分尺度

修正(节点刚域模拟方法)和模型参数误差修正(构件材料和截面特性参数修正方法).

② 斜拉桥主梁的整体结构尺度模型针对扁平钢箱梁结构采用正交异性壳元进行模拟, 根据正交异性板对钢箱梁结构的整体刚度等效原则确定正交异性壳元的相关计算参数. 主梁的局部构件尺度模型则采用有限元方法精细模拟盖板、纵向加劲肋、横隔板、底板和腹板等. 在此基础上采用子模型和子结构方法建立了钢箱梁结构全尺度响应和关键构件尺度之间“双向”的关系(如图 4 所示).

③ 斜拉桥拉索计算参数根据静动载试验结果并采用索力调整优化程序予以确定.

在上述工作基础上对润扬大桥斜拉桥有限元模型进行了静、动力分析并与全桥静载和环境振动试验结果进行了比较: 1) 模态频率和振型的计算结果与实测 19 阶测试频率和测试振型吻合良好, 其中, 竖弯振型 8 阶, 侧弯振型 2 阶, 扭转振型 4 阶, 索塔和主梁的耦合振型 5 阶, 并且匹配的最大振型阶次达到 40 阶, 说明该有限元模型能够全面、准确地反映桥梁整体结构的动力特性; 2) 车辆荷载作用下钢箱梁关键构件的局部应力分析计算结果与实测结果吻合良好. 图 5 为不同加载工况作用时, 主跨跨中截面顶板

