

# 润扬大桥悬索桥小波包能量谱与温度的季节相关性研究

丁幼亮\*, 李爱群, 孙君, 邓扬

东南大学土木工程学院, 南京 210096

\* E-mail: [civilding@163.com](mailto:civilding@163.com)

收稿日期: 2008-04-25; 接受日期: 2008-09-19

国家自然科学基金(批准号: 50725828, 50808041)和江苏省自然科学基金(批准号: BK2008312)资助项目

**摘要** 对润扬大桥悬索桥 236 天的的小波包能量谱与温度实测数据进行了季节相关性研究. 分析结果表明, 润扬大桥悬索桥的小波包能量谱与温度具有明显的季节相关性, 其特征频带能量比的日平均值随着温度的季节变化在一年中可以发生平均约 200% 的变化. 在此基础上采用 6 次多项式模型对小波包能量谱与温度进行了统计建模, 并采用均值控制图法对特征频带能量比的异常变化进行了统计模式识别. 分析结果表明, 运用本文方法可以有效地消除温度的季节变化对悬索桥实测小波包能量谱的影响, 较好地识别出结构损伤引起的特征频带能量比 10% 的异常变化, 并且与实测模态频率相比, 小波包能量谱更适合于大跨桥梁结构的在线实时损伤预警.

**关键词**

结构损伤预警  
小波包能量谱  
小波包分析  
季节相关性  
悬索桥

大跨桥梁结构的健康监测与安全状态评估是目前国内外学术界与工程界的热点研究领域<sup>[1,2]</sup>. 如何根据采集的数据和信号反演出桥梁结构的工作状态和健康状况, 是土木工程领域面临的一大挑战. 已有研究工作表明, 对于正常状态下的桥梁结构而言, 在温度等环境条件的变化影响下, 各种观测数据会在一个较宽的范围内波动, 这种波动将淹没或掩盖结构因局部损伤所造成的结构损伤特征参数的真正改变<sup>[3-5,8,9]</sup>. 因此, 基于长期监测数据建立起客观的物理模型用以描述桥梁温度场作用与结构损伤特征参数之间的物理关系, 在此基础上建立“环境条件归一化”的结构损伤预警方法, 这是桥梁整体状态监测技术面向实际工程应用的重要研究问题.

近年来, 基于结构动力响应的小波包能量谱进行结构损伤预警得到了较为深入的研究<sup>[6-9]</sup>. 文献<sup>[8, 9]</sup>建立了环境激励下基于小波包能量谱的大跨斜拉桥

和悬索桥结构损伤预警方法. 实测分析结果表明, 利用结构动力响应的小波包能量谱能够敏感地表征交通荷载和环境温度对大跨桥梁振动特性的影响. 然而, 如何基于长期监测数据建立统计模式识别方法, 用以正确分离环境变化引起的损伤预警指标异常和结构损伤引起的异常, 这是防止大跨桥梁结构损伤预警方法出现误判的必要手段.

本文以润扬大桥悬索桥 236 天的监测数据为研究对象, 对润扬大桥悬索桥实测小波包能量谱与温度的季节相关性进行了详细的分析, 在此基础上重点研究了“环境条件归一化”的结构整体状态监测方法, 采用统计模式识别方法对小波包能量谱与温度的季节相关性进行统计建模, 并且对“归一化”的小波包能量谱的异常变化进行判别分类, 较完整地建立了大跨桥梁结构基于长期监测数据的损伤预警方法体系.

### 1 小波包能量谱与温度的季节相关性分析

文献[8, 9]将环境荷载激励技术与小波包分析技术相结合, 研究了环境激励下基于小波包能量谱的大跨斜拉桥和悬索桥结构损伤预警方法. 提出对环境激励下的结构振动响应计算虚拟脉冲响应函数并在此基础上计算结构的小波包能量谱及其损伤预警参数, 用以表征环境激励下的结构损伤状态. 假设对虚拟脉冲响应函数 $f$ 进行第 $i$ 层小波包分解, 则虚拟脉冲响应函数 $f$ 在第 $i$ 分解层的小波包能量谱向量 $E_i$ 可以表征结构的动力特性

$$E_i = \{E_{i,j}\}, j = 0, 1, 2, \dots, 2^i - 1. \quad (1)$$

在此基础上选择小波包能量谱向量  $E_i$  中前  $m$  个较大能量系数的特征频带, 将其组成结构损伤预警的小波包能量谱. 将各特征频带的能量比  $I_p$  作为结构损伤预警参数

$$I_p = \frac{E_{i,p}}{\left(\sum_{j=1}^{2^i-1} E_{i,j}\right) / 2^i}, \quad p = 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

能量比  $I_p$  反映了结构动力系统在各个小波包分解频带上的幅频特性, 可以作为结构损伤预警参数并通过这些能量比  $I_p$  的变化来判断结构的损伤情况[8, 9].

