DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2022.04.022

# 基于监测数据的斜拉桥钢箱梁疲劳性能分析\*

崔珊珊<sup>1</sup>,熊文<sup>2</sup>,连俊峰<sup>1</sup>,赵鑫莹<sup>2</sup>,宋晓东<sup>2</sup>

(1.安徽省交通控股集团有限公司,安徽合肥 230088;2.东南大学 交通学院,江苏南京 211189)

摘要:针对大跨度斜拉桥钢箱梁疲劳问题,基于斜拉桥的健康监测数据和疲劳寿命对主梁运 营状态进行评估,为大跨度斜拉桥关键构件服役状态预警提供支撑。对数据异常值、缺失等进行 预处理,采用经验模态分解法及能量突变法分析信号找到阶数阈值后分离快慢变成分,并通过多 元线性回归法对经验模态分解法的有效性进行验证;采用雨流计数法分析钢箱梁应力谱,根据规 范计算结构疲劳寿命,并通过变权理论评价主梁状态。结果表明,经过预处理后的数据能较好地 反映结构在活载作用下的受力状态;综合频幅谱的主频和本征模态函数的能量,确定应力监测数 据的阶数阈值为5,快变成分为前5阶本征函数的和,慢变成分为5阶以后所有本征函数及残差的 和;经验模态分解法能有效分离原始数据中的快慢变成分,为计算疲劳寿命提供数据支持;以疲劳 寿命为指标,根据主梁的长期监测应力,其评分在95分以上,主梁的应力状态良好。

**关键词:**桥梁;斜拉桥;钢箱梁;疲劳性能;监测数据 中图分类号:U441 **文献标志码:**A

**文章编号:**1671-2668(2022)04-0089-08

采用结构健康监测技术可获得实时的桥梁结构 响应,进而对在役桥梁结构的服役状态进行评估,对 突发事件或结构异常情况发出预警。宋晓东等基于 安庆长江公路大桥的拉索加速度时程,实现了拉索 基准频率和索力的自动化识别,进而剔除活载效应 和季节温度效应来获得恒载索力特征值。肖鑫以一 座钢桁梁桥健康监测数据为基础,建立基于随机车 辆荷载模型的桥梁承载力可靠性评估方法,分析了 温度效应对结构承载力可靠指标的影响。夏烨等依 托河北某分离式立交桥,采用小波分析从原始应变 中分离出由交通荷载引起的静态响应,对比分析了 不同评估周期的统计特性差异。陶兴旺等考虑桥面 不平度的影响,将 BP 神经网络法与斜拉桥监测系 统相结合对重车速度、车重进行了识别。陈一飞等 基于北方冰冻海域的大跨度钢箱梁斜拉桥温度监测 数据,结合国内外相关规范,提出了基于极值分析的 截面内温差基准值计算方法。李嘉维等比较了环境 振动测试和健康监测系统动力测试结果,通过基准 有限元模型计算结果与设计计算结果的比较评估了 桥梁的安全性能。

钢桥在服役过程中始终承受环境及车辆引起的 变幅荷载作用,钢构件产生疲劳损伤,且随着服役期 的增长损伤逐渐累积。钢桥的疲劳寿命评估一直是 工程界和学术界的研究热点。黄炎等结合有限元分 析和实桥疲劳试验获取扩大切口和设计切口的应力 响应及面内面外应力分量,基于 AASHTO LRFD 规范对两类切口开展了疲劳寿命评价。韩艳等以某 大跨钢桁悬索桥为背景,针对主桁梁应力关键点进 行动态应变监测,基于 Palmgren-Miner 线性累积损 伤准则及欧洲 Eurocode 3 规范的疲劳强度 S-N 曲线建立了关键构件的疲劳损伤极限状态方程。邓 扬等以润扬大桥为工程背景,研究了应力循环的快 速提取及应变数据中随机干扰成分的剔除方法,提 出了钢箱梁焊缝的疲劳寿命预测值。陈志为基于健 康监测数据提出了大跨多荷载悬索桥的疲劳可靠度 分析框架。叶肖伟等提出了一种考虑钢材锈蚀的桥 梁结构改进疲劳可靠度评估模型,并基于青马大桥 健康监测数据对其典型焊接节点的概率疲劳寿命进 行了评估。该文以某双塔双索面斜拉桥为研究背 景,基于健康监测数据,通过经验模态分解(EMD) 分离温度效应,采用多元线性回归验证 EMD 的有 效性,进而得到主梁应力谱,并根据欧洲 Eurocode 3 规范计算疲劳寿命,对结构疲劳性能进行评估。

