

# 基于环境激励的大跨度桥梁模态试验

胡利平<sup>1</sup>, 韩大建<sup>1</sup>, 禹智涛<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学 土木工程系, 广东 广州 510641; 2. 广东工业大学 建设学院, 广东 广州 510643)

**摘要:** 介绍一种相对简单而实用的基于环境激励的大跨度桥梁模态测试分析方法, 该方法仅利用结构的动态响应信号作频谱分析即可获得模态频率、振型、阻尼等主要模态参数, 处理速度快, 并且结果直观可靠. 通过对广东金马大桥斜拉桥的实桥测试, 证明该方法应用于工程实际是完全可行的.

**关键词:** 环境激励; 模态试验; 金马大桥

中图分类号: U446

文献标识码: A

文章编号: 1007-7162(2005)01-0100-05

## 引言

桥梁结构的模态参数(主要为自振频率、振型和阻尼), 取决于结构本身的材料特性、结构刚度、质量及其分布规律, 它的确定是进行结构动力反应计算和抗风、抗震稳定性分析的前提. 为了准确而真实地评估桥梁结构的模态参数, 最直接而可靠的方法是在实桥上进行模态试验.

传统的结构模态试验中, 一般通过测试结构输入力和输出响应, 以获取结构的频率响应函数, 进而利用模态拟合法来识别结构的模态参数<sup>[1,2]</sup>. 因此, 输入力的施加和测试是必需的, 但是对于大跨度桥梁(如斜拉桥), 这种方法遇到一些实际困难.

1) 激励力的施加有一定的难度, 而且费用较高. 一般单点激励的能量有限, 不足以有效激发出所需的模态. 当输入能量过大时, 则容易引起非线性, 甚至导致结构局部损坏. 而多点激励又会带来模态测试和参数识别的复杂性.

2) 由于风及地脉动对结构的激励相对较大, 实测人工激励与实际的激励并不等同, 结构响应与人工激励不是完全的对对应关系, 这同样会使模态分析复杂化并影响其结果精度.

3) 测试须在关闭桥梁中断交通的情况下进行, 造成的经济损失和社会影响较大.

为克服上述问题给大跨度桥梁模态测试带来的困难, 工程界发展了基于环境激励(包括地脉动、风载以及行车荷载等)的模态测试分析方法, 它仅利用结构的动态响应来直接识别模态参数. 由于这一方法不需要额外的激振设备, 不妨碍交通并且适用于结构在线健康监测, 因而成为近年来国内外研究十分活跃的课题.

本文介绍一种相对简单而实用的基于环境激励的模态测试分析方法, 该方法仅利用结构的动态响应信号作频谱分析, 处理速度快, 并且结果直观可靠. 作为该方法的一个实际应用, 本文还具体介绍了目前世界上跨度最大的独塔混凝土斜拉桥——广东金马大桥的模态测试情况, 测试结果表明, 这种方法应用于工程实际是完全可行的.

## 1 测试分析原理

收稿日期: 2003-09-08

作者简介: 胡利平(1971-), 男, 高工, 博士研究生, 主要研究方向为大跨度桥梁结构.

### 1.1 固有模态及相应频率的识别

对于大型桥梁结构, 其固有模态一般比较复杂. 即使是我们所关心的前若干阶低阶模态, 都可能包含横向弯曲、竖向弯曲、扭转或者弯扭耦合等多种型式. 因此, 对这种结构进行振动测量时在同一断面上通常要布置纵、横、竖 3 个方向的传感器. 通过考察不同测点不同方向之间振动信号的相干函数及相位关系可以识别出结构的固有模态及其相应频率. 由于在同一振型中, 各测点同一方向的振动要么同相要么反相. 因此, 我们只需在桥上选定一组参考点(通常参考点选取应保证其在所要测量的振型中振幅较大, 或者说具有较高信噪比), 同时测量参考点与普通测点的振动信号, 通过计算两组信号的自谱与互谱即可确定模态类型. 在固有频率处, 两者的自谱与互谱均出现峰值, 并且其相位差近似等于  $0^\circ$  或  $180^\circ$ , 表明两点振动同相或反相. 同时, 该频率处两组信号之间的相干函数值应接近 1.0(一般在 0.7~1.0 之间, 表明两组信号相关性较好). 而对于不同方向的振动信号, 其相干函数值可能接近 1.0, 也可能接近 0. 比如在主梁扭转与横向振动耦合模态中, 竖向与横向振动信号的相干函数值应接近 1.0, 而对于主梁纯弯曲模态, 竖向与横向振动信号的相干函数值却接近 0. 显然, 掌握这些规律将有助于更好地辨别出模态类型.