本文在文献[8, 9]提出的小波包能量谱损伤预警方法的基础上, 对润扬大桥悬索桥 2006 年中 236 天

的实测数据进行了研究. 图 1 给出了正常运营条件下润扬大桥悬索桥第 16 阶和第 30 阶特征频带的能量比  $I_p$  日变化曲线. 从图 1 可以看出, 小波包能量谱随着特征频带阶次的不同分别表现出“温度高能量比低、温度低能量比高”和“温度高能量比高、温度低能量比低”两种变化特征. 因此, 润扬大桥悬索桥正常运营条件下的小波包能量谱观测时间序列可以看成是一个由不同频率成分组成的数字信号序列, 其中随着环境温度而趋势变化的部分表现为低频率(长周期)的变化; 受到车辆荷载随机因素影响的随机部分, 则表现为高频率(短周期)的颤动.

为了消除交通荷载和环境温度对悬索桥实测小波包能量谱的影响, 本文采用小波包能量谱与温度的季节相关性分析方法, 也就是建立润扬大桥悬索桥小波包能量谱的日平均值与温度日平均值的数学模型. 采用基于季节相关性分析的多样本平均方法可以较好地消除车辆荷载引起的小波包能量谱的随机颤动. 图 2 给出了润扬大桥悬索桥特征频带能量比的日平均值与温度日平均值之间的季节相关性分析结果. 可以看出, 悬索桥实测小波包能量谱与温度之间呈现十分明显的季节相关性, 散点图比较集中. 表 1 进一步给出了润扬大桥悬索桥特征频带能量比的日平均值在 2006 年中的最大值、最小值及其相对变化. 从表中可以看出, 2006 年润扬大桥悬索桥小波包能量谱的日平均值

