

环境因素对斜拉桥模态频率影响的周期特性

孙利民¹, 周 毅¹, 谢大圻²

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 上海东海大桥管理有限公司, 上海 201308)

摘要: 利用东海大桥主航道斜拉桥 5 年的结构健康监测以及收费站数据, 从周期性的角度研究了温度、交通荷载对结构竖弯、侧弯基频以及高阶频率的影响规律, 并在 1 年, 1 周, 1 天和 0.5 天模态频率变化的主要周期上通过逐步回归分析比较了温度、交通荷载对结构频率变化的影响程度。结果表明, 温度、交通荷载和结构频率的变化存在明显的周期特征, 且在不同的时间周期温度和交通荷载对频率变化的影响程度不同。基于长期实测数据的分析有助于加深对结构频率变化特性的理解, 并把握其周期性变化规律, 从而对结构状态进行更准确地评估。

关键词: 桥梁工程; 周期特性; 模态频率; 环境因素; 数据解释

中图分类号: TU311

文献标志码: A

Periodic Characteristics of Environmental Effects on Modal Frequencies of a Cable-stayed Bridge

SUN Limin¹, ZHOU Yi¹, XIE Daqi²

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Donghai Bridge Management Co. Ltd., Shanghai 201308, China)

Abstract: Based on a 5-year field measurement data from the structural health monitoring system and the toll gate of Donghai Bridge (DHB), this study focuses on the dependency of the structural frequencies, including the first vertical/lateral bending modes as well as the higher modes, on the temperature and traffic loading in the prospect of periodic characteristics. The environmental effects on the frequency variation are compared by the stepwise regression analysis on such dominating periods as 1 year, 1 week, 1 day and 0.5 day. Results of this study show that the variations of temperature, traffics and modal frequencies have some long period components, and the relative importance of temperature and traffics is different for each individual

period. Based on the long-term field measurement data, the analysis herein can advance the understanding on the periodic variation of structural frequencies, and may lead to more reliable assessment of structural conditions.

Key words: bridge engineering; periodic characteristics; modal frequency; environmental factors; data interpretation

近 20 年来,随着结构健康监测技术广泛应用于大跨度桥梁工程,基于监测系统实测数据的结构状态评估成为了研究热点。模态频率在理论上与结构的物理参数(如刚度、质量、阻尼等)存在直接的函数关系而且易于从环境振动响应中以较高精度测得,因而成为了最常用的评估结构整体状态的动力学指标之一。然而,实际结构的模态频率除与结构的损伤有关外,还会受到温度、风荷载、交通荷载等因素的影响(本文统称环境因素影响),其影响程度甚至可能会超过结构轻微损伤对模态频率的影响程度。与不确定性很强的结构损伤相比,环境因素的变化具有一定的规律性,因此通过研究结构动力特性与环境因素的关系,找出其相关性,就有可能从实测的结构频率变化中剔除环境因素影响的部分,从而更准确地评估结构损伤的影响。

有关结构频率与环境因素的相关性研究大多基于现场实测数据^[1]。研究对象从早期的小跨度混凝土桥,如 Alamosa Canyon 桥^[2]、Z24 桥^[3],逐渐扩展到大跨度缆索承重桥,如青马大桥^[1]、汀九大桥^[4]、Tamar 大桥^[5]、润扬大桥^[6]、永和大桥^[7]、东海大桥^[8]等;考虑的环境因素从最初的单一温度效应拓展到交通流^[9]、风速^[10]及其效应组合^[7, 11-12];建模方法从简单回归分析^[6]发展到高级智能算法如支持向量机^[13]、非线性主成分分析^[7]等方法。除了基于现场实测,还有一些关于温度-频率关系的实验室实验研

收稿日期: 2014-09-25

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2013CB036305)

第一作者: 孙利民(1963—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要从事结构健康监测与振动控制研究。E-mail: lmsun@tongji.edu.cn

通讯作者: 周毅(1986—),男,博士生,主要从事结构健康监测研究。E-mail: zhouyi8659@126.com

究^[1, 14]以及有限元分析^[15-16]. 目前的研究取得了一定的共识,比如认为温度主要通过改变材料弹性模量影响频率,但由于环境因素的作用效应复杂,在影响机理层面形成的共识并不多. 另外,相比于温度效应,对交通荷载和风荷载影响的研究还较少. 随着实桥结构健康监测数据的不断积累,有必要对环境因素的影响规律进行更深入的研究,并建立可对其进行定量描述的数学模型.

众所周知,结构所受到的外部环境作用(如温度、交通荷载)自身具有周期性变化的特征,因而由此造成结构特性的变化也具有周期性. 但不同的影响因素,其主要的周期应该是不同的,在每个周期上的影响程度也应不同. 长期监测的数据有助于发现环境作用与结构动力特性(如模态频率)变化的典型周期,以及在各种典型周期尺度上环境因素影响程度的强弱,进而选择更为合适的方法和参数,建立依存于不同周期成分结构动力特性变化的预测模型.

早期的研究根据东海大桥的结构健康监测数据,分析了结构温度、空气湿度、累积降雨量、桥面风速/风向、海面高度、交通荷载等环境因素对结构频率变化的影响^[8, 12],结果表明:湿度、累积降雨量、海面高度与结构频率的关联性很弱,风速/风向只在强风时段(几小时的尺度)有重要影响,而温度和交通荷载则是影响结构频率长期变化的主要因素. 限于篇幅,本文重点讨论温度、交通荷载对东海大桥主航道斜拉桥固有振动频率的影响. 所研究的结构振动模态对象选择了通常更受关注的 3 Hz 以下的低阶频率范围. 采用频域分析方法,对桥梁结构频率和环

境因素变化的主要周期成分进行了研究,在与自然规律和交通车辆运营规律相吻合的周期尺度上(如 1 年,1 周,1 天,0.5 天),通过回归分析比较了温度、交通荷载与结构频率变化的相关性,并对其影响机理进行了初步探讨.