#### 1 工程背景

安庆长江公路大桥为双塔双索面五跨连续钢箱

<sup>\*</sup> 基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK20201274);东南大学"至善青年学者"项目

梁斜拉桥,边跨设置 3 个桥墩,跨径布置为 50 m+ 215 m+510 m+215 m+50 m=1 040 m(见图 1)。 主梁采用正交异性板结构的钢箱梁。采用电阻式应 变传感器测量主梁应力,测点由北到南分别位于 NO7、NA6、NO1、NJ8、跨中箱梁、SJ8、SO1、SA6、 SO7 的上下游顶板和 U 肋(N/S 表示北塔/南塔, A/J 表示边跨/主跨有拉索梁段,O 表示无拉索梁 段,离索塔越近的梁段编号越大)。梁段编号见图 2,测点布置见表 1。







路

公

与

沆

运

图 2 安庆长江公路大桥北塔梁段编号

表1 应变传感器分布

传感器编号	布置位置	传感器号	布置位置
YB010101	钢箱梁 NO7 段上游顶板	YB020107	跨中箱梁下游顶板
YB010102	钢箱梁 NO7 段上游 U 肋	YB020108	跨中箱梁下游 U 肋
YB010103	钢箱梁 NO7 段下游顶板	YB020109	主跨箱梁 SJ8 段上游顶板
YB010104	钢箱梁 NO7 段下游 U 肋	YB020110	主跨箱梁 SJ8 段上游 U 肋
YB010105	钢箱梁 NA6 段上游顶板	YB020111	主跨箱梁 SJ8 段下游顶板
YB010106	钢箱梁 NA6 段上游 U 肋	YB020112	主跨箱梁 SJ8 段下游 U 肋
YB010107	钢箱梁 NA6 段下游顶板	YB030101	钢箱梁 SO1 段上游顶板
YB010108	钢箱梁 NA6 段下游 U 肋	YB030102	钢箱梁 SO1 段上游 U 肋
YB010109	钢箱梁 NO1 段上游顶板	YB030103	钢箱梁 SO1 段下游顶板
YB010110	钢箱梁 NO1 段上游 U 肋	YB030104	钢箱梁 SO1 段下游 U 肋
YB010111	钢箱梁 NO1 段下游顶板	YB030105	钢箱梁 SA6 段上游顶板
YB010112	钢箱梁 NO1 段下游 U 肋	YB030106	钢箱梁 SA6 段上游 U 肋
YB020101	主跨箱梁 NJ8 段上游顶板	YB030107	钢箱梁 SA6 段下游顶板
YB020102	主跨箱梁 NJ8 段上游 U 肋	YB030108	钢箱梁 SA6 段下游 U 肋
YB020103	主跨箱梁 NJ8 段下游顶板	YB030109	钢箱梁 SO7 段上游顶板
YB020104	主跨箱梁 NJ8 下游 U 肋	YB030110	钢箱梁 SO7 段上游 U 肋
YB020105	跨中箱梁上游顶板	YB030111	钢箱梁 SO7 段下游顶板
YB020106	跨中箱梁上游 U 肋	YB030112	钢箱梁 SO7 段下游 U 肋

# 2 监测数据分析

#### 2.1 应力时程数据预处理

大跨度斜拉桥的长期监测中可能出现数据异 常、缺失等情况,为得到能反映结构真实状况的有效 信息,对原始数据进行异常值处理、缺失值填补等预处理。同时为方便后续应力疲劳分析,对预处理后的数据进行快慢变成分分离。图 3 为 YB010101 传感器 2018 年 5—10 月的监测数据,其中存在数据异常和缺失情况。