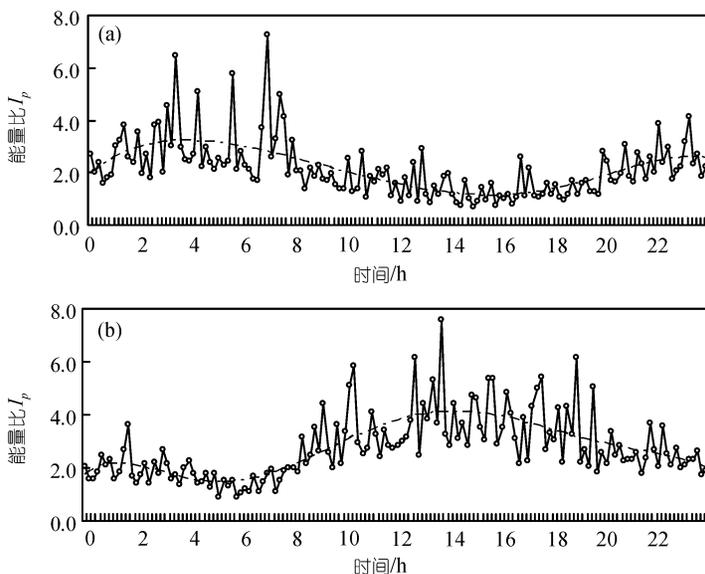


图 1 特征频带的能量比  $I_p$  日实测曲线  
(a) 第 16 阶特征频带; (b) 第 30 阶特征频带

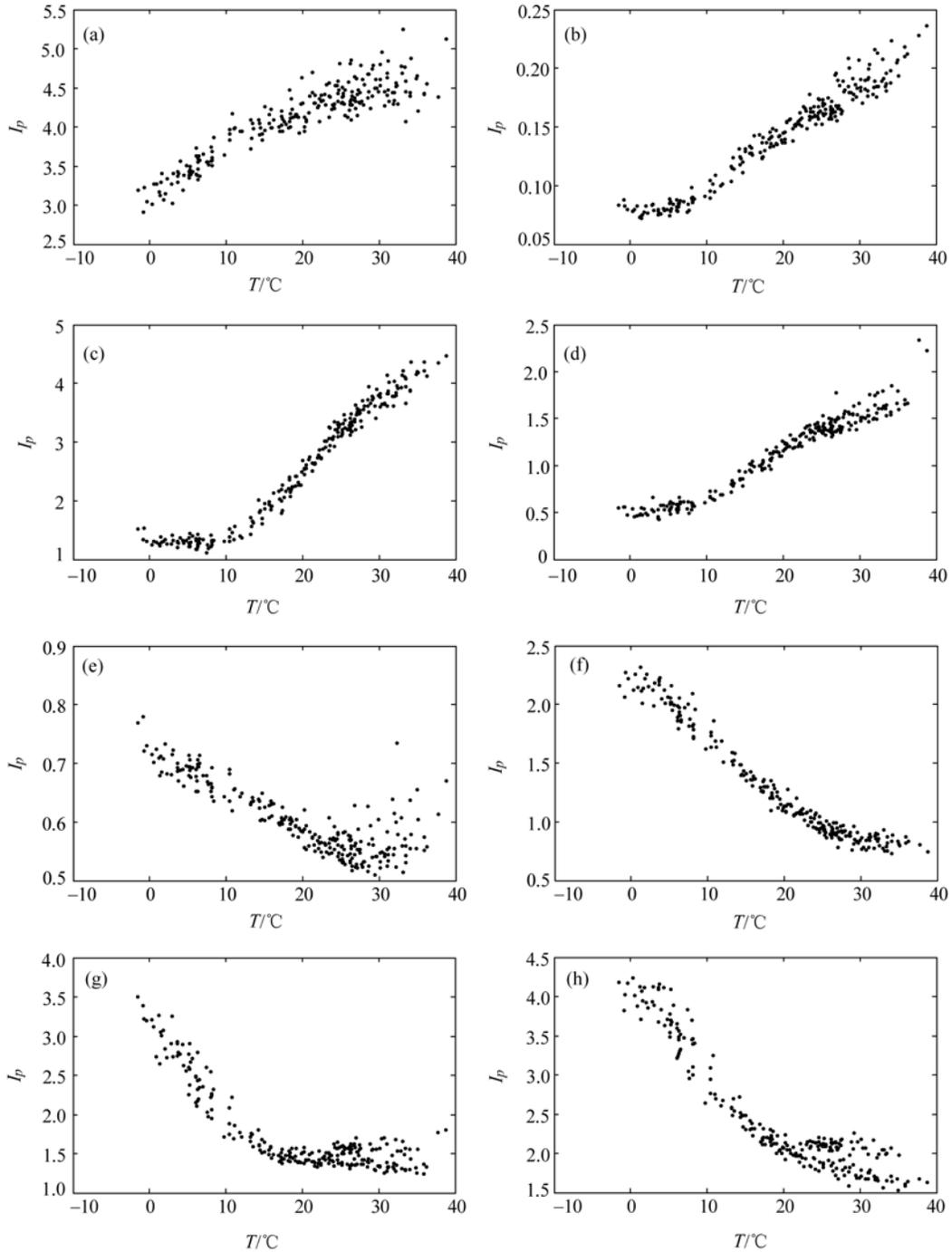


图2 润扬大桥悬索桥小波包能量谱与温度的季节相关性

(a) 第13阶特征频带; (b) 第22阶特征频带; (c) 第30阶特征频带; (d) 第31阶特征频带;  
(e) 第11阶特征频带; (f) 第16阶特征频带; (g) 第21阶特征频带; (h) 第29阶特征频带

的最小变化为52.7130%，最大变化则达到451.6737%，平均变化达到207.0006%。可见，悬索桥结构在环境温度变化的影响下，实测小波包能量谱会在一个较

宽的范围内波动。如何进一步有效地消除温度对悬索桥实测小波包能量谱的影响，是结构整体状态监测与损伤预警应用于实际工程的重要研究问题。

表 1 润扬大桥悬索桥实测小波包能量谱的季节变化

频带阶次	能量比最大值	能量比最小值	相对变化(%)
11	0.7796	0.5105	52.7130
13	5.1212	2.9085	76.0770
16	2.3050	0.7368	212.8393
21	3.4914	1.2468	180.0289
22	0.2364	0.0721	227.8779
29	4.2239	1.5479	172.8794
30	4.4707	1.1706	281.9153
31	2.3402	0.4242	451.6737

## 2 季节相关性分析在结构损伤预警中的应用

### 2.1 小波包能量谱与温度的季节相关性模型

为了建立“环境条件归一化”的结构损伤预警方法,润扬大桥悬索桥小波包能量谱与温度的季节相关性分析可以分为 2 个步骤: 1) 建立悬索桥小波包能量谱与温度的季节相关性模型,用以消除环境温度对小波包能量谱的影响; 2) 采用统计模式识别方法

对“归一化”的小波包能量谱的异常变化进行判别分类,用以实现结构损伤预警。

从图 2 可以看出,润扬大桥悬索桥的小波包能量谱与温度之间具有明显的季节相关性特征。为此,本文采用 6 次多项式模型建立各阶特征频带的能量比  $I_p$  与温度  $T$  的回归公式

$$I_{p,j}(T) = p_1T^6 + p_2T^5 + p_3T^4 + p_4T^3 + p_5T^2 + p_6T^1 + p_7, \quad (3)$$

式中,  $T$  为温度日平均值;  $I_{p,j}$  为悬索桥第  $j$  阶特征频带能量比  $I_p$  的日平均值;  $p_i(i=1\sim7)$  为回归模型的系数。为了检验回归模型的泛化性能(预测效果),从总共 236 天的监测样本中非连续抽取 196 天作为训练数据进行多项式拟合,得到小波包能量谱与温度的回归模型,其余 40 天则作为检验数据用于验证模型的泛化能力。