本文以揭示结构频率变化及其影响因素的周期性特性为主要研究目的,为今后的环境因素影响规律建模奠定基础. 研究采用了长达 5 年的监测数据,无疑可以减小统计结果的不确定性,把握结构频率的长周期变化规律,有利于对监测现象进行更为客观的分析.

1 东海大桥及其健康监测系統概况

东海大桥是一座连接上海与洋山集装箱深水港的跨海大桥,全长 32.5 km,于 2005 年 12 月建成通车,其主通航孔为主跨 420 m 的双塔单索面叠合梁斜拉桥(图 1). 该桥气候和交通环境独特,相对于热带地区的桥梁,桥址区四季分明,季节温差大;大桥交通荷载以重载集装箱卡车(集卡)为主,荷载水平显著高于常规公路桥梁. 为了对养护管理提供技术支持以保障大桥的安全畅通,东海大桥安装了结构健康监测系統^[17],从 2006 年底开始,连续、实时地监测大桥的动力、静力响应及环境作用. 主航道斜拉桥上的温度、振动测点如图 1 所示,其中共有 50 个温度传感器分布在主梁的 4 个截面上,包括桥面气象站中的大气温度计、箱梁内空气温度计、钢结构温度计、混凝土结构温度计、以及应变补偿用温度计等,采样频率分 1 Hz 和 10 Hz 两种;共有 22 个加速度

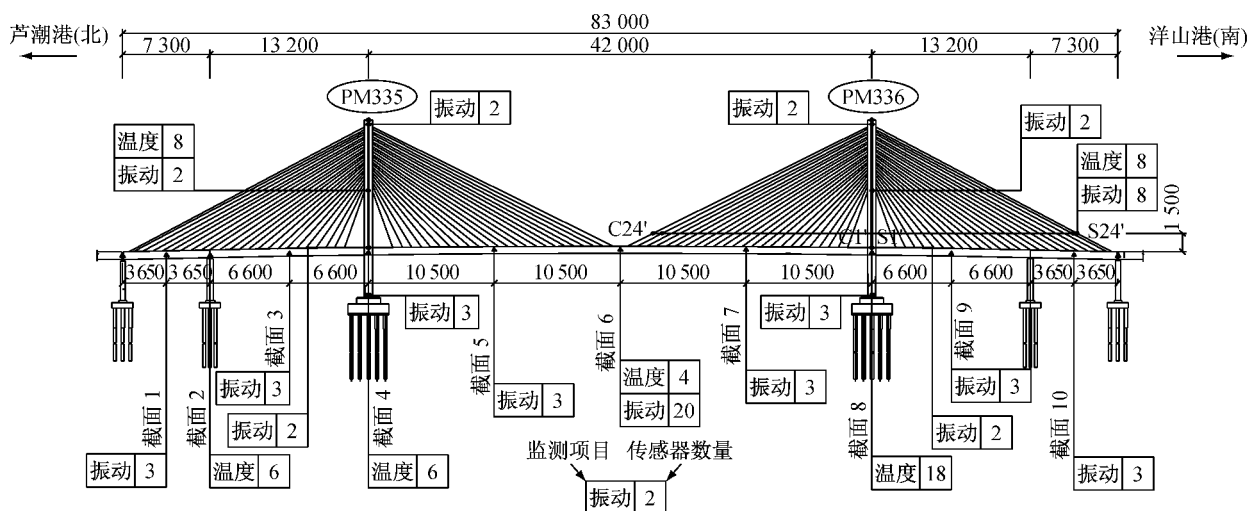


图 1 主航道斜拉桥上的温度、振动测点布置图 (单位: cm)

Fig.1 Layout of temperature and vibration sensors on DHB (unit: cm)

传感器分布在主梁的 7 个截面上,采样频率均为 50 Hz.

2 数据分析方法

本文采用 2007—2011 年共 5 年的监测数据,为了保证数据的连续性,对于因监测设备故障而产生的数据错误或短期缺失采用线性插值法进行了补充,并对 5 年数据进行了滑动平均和减采样处理,最终得到样本时间间隔为 1 h 的 5 年连续数据.

研究中,采用功率谱分析确定频率、温度、交通荷载的主要周期,通过互相关函数估计温度与结构响应之间的时间滞后;在此基础上,利用具有线性相位的 FIR 带通滤波器分离出各个周期成分的时程;最后,在各主要周期上,对经中心化和标准化处理后的数据采用逐步回归法建立结构模态频率与温度和等效交通荷载关系的回归方程,通过比较回归系数的绝对值大小确定各因素对结构频率影响程度的强弱,见图 2.

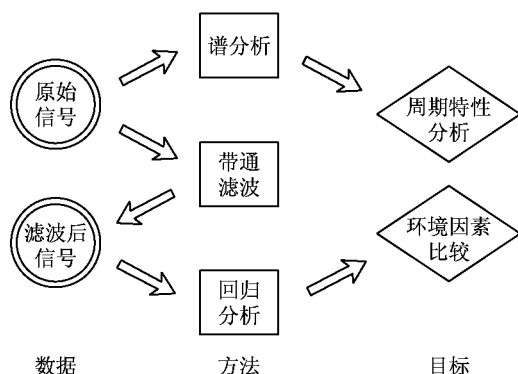


图 2 分析方法

Fig.2 Analysis process

3 监测数据

3.1 温度场

东海大桥主航道斜拉桥主梁上布有多个温度测点,表 1 列出了主要温度测点之间的相关系数,可见在年尺度上主梁纵向各断面温度测点间的相关性很强.温度变化的时程数据显示,主梁顶板混凝土温度滞后于底板钢结构温度约 7 h,但它们的时程波形相近,因此以下研究中采用跨中混凝土温度传感器(截面 6)的数据作为结构温度状态的代表值.

