

# 环境温度对连续刚构桥模态频率的影响<sup>\*</sup>

余印根<sup>1</sup>, 宗周红<sup>2</sup>, 陈宝春<sup>1</sup>, 夏樟华<sup>1</sup>

(1. 福州大学土木工程学院 福州, 350108) (2. 东南大学土木工程学院 南京, 210096)

**摘要** 针对环境温度对大跨度预应力钢筋混凝土连续刚构桥的频率影响问题, 通过下白石大桥健康监测系统的温度和模态频率数据统计分析, 建立了该桥环境温度与模态频率的三元线性回归模型。检验结果表明, 该模型具有较好的拟合和预测精度, 可对桥梁后续的模态频率数据进行预测评判。基于该回归模型, 提出了下白石连续刚构桥梁模态频率的温度修正模型, 可以有效剔除环境温度对模态频率的影响, 使频率变化趋于平稳, 为桥梁进一步的安全性评估、损伤诊断和桥梁模型修正等提供温度修正的模态频率数据。

**关键词** 连续刚构桥; 桥梁健康监测; 模态频率; 环境温度; 数理统计

**中图分类号** U446; U448.23

## 引言

基于振动测试的桥梁自动实时监测系统由于输入荷载的不确定性, 结构振动参数只能由响应信号确定。同时, 桥梁又是由多种材料和子结构复合而成的复杂结构, 这决定了仅基于响应信号识别得到的动力特性参数不仅与系统自身的刚度和质量等参数有关, 还受到温度、湿度、车载以及风力等因素的影响, 这对基于动力的结构损伤识别产生不利的影响<sup>[1-3]</sup>。例如, 研究显示昼夜温差和季节温差将会导致桥梁两端约束程度和挠度的改变<sup>[4-5]</sup>。由于环境温度的影响, 桥梁的固有频率的变化可能高达 10%, 远远超过了一般结构损伤所引起的结构固有频率的变化<sup>[6-9]</sup>。因此, 环境因素尤其是环境温度对桥梁动力特性的影响在桥梁健康监测损伤识别中是不可忽视的。

近年来, 研究人员开始关注温度对桥梁动力影响的机制<sup>[10-12]</sup>。文献<sup>[12]</sup>以香港汀九大桥 600 h 测试数据为基础, 提出了利用基于支持向量机(SVM)的非线性回归算法建立“模态频率-温度分布”模型, 并建立消除环境温度的模态频率修正模型, 消除了环境温度引起的模态频率的波动。大跨度连续刚构桥梁结构受温度影响较大, 且温度场分布较复杂, 温度对模态频率的影响存在时间和空间效应, 研究其模态频率-温度分布模式是必要的。

基于沈海线(闽)(G15)福宁高速公路下白石大桥健康监测信息, 笔者选取一年中 4 个不同季度、920 h 的模态频率与环境温度数据, 采用数理统计方法研究环境温度对其模态频率的影响, 为下白石大桥桥梁安全性耐久性评估、桥梁损伤诊断、桥梁模型修正等桥梁健康监测问题提供温度修正的模态频率数据。

## 1 下白石大桥环境温度监测

### 1.1 下白石大桥温度测点布置

下白石大桥主桥上部结构为跨径 145 m+2×260 m+145 m 的预应力混凝土连续刚构, 主桥桥面宽为 24.50 m, 分为上下行两幅。桥梁跨越福建宁德市赛江赛歧至下白石河段, 桥址所在地区属于中亚热带海洋性季风气候, 具有四季分明、气候温暖、多雨, 无霜期长和台风频繁等特点。多年平均气温为 19℃, 极端最高气温为 39.4℃, 设计最大风速为 40 m/s。2007 年, 下白石大桥建立了实时健康监测系统<sup>[13]</sup>, 全桥纵桥向在 C、E 两个断面布置温度传感器, 纵向、竖向及横向温度传感器布置如图 1、2 所示。全桥共布设 16 个温度传感器, 各温度测点编号分别为 C<sub>1</sub>~C<sub>8</sub> 和 E<sub>1</sub>~E<sub>8</sub> (分别表示 C 断面 1#~8# 测点和 E 断面 1#~8# 测点), 每 5 min 执行一次温度数据采集, 一天采集 23 h 的数据。

\* 国家自然科学基金资助项目(51178101)