图 3 YB010101 传感器 2018 年 5-10 月监测数据

采用拉因达准则(3σ 准则)检验监测数据中的 异常值,对检测到的异常值通过线性插值法予以替 换。对于一定长度目标数据空白的小段缺失,根据 上一时间段未缺失或已填补完整的监测数据采用 Hermite 插值法进行填补;对于大段缺失,认为其不 能有效反映结构真实信息,予以舍弃。按上述方法 处理后的数据后见图 4。



# 2.2 快慢变成分分离

桥梁结构运营过程中受到温度、风等环境荷载 和车辆荷载的耦合作用,其监测数据包含快慢变成 分,快变成分主要由车辆荷载和噪声引起,慢变成分 主要由温度荷载引起。主梁的应力状态评估以疲劳 寿命作为评估指标,而疲劳寿命的计算与应力幅密 切相关,温度荷载较车辆荷载变化缓慢,应力幅大小 主要受车辆荷载影响。因此,需分离出快变成分供 疲劳分析。以 YB010101 传感器 2016 年 6—10 月 预处理后的监测数据为例,对目标信号进行经验模 态分解,得到 10 阶模态函数及残差(见图 5)。

为确定快慢变成分各自的本征模态函数构成, 综合频幅谱的主频和本征模态函数的能量突变阶数 分析阶数阈值,计算各阶模态函数的能量,结果见图 6。从图6可看出:能量在第6阶附近发生突变:第 1~4阶的能量持续增长,第4~6阶的能量变化平 稳,第6阶又开始增长。根据能量的突变阶数,初步 确定快慢变成分的阶数阈值为4~6阶。

采用快速傅里叶变换计算温度时程及各阶模态 函数的频谱图,结果见图7、图8。从图7、图8可看





出:温度时程的主频与第 3~5 阶本征模态函数的主 频相同,为13.89 µHz,从第 6 阶开始本征模态函数 的主频均小于温度时程。由于慢变成分主要由温度 荷载引起,当模态函数的主频小于温度时程主频时, 认为该阶模态函数属于慢变成分。

综上,确定阶数阈值为 5,预处理后监测数据的 快变成分  $x_q(t)$ 和慢变成分  $x_s(t)$ 可按式(1)计算, 计算结果见图 9。

$$x_{q}(t) = \sum_{i=1}^{5} IMF_{i}, x_{s}(t) = \sum_{i=6}^{10} IMF_{i} + r \quad (1)$$



图 9 YB010101 传感器 2016 年 6—10 月监测数据中的 快慢变成分

# 3 应力温度效应提取及验证

为判定分离出的快变成分的准确性,校验 EMD 方法的可靠性,采用多元线性回归法分离活载和温 度效应,并对两种方法的分离结果进行互校。

#### 3.1 温度效应提取

由温度变化引起的结构应力在桥梁健康监测系 统采集的应力时程中占相当大比例,且这部分应力 与温度具有很好的线性关系。考虑到两者的线性关 系,在提取应力温度效应时将温度作为自变量,通过 回归函数表达式计算温度引起的应力,同时考虑温 度滞后作用的影响。函数表达式为:

$$Y(t) = \beta_0 + \beta_1 T_1(t - n_{k1}) + \beta_2 T_2(t - n_{k2}) + \mu(t)$$
(2)

式中:Y(t)为t时刻温度引起的应力; $\beta_0$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 为多 元线性回归参数; $n_{k1}$ 、 $n_{k2}$ 分别为应力相对于 $T_1$ 、 $T_2$ 的滞后时长; $T_1$ 为结构温度; $T_2$ 为结构的日平均温 度; $\mu(t)$ 为随机误差。

回归参数通过最小二乘法确定, 使  $\beta_0$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$  满 足下式:

$$Q(\hat{\beta}_{i}) = \sum_{i=1}^{n} \{Y_{i} - [\hat{\beta}_{0} + \hat{\beta}_{1} T_{1}(t - n_{k1}) + \hat{\beta}_{2} T_{2}(t - n_{k2})]\}^{2} = \min$$
(3)