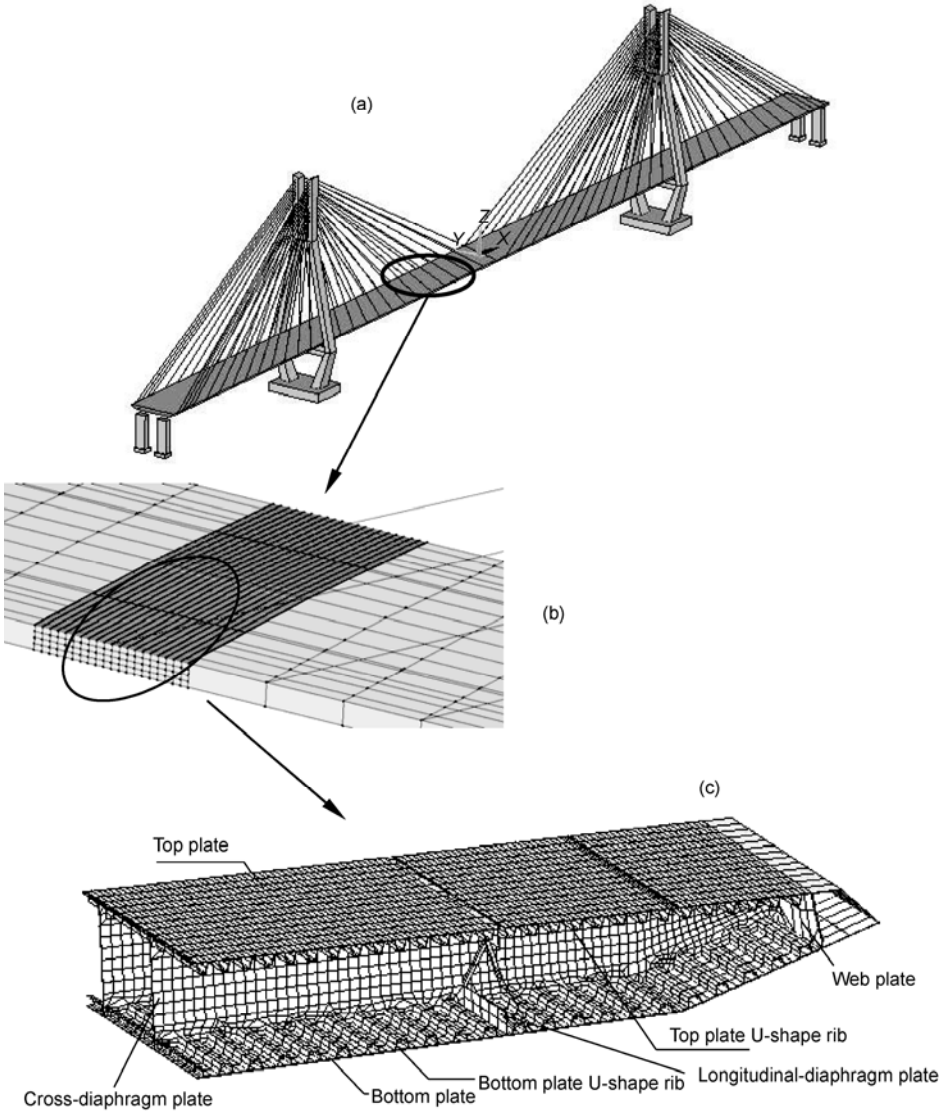

图 4　润扬大桥斜拉桥的多尺度分析模型

(a) 整体结构尺度模型; (b) 多尺度衔接示意图; (c) 局部构件尺度模型

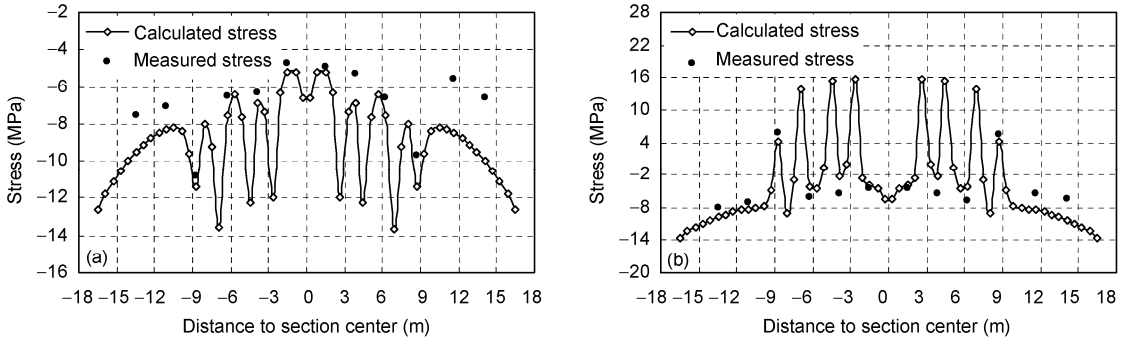

图 5　顶板 U 肋应力跨中截面横向分布图

(a) 加载工况 1; (b) 加载工况 2

U肋下缘的纵向弯曲应力沿梁宽横向分布图. 可以看出, 顶板 U 肋各测点的应力计算值与实测值吻合良好. 说明该有限元模型能从整体结构尺度与局部构件尺度 2 个方面准确地模拟斜拉桥在服役载荷作用下的行为与工作状态, 为该桥结构环境作用效应评估提供了适合的数值仿真技术.

4　桥梁动力性能监控与异常预警

4.1　桥梁结构模态频率高精度、在线识别技术

桥梁模态频率识别一般采用经典功率谱估计方法, 要获取较高的频率分辨率就要增加振动响应的采集时间. 然而, 桥梁运营状态下受车辆活载的影响, 振动响应具有显著的非平稳特征, 需要在尽量短的时间内完成频率测试.

本项目建立了大跨桥梁结构模态频率高精度、在线识别技术[13], 采用最大熵谱分析代替传统功率谱分析识别结构模态频率, 显著地改善传统功率谱法对于非平稳振动响应频率分辨率低、识别精度差等问题. 基本实施方案为如下.

采用最大熵法进行模态频率的概率估计用以改善传统功率谱法识别频率分辨率低的缺点. 最大熵谱估计的基本思想是已知 $p+1$ 个值, 对 $m>p$ 的未知的自相关函数予以外推, 外推后的自相关函数所对应的时间序列应具有最大的熵. 若 X 是一个高斯随机信号, 则最大熵功率谱为:

$$P_{MEM}(\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega})=\frac{\sigma^2}{\left|1+\sum_{k=1}^{p}\alpha_k\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega k}\right|^2}, \tag{3}$$

式中 $\sigma^2,\alpha_1,\alpha_2,\cdots,\alpha_p$ 是 AR(auto-regressive)模型的参数. $P_{MEM}(\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega})$ 存在一个制约条件, 即它的傅里叶逆变换所得到的前 $p+1$ 个自相关函数应等于所给定的信号 X 的前 $p+1$ 个自相关函数.

以润扬大桥悬索桥主梁模态频率识别为例, 直接根据功率谱识别的主梁模态频率由于频率分辨率的限制(润扬大桥采样频率 20 Hz, 数据点数 4906, 则频率分辨率仅为 0.0041 Hz), 难以准确地反映模态频率的日变化特征(如图 6 所示). 采用最大熵法对模态频率进行概率识别则可以将频率分辨率提高到 0.0005 Hz, 模态频率的日变化曲线能够明显地表征环境条件对模态频率的影响, 主要表现为环境温度的变化对模态频率的影响是长期性的趋势, 而交通