收稿日期: 2012-09-21; 修回日期: 2012-11-30

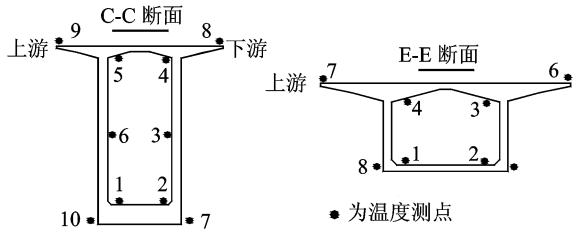


图 1 温度传感器横断面布置图

Fig. 1 Cross-sectional arrangement of temperature sensors

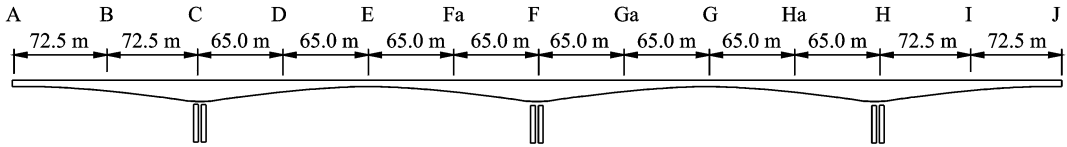


图 2 全桥测点纵断面布置图

Fig. 2 Longitudinal section arrangement of sensors

选取混凝土箱梁各测点温度分布差异特别明显的晴朗天气、高温一天的数据(2008年5月18日),分析桥梁纵向温度分布情况,如表1所示。

表 1 C、E 断面对应温度测点温度相关分析

Tab. 1 Correlation analysis of temperature in C&amp;E sections

断面测点	E 断面测点	相关系数 R 值	$\Delta T_{\max}/^{\circ}\text{C}$
C <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	0.916	1.65
C <sub>2</sub>	E <sub>2</sub>	0.949	1.44
C <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	0.934	0.46
C <sub>4</sub>	E <sub>4</sub>	0.980	0.43
C <sub>5</sub>	E <sub>5</sub>	0.990	0.97
C <sub>6</sub>	E <sub>6</sub>	0.992	0.66
C <sub>7</sub>	E <sub>7</sub>	0.968	0.50
C <sub>8</sub>	E <sub>8</sub>	0.851	7.41

从表1可看出,在5月18日这种高温天气下,箱外C、E断面各测点除C<sub>8</sub>与对应的E<sub>8</sub>点温度走势差别较大外,两个截面其他对应的相同位置的温度变化走势图非常相似,日温差最大值 $\Delta T_{\max}$ 均在2℃以内,且相关系数表明各对应测点温度变化趋势基本重合。C<sub>8</sub>与E<sub>8</sub>虽然都是布置在桥面的传感器,然而C<sub>8</sub>测点布置在混凝土护栏外侧壁,位于A、B幅桥梁空隙间,基本不受太阳直射,因此,温度走势与C<sub>5</sub>的走势相似;而E<sub>8</sub>测点布置于桥面,受太阳直射,必与C<sub>8</sub>测点温度走势有差别。

以上分析说明,桥梁纵向的温度分布是比较类似的,将三维温度场简化为二维温度场来处理,这在满足工程需要及精度方面是完全可行的;因此,取下白石大桥E断面作为温度场分析对象。

## 1.2 环境温度监测结果分析

国内外大量的实测资料表明,混凝土箱梁无论受到日间太阳辐射导致梁体温度升高,还是夜间受到反辐射及大气流动等因素的影响导致梁体温度下降,除了梁体端部极短的范围温度有明显的变化之外,其余沿梁体轴线纵向温度分布是很均匀的<sup>[14]</sup>。

## 1.3 箱梁年温度变化研究

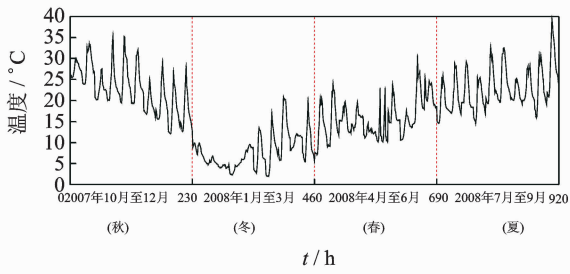
Feltrin 研究表明,模态频率与环境温度长期变化的回归效果较与环境温度短期变化的回归效果好的多<sup>[15]</sup>。实际数据采集过程中采集信号受噪音等因素影响,数据离散性较大,因此要寻求环境温度与模态频率的相关关系应以长期的数据进行分析<sup>[16]</sup>。在2007年10月~2008年9月四季度中每个季度分别选取10d(即230h),每个月分别随机抽取3d或4d的数据进行分析,分析了不同季节共40d(非连续时间段)920h数据。图3为桥面温度、箱外平均温度、箱内平均温度在40天内的变化图。

从图3可以得出,桥面温度、箱外平均温度、箱内平均温度三者年变化规律基本相似,日变化和年变化趋势均呈正弦分布。桥面直接受日照辐射,日温波动较大,箱外平均温度次之,但在2008年1~2月份一段寒冷天气下全桥温度均无明显的波动,一天内温度较平稳;箱内平均温度年变化呈折线型分布,无明显的昼夜温差。

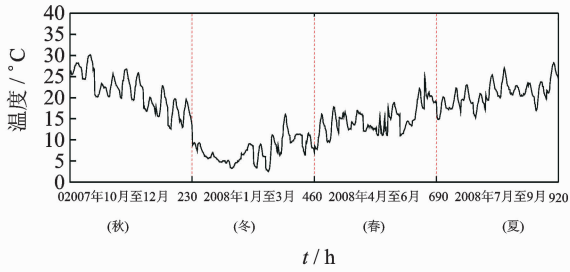
## 2 环境温度对模态频率的影响分析

### 2.1 模态频率的识别

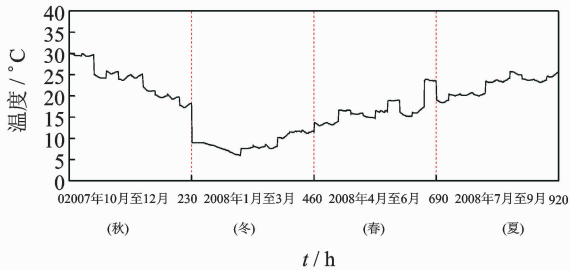
下白石大桥总共布置了13个测试断面,分别为A~M断面,如图2所示。通过各测试断面加速度传感器实时采集加速度信号(采样频率为200Hz),采用模态分析软件对试验数据分别用峰值法<sup>[17]</sup>和随机子空间法<sup>[18]</sup>进行模态分析,得到桥梁前8阶模