当  $Q(\beta_i)$  取最小值时,要求其对  $\beta_i$  的偏导数为 零,即:

$$\frac{\partial Q}{\partial \beta_0} = 0, \frac{\partial Q}{\partial \beta_1} = 0, \frac{\partial Q}{\partial \beta_2} = 0$$
(4)

将式(3)代入式(4),得到如下矩阵方程:

$$(T^{\mathsf{T}}T)\beta = T^{\mathsf{T}}Y$$

$$\begin{bmatrix} 1 & T_{1}(1-n_{k_{1}}) & T_{2}(1-n_{k_{2}}) \end{bmatrix}$$

$$(5)$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & T_2(1-n_{k1}) & T_2(1-n_{k2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & T_n(1-n_{k1}) & T_2(1-n_{k2}) \end{bmatrix}$$
(6)

对式(5)进行求解,得到多元线性回归参数:

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (T^{\mathrm{T}}T)^{-1}T^{\mathrm{T}}Y \tag{7}$$

确定回归参数 β 后,对已建立的模型进行拟合 度 R<sup>2</sup> 计算,拟合度越趋近于 1,表明回归模型对目 标数据的还原度越高,模型越完善。拟合度计算公 式如下:

$$R^{2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (Y_{i} - \bar{Y})^{2}}{\sum_{i=1}^{n} (\hat{Y}_{i} - \bar{Y})^{2}}$$
(8)

对原始数据进行预处理,处理后的应力和温度 数据见图 10。为确定应力相对于温度的滞后时间, 将应力数据前(后)移若干长度,计算移动后的应力 时程与温度的互相关系数,得到图 11 所示互相关系 数一时间图。互相关函数图的峰值点横坐标为一3, 表明由温度引起的应力相对于温度变化滞后 3 个数 据点。由于温度的采样频率为1/300 Hz,即相邻数



图 10 预处理后的应力和温度数据



图 11 结构温度与应力的互相关系数一时间

据点间隔 5 min,应力温度效应的滞后时长为 15 min。在多元线性模型的建立过程中将上述滞后时 长代入式(2),得到如下函数表达式:

 $Y(t) = \beta_0 + \beta_1 T_1(t-3) + \beta_2 T_2(t-0) + \mu(t)$ (9)

按式(3)~(7)计算  $\beta_0$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ ,得到 2016 年 6 月 每天的拟合参数(见表 2)。

表 2 多元线性回归模型参数

日期	$oldsymbol{eta}_{\scriptscriptstyle 0}$	$oldsymbol{eta}_1$	$\beta_2$	日期	$eta_{\circ}$	$oldsymbol{eta}_1$	$eta_2$
2016-06-01	1.486 9	3.746 9	-3.433 5	2016 - 06 - 16	-6.1112	0.760 4	-0.124 9
2016 - 06 - 02	-18.8469	0.190 6	-0.0732	2016 - 06 - 17	11.141 1	0.125 9	0.032 2
2016 - 06 - 03	-68.5389	2.846 4	-0.3650	2016 - 06 - 18	33.811 4	-0.1627	-0.1677
2016 - 06 - 04	-7.8487	2.714 9	-2.426 9	2016 - 06 - 19	-20.9385	1.755 7	-0.409 3
2016 - 06 - 05	-8.0632	0.888 3	-0.242 3	2016 - 06 - 20	-34.7394	2.189 1	-0.5142
2016 - 06 - 06	4.771 5	0.435 2	-0.0247	$2016\!-\!06\!-\!21$	35.423 1	-0.1168	-0.1758
2016 - 06 - 07	-3.0017	0.832 5	-0.285 5	$2016 \!-\! 06 \!-\! 22$	12.384 1	0.044 1	0.302 8
2016 - 06 - 08	-11.817 0	1.004 9	-0.0967	2016 - 06 - 23	15.456 2	0.005 0	0.189 8
2016 - 06 - 09	$-10.552\ 1$	0.896 3	-0.045 3	2016 - 06 - 24	30.314 6	-0.7186	0.662 0
2016 - 06 - 10	3.248 4	0.436 9	-0.0564	2016 - 06 - 25	-71.213 1	7.627 4	-4.6320
2016 - 06 - 11	4.885 9	0.285 1	0.216 0	2016 - 06 - 26	-56.1807	4.174 1	-1.9407
2016 - 06 - 12	-5.6353	1.577 2	-0.864 9	2016 - 06 - 27	-64.9397	2.549 7	0.166 6
2016 - 06 - 13	$-11.243 \ 3$	0.970 0	-0.3154	2016 - 06 - 28	43.102 4	5.731 3	-7.6960
2016 - 06 - 14	14.166 4	$-0.208 \ 1$	0.410 0	2016 - 06 - 29	-22.7383	1.945 1	-0.789 1
2016 - 06 - 15	22.385 5	-0.509 8	0.428 1	2016 - 06 - 30	9.963 0	0.046 2	0.274 3