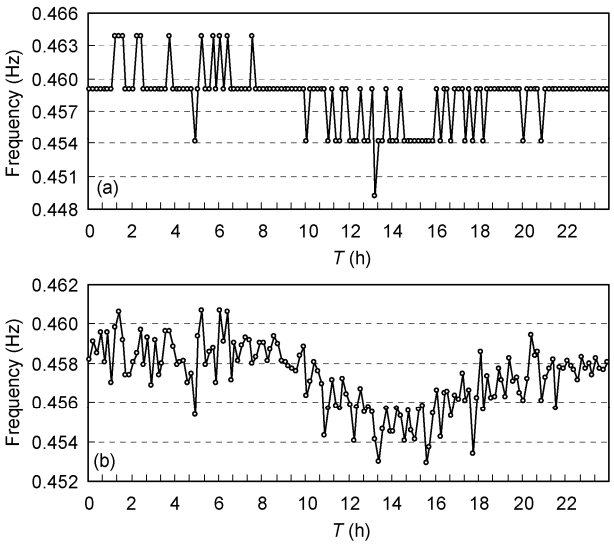

图 6　五阶对称竖弯模态频率的日实测曲线

(a) 直接识别; (b) 概率识别

载荷和风速对模态频率的影响则由于荷载的非平稳性呈现瞬时的颤动变化. 进一步长期监测分析表明(图 7), 润扬大桥悬索桥低阶竖弯振型的实测模态频率受环境温度变化的影响则较小, 高阶竖弯振型的实测模态频率与环境温度则存在较为明显的相关关系, 表现为"温度高频率低、温度低频率高"的变化特征, 高阶模态频率的年平均变化达到 1.5%~2.0%.

4.2　基于振动监测数据和小波包分析的结构损伤预警技术

传统基于模态频率和振型的结构损伤评估技术存在损伤敏感性低、噪声影响大、传感器布设量大等问题, 导致了桥梁结构整体状态监测与预警的困难. 本项目引入小波包分析、数据融合技术等先进信号分析和数据处理方法研究适用于大型土木工程结构的损伤预警技术[14, 15], 从理论证明、数值分析、模型试验等系统地研究结构损伤预警的敏感性、噪声鲁棒性和工程实用性, 系统建立了基于小波包能量谱的大型土木工程结构损伤预警技术[16, 17], 包括基于小波变换的结构多尺度分解理论证明、基于小波包能量谱的结构损伤预警指标体系、环境激励下的小波包能量谱识别技术等. 基本实施方案如下.

① 采用 2 个加速度传感器测量结构在自然激励条件下的结构动力响应 $x_n(t)$和 $x_m(t)$.

② 计算测点响应 $x_n(t)$, $x_m(t)$的互谱密度 $G_{yu}(n,m)$和响应 $x_m(t)$的自谱密度 $G_{uu}(m)$, 据此计算虚拟频率响应函数 $H_{yu}(n,m)$. 对虚拟频率响应函数 $H_{yu}(n,m)$进行逆傅里叶变换, 即得到虚拟脉冲响应函数 $C_{yu}(n,m)$.

③ 采用 Daubechies 小波对虚拟脉冲响应函数 $C_{yu}(n,m)$进行第 i 层小波包分解, 选择适宜的小波函数阶次和小波包分解层次, 得到 $C_{yu}(n,m)$在第 i 分解层的小波包能量谱向量 $\boldsymbol{E}_i=\{E_{i,j}\}$ ($j=0,1,2,\cdots,2^i-1$), 据此计算每个频带的能量比 I_p, 并作为结构损伤预警参数:

$$I_p=\frac{E_{i,p}}{\left(\sum_{j=1}^{2^i-1}E_{i,j}\right)\Big/2^i}\quad (p=0,1,2,\cdots,2^i-1),\tag{4}$$

通过能量比 I_p 的变化来判断结构的损伤状态.

④ 为进一步提高环境激励下结构损伤预警的准确性, 将信息融合技术引入到基于小波包能量谱的结构损伤预警方法中. 采用 D-S 证据理论对环境激励下识别的小波包能量谱进行多源信息融合得到改进的小波包能量谱, 并计算结构的损伤预警指标.

表 2 和表 3 分别给出了美国土木工程学会 ASCE Benchmark 结构损伤前后(损伤工况为去除第 1 层东南角一跨的支撑)的模态频率和小波包能量谱试验结果. 结果表明, 小波包能量谱相比模态频率具有损伤敏感性强、抗噪声能力强、在线识别效果好等优点, 适用于大型工程结构的实时损伤预警.

4.3　"环境条件归一化"的桥梁整体性能监控技术

桥梁结构在温度、风速等环境条件的变化以及正常运营荷载的变化影响下, 各种观测数据会在一个较宽的范围内波动, 从而淹没或掩盖结构局部损伤或超载等异常所造成的结构动力特征参数的真正改变, 这是导致运营状态下结构整体性能监控困难的重要原因.