### 1.2 振型的识别

由随机振动理论可知<sup>[3]</sup>, 当一个  $n$  自由度结构体系在  $m$  个自由度上作用有平稳随机激励  $\{f(t)\} = \{f_1(t), f_2(t), \dots, f_m(t)\}^T$  时, 所产生的随机加速度响应  $\{a(t)\}$  和随机激励  $\{f(t)\}$  的功率谱密度的矩阵关系式如下:

$$[S_{aa}(\omega)]_{m \times n} = [H_a(\omega)]_{n \times m} [S_{ff}(\omega)]_{m \times m} [H_a^*(\omega)]_{m \times n}^T \quad (1)$$

其中  $\omega$  为圆频率,  $[S_{aa}(\omega)]$  为加速度响应的功率谱密度矩阵,  $[S_{ff}(\omega)]$  为随机激励的功率谱密度矩阵,  $[H_a(\omega)]$  为传递函数矩阵, 其任一元素  $H_a^{pq}$  表示  $q$  点激振、 $p$  点拾振的传递函数值, 而  $[H_a^*(\omega)]$  为其共轭矩阵.

矩阵  $[S_{aa}(\omega)]$  在第  $p$  行和第  $k$  列上的元素  $S_{aapk}(\omega)$  就是结构的第  $p$  个自由度和第  $k$  个自由度的响应之间的互谱密度函数, 其计算公式为

$$S_{aapk}(\omega) = \sum_{q=1}^m \sum_{r=1}^m H_a^{pq}(\omega) S_{ffqr}(\omega) H_a^{*rk}(\omega). \quad (2)$$

当  $p=k$  时, 就得到结构在第  $p$  个自由度上响应的自谱密度函数, 也就是矩阵  $[S_{aa}(\omega)]$  中的对角元素. 它的计算公式可表示为

$$S_{aapp}(\omega) = \sum_{q=1}^m \sum_{r=1}^m H_a^{pq}(\omega) S_{ffqr}(\omega) H_a^{*rq}(\omega). \quad (3)$$

对于小阻尼系统, 当  $\omega \approx \omega_i$  时 ( $\omega_i$  为结构的第  $i$  阶模态圆频率), 根据结构动力方程可以导出:

$$H_a^{pk}(\omega_i) \approx -\frac{\phi_{pi} \phi_{ki} \omega_i}{j c_i}, \quad (4)$$

$$H_a^{*pk}(\omega_i) \approx \frac{\phi_{pi} \phi_{ki} \omega_i}{j c_i}. \quad (5)$$

式中:  $\phi_{pi}$ 、 $\phi_{ki}$  分别表示结构  $i$  阶振型在位置  $p$  和  $k$  点处的坐标,  $j = \sqrt{-1}$  为单位虚数,  $c_i$  为  $i$  阶模态阻尼.