需要说明的是,在短时间尺度上结构温度场的不均匀性明显增加,而一些结构响应必须考虑非均

匀温度场的影响,如斜拉桥跨中挠度的变化^[18]等.不过由于影响机理复杂、测点有限等原因,非均匀温度场与结构频率的关系较为复杂,本文不做进一步讨论.

表 1 温度相关系数表(2007 年)

Tab.1 Correlation coefficient of temperature in 2007

相关系数	截面 2	截面 4	截面 6	截面 8
顶板(砼) 截面 6	0.998 2	0.989 5	1	0.991 3
底板(钢) 截面 6	0.999 3	0.996 5	1	0.997 2

注:各截面位置见图 1

3.2 交通荷载

交通荷载是影响结构频率变化的主要因素之一^[8, 12].但遗憾的是,东海大桥健康监测系统中未设动态称重仪对交通荷载进行直接监测.为弥补这一缺失,研究采用主梁中跨 1/4 处的响应加速度均方根(RMS)值 R 来等效交通荷载的效应. R 根据式(1)获得

$$R = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (1)$$

式中: x_i 是监测截面 7 上的竖向或侧向加速度数据; N 为样本数;每个样本统计时长为 1 h.主梁加速度响应除了受交通荷载影响外,风荷载、大地脉动等也是可能因素.但与交通荷载相比,风荷载的影响只体现在强风时的短暂期间;另外,现场环境振动试验的经验也说明地脉动的影响程度要远低于交通荷载.因此,后两者的影响是可以忽略的.

另外,如图 3 所示,来自收费站的每日双向车流量数据与竖向、侧向响应加速度 R 值的日平均值存在明显的正相关性.且在黄金周休假期间,由于车流量骤减,主梁加速度响应 R 值也同步减小.这些现象都可从不同侧面佐证“用主梁加速度均方根值 R 来等效交通荷载”这一假定的合理性.

东海大桥为连接洋山深水港和上海的唯一陆上通道,其交通车辆以集卡为主.图 4 展示了大桥每月双向总车流量及集卡流量的变化(从 2011 年 4 月起,收费站未对集卡单独计数,所以两线重合).在总车流量和集卡流量分别计数的 51 个月中,集卡构成了车流量的 80%.值得注意的是,交通流量除了存在逐年增加的趋势外,也表现出“夏季大,冬季小”的年周期变化规律,这一现象与洋山港的货物吞吐量有关.

3.3 桥梁结构模态频率

基于主梁上的实测加速度数据采用峰值拾取(PP)法识别主航道斜拉桥的模态频率.目前常用的

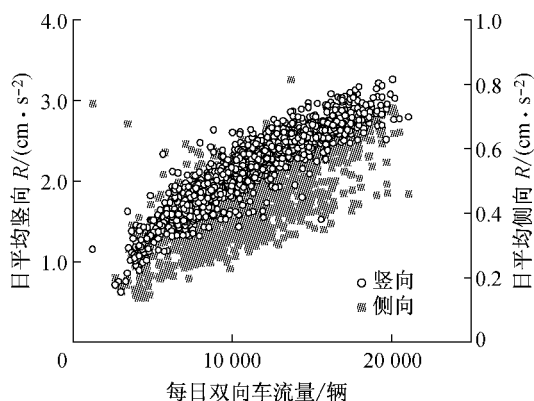


图 3 加速度均方根值 Vs 车流量

Fig.3 Acceleration RMS Vs traffic volume

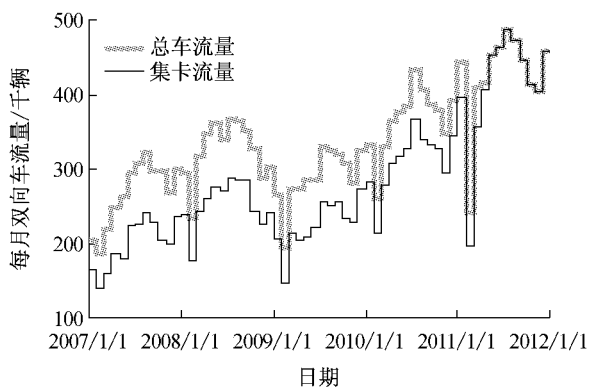


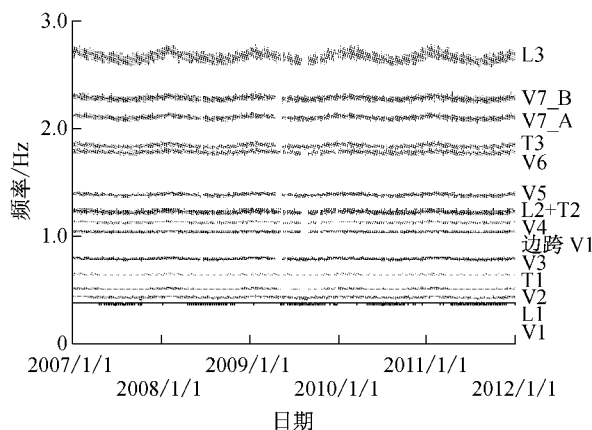
图 4 每月交通量时程图

Fig.4 Monthly traffic volume

频率识别方法包括峰值拾取(PP)法、频域分解(FDD)法、随机子空间(SS1)法、特征系统实现(ERA)法、小波(Wavelet-based)法、经验模态分解(EMD-based)法等。每种方法均有各自的优缺点,本文研究的动力特性以结构频率为主,所关心的频率范围内无重频、密频现象,因此采用了桥梁模态试验最常用的 PP 法。在对环境影响因素的分析研究中,