图 3 给出了采用 196 天作为训练数据的小波包能

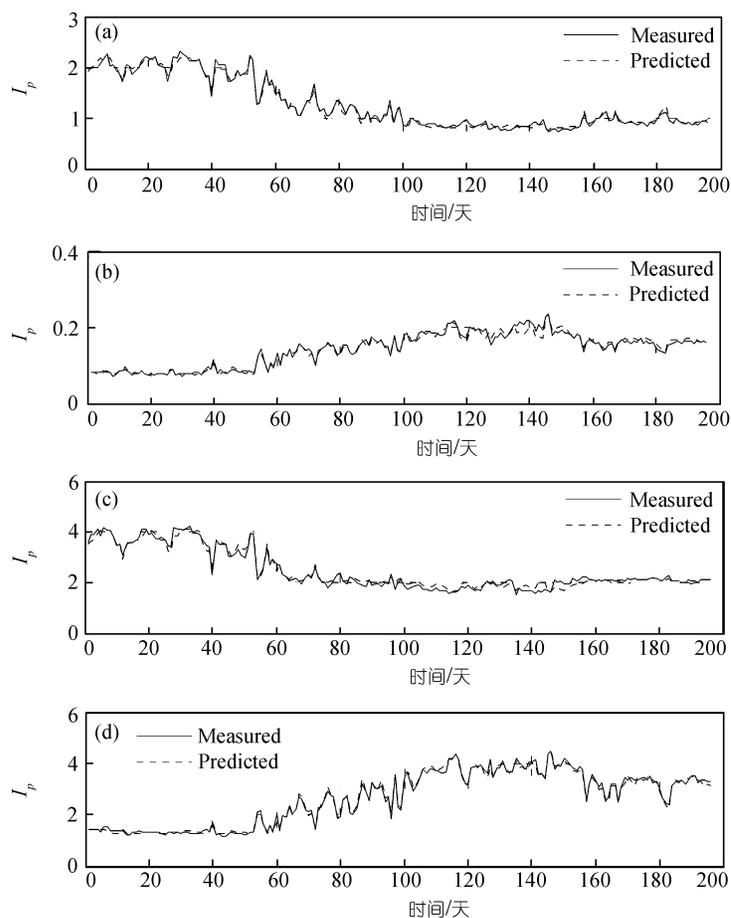


图 3 小波包能量谱与温度的多项式模型拟合效果

(a) 第 16 阶特征频带; (b) 第 22 阶特征频带; (c) 第 29 阶特征频带; (d) 第 30 阶特征频带

量谱与温度的多项式模型拟合效果. 图 3 中实线为特征频带能量比  $I_p$  的实测值, 虚线为基于回归模型的能量比  $I_p$  计算值. 可以看出能量比  $I_p$  实测值与计算值曲线比较吻合, 说明采用 6 次多项式模型的拟合效果良好. 在此基础上采用其余 40 天的温度数据代入 6 次多项式模型得到能量比  $I_p$  的预测值, 图 4 给出了预测值和实测值的比较. 可以看出, 润扬大桥悬索桥各阶特征频带的能量比  $I_p$  的预测值与实测值吻合良好. 因此, 根据小波包能量谱与温度的季节相关性特征建立统计模型可以有效地消除温度的变化对悬索桥实测小波包能量谱的影响.

### 2.2 季节相关性的统计模式识别

下面讨论如何采用统计模式识别方法对“归一化”的小波包能量谱的异常变化进行判别分类. 首先将特征频带能量比  $I_p$  的实测值与预测值的残差定义为结构损伤预警指标

$$e = I_{p,m} - I_{p,e} \quad (4)$$

式中,  $I_{p,m}$  和  $I_{p,e}$  分别为能量比  $I_p$  的实测值与预测值. 在此基础上采用均值控制图法对悬索桥小波包能量谱的异常变化进行统计模式识别. 均值控制图是一种用统计方法设计的图, 是统计假设检验的图上作业法, 在均值控制图上每描一个点就是做一次统计假设检验, 而且假设检验用一种可视的形式表示出来<sup>[10]</sup>. 图中有中心线(CL)、上控制线(UCL)、下控制线

(LCL)和一系列样本的描点序列. 其中, 中心线表示的是所有样本的均值位置, 而上控制线和下控制线则是按照一定的置信度得到的置信区间. 若是样本点落在了控制线之间, 就认为该样本点正常; 相反, 若是落在了控制线之外, 则认为该点异常. 因此, 为了将均值控制图法应用于结构整体状态监测中, 首先需要确定正常状态下的中心线、上控制线和下控制线的位置, 即通过改变假设检验的显著性水平调整上、下限范围, 使得正常状态的样本点均落在允许变化范围内.

如本文第 2 节所述, 温度的变化对小波包能量谱各阶特征频带的影响性质不同. 其中, 对温度变化敏感的特征频带可以划分为两类: 1) “正”影响频带, 即特征频带的能量比随着温度的变化呈现“温度高能量比高、温度低能量比低”的变化特征; 2) “负”影响频带, 即特征频带的能量比随着温度的变化呈现“温度高能量比低、温度低能量比高”的变化特征. 也就是说, 温度变化引起的结构动力特性改变对于“正”影响频带和“负”影响频带的能量比变化特征亦不同. 因此, 为了更好地分离结构损伤引起的动力特性变化, 分别对小波包能量谱的“正”影响频带和“负”影响频带的能量比计算均值控制图, 如图 5 所示. 其中, “正”影响频带选取第 13, 22, 30 和 31 阶; “负”影响频带选取第 11, 16, 21 和 29 阶. 图 5 中, 前 196 个样本为训练样本, 后 40 个样本为检验样本. 可以看出, 采用均值