将表 2 中的  $\beta_0$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 代入式(9)计算每天的应 力估计值,得到图 12 所示应力数据拟合值。按式 (8)计算,得到 2016 年 6—10 月的应力拟合值与实 测值 的 拟 合 度 分 别 为 0.996 1、0.908 5、0.904 8、



0.914 6、0.712 2,均接近于1,拟合结果有效。

#### 3.2 多元线性回归与 EMD 比较

考虑到活载效应的波动性较强,选择慢变成分 拟合度作为互校指标进行检验。若二者拟合度大于 0.8,则认为 EMD 分离的快慢变成分结果准确,否 则重新计算阶数阈值并重构快慢变成分,直至拟合 度大于 0.8。通过多元线性回归法提取的应力温度 效应与经验模态分解得到的慢变成分见图 13,二者 的变化趋势及波动范围基本一致。按式(8)计算,两 种方法提取的慢变成分拟合度分别为 0.871 5、 0.949 3、0.800 2、0.968 8、0.803 1,均大于 0.8, EMD 法分离应力数据有效。



线性回归法和 EMD 法提取的温度效应 图 13

#### 应力数据疲劳分析及评估 4

# 4.1 应力疲劳分析

可根据雨流计数法求得的应力谱,按相关疲劳 规范计算结构的疲劳损伤及寿命,评估大跨度桥梁 结构主梁应力状态。根据欧洲 Eurocode 3 规范进 行安庆长江公路大桥主梁应力状态评估分析。该规 范定义了 S-N 曲线,不同疲劳细节类型 Δσc 所对 应的疲劳强度曲线不同。从理论上讲,小于截止极 限 Δσ<sub>1</sub> 的应力幅不会引起细节的疲劳损伤,故截止 极限被认为是疲劳作用的应力门槛。但在实际钢结 构桥梁中,考虑到焊接微裂纹或钢材内部微小缺陷 的存在,在高应力幅作用下"疲劳门槛"的概念不再 适用。为使评估结果能更好地反映结构真实状态, 将小于 Δσ<sub>L</sub> 的应力幅一并计入疲劳损伤计算中。

根据 Palmgren-Miner 线性损伤累积理论,细节 承受变幅应力循环产生的总疲劳损伤为:



图 15 2016年6-10月的标准日应力谱

式中:S为细节承受的应力幅  $\Delta \sigma_{\rm R}$ ;  $n_i$ 和  $n_i$ 分别对  $\overline{\Delta\sigma}_{\rm R} > \Delta\sigma_{\rm D}, \Delta\sigma_{\rm R} \leq \Delta\sigma_{\rm D}$ 时的循环次数; $K_{\rm C}, K_{\rm D}$ 为 应力幅位于等幅疲劳极限。

结构的预期使用寿命为疲劳损伤的倒数,即:

$$Y_{\notin \Pi \bar{\sigma} \hat{\sigma}} = \frac{1}{365D} \tag{11}$$

### 4.2 应力评估

按照欧洲 Eurocode 3 规范的相关规定,取 YB010102 传感器 2016 年 6—10 月监测数据计算 安庆大桥的疲劳损伤及寿命,评估其应力状态。目 标数据及快变成分见图 14。通过 MATLAB 对应 力快变成分进行雨流计数,得到日应力谱。考虑到 日应力谱的波动较大,为使评估结果更稳定,在计算 疲劳损伤前对日应力谱进行标准化处理,得到标准 日应力谱(见图15)。标准日应力谱的循环次数为