利用式(2)~(5), 可得:

$$\frac{S_{a\phi k}(\omega_i)}{S_{a\phi p}(\omega_i)} \approx \frac{\sum_{q=1}^m \sum_{r=1}^m \frac{\phi_{qi}\phi_{ri}\omega_i}{c_i} S_{ffqr}(\omega_i) \frac{\phi_{ki}\omega_i}{c_i}}{\sum_{q=1}^m \sum_{r=1}^m \frac{\phi_{qi}\phi_{ri}\omega_i}{c_i} S_{ffqr}(\omega_i) \frac{\phi_{ki}\omega_i}{c_i}} = \frac{\phi_{pi}\phi_{ki} \sum_{q=1}^m \sum_{r=1}^m \frac{\phi_{qr}\omega_i}{c_i} S_{ffqr}(\omega_i) \frac{\phi_{ri}\omega_i}{c_i}}{\phi_{pi}\phi_{pi} \sum_{q=1}^m \sum_{r=1}^m \frac{\phi_{qr}\omega_i}{c_i} S_{ffqr}(\omega_i) \frac{\phi_{ri}\omega_i}{c_i}} = \frac{\phi_{ki}}{\phi_{pi}} \quad (6)$$

上式表明,对于各个模态频率分得比较开,阻尼比较小的多自由度结构(一般桥梁均属此类),在随机激励下,当  $\omega \approx \omega_i$  时(即结构的某阶自振频率处),响应信号的互谱与自谱峰值之比近似为振幅之比。同理还可证明,不同测点响应信号的自谱峰值之比的平方根也近似为其振幅之比。

### 1.3 阻尼估计

从环境振动试验中估计阻尼比,一般都采用半功率带宽法。由于影响结构阻尼比识别精度的因素较多,如环境振动的非平稳性、频率分辨率的选择、数据分析过程中的平均次数和功率谱幅值的精度等等,所以结构阻尼很难精确确定。通常,只能对所有测点记录的振动信号进行阻尼比分析,以获得一组阻尼比数据序列,由此确定模态的阻尼比估计范围及估计值(平均值)。

## 2 实桥测试

金马大桥是广东广肇高速公路上跨越西江河道的一座特大型桥梁,全长 1 912.6 m,按双向 6 车道设计。其主桥采用独塔斜拉桥与刚构联合体系,跨径组合为(60+2×283+60)m,是当今世界上跨度最大的独塔混凝土斜拉桥。斜拉桥梁塔固结,主梁采用梁板结构,双索面,索塔为箱形断面。刚构主梁采用双箱单室断面,主墩为双肢薄壁墩,边墩为柔性墩,基础均为嵌岩桩。全桥总体布置见图 1。

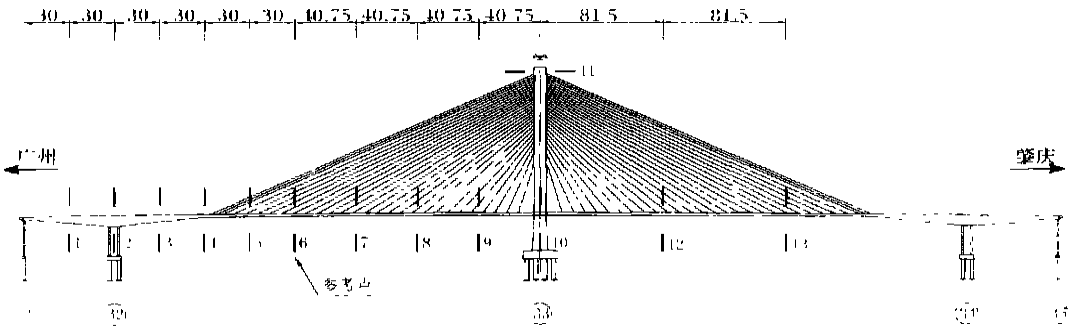


图 1 测量截面位置(单位:m)

受建设单位的委托,我们利用上述方法对该桥作了模态试验。

### 2.1 结构有限元动力分析

为了合理布设传感器,试验前对该桥作了有限元动力分析。分析采用三维有限元计算模型,其中斜拉索、桩采用梁/索单元,主梁、主塔、T 构箱梁以及薄壁墩采用板壳单元,承台则采用实体单元。全桥结构划分为 3 546 个板壳单元、372 个梁单元以及 164 个实体单元,共计 4 204 个结点。计算采用国际通用有限元分析程序 SAP2000 Nonlinear 进行。结果见表 1。