本文关注的主要是结构频率的变化而非结构频率自身,因此,即使结构频率的识别存在系统误差,对环境因素周期特性的影响也不大。

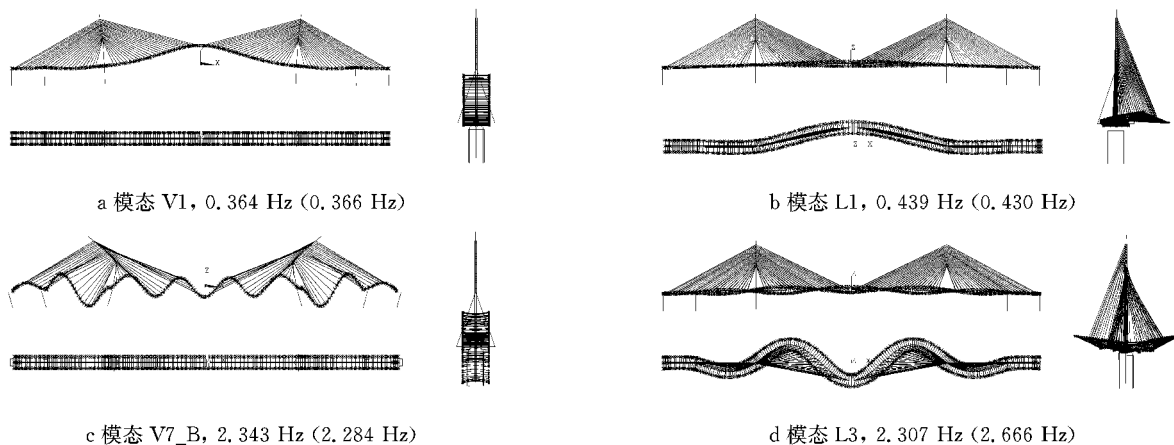
在 0~3 Hz 范围内以主梁振动为主的 15 阶模态的频率识别结果如图 5 所示。2007~2011 年 5 年中东海大桥主航道桥的模态频率随时间呈现明显的周期性变化。本文选择频率较低的主梁第 1 阶竖弯模态(V1)和第 1 阶侧弯模态(L1),以及频率较高的主梁第 7 阶竖弯模态(V7_B)和第 3 阶侧弯模态(L3)为代表,分别讨论不同范围的结构模态频率随环境因素的变化规律。如图 6 所示为通过经修正的有限元模型计算所得的 4 阶模态的振型和频率,作为比较,图中也列出了相关模态 5 年中实测频率(每小时 1 点)的平均值,除较高阶的第 3 阶侧弯模态(L3)外,两者吻合较好。



① V:竖弯; L:侧弯; T:扭转; 数字表示阶次; ② V7_A 和 V7_B 的差别是边跨的相位不同; ③ L2(1.219 7 Hz)和 T2(1.223 1 Hz)的频率很接近,图中难以区分

图 5 主航道斜拉桥模态频率时程

Fig.5 Time histories of modal frequencies of DHB



* 括号中为实测 5 年频率均值

图 6 主航道桥代表模态振型与频率

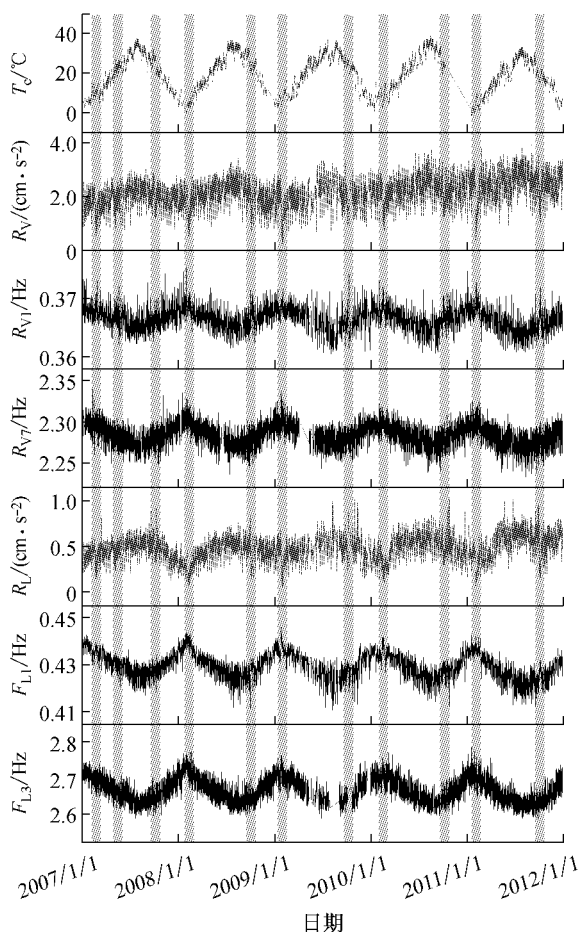
Fig.6 Representative modes and frequencies of DHB