图 14 YB010102 传感器 2016 年 6-10 月监测数据

当天及之前一段时间的日应力谱中对应应力幅的循 环次数平均值。以每月 5—18 日共 14 d 的标准日 应力谱为代表值,对各月的疲劳损伤进行计算,根据 规范公式计算应力幅对应的疲劳损伤,结果见图 16。按式(10)计算应力循环产生的总疲劳损伤,然 后按式(11)将累计疲劳损伤转换为结构的疲劳寿 命,结果见表 3。

以计算所得疲劳寿命作为评估指标对各测点每



图 16 2016 年 6-10 月的疲劳损伤

表 3 桥梁结构的疲劳寿命

时间	疲劳寿命/年	时间	疲劳寿命/年
2016 - 06	53 529	2016 - 09	46 291
2016 - 07	82 887	2016 - 10	21 538
2016 - 08	36 982		

月的应力状态进行评估,采用无量纲模型计算应力 评价值。定义疲劳寿命不小于设计使用年限 T。为 满分状态、等于零为零分状态,两者之间按线性关系 插值。单测点评价值计算公式如下:

$$x_{i} = \begin{cases} 100, t_{i} \ge T_{0} \\ 100 \times t_{i} / T_{0}, 0 < t_{i} < T_{0} \\ 0, t_{i} \le 0 \end{cases}$$
(12)

在斜拉桥主梁应力评估中,通常认为各应力测 点的初始权重相同。事实上,不同测点的应力变化 对桥梁整体结构的影响程度不同。因此,在主梁应 力综合评价中采用变权理论对各测点权重进行修 正,计算公式如下:

$$w_{i} = \frac{w_{i}^{0} x_{i}^{\alpha-1}}{\sum_{i=1}^{n} w_{i}^{0} x_{i}^{\alpha-1}}$$
(13)

式中: $w_i^\circ$ 为初始权重,设 $w_i^\circ = 1/n$ ;n为测点总数;  $w_i$ 为修正后权重; $x_i$ 为单测点应力评价值; $\alpha$ 为均 衡性系数, $\alpha = 0.5$ 。

综上,主梁应力综合评价值为:

$$V = \sum_{i=1}^{n} w_i x_i \tag{14}$$

根据应力单测点或综合评价值,按表 4 所示评 价标准判断是否需对桥梁采取相应措施。

表 4 斜拉桥主梁应力评价标准

评定	构件技	世法	应力	
标度	术状况	油还	评价值	
1	良好	应力变化较小	80~100	
2	较好	应力有变化但有限	$60 \sim 80$	
3	较差	应力变化较大,需注意	$40\!\sim\!60$	
4	差	应力变化相当大	$20\!\sim\!40$	
5	危险	应力变化非常大,应立即	0 90	
		检查并处理	$0 \sim 20$	

按式(14)计算各月主梁应力综合评价值,结果 见表 5。由表 5 可知:主梁应力在 2016 年 6—10 月 的评分均为 100,在 2018 年 5—10 月的评分均在 95 分以上,主梁应力状态良好。

时间	评价值	时间	评价值
2016 - 06	100.00	2018 - 06	99.41
2016 - 07	100.00	2018 - 07	99.95
2016 - 08	100.00	2018 - 08	98.47
2016 - 09	100.00	2018 - 09	98.97
2016 - 10	100.00	2018 - 10	98.59
2018 - 05	98.58		

表 5 主梁应力综合评价值

#### 5 结论

(1)数据预处理能有效剔除监测数据中的异常 值,填补缺失值,减少毛刺,提高健康监测数据用于 桥梁评估的有效性。

(2)利用经验模态分解将应力数据分解为10 个本征模态函数,结合频谱的主频和本征模态函数 的能量突变阶数可有效剥离数据中的温度效应。多 元线性回归法与经验模态分解法互校可验证经验模 态分解法处理应变数据的可靠性。