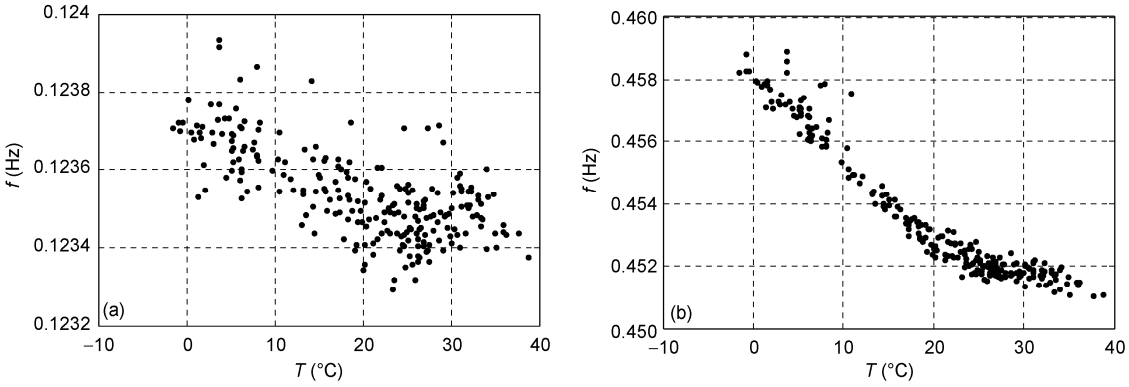

图 7　模态频率日平均值与温度日平均值的季节相关性

(a) 一阶对称竖弯; (b) 五阶对称竖弯

表 2　结构损伤前后的模态频率

Case	Mode No.					
	1	2	3	4	5	6
Intact structure	7.45	7.66	14.45	19.83	20.88	22.52
Damaged structure	7.55	7.36	13.99	19.84	20.48	22.58
Variance (%)	1.34	3.92	3.18	0.05	1.92	0.27

表 3　结构损伤前后的小波包能量谱预警指标

Case	Sensors					
	H8_9	H6_8	H5_11	H14_11	H15_11	H15_9
Intact structure	3.13	3.59	3.02	3.85	2.21	3.23
Damaged structure	10.06	19.57	7.04	26.77	8.78	6.34
Variance (%)	221.64	445.60	132.86	594.99	296.58	95.98

本项目基于长期监测数据研究大跨桥梁结构状态预警参数(包括模态频率和小波包能量谱等整体动力特性参数以及斜拉索索力和吊杆内力)与环境条件(温度、正常交通荷载和风荷载)的相关性规律, 在此基础上采用神经网络和统计模式识别技术研究“环境条件归一化”的桥梁运营状态监测与异常预警技术[18, 19]. 基本实施方案如下.

① 采用 sigmoid 传递函数的单隐层的非线性 BP 神经网络模型来建立结构状态预警参数与正常运营环境条件的多元回归模型, 为了克服神经网络中经常出现的过拟合现象, 采用提前停止技术和贝叶斯正则化技术对其进行改进.

② 隐层神经元的数目对神经网络的泛化能力起着至关重要的作用, 取不同的隐层神经元数目分别训练神经网络, 每次训练之后将验证样本再次输入网络, 计算验证样本的性能函数, 以此来评价网络训练的质量, 从而得到最优的隐层神经元数目.

③ 定义结构整体状态预警指标为:

$$e = |f_{\mathrm{m}} - f_{\mathrm{s}}|, \tag{5}$$

其中, f_{m} 和 f_{s} 分别为结构状态预警参数的实测值和网络预测值. 采用多样本假设检验的方法来判断结构运营状态是否发生异常.

图 8 给出了润扬大桥悬索桥小波包能量谱与温度的相关性. 图 9 给出了小波包能量谱异常预警分析结果. 结果表明, 环境条件的变化可以引起模态频率和小波包能量谱发生平均约 2.0%和 200%的年变化, 运用该方法可以较好地识别出模态频率和小波包能量谱 0.2%和 10%的异常变化.

5　桥梁关键构件状态评估与运营维护

5.1　扁平钢箱梁焊接细节应变监测数据分析技术

目前国内外大跨钢箱梁桥的疲劳性能设计大都采用基于焊接构件室内疲劳实验结果(*S-N* 曲线)的安全寿命设计法. 如何准确预测钢箱梁桥在真实荷载环境条件下的疲劳损伤状况, 建立更为完善的钢箱