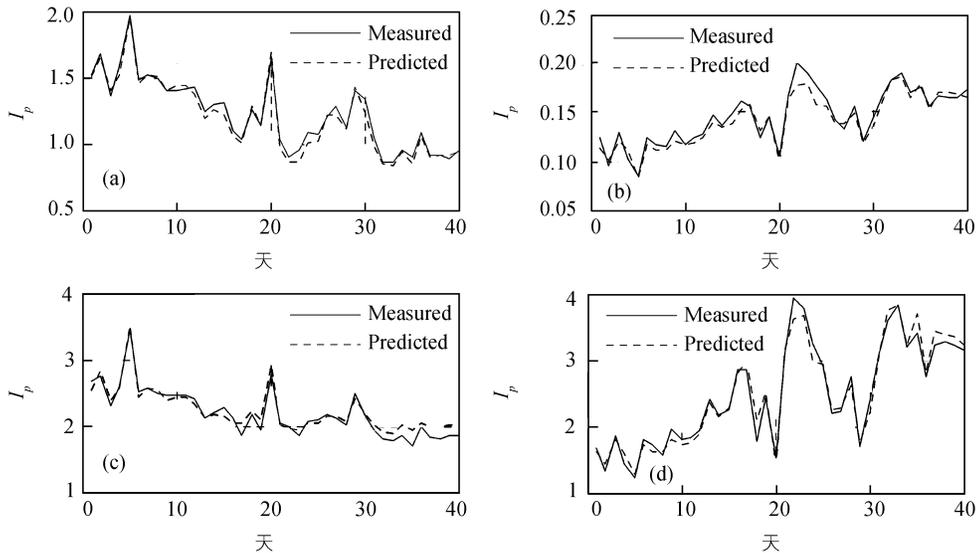


图 4 小波包能量谱与温度的多项式模型预测效果  
(a) 第 16 阶特征频带; (b) 第 22 阶特征频带; (c) 第 29 阶特征频带; (d) 第 30 阶特征频带

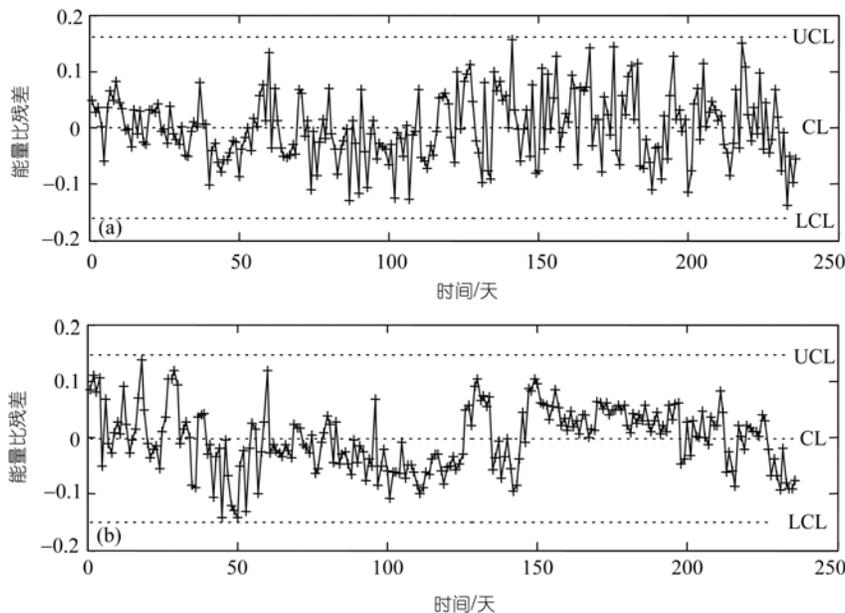


图 5 结构正常状态下的均值控制图  
(a) “正”影响频带; (b) “负”影响频带

控制图法可以直观地描述悬索桥实测小波包能量谱的变化情况, 并且通过多样本点的假设检验可以有效降低误判的概率。

### 2.3 季节相关性分析在结构损伤预警中的应用

小波包能量谱与温度的季节相关性分析应用于结构损伤预警的基本步骤如下。

1) 根据结构正常状态下的长期监测数据建立多项式统计模型, 计算各样本点特征频带能量比  $I_p$  的实测值与预测值的残差, 绘制均值控制图并且确定正常状态下的上、下限范围。

2) 将结构未知状态下的特征频带能量比和温度实测值作为待检验样本, 首先将温度实测值代入多项式模型得到能量比预测值, 然后计算特征频带能量比的实测值与预测值的残差并将这些未知状态的残差与正常状态的样本点绘制在同一幅图中。若所有样本点都落在界限范围内, 则认为该状态正常, 反之, 若未知状态的样本点明显偏离正常状态下的中心线, 并且有样本点落在界限范围外, 则判定结构发生异常, 从而实现结构的整体状态监测。