(a) 桥面平均温度(非连续时间段)  
(a) Average temperature of bridge deck



(b) 箱外平均温度(非连续时间段)  
(b) Average temperature outside box girder



(c) 箱内平均温度(非连续时间段)  
(c) Average temperature inside box girder

图 3 箱梁温度年变化规律图

Fig. 3 Annual temperature variation of box girder

态频率。图 4 为平均正则化了的功率谱密度曲线。图 5 为随机子空间法获得的稳定图。

与温度年变化规律研究采用的温度样本数据对应的模态频率数据进行分析,得到其均值、波动范围

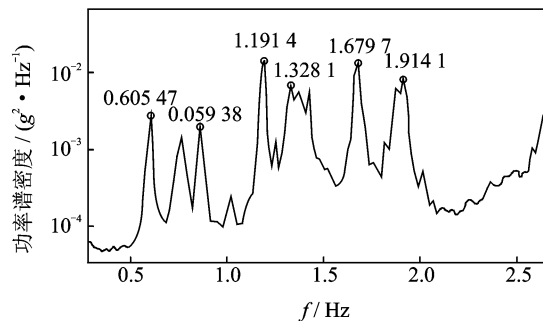


图 4 平均正则化功率谱密度曲线(竖向)

Fig. 4 Averaging normalized power spectral density curve(vertical)

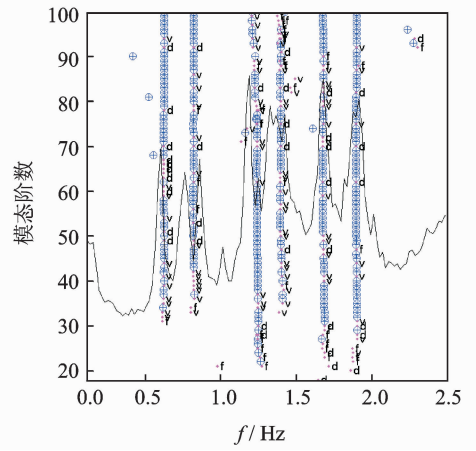
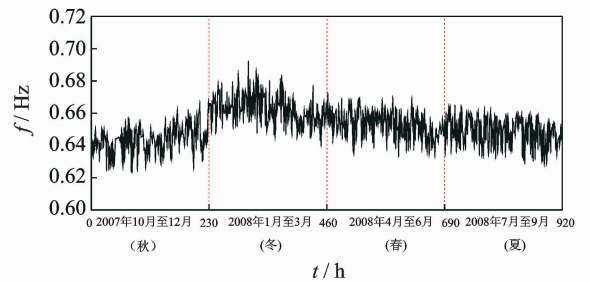


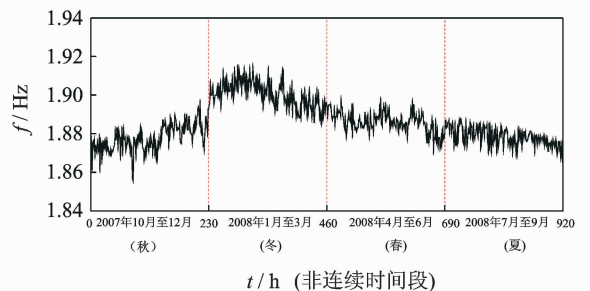
图 5 随机子空间法稳定图(竖向)

Fig. 5 Stability diagram of stochastic subspace identification (SSI) method (vertical)

和方差如表 2 所示。图 6 为竖向一阶与六阶模态频率 920 h(40 d)的实测曲线。



(a) 竖向一阶频率实测值  
(a) the testing 1st V-frequency



(b) 竖向六阶频率实测值  
(b) the testing 6th V-frequency

图 6 模态频率年变化图

Fig. 6 Annual temperature variation of modal frequency

从表 2 可以看出,各阶模态频率年变化量不同,年变化最大的竖向一阶模态频率波动范围达 10.48%。变异系数 CV 为标准差与平均数的比值,  $CV_i = \sigma_i / f_i$ , 其中:  $\sigma_i$  为第  $i$  阶模态频率的标准差;  $f_i$  为第  $i$  阶模态频率的均值。  $CV_i$  值的大小反映了单位均值的离散程度,  $CV_i$  越大表明离散度越大。