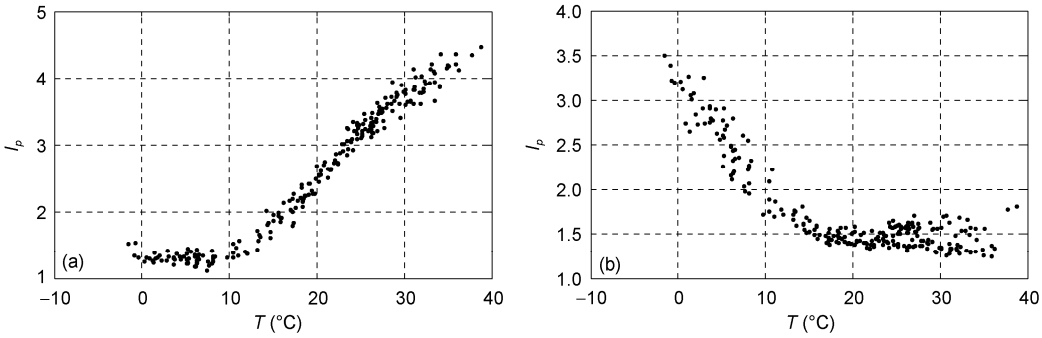

图 8　润扬大桥悬索桥小波包能量谱与温度的相关性

(a) 第 30 阶特征频带; (b) 第 21 阶特征频带

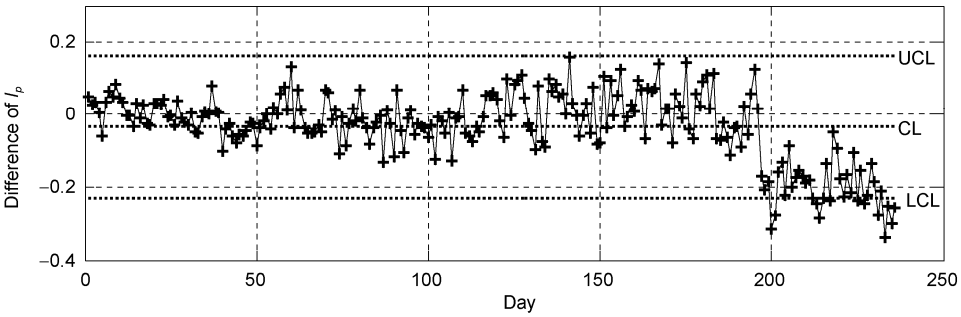

图 9　小波包能量谱 10%的异常变化

梁桥疲劳状态评估方法, 仍是桥梁工程领域面临的一大挑战.

本项目基于长期应变监测数据研究钢箱梁焊接细节的疲劳效应与温度和车辆增长的相关性, 采用统计分析技术建立焊接细节疲劳荷载效应的概率模型, 在此基础上采用 Miner 线性损伤累积理论和线弹性断裂力学理论建立焊缝疲劳损伤评估技术, 并研究扁平钢箱梁疲劳监测重点部位确定方法[20~22]. 以润扬大桥悬索桥和斜拉桥为例, 基本实施方案如下.

① 研究了润扬大桥钢箱梁焊接细节在日常环境、台风来袭和交通流量剧增等条件下的疲劳应力谱特征, 揭示了车辆荷载和钢箱梁温度变化与焊接细节疲劳损伤的相关性规律, 在此基础上采用 GMM 为高斯混合模型(Gaussian Mixture Model, 简称 GMM)建立了焊接细节等效应力范围和循环次数的概率模型.

② 基于 *S-N* 曲线和 Miner 线性损伤累积理论建立了钢箱梁疲劳可靠度评估技术, 钢箱梁焊接细节的疲劳极限状态方程:

$$g(X)=\Delta-e\cdot D=\Delta-e\cdot\frac{365\cdot n\cdot N_{\mathrm{d}}\cdot S_{\mathrm{eq}}^{m}}{K_2}, \tag{6}$$

其中, n 为服役年限, Δ 为临界疲劳损伤, K_2 为疲劳强度系数, S_{eq} 为日等效应力幅, N_{d} 为循环次数, e 为传感器测试误差系数, S_{eq} 和 N_{d} 的概率分布由步骤①确定. 该方法可以准确地考虑真实环境和荷载条件下的疲劳荷载效应, 推动了扁平钢箱梁抗疲劳设计发展.

③ 联合线弹性断裂力学和现场无损检测技术建立了钢箱梁焊缝细节疲劳可靠度评估技术, 采用有限厚板的半椭圆裂纹模型推导了焊缝细节疲劳断裂抗力的表达式, 得极限状态方程为:

$$g(Z)=R-e\cdot CS_{\mathrm{eq}}^{m}\cdot 365\cdot n\cdot N_{\mathrm{d}}, \tag{7}$$

其中, R 为断裂抗力, C 和 m 分别为裂纹扩展系数和裂纹扩展指数, 其余参数同步骤②. 该方法将焊缝现场无损检测结果和长期监测结果相结合, 评估结果为钢箱梁养护管理提供了科学依据.

④ 长期监测结果表明, 钢箱梁纵肋对接焊缝的疲劳损伤比纵肋与桥面板的连接焊缝大; 即使在同一个桥面板, 也要考虑上下游交通流量的不同而引起疲劳强度变化的情况; 润扬大桥悬索桥的疲劳损伤比润扬大桥斜拉桥要大.

⑤ 综合以上研究成果, 提出了一种基于疲劳损伤程度指标的钢箱梁桥疲劳监测重点部位确定方法, 全面考虑了桥梁整体和局部受力特性、交通量和不同焊接部位等因素影响, 为传感器的优化布置和日常养护管理提供指导.

图 10 分别给出了润扬大桥悬索桥 ZLNL4-15(位于上游右车道处)焊缝疲劳损伤长期监测结果. 图 11 给出了润扬悬索桥ZLNL4-15疲劳荷载效应的概率统计模型.

5.2　桥梁梁端位移监测数据分析技术

伸缩缝是桥梁结构缝隙中埋设的重要构件, 实际工程中由于设计施工缺陷、管理维护不善及车辆超载加剧等情况, 使得伸缩缝发生损坏的情况较为严重, 因此迫切需要有效的方法对伸缩缝的状态进行实时监测和评估.