本文 3.1 节和 3.2 节建立了结构处于正常状态下的均值控制图, 如图 5 所示。为了考察均值控制图应用于结构损伤预警的效果, 对 3.1 节润扬大桥悬索桥

后 40 天样本的实测小波包能量谱按下式施加一定的变化, 用以模拟结构损伤对小波包能量谱的影响

$$I_{p,j} = I_{p,j}^a - \varepsilon \bar{I}_{p,j}^a, \quad (5)$$

式中,  $I_{p,j}^a$  是第  $j$  阶特征频带能量比的实测值;  $I_{p,j}$  为考虑损伤影响的特征频带能量比值;  $\varepsilon$  为用百分比表示的损伤程度;  $\bar{I}_{p,j}^a$  为第  $j$  阶特征频带能量比实测值的年平均值。  $\varepsilon$  分别取为 5% 和 10%。

根据(5)式计算后 40 天样本的特征频带能量比值并得到能量比实测值与预测值的残差, 在此基础上与正常状态下的测试样本一起绘制均值控制图。图 6 和 7 分别给出了“正”影响频带和“负”影响频带的均值控制图。可以看出, 结构损伤引起特征频带能量比发生 5% 的变化时, 采用“负”影响频带绘制的均值控制图无法明确判定结构发生异常; 而采用“正”影响频带绘制的均值控制图呈现一定的整体下降的变化, 且有少数样本已超出控制范围, 可以判定结构发生异常。当特征频带能量比发生 10% 的变化时, 无论是“正”影响频带或是“负”影响频带, 后 40 个样本均呈现较明显的整体下降的变化, 偏离了均值控制线, 且有部分样本已超出控制范围, 可以判定结构发生异常。根据上述分析, 采用均值控制图法可以较好地识别出悬索桥结构损伤引起的小波包能量谱 10% 的异常变化。

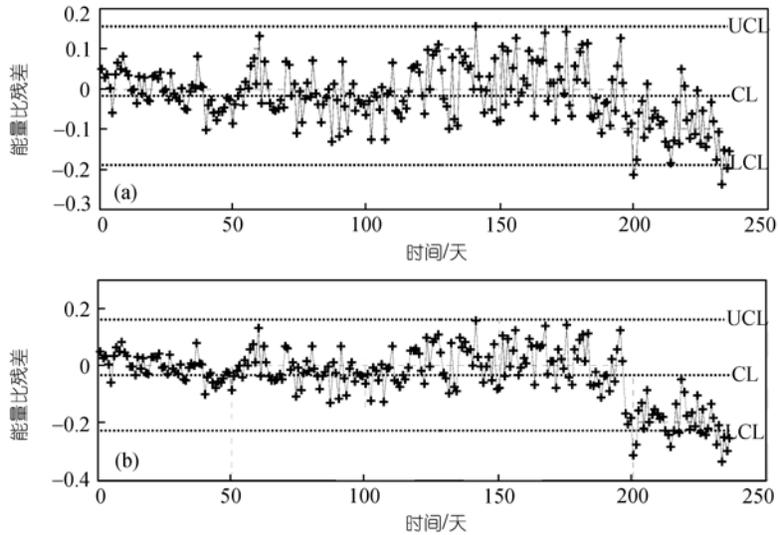


图 6 结构损伤状态下“正”影响频带的均值控制图  
(a) 5%的变化; (b) 10%的变化

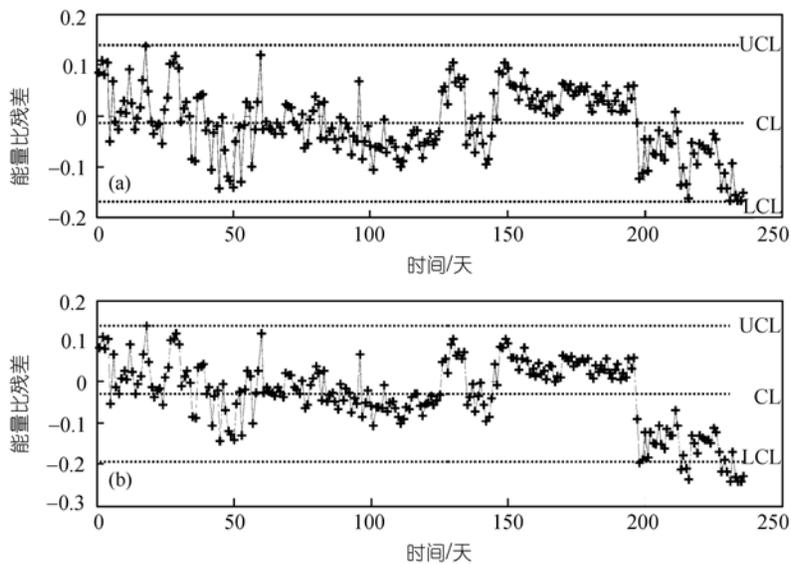


图 7 结构损伤状态下“负”影响频带的均值控制图  
(a) 5%的变化; (b) 10%的变化

#### 2.4 小波包能量谱与模态频率的比较

为了进一步说明小波包能量谱的损伤预警效果, 本文对上述236天的润扬大桥悬索桥的模态频率进行了识别. 图8给出了润扬大桥悬索桥主梁四阶反对称竖弯和五阶对称竖弯的模态频率日平均值与温度日平均值之间的季节相关性分析结果. 表2进一步给出了润扬大桥悬索桥实测模态频率的日平均值在236天中的最大值、最小值及其相对变化. 可以看出, 悬