CV 值可得出低阶模态频率离散性较大。

表 2 各阶模态频率的年变化分析

Tab. 2 Analysis of annual frequency variation

统计参数	$f_{ave}/\text{Hz}$	$f_{max}/\text{Hz}$	$f_{min}/\text{Hz}$	波动范围/%	CV/%
$V_1$	0.652	0.692	0.624	10.48	1.69
$V_2$	0.805	0.831	0.780	6.31	1.12
$V_3$	1.244	1.291	1.200	7.33	1.21
$V_4$	1.385	1.426	1.347	5.70	1.08
$V_5$	1.660	1.688	1.635	3.22	0.60
$V_6$	1.886	1.915	1.855	3.16	0.58
$H_1$	0.413	0.424	0.402	5.33	0.97
$L_1$	1.668	1.701	1.646	3.33	0.66

从图 6 可以看出,各阶模态频率时程曲线并非平稳变化,而是随季节性温度变化出现较大的起伏,各阶模态频率变化规律一致,即总体上表现为“温度高频率低、温度低频率高”。

## 2.2 模态频率与环境温度最优线性回归模型建立

### 2.2.1 一元线性回归模型

寻求下白石大桥桥梁模态频率与环境温度的相关关系,分别建立前几阶模态频率与桥面温度、箱内平均温度、箱外平均温度和全截面平均温度的一元一次线性回归模型,并分析对比其回归效果。

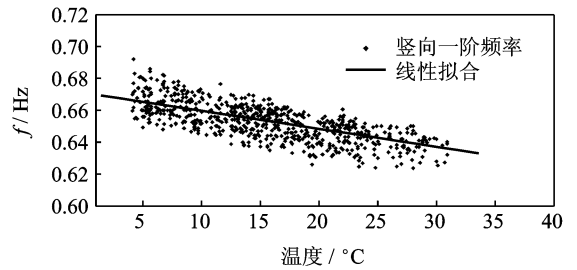
选取以上 920 个数据中前 690 个的温度与频率数据进行回归分析。建立环境温度与频率的线性回归模型,其中: $y$  表示模态频率( $f$ ); $x$  表示温度( $t$ )。结果如图 7 和表 3 所示(注:文中仅给出模态频率与全截面平均温度的线性回归图)。

表 3 模态频率与全截面平均温度线性回归及检验

Tab. 3 Linear regression and verification between the sectional average temperature and the modal frequency

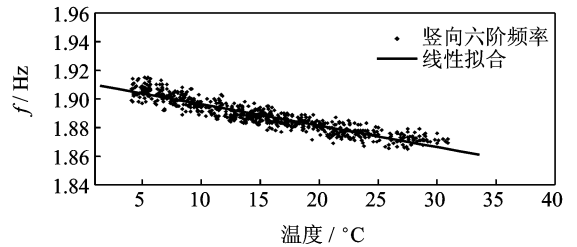
模态频率	$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x$ ( $y$ 为频率, $x$ 为全截面平均温度)				
	回归方程系数		$F$ 检验 显著线性相关	拟合优度检验	
	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1 (\times 10^{-3})$		$R$	$R^2$
$V_1$	0.669 9	-1.050	显著	0.64	0.41
$V_2$	0.820 7	-0.847	显著	0.64	0.41
$V_3$	1.269 2	-1.569	显著	0.63	0.40
$V_4$	1.418 7	-2.002	显著	0.86	0.76
$V_5$	1.684 3	-1.361	显著	0.85	0.72
$V_6$	1.910 6	-1.418	显著	0.90	0.81
$H_1$	0.418 4	-0.302	显著	0.43	0.19
$L_1$	0.530 0	-0.472	显著	0.76	0.57

通过一元一次线性回归分析得出以下结论:



(a) 竖向一阶频率实测值

(a) the testing 1st V-frequency



(b) 竖向六阶频率实测值

(b) the testing 6th V-frequency

图 7 模态频率与全截面平均温度一元线性回归

Fig. 7 The simple linear regression model between the sectional average temperature and the modal frequency

1) 通过显著性水平  $\alpha=0.05$  的  $F$  检验发现,前九阶模态频率与各温度值之间均显著线性相关;

2) 样本决定系数  $R^2$  大小分布表明,随着阶数的增加, $R^2$  值呈增大趋势,说明越高阶的模态频率与环境温度的线性拟合效果越好,即高阶模态频率的变化可由环境温度变化解释程度更高;

3) 由表 3 可知,虽然竖向六阶样本决定系数  $R^2$  已达 0.81,但其他低阶模态频率的回归方程的  $R^2$  值普遍不高,说明除全截面平均温度外,还应考虑其他因素对模态频率的影响。

### 2.2.2 多元线性回归模型

由于混凝土导热性能差,方向性强,结构混凝土温度相对环境温度存在明显的时间滞后性,导致桥梁动力特性变化往往滞后于环境温度变化<sup>[19]</sup>。因此,分析环境温度对大跨度连续刚构桥梁动力特性影响时,同时考虑环境温度的空间分布和时间分布。

#### 1) 回归模型建立

模态频率和温度的同步时间序列为

$$\begin{cases} \mathbf{Y}^c = [y_1^c & y_2^c \cdots y_n^c \cdots y_N^c]^T \\ \mathbf{X} = [X_1 & X_2 \cdots X_n & X_N]^T \end{cases} \quad (1)$$

其中: $y_n^c$  为对  $c$  阶( $c=1,2,\dots,9$ )模态频率辨识得到的第  $n$  个样本; $N=690$ ; $\mathbf{X}_n = [x_{1,n} \quad x_{2,n} \quad \cdots \quad x_{8,n}]$