### 2.2 试验过程及结果分析

从有限元分析结果可知,金马大桥的振动模态比较复杂,其前 10 阶模态已包括竖向弯曲、横向弯曲、纵向向漂移、扭转等几种类型。要全部测量出这些模态需要采集多个截面的振动信

号。为此, 试验中共布置了 1 组参照测点及 12 组移动测点, 测试截面位置见图 1。其中桥面每组测点设有 2 个竖向传感器及顺桥向、横桥向水平传感器各 1 个, 塔上测点仅设顺桥向、横桥向水平传感器各 1 个。考虑到桥梁的对称性, 试验主要在左半桥进行, 右半桥 2 个测试截面主要用于判定模态的对称类型(是正对称或反对称)。

受导线长度、传感器数量及其它信号采集放大设备的限制, 信号采集工作分 6 组进行, 每组采集 12 个通道数据(包括 1 组参照测点及 2 组移动测点)。由于理论模态分析结果表明, 该桥前 15 阶频率均在 1.5 Hz 以内, 且相邻两阶频率相差最小约 0.01 Hz。为保证试验结果精度, 试验中采样频率设为 10 Hz, 低通上限频率设为 2.5 Hz, 每次采样时间为 25 min, 这样信号记录长度能相对长些, 使信号趋于平稳化, 环境激励能近似满足平稳随机过程的假设。结果分析时采用 1 024 点 FFT 作频谱分析, 频率分辨率为 0.01 Hz, 可以满足频率分辨率的要求。在具体的数据分析中, 选用了较大的重叠率和较多的平均次数, 以改善信号谱分析精度。

试验结果如表 1 所示。从表中可以看出, 实测模态频率与理论计算值均比较接近, 表明结构的理论计算模型基本正确, 实际结构整体刚度满足设计要求。实测阻尼比均介于 1% ~ 3% 之间, 这些阻尼值实际包含了结构阻尼与空气阻尼两部分, 表征了结构在低量级环境振动下的能量消散情况。图 2(a)~(f) 给出了部分实测竖向弯曲模态曲线, 从图中可以看出, 实测与理论曲线大致相符, 但二阶竖向对称弯曲振型差别较大, 其原因与参考点在该模态下接近该阶模态节点位置, 信噪比较小有关。