在后续进行相关性分析和逐步回归分析时,本文采用了中心化和标准化的方法,将参与计算的样本化为均值为0,方差为1的量纲为一序列,以减少因数量级差距而带来的计算误差。

4 结构频率的变化规律

4.1 时域相关性分析

以 $T_C, R_V, R_L, F_{V1}, F_{L1}, F_{V7}, F_{L3}$ 分别表示混凝土结构温度、竖向等效交通荷载(竖向响应加速度的均方根值)、侧向等效交通荷载(侧向响应加速度的均方根值)、主梁中跨第1阶竖弯频率、第1阶侧弯频率、第7阶竖弯频率和第3阶侧弯频率。图7展示了温度、等效交通荷载和桥梁结构频率的5年变化时程,可见,各监测量的年重复性较好,等效交通荷载的平均值随时间略有增长,与大桥通车后交通量逐年增加的趋势一致。在年周期上,结构频率与温度、等效交通荷载呈反相关关系。



注:图中阴影代表春节和“十·一”黄金周,以及2007年的“五·一”黄金周

图7 主航道斜拉桥温度、等效交通荷载、结构频率时程图
Fig.7 Evolutions of temperature, equivalent traffics and modal frequencies of DHB

基于5年数据进行温度与结构频率的相关性分析,得到混凝土结构表面温度 T_C 与主梁竖弯频率 F_{V1}, F_{V7} 和侧弯频率 F_{L1}, F_{L3} 的相关系数分别为 $-0.62, -0.65, -0.77$ 和 -0.79 ; 竖向等效交通荷载 R_V 与竖弯频率 F_{V1}, F_{V7} 的相关系数分别为 -0.61 和 -0.43 ; 侧向等效交通荷载 R_L 与侧弯频率 F_{L1}, F_{L3} 的相关系数分别为 -0.68 和 -0.47 。可见结构各阶频率变化与温度变化的相关系数均较为相近,而与交通荷载变化的相关系数中,低阶模态频率要大于高阶模态频率。结构频率变化滞后混凝土结构表面温度变化 $5 \sim 6$ h,而与等效交通荷载的同步性较好。在第5节的逐步回归分析中,为消除结构频率变化与温度变化间的时间滞后影响,对温度数据进行了时间平移处理。

4.2 频域特性分析

为了进一步观察环境因素和结构频率变化的周期特性,对5年的监测时程数据进行了谱分析。作为影响因素的混凝土温度 T_C ,等效交通荷载 R_V, R_L 和作为结构响应的结构模态频率 $F_{V1}, F_{V7}, F_{L1}, F_{L3}$ 的功率谱密度(PSD)如图8所示,从中可以发现它们

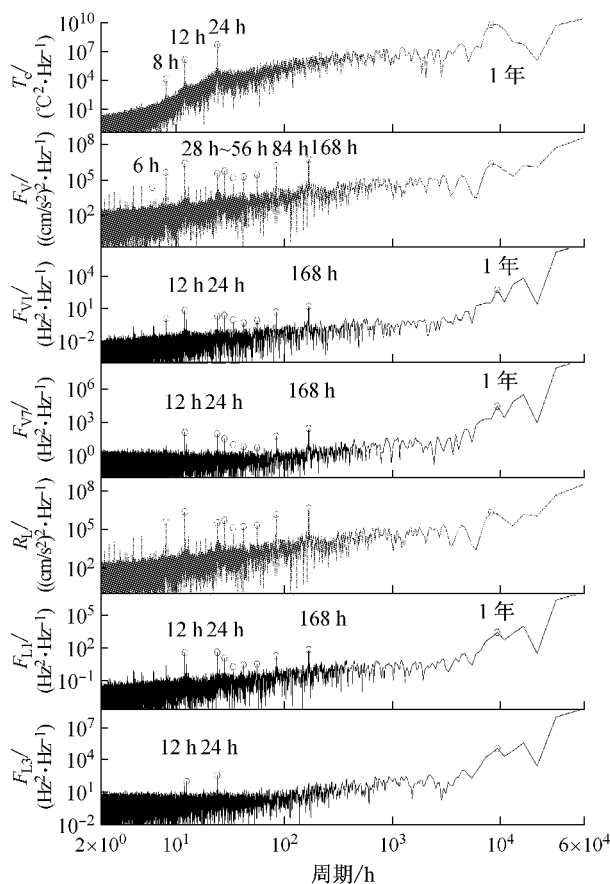


图8 主航道斜拉桥温度、等效交通荷载、结构频率功率谱密度图

Fig.8 PSD of temperature, equivalent traffics and modal frequencies of DHB

各自具有一系列鲜明的周期成分,而且结构频率和影响因素的周期成分之间存在着对应关系.这一现象说明,环境温度、交通荷载等影响因素具有固有的变动周期,由此造成结构模态频率的变化也表现出相同的周期成分,但在不同的周期成分上,不同环境因素的影响程度是不同的.

表 2 给出了结构温度、等效交通荷载以及结构频率等物理量的主要周期,其中结构频率的变化周期 1 周,1 d 与人们的作息周期吻合,1 年,1 d 是气温变化的周期,0.5 d 对应上下班的早晚交通高峰.需要指出的是,84 h,56 h,42 h,33.6 h,28 h 等变化周期分别是 1 周(168 h)成分的 2~6 次谐波;同样,12 h,8 h,6 h,4.8 h,4 h 也是 1 d(24 h)的 2~6 次谐波.这是由于,这些物理量的周期变化时程波形并非严格的简谐波,1 年,1 周,1 d 和 0.5 d 的真实周期成分如按傅里叶级数展开,会在频域中产生一系列的高阶谐波分量.