索桥高阶竖弯振型的模态频率与温度之间呈现十分明显的季节相关性, 散点图比较集中. 在此基础上, 亦采用6次多项式模型建立模态频率 $f$ 与温度 $T$ 的回归公式, 并将模态频率实测值与预测值的残差定义为结构损伤预警指标

$$e = f_{m,i} - f_{e,i}, \quad (6)$$

式中,  $f_{m,i}$  和  $f_{e,i}$  分别为模态频率的实测值与预测值. 图9给出了润扬大桥悬索桥根据高阶模态频率计算的均

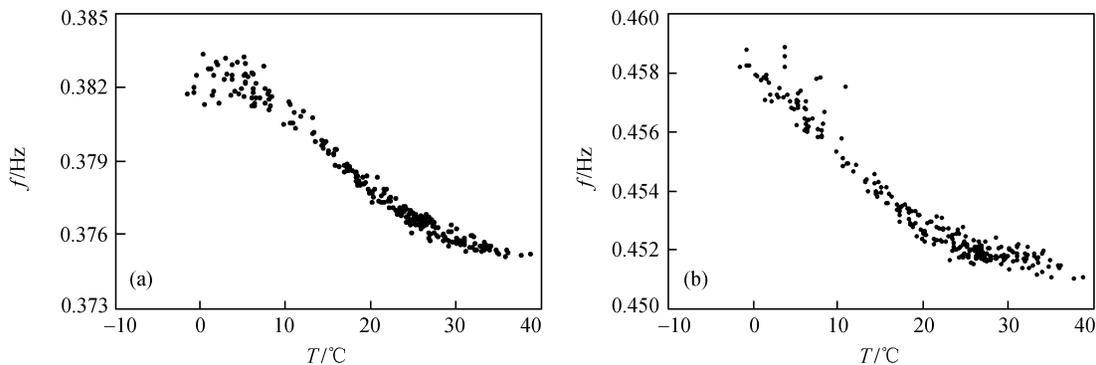


图 8 润扬大桥悬索桥模态频率与温度的季节相关性  
(a) 四阶反对称竖弯; (b) 五阶对称竖弯

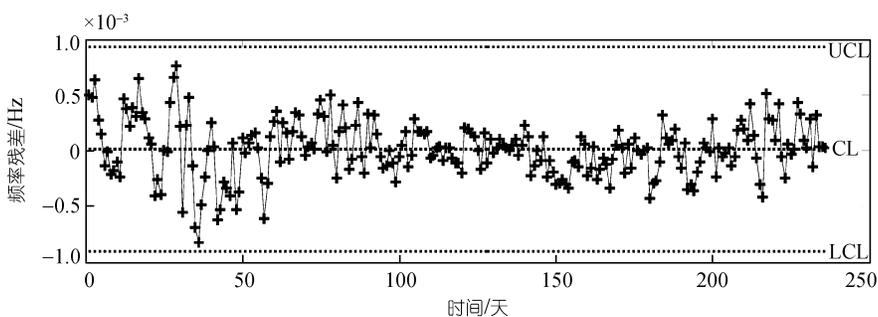


图 9 结构正常状态下的均值控制图

表 2 润扬大桥悬索桥实测模态频率的季节变化

振型阶数	主梁振型特点	最大值/Hz	最小值/Hz	相对变化/%
1	四阶反对称竖弯	0.3833	0.3751	2.186
2	五阶对称竖弯	0.4589	0.4510	1.752

值控制图. 图 9 中, 前 196 个样本为训练样本, 后 40 个样本为检验样本.

与小波包能量谱相类似, 对悬索桥后 40 天样本的实测模态频率按下式施加一定的变化, 用以模拟结构损伤对频率的影响

$$f_i = f_i^a - \varepsilon \bar{f}_i^a, \quad (7)$$

式中,  $f_i^a$  是第  $i$  阶模态频率的实测值;  $f_i$  为考虑损伤影响的模态频率值;  $\varepsilon$  为用百分比表示的损伤程度;  $\bar{f}_i^a$  为第  $i$  阶模态频率实测值的年平均值.  $\varepsilon$  分别取为 0.1% 和 0.2%. 根据(7)式计算后 40 天样本的模态频率值并得到模态频率的残差, 在此基础上与正常状态下的测试样本一起绘制均值控制图, 如图 10 所示. 可以看出, 结构损伤引起模态频率发生 0.1% 的变化时, 采用均值控制图无法明确判定结构发生异常; 而结

构损伤引起模态频率发生 0.2% 的变化时, 后 40 个样本呈现较明显的整体下降的变化, 偏离了均值控制线, 且有部分样本已超出控制范围, 可以判定结构发生异常. 因此, 采用均值控制图法可以较好地识别出悬索桥结构损伤引起的模态频率 0.2% 的异常变化.