$x'_{1,n} \ x'_{2,n} \ \dots \ x'_{8,n}]^T$  为实测得到的第  $n$  个温度分布矢量样本;  $x_{i,n}$  为第  $i$  个温度传感器信号在第  $n$  小时期间的平均值;  $x'_{i,n}$  为第  $i$  个温度传感器信号在第  $n-t$  小时期间的平均值,因此,可选自变量个数为 16 个。

由此可建立  $c$  阶模态频率与温度之间多元线性回归方程为

$$y^c = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_8 x_8 + \beta_9 x'_1 + \dots + \beta_{16} x'_8 + \varepsilon = \beta \mathbf{X}^T + \varepsilon \quad (2)$$

其中:  $\beta = [\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{16}]^T$  为系数向量;  $\mathbf{X} = [1, x_1, \dots, x_8, x'_1, \dots, x'_8]^T$  为扩展温度向量,下标 1, 2,  $\dots, 8$  对应于温度测点的编号。

2) 变量筛选

采用统计专业软件 SPSS13.0 进行逐步回归分析,利用逐步筛选法(Stepwise)进行多元线性回归分析,建立竖向一阶模态频率与环境温度的最优回归方程,并将此最优回归方程运用于其他各阶模态频率验证其有效性。

回归自变量因子中温度时间分布分别考虑滞后 1, 2 和 3 h 的实测数据进行逐步最优回归,分别得到相应的回归方程和回归结果如表 4 所示。

结果表明,下白石大桥模态频率与时间滞后两小时的温度数据拟合效果最佳,回归方程式中  $x_3$  为箱内测点 3 第  $i$  小时内一小时平均温度;  $x'_6$  为箱梁箱底测点 6 第  $i-2$  小时内一小时平均温度;  $x'_8$  为桥面温度测点 8 第  $i-2$  小时内一小时平均温度。

表 4 回归方程及检验

Tab. 4 Regressive equation and verification

回归方程	$\hat{y} = 0.6726 - 0.000766x_3 + 0.000490x'_6 - 0.000899x'_8$
方程检验	数据量 $N = 690$ , 因子数 $m = 3$ , $F$ 统计量 = 255.895, $P$ 值 = 0.000004, $F$ 临界值 = 2.618, 水平 $\alpha = 0.05$
相关参数	复相关系数 $R = 0.727$ , $R^2 = 0.528$ , 调整后 $R^2 = 0.526$
结论	$F$ 统计量 $> F$ 临界值, 回归方程具有显著的线性关系

从自变量筛选结果分析,最优回归方程体现出明显的温度时间分布和空间分布。时间上,因箱外温度传感器测量的是箱外大气温度,因此存在 2 h 的时间滞后性,进入最优回归方程的自变量为提前 2 h 的箱外环境温度  $x'_6$  和  $x'_8$ 。箱内温度传感器测得箱内壁表面混凝土温度,且箱内温度比较稳定,不存在时间滞后性问题。空间上,模态频率变化还与箱梁横截面温度梯度有关,最优回归方程中表现为

桥面与梁底温差  $(0.000899x'_8 - 0.000490x'_6)$ , 箱内与梁底温差  $(0.000766x'_3 - 0.000490x'_6)$ 。

拟合优度检验结果表明,此三元线性回归效果较一元一次线性回归模型有了明显的改善。复相关系数  $R$  值已达 0.727,表明回归方程对原有数据的拟合程度较好,自变量与因变量的线性关系较强。

经过逐步回归分析得出的最优回归方程为

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_3 + \beta_2 x'_6 + \beta_3 x'_8 + \varepsilon = \beta \mathbf{X}^T + \varepsilon \quad (3)$$

式(3)不仅满足统计学上的意义,具有较好的回归效果,而且能从物理意义上很好的对其解释,体现了温度空间上和时间上的分布对桥梁模态频率的影响,说明此回归模型具有实际的回归意义。

3) 各阶最优模型建立

将逐步回归筛选出来的 3 个自变量与其他各阶模态频率进行最小二乘回归,分别建立各自的回归模型并验证其回归效果。表 5 为各阶模态频率的回归方程和回归检验结果。由表 5 可知,各阶回归方程均有显著线性意义,复相关系数  $R$  值较一元一次线性回归模型均有了明显提高,且呈现明显的规律性。随着阶数的增加,复相关系数  $R$  值增大,说明越高阶的模态频率与环境温度的相关程度越高,回归效果越好。

表 5 各阶模态频率最优回归模型

Tab. 5 Optimum regression model of modal frequency

模态频率	$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_3 + \hat{\beta}_2 x'_6 + \hat{\beta}_3 x'_8$				拟合优度检验	
	回归方程系数( $\times 10^{-3}$ )				$R$	$R^2$
	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$		
$V_1$	0.6726	-0.766	0.490	-0.899	0.727	0.528
$V_2$	0.8220	-0.748	0.770	-0.876	0.734	0.539
$V_3$	1.2723	-0.642	0.158	-0.982	0.764	0.584
$V_4$	1.4200	-1.295	0.693	-1.368	0.885	0.784
$V_5$	1.6857	-1.354	1.025	-0.993	0.897	0.808
$V_6$	1.9119	-0.985	0.653	-1.074	0.949	0.901
$H_1$	0.4192	-0.468	0.366	-0.207	0.566	0.320
$L_1$	0.5311	-0.671	0.685	-0.489	0.678	0.459