表 2 各物理量的主要周期

Tab.2 Predominant periods of signals

周期	T_C	R_V	F_{V1}	R_L	F_{L1}
1 年	9 362.3	8 192.0	13 107	8 192.0	9 362.3
1 周	—	168.0	168.0	168.0	168.0
	—	84.0	84.0	84.0	84.0
	—	56.0	56.0	56.0	56.0
	—	42.0	42.0	42.0	42.0
	—	33.6	33.6	33.6	33.6
	—	28.0	28.0	28.0	28.0
1 d	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0
0.5 d	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0
	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
	—	4.8	4.8	4.8	4.8
	—	4.0	4.0	4.0	4.0

4.3 温度影响

由图 8 可见,温度变化的主要周期有 1 年和 1 d,结构频率变化中存在与此对应的周期成分.由于仅采用了 5 年的数据长度,温度变化的年周期峰值不如天周期峰值明显,但年周期所对应的能量远大于天周期,这是因为温度的年变化幅度大于天变化幅度.

4.4 交通荷载影响

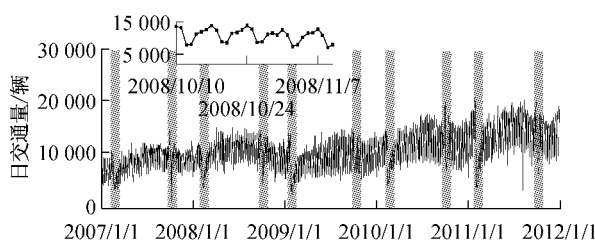
等效交通荷载变化的主要周期有 8 760 h(1 年),168 h(1 周),24 h(1 d)和 12 h(0.5 d),同样从结构频率 F_{V1} , F_{V7} , F_{L1} 的变化中可以找到与此对应的周期成分(图 8).但高阶侧弯频率 F_{L3} 未能找到 168 h 的变化周期,可能与交通荷载激励的方向性有关,有待今后进一步研究.

为了更真实地了解交通荷载的周期特性,调研了东海大桥收费站的每日车流量数据.图 9 为每日双向车流量时程及功率谱密度图.将图 7 和图 9 对比可见,在国庆、春节等黄金周长假期间车流量明显下降,与此相对应,桥梁主梁振动响应加速度均方根值也相应下降、结构模态频率相应上升.功率谱密度图显示,东海大桥每日双向车流量存在 168 h 的变化周期及其谐波分量(84 h,56 h).需指出的是,由于交通量每天仅一个数据,根据 Nyquist 定理,周期小于 48h 的成分无法从图中得到.

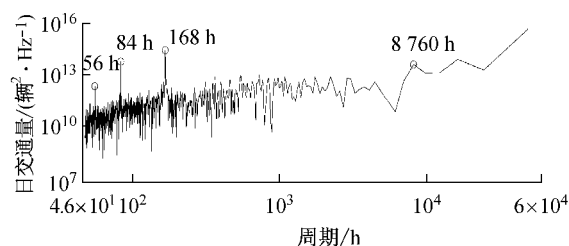
另外,由图 8 可见,交通荷载变化的 12 h 周期成分的能量大于 24 h 成分,这是交通荷载存在早晚高峰的缘故.东海大桥作为连接上海和洋山港的唯一陆路通道,进入洋山港的集装箱卡车需原路返回上海,24 h 内存在早晚高峰.

交通荷载变化所具有的 1 周周期成分在温度的变化中并未出现,因此可以断定交通荷载是 1 周周期成分上影响结构频率的主要因素.交通荷载在 1 周和半天周期上的能量大于在 1 年周期上的能量,而结构频率 F_{V1} , F_{V7} , F_{L1} , F_{L3} 在 1 年变化周期上的能量大于在其他主要周期上的能量,这表明结构频率变化除了受到交通荷载的影响外,还与温度变化的影响有关.

根据相关分析和谱分析的结果可初步判断,结构模态频率的变化与温度、交通荷载均密切相关,1 年,1 周,1 d 和 0.5 d 等周期应是分析中重点考虑的时间周期.



a 时程



b 功率谱

图 9 东海大桥的日交通量时程、功率谱密度图

Fig.9 Daily traffic volume and its PSD of DHB

5 模态频率在各周期上的回归分析

由前文分析可知,温度、交通荷载都是影响斜拉桥频率长期变化的主要环境因素,其影响规律具有明显的周期特性,不同影响因素所表现出的主要影响周期也是不同的.在某些周期成分上,结构频率可能会受到温度和交通荷载两种因素的同时影响,这种情况下,有必要分析不同因素对结构频率变化的贡献程度,以便在建立模型时对各因素的权重有正确的评价.

通过带通滤波对结构频率、温度、等效交通荷载的主要周期成分进行了分离,得到单一周期成分的时程波形,然后对应每一个主要周期建立逐步回归方程,并通过回归系数绝对值的相对大小,比较温度、交通荷载在不同变化周期上对结构频率的影响程度.带通滤波的意义在于使参与回归的自变量和因变量在相同的时间尺度上对应起来,避免因自变量在不同时间尺度上贡献的差异而使比较失去公平.

5.1 逐步回归分析

采用逐步回归分析来建立结构模态频率与温度和等效交通荷载的回归方程.假定其影响符合线性叠加关系,可以表示为

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \epsilon \quad (2)$$

式中:因变量 y 表示按某一周期变化的结构模态频率序列;自变量 x_1 和 x_2 分别是按相同周期变化的温度和等效交通荷载序列.在由最小二乘法估计出回归系数 $\beta_0 \sim \beta_2$ 后,通过 F 检验和 t 检验分别对总体回归方程的估计 $\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + e$ 的效果和各个自变量 x_i 的作用进行显著性检验,并根据检验的结果决定是否移除某个自变量.