比较本文 2.3 节和 2.4 节小波包能量谱和模态频率的损伤预警效果可知, 温度的季节变化可以引起模态频率发生平均约 2.0% 的变化, 运用均值控制图法可以较好地识别出结构损伤引起的模态频率 0.2% 的异常变化; 另一方面, 温度的季节变化可以引起小波包能量谱的特征频带能量比发生平均约 200% 的变化, 运用本文方法则可以较好地识别出结构损伤引起的能量比 10% 的异常变化. 因此, 与实测模态频率相比, 利用结构动力响应的小波包能量谱可以更敏感地发现大跨悬索桥结构振动特性的异常变化, 并且本文建立的统计模式识别方法可以有效地分离环境变化引起的损伤预警指标异常和结构损伤引起的异常, 且形象直观、应用简便, 适合于大跨桥梁结构的在线状态监测与损伤预警.

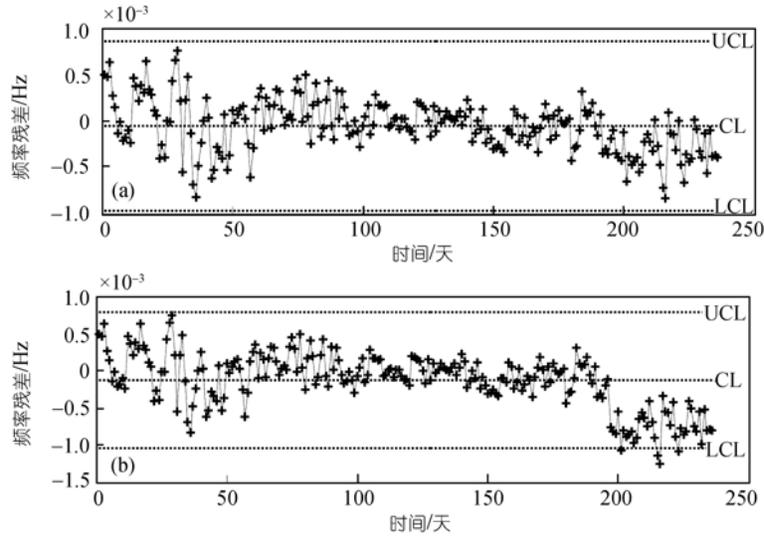


图 10 结构损伤状态下的均值控制图

(a) 模态频率 0.1% 的变化; (b) 模态频率 0.2% 的变化

### 3 结论

基于长期监测数据建立起客观的物理模型用以描述悬索桥环境温度与结构损伤特征参数之间的关系,在此基础上建立“环境条件归一化”的结构损伤预警方法,是大跨桥梁结构损伤预警技术面向实际工程应用的重要问题之一。

本文在小波包能量谱损伤预警方法的基础上,对润扬大桥悬索桥236天的小波包能量谱与温度实测数据进行了季节相关性研究。分析结果表明,润扬大桥悬索桥各阶特征频带能量比与温度具有明显的季节相关性,实测特征频带能量比的日平均值在一年

中随着季节的变化可以发生平均约200%的变化。在此基础上根据小波包能量谱与温度的季节相关性特征,采用6次多项式模型对特征频带能量比—温度进行了统计建模,并采用均值控制图法对特征频带能量比的异常变化进行了判别分类。分析结果表明,运用本文方法可以有效地消除温度的季节变化对悬索桥实测小波包能量谱的影响,较好地识别出结构损伤引起的能量比10%的异常变化,并且与实测模态频率相比,小波包能量谱可以更敏感地发现大跨悬索桥结构振动特性的异常变化,从而更适合于大跨桥梁结构的在线实时损伤预警。

### 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 [\[DOI\]](#)
- 2 李爱群, 缪长青, 李兆霞, 等. 润扬长江公路大桥结构健康监测监测系统研究. *东南大学学报(自然科学版)*, 2003, 33(5): 544—548
- 3 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. *中国公路学报*, 2006, 19(2): 67—73
- 4 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. *Eng Struct*, 2005, 27(12): 1762—1773 [\[DOI\]](#)
- 5 Hua X G, Ni Y Q, Ko J M, et al. Modeling of temperature-frequency correlation using combined principal component analysis and support vector regression technique. *J Comput Civ Eng*, 2007, 21(2): 122—135 [\[DOI\]](#)
- 6 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 [\[DOI\]](#)
- 7 Sun Z, Chang C C. Statistical wavelet-based method for structural health monitoring. *J Struct Eng*, 2004, 130(7): 1055—1062 [\[DOI\]](#)
- 8 丁幼亮, 李爱群, 刘涛. 润扬大桥斜拉桥实测响应的小波包分析及其环境变异性研究. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2008, 38(11): 44—54
- 9 Ding Y L, Li A Q. Structural health monitoring of long-span suspension bridges using wavelet packet analysis. *Earthquake Eng Vib*, 2007, 6(3): 289—294 [\[DOI\]](#)
- 10 Fuqate M L, Sohn H, Farrar C R. Vibration-based damage detection using statistical process control. *Mech Syst Signal Proc*, 2001, 15(4): 707—721 [\[DOI\]](#)