$F$  检验( $\alpha = 0.05$ )结果均为“显著”线性相关

经方差分析表明,由 3 个测点的温度变化引起的模态频率的变差占总变差的主要部分,其中竖向六阶模态频率达 90.1%(即  $R^2$  为 0.901),其他因素引起的变差占总变差的 9.9%。低阶模态频率的  $R^2$  值相对较低,说明除环境温度外其他不确定性因素,如噪声、误差和环境湿度等对前几阶模态频率影响较大,致使其数据离散性加大。因此,对于大跨径连续刚构桥梁,高阶模态频率更加稳定可靠,对桥梁进

行基于动力特性的安全性评估应该考虑采用消除环境温度影响的高阶模态频率。

通过对各回归方程的回归系数做偏相关的 F 检验可知,各变量对其回归方程均有显著的线性关系。从回归系数的正负号可以看出,各温度变量对各阶模态频率的影响规律相同,这表明参数筛选结果对各阶模态频率回归具有通用性。

### 2.2.3 回代检验

对回归方程的检验,除了用给出的检验统计量检验方程的合理性外,还必须对方程做回代检验。回代检验的方法是把 3 项指标的原始数据重新代入回归方程,验证方程拟合性能。

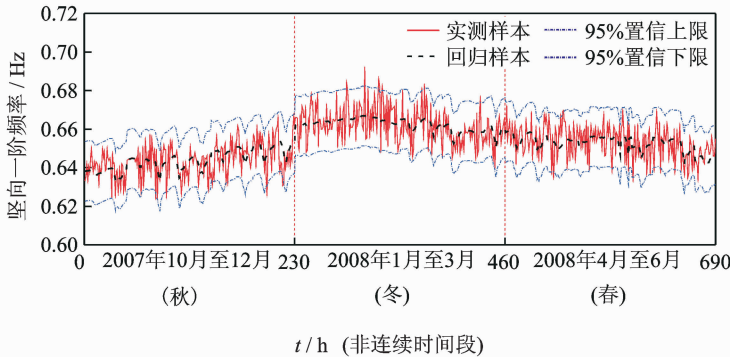
定义模型的拟合残差为

$$e_f^c = y^c - \hat{y}^c \quad (4)$$

定义均方误差  $\sigma(x)$  作为误差评判指标

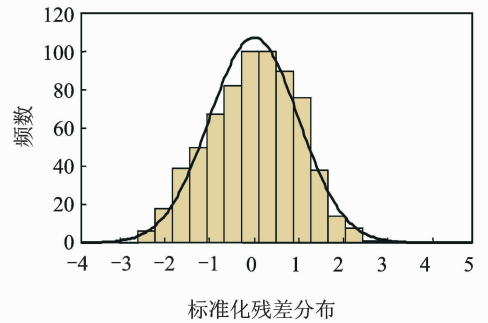
$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (5)$$

它表示  $e_f^c$  幅值的均方差,  $\sigma(x)$  的大小反映了拟合的精度。图 8 为竖向一阶及六阶模态频率的三元线性回归模型的拟合残差及其分布,各阶回归模型的拟合均方误差如表 6 所示。回代结果表明,实测模态频率 ( $y$ ) 在其预测模态频率  $\hat{y} \pm \delta(x)$  预测区间范围内,置信度为 95%。拟合残差服从正态分布假设,即  $\epsilon \sim N(0, \sigma^2)$ ,表明笔者采用的多元正态线性回归分析是可行的,得到的回归统计分析模型是最佳的无偏估计预测模型,可以用于样本的整体估计和预测。