本项目采用桥梁梁端位移的变化规律表征桥梁伸缩缝的健康状态. 基于温度、车辆荷载以及主梁梁端位移的长期监测数据研究主梁梁端位移与温度、车辆荷载的相关性特征, 在此基础上应用统计过程控制图方法研究“环境条件归一化”的梁端位移异常预警方法, 实现伸缩缝服役性能的在线监控与预警[23, 24]. 基本实施方案如下.

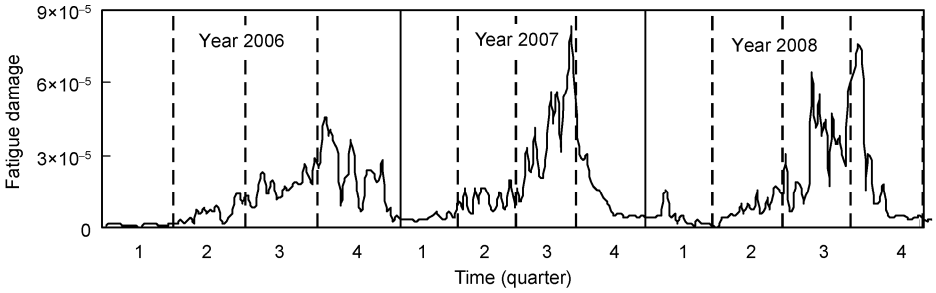

图 10　润扬悬索桥 ZLNL4-15 处焊缝疲劳损伤监测结果

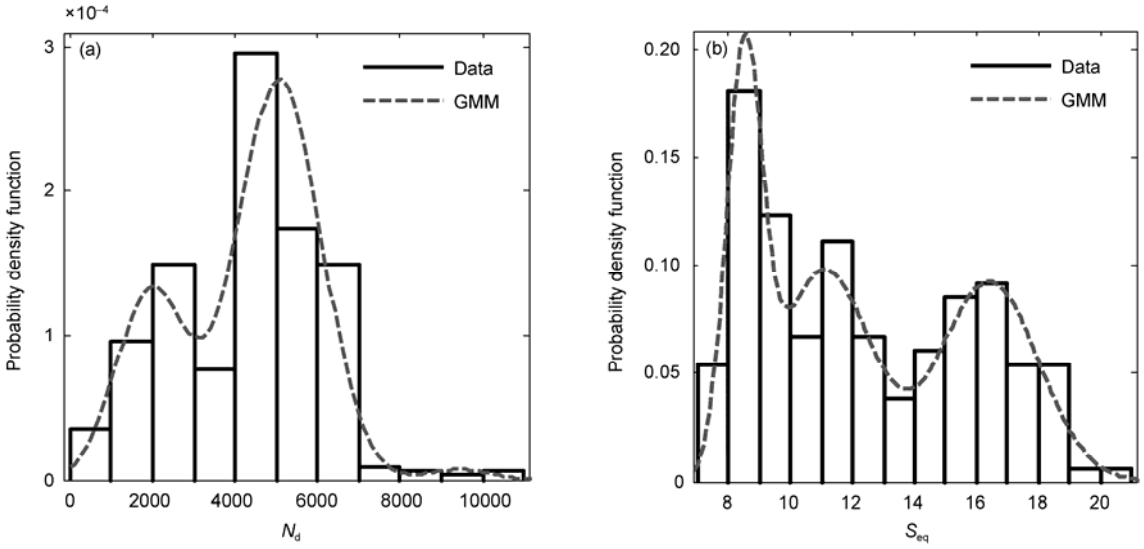

图 11　悬索桥 ZLNL4-15N_d 和 S_{eq} 的多峰概率分布模型

(a) 日应力循环次数 N_d; (b) 日等效应力范围 S_{eq}

① 主梁梁端位置设置纵向位移传感器, 同时, 在主梁的跨中位置安装温度传感器和加速度传感器, 用以监测主梁的温度和由于车辆荷载引起的主梁竖向加速度.

② 以 10 min 为计算区间, 对传感器获取的原始数据进行处理, 计算梁端纵向位移 D、温度 T 和车辆荷载的代表值 R.

③ 建立完好状态下纵向位移和环境条件的相关模型: 选取桥梁运营初期 n 天的监测数据并采用神经网络方法建立温度 T 和梁端纵向位移 D 之间的关系; 消除温度对纵向位移的影响, 选取参考温度为 T_r, 将位移原始测试值 D “归一化”至参考温度 T_r, 得到消除温度影响的梁端纵向位移值 D_1; 建立 D_1 和车辆荷载代表值 R 的相关性模型, 然后选取车辆荷载的参考值为 R_r, 将 D_1 “归一化”至车辆荷载的参考值 R_r, 得到消除车辆荷载影响的位移值 D_2.