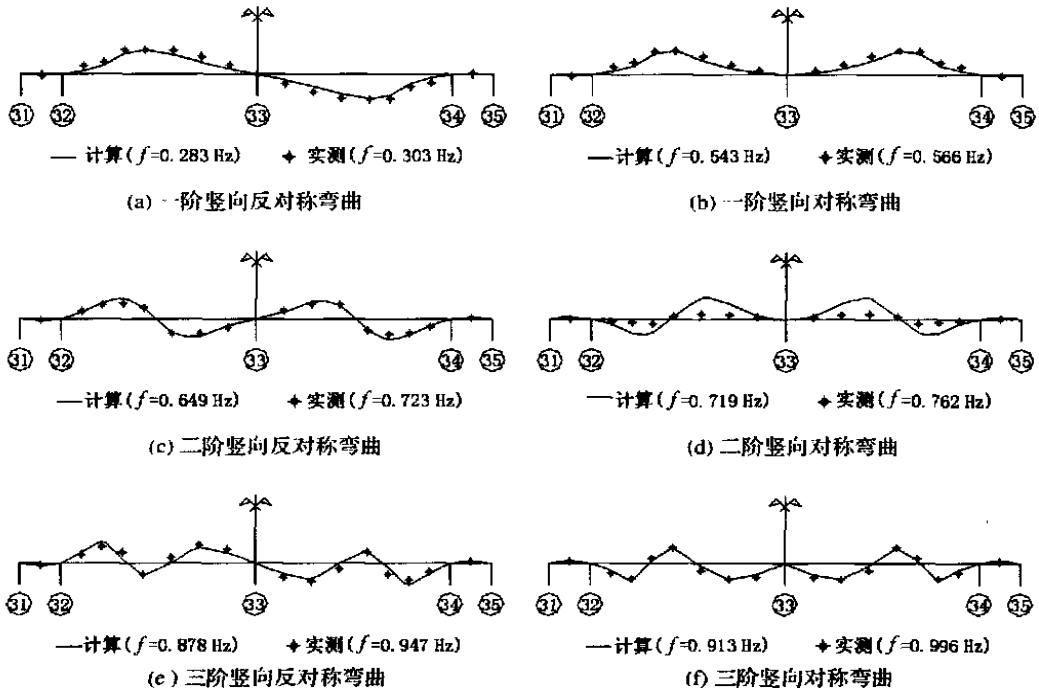


图 2 结构部分实测与理论计算模态振型

(注: 图中右半桥实测振型系根据左半桥实测结果对称反演而得。)

表 1 结构部分实测振型及相关参数

序号	模态类型	自振频率/Hz		阻尼比/%	
		理论值	实测值	范围	平均值
1	竖向反对称弯曲	0.283	0.303	2.47~3.14	2.79
2	塔横桥向弯曲	0.463	0.479	2.26~2.78	2.59
3	竖向对称弯曲	0.543	0.566	1.47~1.81	1.65
4	扭转	0.568	0.605	2.10~2.39	2.30
5	竖向反对称弯曲	0.649	0.723	1.17~1.54	1.40
6	横桥向反对称弯曲	0.660	0.703	1.07~1.58	1.39
7	竖向对称弯曲	0.719	0.762	1.96~2.22	2.06
8	纵桥向漂移	0.753	0.771	1.91~2.17	2.10
9	横桥向对称弯曲	0.781	0.850	1.15~1.62	1.42
10	扭转	0.827	0.859	1.14~1.38	1.25
11	竖向反对称弯曲	0.878	0.947	1.00~1.23	1.12
12	竖向对称弯曲	0.913	0.996	0.96~1.19	1.03

### 3 结语

金马大桥斜拉桥模态试验的结果表明,基于环境激励的模态测量和数据分析方法,所得各阶模态分阶比较清楚,理论与实测模态比较接近,说明该方法用于测试大跨度斜拉桥的自振特性是完全可行的。

当然,试验结果的好坏还有赖于高质量的信号采集数据。因此,现场测试前的方案设计与规划非常关键,它有助于在结构上合理布置传感器、设置滤波截止频率、选择采样速率及记录时间等。另一方面,为了提高后期数据处理的速度,还可以依据上述原理将频谱分析、模态识别过程编制成智能一体化程序,这样可以大大降低人工工作量、有效减少人为误差,并提高分析结果的可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 李德葆,陆秋海. 实验模态分析及其应用[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [2] 沃德·海伦,斯蒂芬·拉门兹,波尔·萨斯. 模态分析理论与试验[M]. 北京:北京理工大学出版社,2000.
- [3] 李国强,李杰. 工程结构动力检测理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2002.

## Modal Test of Long Span Bridges Based on Ambient Excitation

HU Li-ping<sup>1</sup>, HAN Da-jian<sup>1</sup>, YU Zhi-tao<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, South China Univ. of Tech., Guangzhou 510641, China;

2. Faculty of Construction, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510643, China)

**Abstract:** This paper presents the theory and methodology of a relatively simple and practical modal test approach based on ambient excitation for long span bridges. In this approach, some fundamental parameters, such as mode shapes and their corresponding frequencies as well as the damping ratios, can be found by a fast process of spectra analysis of the measured response signal. Also, its results are direct and reliable. The successful practices of the modal test on Guangdong Jinma Cable-stayed Bridge shows that the method is valid.

**Key words:** ambient excitation; modal test; Jinma Bridge