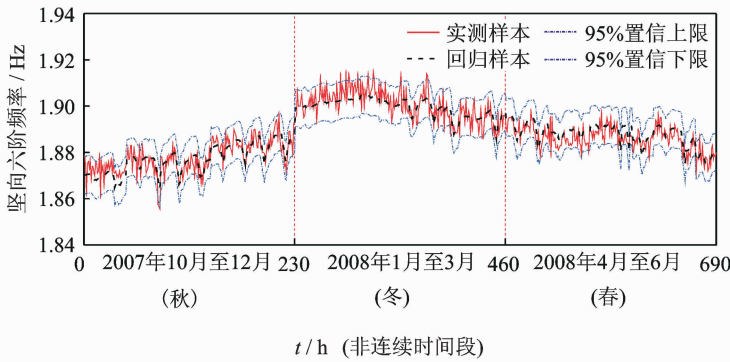
(a) 竖向一阶频率拟合曲线

(a) The 1st V-frequency fitting curve



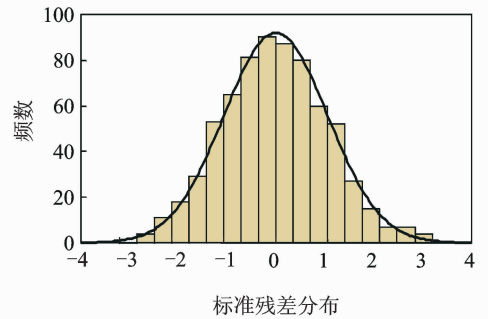
(b) 竖向一阶频率拟合残差分布

(b) The 1st V-frequency residual distribution



(c) 竖向六阶频率拟合曲线

(c) The 6th V-frequency fitting curve



(d) 竖向六阶频率拟合残差分布

(d) The 6th V-frequency residual distribution

图 8 模态频率的多元线性模型回归误差分析

Fig. 8 Error analysis of the multiple linear regression models

表 6 多元线性回归模型的均方误差

Tab. 6 Mean square error of regression model

误差类型	模态频率/(10 <sup>-3</sup> Hz)							
	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>6</sub>	H <sub>1</sub>	L <sub>1</sub>
拟合均方误差	7.83	5.82	5.52	4.39	4.59	4.15	3.37	6.03
预测均方误差	9.89	7.62	7.36	6.67	5.16	4.74	3.02	6.54

### 2.2.4 外推检验

为进一步检验预测模型的准确性与泛化性能(即预测性能),选取以上 920 个数据中回归样本以外的 230 个“检验数据”代入方程进行计算。同样定义模型的预测残差为  $e_f^p$  及预测残差的均方误差  $\sigma(x)$  作为误差评判指标,如表 6 所示。

表 6 表明,拟合均方误差与预测均方误差相近

且变化趋势相同,说明所建立的三元线性回归模型不仅具有较好的回归效果,还具有满意的预测效果。

### 2.3 模态频率的温度修正模型

通过统计回归分析建立起了“模态频率-温度空间、时间分布”的回归模型,将环境温度对各阶模态频率的影响进行了量化。在此三元线性回归模型的基础上,考虑消除环境温度对模态频率的影响,提出模态频率的温度修正模型

$$y_n^c = \tilde{y}_n^c - [\hat{y}^c(T_n) - \hat{y}^c(T_0)] \quad (6)$$

其中: $y_n^c$  为修正后  $c$  阶模态频率值; $\tilde{y}_n^c$  为时段  $n$  上  $c$  阶模态频率的实测值; $\hat{y}^c(*)$  为  $c$  阶模态频率关于温度分布模型,其值由表 5 各阶回归模型可得, $T_n$  为时段  $n$  上实测的回归模型中温度矢量值; $T_0$  为给定的一个参考初始温度分布。

通过长时期的温度监测分析发现,早晨 6:00~8:00 期间箱梁结构内的温度分布比较均匀,和外界气温相差很小,且这一时段温度不发生明显变化。因此,取这段时间的温度场作为初始温度场  $T_0$ ,并定义为 20℃。温度测点  $x_3, x'_6, x'_8$  的初始温度均为 20℃。通过模态频率的温度修正模型将相对于初始温度场的温度引起的模态频率的变化剔除,得到不受日温和季节性温度变化而变化的模态频率序列。

将用于回归模型建立的 690 个数据点的实测模态频率值和通过回归模型计算得到的拟合值代入修正模型,得到剔除环境温度影响后的模态频率时程曲线,图 9 为消除温度影响后的模态频率时程曲线。

由图 3 和图 9 对比可得,消除环境温度影响后,各阶模态频率已经不存在随日温度变化和季节性温度变化而显著波动的现象,频率变化趋于平稳,竖向六阶较竖向一阶模态频率平稳,说明高阶模态频率受其他不确定性因素影响较小,这也与回归分析得出的结论相符。然而,因为温度变化对模态频率的影响是长期性的趋势,而其他不确定性因素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,同时受测量的随机误差影响,修正后的频率时程曲线并非一条平稳的直线,仍存在较小区间内的随机波动,且低阶频率较高阶波动大。由标准化残差分析表明,这种误差是随机的,符合标准正态分布。

## 3 结 论

1) 利用逐步最优线性回归分析方法建立了考

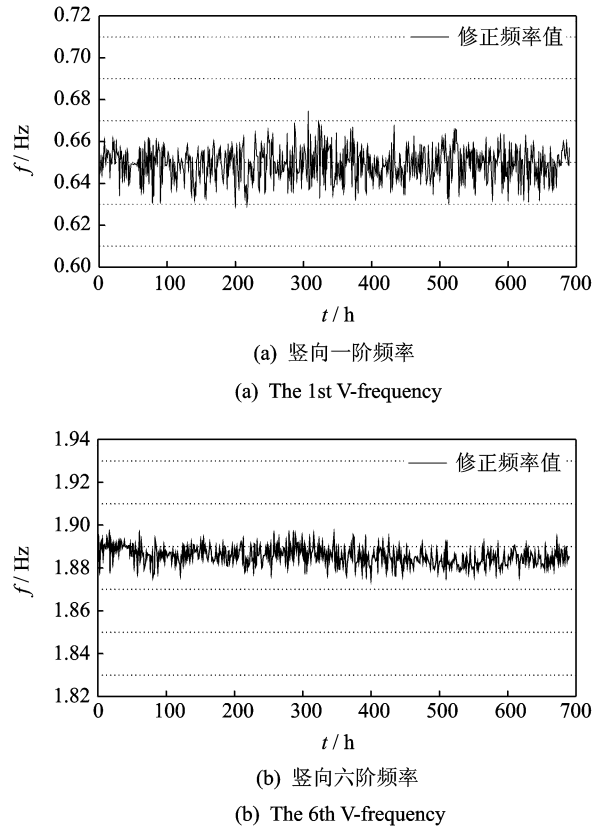


图 9 消除温度影响后的模态频率曲线

Fig. 9 The frequency curve eliminated temperature effects

虑温度、时间、空间分布的下白石连续刚构桥环境温度与模态频率的三元线性回归模型。经检验,该模型具有较好的拟合效果和预测效果,可以应用于对桥梁后续的模态频率数据进行预测评判。