④ 将步骤③计算的位移值 D_2 取日平均值, 记为 $\bar{D}_2$, 将其输入均值控制图, 调整控制图的显著性水平, 使得上述 n 个样本点全部落在控制图的上、下控制线之内.

⑤ 伸缩缝性能异常的智能诊断: 对未知状态的 m 天监测数据, 采用正常运营状态下的相关模型消除温度和车辆荷载的影响, 在此基础上得到 m 个日平均位移值, 记为 $\bar{D}_3$. 保持步骤④确定的显著性水平不变, 将 $\bar{D}_2$ 和 $\bar{D}_3$ 同时输入均值控制图, 此时, 若所有 $n+m$ 个样本仍全部位于上、下控制线内, 则说明伸缩缝状态为正常, 若有样本落在了控制线以外, 则说明伸缩缝性能异常.

图 12 和 13 给出了润扬大桥悬索桥梁端位移与温

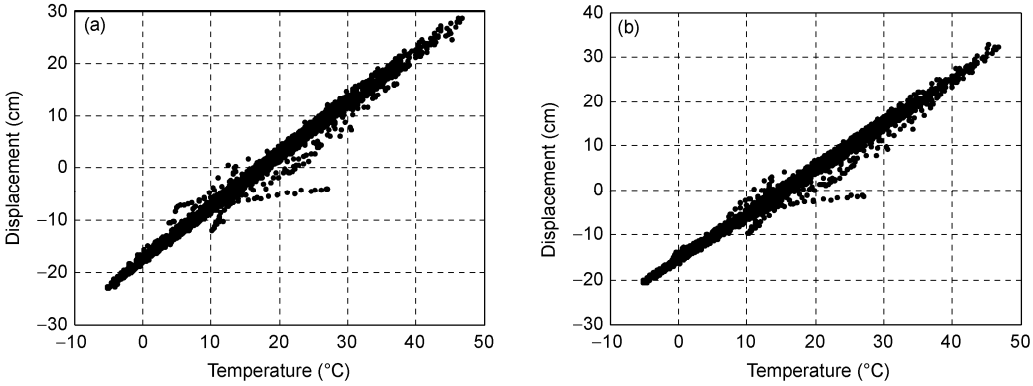

图 12　梁端位移和温度的相关性

(a) 北端; (b) 南端

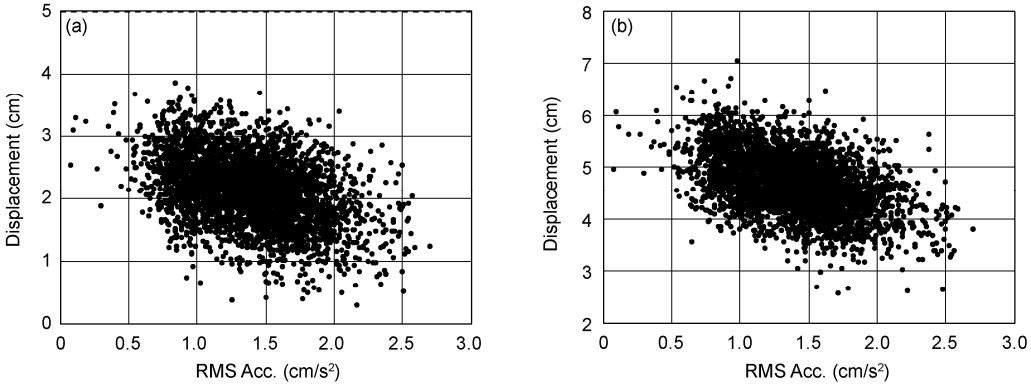

图 13　梁端位移和车辆荷载代表值的相关性

(a) 北端; (b) 南端

度、车辆荷载的相关性. 分析结果表明, 运用该方法可以较好地识别出梁端位移 1.0%的异常变化.

6　结语

我国桥梁结构健康监测系统的研究与应用始于 20 世纪 90 年代, 依托我国大规模基础设施建设的背景, 桥梁结构健康监测系统在我国得到了广泛的应用. 然而, 很多桥梁健康监测系统大多数只注重对测试数据的采集与保存, 距离系统的设计目标存在较大的差距, 不仅造成系统投入和资源浪费, 而且难以对桥梁服役安全状态进行分析和评价, 严重制约了桥梁结构健康监测的进一步发展.

国家杰出青年科学基金项目“结构健康监测”基于润扬大桥斜拉桥和润扬大桥悬索桥结构健康监测系统的长期监测数据, 突破桥梁健康监测海量数据处理分析与评估关键技术, 建立了斜拉桥和悬索桥整体状态监测以及关键构件性能监控方法. 通过长期海量数据的监测与分析, 不仅准确把握了大跨桥梁环境作用、结构响应及其累积损伤效应的长期变化规律, 而且可以进一步在台风或者交通量剧增等恶劣气候环境或突发事件下及时对桥梁状态进行评估, 为桥梁科学管理与维护提供分析依据. 此外, 该项目通过长期数据分析揭示了大跨斜拉桥和悬索桥风场、温度场等环境作用以及位移、应变、振动等结构响应的长期变化规律, 为我国桥梁全寿命设计理论和改进相应的规范标准提供重要基础数据和参考.