(3)定义疲劳寿命不小于设计使用年限为满分状态、等于零为零分状态,两者之间线性插值,快速 计算单测点评价值,再根据变权理论得到主梁应力的综合评价值,可实现主梁应力状态单点评估与整体评估。

#### 参考文献:

- [1] 宋晓东,崔珊珊,熊文,等.基于健康监测的斜拉桥恒载 索力提取与评估[J].东南大学学报(自然科学版), 2020,50(6):1102-1108.
- [2] 肖鑫.基于健康监测的钢桁梁桥结构承载力可靠性评估[J].铁道标准设计,2020,64(5):89-95.
- [3] 夏烨,王鹏,孙利民.基于中性轴指标的混凝土梁桥长 期监测与性能评估[J].同济大学学报(自然科学版), 2020,48(5):653-663.
- [4] 陶兴旺,孙宗光,陈一飞.基于监测响应的斜拉桥车重 车速识别[J].公路交通科技,2019,36(12):87-93.
- [5] 陈一飞,孙宗光,邵元.基于长期监测的北方跨海斜拉 桥钢箱梁截面温差特性分析[J].公路交通科技,2018, 35(5):65-72.
- [6] 李嘉维,夏樟华,余印根,等.基于长期动力特性监测数 据的大跨度桥梁安全性能评估[J].福州大学学报(自 然科学版),2014,42(4):596-605.
- [7] 黄炎,阮诗鹏,蔡晶垚.正交异性钢桥面板切口尺寸扩 大的现场疲劳监测试验[J].公路交通科技,2020,37
   (4):81-87.

- [8] 韩艳,李凯,孙一婵,等.基于现场实测的大跨钢桁悬索 桥疲劳可靠度分析[J].公路交通科技,2020,37(4): 72-80.
- [9] 邓扬,李爱群,丁幼亮.钢箱梁桥海量应变监测数据分析与疲劳评估方法研究[J].工程力学,2014,31(7): 69-77.
- [10] DENG Yang,LI Aiqun,DING Youliang.Analysis of monitored mass strain data and fatigue assessment for steelbox-girder bridges[J].Engineering Mechanics,2014,31(7): 69-77.
- [11] 陈志为.基于健康监测系统的大跨多荷载桥梁的疲劳 可靠度评估[J].工程力学,2014,31(7):99-105.
- CHEN Zhiwei. Fatigue reliability assessment of multiloading suspension bridges based on SHMS [J].
   Engineering Mechanics, 2014, 31(7):99-105.
- [13] 叶肖伟,傅大宝,倪一清,等.考虑钢材锈蚀的桥梁焊 接节点概率疲劳寿命评估(英文)[J].空间结构, 2012,18(4):88-95.
- [14] 李苗,任伟新,黄天立,等.基于 EMD 与 IMF 能量的 桥梁应变温度效应成分的提取[J].公路交通科技, 2015,32(7):62-68.
- [15] 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.
- [16] 孙雅琼,赵作周.混凝土桥梁应变监测的时变温度效 应分离方法[J].中外公路,2018,38(3):204-207.
- [17] 刘泽佳,陈溢涛,周立成,等.桥梁长期健康监测大数 据温度与应变特征及关联性分析[J].科学技术与工 程,2018,18(35):72-79.
- [18] YAN A M, KERSCHEN G, DE BOE P, et al. Structural damage diagnosis under varying environmental conditions—Part I: A linear analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, 19(4):847-864.
- [19] 刘小玲.多源信息融合技术在钢结构斜拉桥状态评估 中的应用研究[D].南京:东南大学,2017.
- [20] 吴佰建,李兆霞,王滢,等.桥梁结构动态应变监测信息的分离与提取[J].东南大学学报(自然科学版), 2008,38(5):767-773.
- [21] European Committee for Standardization.Eurocode 3: Design of steel structures—Part1-9: Fatigue: BS EN 1993-1-9:2005[S].European Committee for Standardization,2005.
- [22] 熊文,涂雪,肖汝诚.基于变异系数与趋势因子的斜拉 桥索力评估[J].同济大学学报(自然科学版),2011, 39(11):1575-1580.

收稿日期:2021-07-20