2) 建立了下白石连续刚构桥模态频率-温度修正模型,能消除环境温度引起的模态频率的变化,使频率变化趋于平稳,为桥梁健康监测和安全评估提供了温度修正的模态频率数据。

3) 研究了环境温度对模态频率的影响,在消除环境温度的影响后模态频率仍存在一定的离散性,进一步开展对其他因素的影响研究是必要的。

### 参 考 文 献

[1] Zong Zhouhong, Wang T L, Huang D Z, et al. State-of-the-art report of bridge health monitoring[J]. Journal of Fuzhou University, 2002, 30(2): 127-152.

[2] 杨秋伟,梁超锋. 环境激励下检测结构损伤的柔度灵敏度方法[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(3): 305-308. Yang Qiuwei, Liang Chaofeng. Flexibility-based sensitivity approach for structural damage detection under

- ambient vibration[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 31(3):305-308. (in Chinese)
- [3] 胡红生, 钱苏翔. 移动质量激励下梁动态响应分析与试验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(2):153-157.  
Hu Hongsheng, Qian Suxiang. Dynamic response analysis and tests for a beam subjected to a moving mass[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(2):153-157. (in Chinese)
- [4] Farrar C R, Jauregui D. Damage detection algorithms applied to experimental and numerical modal data from the I-40 bridge[R]. [s. l.]; Los Alamos National Library Report, 1996.
- [5] Siddique A B, Sparling B F, Wegner L D. Assessment of vibration-based damage detection for an integral abutment bridge[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2007, 34: 438-452.
- [6] Bart P, Guido D R. One-year monitoring of the Z24-bridge: environmental effects versus damage events [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2001, 30:149-171.
- [7] Ni Y Q, Hua X G, Fan K Q, et al. Correlating modal properties with temperature using long-term monitoring data and support vector machine technique [J]. Engineering Structures, 2005, 27(12):1762-1773.
- [8] 许永吉, 朱三凡, 宗周红. 环境温度对桥梁结构动力特性影响的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(6):119-123.  
Xu Yongji, Zhu Sanfan, Zong Zhouhong. Experimental study on effects of environmental temperature on dynamic characteristics of bridge structures[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(6):119-123. (in Chinese)
- [9] Zhou H F, Ni Y Q, Ko J M, et al. Eliminating temperature effect in vibration-based structural damage detection [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2011, 137(12):785-796.
- [10] Fu Y, DeWolf J. Monitoring and analysis of a bridge with partially restrained bearings [J]. Journal of Bridge Engineering, 2001, 6(1): 23-29.
- [11] Mosavi A A, Seracino R, Rizkalla S. Effect of temperature on daily modal variability of a steel-concrete composite bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2012, 17:979-983.
- [12] 樊可清, 倪一清, 高赞明. 大跨度桥梁模态频率识别中的温度影响研究[J]. 中国公路学报, 2006, 19(2):67-73.  
Fan Keqing, Ni Yiqing, Gao Zanming. Research on temperature influences in long-span bridge eigenfrequencies identification [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(2):67-73. (in Chinese)
- [13] 徐立群. 大跨径连续刚构桥健康监测概念设计及系统集成[D]. 福州:福州大学, 2008.
- [14] Xu Zhaodong, Wu Zhishen. Simulation of the effect of temperature variation on damage detection in a long-span cable-stayed bridge [J]. Structural Health Monitoring, 2007, 6: 177-189.
- [15] Feltrin G. Temperature and damage effects on modal parameters of a reinforced concrete bridge[C]// Proceedings of 4th International Structural Dynamics Conference. Munich, Germany: [s. n.], 2002:373-378.
- [16] Magd A W, Guido D R. Effect of temperature on dynamic system parameters of a highway bridge [J]. Structural Engineering International, 1997, 7(4): 266-270.
- [17] 应怀樵. 波形和频谱分析与随机数据处理[M]. 北京:铁道出版社, 1983:1-100.
- [18] 任伟新. 环境振动系统识别方法的比较分析[J]. 福州大学学报:自然科学版, 2001, 29(6):80-86.  
Ren Weixin. Comparison of system identification methods using ambient vibration measurements [J]. Journal of Fuzhou University: Natural Sciences Edition, 2001, 29(6):80-86. (in Chinese)
- [19] 钱宇峰. 大跨径 PC 连续箱梁桥的温度场研究及其效应分析[D]. 西安:长安大学, 2005.



**第一作者简介:**余印根,男,1983年11月生,博士研究生。主要研究方向为桥梁结构检测监测及评估等。

E-mail:yyg0506@126.com