参考文献

1 Ko J M, Ni Y Q. Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges. Eng Struct, 2005, 27(12): 1715–1725

2 Hsieh K H, Halling M W, Barr P J. Overview of vibrational structural health monitoring with representative case studies. J Bridge Eng, 2006, 11(6): 707–715

3 Farrar C R, Doebling S W, Nix D A. Vibration-based structural damage identification. Philos Trans Royal Society: Math, Phys & Eng Sci, 2001, 359(1778): 131–149

4 Wang H, Li A Q, Guo T, et al. Field measurement on wind characteristic and buffeting response of the Runyang Suspension Bridge during typhoon Matsa. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009, 52(5): 1354–1362

5 Wang H, Li A Q, Jiao C K, et al. Characteristics of strong winds at the Runyang Suspension Bridge based on field tests from 2005 to 2008. J Zhejiang Univ-Sci A, 2010, 11(7): 465–476

6 Deng Y, Ding Y L, Li A Q. Prediction of extreme wind velocity at the site of the Runyang Suspension Bridge. J Zhejiang Univ-Sci A, 2011, 12(8): 605–615

7 Wang H, Li A Q, Hu R M. Comparison of ambient vibration response of the Runyang Suspension Bridge under skew winds with time-domain numerical predictions. J Bridge Eng, 2011, 16(4): 513–526

8 Wang H, Li A Q, Zhao G W, et al. Non-linear buffeting response analysis of long-span suspension bridges with central buckle. Earthquake Eng Eng Vib, 2010, 9(2): 259–270

9 Ding Y L, Li A Q, Sun J, et al. Experimental and analytical studies on static and dynamic characteristics of steel box girder for Runyang Cable-stayed Bridge. Adv Struct Eng, 2008, 11(4): 425–438

10 Ding Y L, Li A Q. Finite element model updating for the Runyang Cable-stayed Bridge tower using ambient vibration test results. Adv Struct Eng, 2008, 11(3): 323–335

11 Wang H, Li A Q, Hu R M, et al. Accurate stress analysis on steel box girder of long span suspension bridges based on multi-scale submodeling method. Adv Struct Eng, 2010, 13(4): 727–740

12 Ding Y L, Li A Q, Du D S, et al. Multi-scale damage analysis for a steel box girder of a long-span cable-stayed bridge. Struct Infrastruct Eng, 2010, 6(6): 725–739

13 Ding Y L, Li A Q. Temperature-induced variations of measured modal frequencies of steel box girder for a long-span suspension bridge. Int J Steel Struct, 2011, 11(2): 145–155

14 Liu T, Li A Q, Ding Y L, et al. Study of the structural damage identification method based on multi-mode information fusion. Struct Eng Mech, 2009, 31(3): 333–347

15 Kim H, Melhem H. Damage detection of structures by wavelet analysis. Eng Struct, 2004, 26(3): 347–362

16 Ding Y L, Li A Q, Liu T. A study on the WPT-based structural damage alarming of the ASCE benchmark experiments. Adv Struct Eng, 2008, 11(1): 121–127

17 Ding Y L, Li A Q, Liu T. Environmental variability study on the measured responses of Runyang Cable-stayed Bridge using wavelet packet analysis. Sci China Ser E-Tech Sci, 2008, 51(5): 517–528

18 Ding Y L, Li A Q, Sun J, et al. Research on seasonal correlation of wavelet packet energy spectrum and temperature of Runyang Suspension Bridge. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009, 52(6): 1776–1785

19 Ding Y L, Deng Y, Li A Q. Study on correlations of modal frequencies and environmental factors for a suspension bridge based on improved neural networks. Sci China Tech Sci, 2010, 53(9): 2501–2509

20 Guo T, Li A Q, Li J H. Fatigue life prediction of welded joints in orthotropic steel decks considering temperature effect and increasing traffic flow. Struct Health Monit, 2008, 7(3): 189–202

21 Guo T, Li A Q, Wang H. Influence of ambient temperature on the fatigue damage of welded bridge decks. Int J Fatigue, 2008, 30(6): 1092–1102

22 Deng Y, Ding Y L, Li A Q. Fatigue reliability assessment for bridge welded details using long-term monitoring data. Sci China Tech Sci, 2011, doi: 10.1007/s11431-011-4526-6

23 Deng Y, Ding Y L, Li A Q. Structural condition assessment of long-span suspension bridges using long-term monitoring data. Earthquake Eng Eng Vib, 2010, 9(1): 123–131

24 Ding Y L, Li A Q. Assessment of bridge expansion joints using long-term displacement measurement under changing environmental conditions. Front Architect Civil Eng China, 2011, 5(3): 374–380