对于回归方程的检验方法,给出原假设 $H_0: \beta_1 = \beta_2 = 0$,若 H_0 成立,则回归方程无意义,统计量

$$F = \frac{U/m}{Q/(n-m-1)}$$

将服从自由度为 m 和 $n-m-1$ 的 F 分布,此处回归平方和 $U = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$,残差平方和 $Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$,自由度 $m = 2$, n 是样本容量.给定显著性水平 α ,若计算值 $F > F_{1-\alpha}$,则拒绝原假设,认为回归方程有显著意义.

对于自变量 x_i 显著性的检验方法可以采用 t 检验,给出原假设 $H_0: \beta_i = 0$,构造统计量 $T_i = \frac{b_i}{S_{b_i}}$,其中

b_i 是自变量 x_i 的系数 β_i 的估计值, S_{b_i} 为 b_i 的标准误.统计量 T_i 服从自由度为 $n-m-1$ 的 t 分布.给定显著性水平 α ,若计算值 $|T_i| > t_{1-\alpha/2}$,则拒绝原假设,认为自变量 x_i 的增加显著改善了对因变量 y 的预测效果^[19].

选用 2007~2008 年共 15 000 h 的连续数据进行分析,其中模态频率作为因变量 y ,混凝土温度和等效交通荷载作为自变量 x_1 和 x_2 .回归系数的结果如表 3 所示,变量的上标 n 表示数据经过了标准化处理.

下面以 1 d 的周期成分为例对回归过程进行说明.第 1 阶主梁竖弯频率 F_{v1}^n 与混凝土温度 T_c^n 和竖向等效交通荷载 R_v^n 的回归方程为:

$$F_{v1}^n = -0.497 \times T_c^n - 0.571 \times R_v^n + \epsilon \quad (3)$$

在显著性水平 $\alpha = 0.01$ 的条件下,该回归方程的 F 统计量为 17 455.2,通过了显著性检验.对每一个回归自变量而言, T_c^n 和 R_v^n 对应的 t 统计量分别为 -107.62 和 -125.56,也都通过了显著性检验,这说明在显著性水平 $\alpha = 0.01$ 的条件下,混凝土温度和等效交通荷载对频率 F_{v1} 变化的影响显著.通过比较回归系数(-0.497 和 -0.571)的绝对值大小,可以发现第 1 阶主梁竖弯频率对于温度和交通荷载的敏感程度大致相当,而且均呈反相关关系.

回归方程式(3)的均方根误差 $E = 0.549$ (E 越接近 0 说明模型的拟合效果越好),可见拟合效果尚不十分理想,反映出基于实测数据的建模是一项难度较大的工作.

5.2 结果讨论

表 3 列出了在 1 年,1 周,1 d 和 0.5 d 4 个不同时间周期上的回归分析结果.表中所有的回归系数均为负数,说明温度、交通荷载的增加会引起结构频率的降低;最后一列备注了根据回归系数比较得出的温度、交通荷载对结构频率影响程度的相对关系.可见在不同周期上它们的影响程度不同:温度是 1 年周期上的主导因素;交通荷载是 1 周,0.5 d 周期上的主导因素;而在 1 d 的周期上两者影响程度大致相当.

已有研究认为,温度对结构频率的影响主要源于对材料特性的改变;在桥梁边界条件不变的前提下,由热胀冷缩引起的结构几何尺寸的变化对模态频率的影响微小^[1].混凝土、钢等结构材料的弹性模量随温度升高而减小是温度与结构频率变化呈现反相关关系的主要原因.根据文献[1]中的公式所估计得到的东海大桥主航道桥频率的相对变化量与实测

表 3 多元线性回归结果汇总表

Tab.3 Summary of stepwise regressions

周期	模态	回归系数		备注
		$\beta_1 < T_C^u >$	$\beta_2 < R_V^u/R_L^u >$	
1 年	F_{V1}^u	-0.848	-0.178	温度影响更大
	F_{V7}^u	-0.929	-0.072	
	F_{L1}^u	-0.768	-0.214	
	F_{L3}^u	-0.795	-0.192	
1 周	F_{V1}^u	-0.145	-0.889	除 F_{L3} 外, 交通荷载影响更大
	F_{V7}^u	-0.240	-0.795	
	F_{L1}^u	-0.251	-0.760	
	F_{L3}^u	-0.681	-0.232	
1 d	F_{V1}^u	-0.497	-0.571	温度、交通荷载的影响大致相当
	F_{V7}^u	-0.636	-0.223	
	F_{L1}^u	-0.685	-0.383	
	F_{L3}^u	-0.570	-0.190	
0.5 d	F_{V1}^u	-0.037	-0.717	交通荷载影响更大, 尤其是低阶模态
	F_{V7}^u	-0.187	-0.554	
	F_{L1}^u	-0.046	-0.813	
	F_{L3}^u	-0.092	-0.144	

结果基本处于同一数量级。

交通荷载与结构频率变化的反相关关系可能存在两种机理:一是交通荷载增加了结构的附加质量;二是由于结构的非线性特性,当振动幅度增加时系统刚度减小,从而引起频率下降。虽然从附加质量的角度可以解释部分实测现象(如交通荷载与主梁竖弯和侧弯基频 F_{V1} , F_{L1} 具有相同的主要变化周期),但是不能解释高阶侧弯频率 F_{L3} 缺少 1 周的变化周期的现象。考虑到交通荷载激励具有方向性,这一现象可能与结构频率的振幅依赖性有关。

环境因素对结构行为的影响是非常复杂的,对其影响机理进行严密的揭示并非易事。有待今后更深入的研究。

6 结论

基于东海大桥健康监测系统 2007~2011 年的监测数据,研究了温度、交通荷载等环境因素对主航道斜拉桥模态频率变化的影响规律,并特别关注了其周期特性,为下一步建立运营条件下结构模态频率变化的统计预测模型打下了基础。本文主要结论如下:

(1) 对于东海大桥主航道斜拉桥,温度和交通荷载是在长时间尺度上影响结构频率变化的主要因素;温度、交通荷载和结构频率的变化都存在明显的周期特征:温度变化存在 1 年和 1 d 的主要周期,交通荷载变化存在 1 年,1 周,1 d 和 0.5 d 的主要周期;与此相对应,结构频率也以 1 年,1 周,1 d 和 0.5

d 的周期变化。环境因素和结构频率的变化时程并非单纯简谐函数,因此在频域上,其功率谱密度函数除了真实周期的成分外,也鲜明地显现了高阶谐波分量成分。

(2) 通过对数据进行带通滤波处理,在各主要周期上对环境影响因素和结构响应频率的相关关系进行逐步回归分析,结果表明,温度和交通荷载在不同周期上对结构频率变化的影响程度不同:1 年的周期上,温度的影响大于交通荷载;1 周的周期上,交通荷载对竖弯频率以及侧弯基频的影响大于温度;1 d 的周期上,两者影响程度大致相当;而在 0.5 d 的周期上以交通荷载的影响为主。

(3) 为提高评估精度,在不同的评估时间尺度上应重点考虑的环境因素不同,采用的统计预测模型也应不同。当采用回归模型对结构进行评估时,如果两种环境因素在不同的周期上影响评估指标,那么首先回归对评估时间尺度影响大的环境因素比较合适;如果两种环境因素在相同的周期上影响评估指标,那么应对它们同时进行多元回归,以免低估后回归因素的影响。值得一提的是,对于评估指标无法连续追踪的定期间隔测试而言,理解环境因素变化的周期特性将有助于对结构状态的正确判断。下一步工作将对环境因素影响频率的机理进行更深入的研究,并结合实测数据建立正常运营环境条件下结构模态频率变化的统计预测模型。

参考文献:

- [1] Xia Y, Chen B, Weng S, *et al.* Temperature effect on vibration properties of civil structures: a literature review and case studies[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2012, 2(1): 29.
- [2] Sohn H, Dzwonczyk M, Straser E G, *et al.* An experimental study of temperature effect on modal parameters of the Alamosa Canyon Bridge [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1999, 28(7/8): 879.
- [3] Peeters B, de Roeck G. One-year monitoring of the Z24-Bridge: environmental effects versus damage events [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2001, 30(2): 149.
- [4] Ni Y Q, Zhou H F, Ko J M. Generalization capability of neural network models for temperature-frequency correlation using monitoring data[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(10): 1290.
- [5] Cross E J, Koo K Y, Brownjohn J M W, *et al.* Long-term monitoring and data analysis of the Tamar Bridge [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 35(1/2): 16.

- [6] Ding Y, Li A. Temperature-induced variations of measured modal frequencies of steel box girder for a long-span suspension bridge[J]. *International Journal of Steel Structures*, 2011, 11(2): 145.
- [7] Li H, Li S, Ou J, *et al.* Modal identification of bridges under varying environmental conditions: temperature and wind effects[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2010, 17(5): 495.
- [8] 闵志华, 孙利民, 谈丹辉. 影响斜拉桥模态参数变化的环境因素分析[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(10): 99.
MIN Zhihua, SUN Limin, DAN Danhui. Effect analysis of environmental factors on structural modal parameters of a cable-stayed bridge[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(10): 99.
- [9] Zhang Q W, Fan L C, Yuan W C. Traffic-induced variability in dynamic properties of cable-stayed bridge [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2002, 31(11): 2015.
- [10] Siringoringo D M, Fujino Y. System identification of suspension bridge from ambient vibration response [J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(2): 462.
- [11] Ding Y, Deng Y, Li A. Study on correlations of modal frequencies and environmental factors for a suspension bridge based on improved neural networks [J]. *Science China Technological Sciences*, 2010, 53(9): 2501.
- [12] 孙利民, 周毅, 谢大圻. 大跨度斜拉桥模态频率的环境因素影响[J]. *重庆交通大学学报: 自然科学版*, 2013, 32(6): 6.
SUN Limin, ZHOU Yi, XIE Daqi. Environmental effects on modal frequency of long-span cable-stayed bridges[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science*, 2013, 32(6): 6.
- [13] 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]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2007, 21(2): 122.
- [14] 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.
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.
- [15] Xu Z, Wu Z. Simulation of the effect of temperature variation on damage detection in a long-span cable-stayed bridge[J]. *Structural Health Monitoring*, 2007, 6(3): 177.
- [16] 李小年, 陈艾荣, 马如进. 温度对桥梁模态参数的影响[J]. *华南理工大学学报: 自然科学版*, 2012, 40(4): 138.
LI Xiaonian, CHEN Airong, MA Rujin. Influence of temperature on modal parameters of bridge[J]. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition*, 2012, 40(4): 138.
- [17] Sun L, Sun Z, Dan D, *et al.* Large-span bridge and their health monitoring systems in China[C]//*Proceedings of 2007 International Symposium on Integrated Life-cycle Design and Management of Infrastructure*. Shanghai: Tongji University Press, 2007: 79-95.
- [18] Zhou Y, Sun L. Temperature effects on performance of long-span cable-stayed bridges[C]//*Proceedings of the Sixth World Conference on Structural Control and Monitoring*. Barcelona: CIMNE, 2014: 432-444.
- [19] Kleinbaum D G, Kupper L L, Muller K E. Applied regression analysis and other multivariable methods[M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2003.