

文章编号 :1007 - 649X(2001)02 - 0039 - 04

# 香港汀九大桥自振特性测量

王卫锋<sup>1</sup>, 王文东<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学交通学院, 广东 广州 510640; 2. 华南理工大学建筑学院, 广东 广州 510640)

**摘 要:** 香港汀九大桥是一座三塔四索面的特大斜拉桥, 结构新颖. 为了进行更准确的抗风抗震分析, 以及将来桥梁的健康检测, 实验测量桥梁的自振特性是必不可少的. 根据汀九大桥环境激励 (主要是风) 下桥振动的加速度传感器数据, 利用谱分析方法来确定振型及对应的固有频率, 通过半功率带宽法测得阻尼比. 振型及对应的固有频率与有限元分析结果基本吻合.

**关键词:** 自振特性; 模态分析; 环境振动

**中图分类号:** U 448.27 **文献标识码:** A

## 0 引言

汀九大桥是一座三塔四索面双桥面特大斜拉桥, 结构新颖. 两个主跨分别长 448 m 和 475 m, 边跨长 127 m, 全桥总长 1177 m. 桥采用 3 个纤细的长圆形等截面钢筋混凝土独柱桥塔, 主塔高度 200 m, 汀九塔和青衣塔分别为 172 m 和 163 m. 主塔用纵向稳定索加劲, 稳定索斜拉至两边塔塔位并锚固在主梁上.

作为一座大跨度的新型斜拉桥, 实测自振特性可以获得计算无法得到的阻尼比及完善计算力学模型, 这对抗风抗震计算有着重要的影响.

## 1 现场测试

现场测量由香港大学完成, 本文的工作是对信号进行分析.

### 1.1 仪器设备和数据采集

测量系统由加速度计、信号调制器、谱分析仪和微机组成.

在测量点和参考点共布置 11 个加速度计, 测量桥的动力反应. 每个加速度计为一个通道, 每个通道的采样频率均为 25 Hz. 低通滤波器的滤波频率为 10 Hz, 考虑到滤波器的性能, 采样频率比山农采样定律规定的最低两倍滤波频率要略高, 采样时间为 30 min. 通过信号调制器的模拟信号被 A/D 转换仪转成数字信号输入微机保存. 每次采样为一个文件, 文件包含 11 个通道的实时数据.

数据采集过程流程图如图 1 所示.

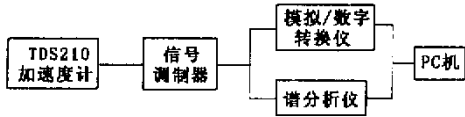


图 1 数据采集过程流程图

Fig.1 Instrumentation system

### 1.2 现场试验步骤

汀九桥的立面图见图 2.

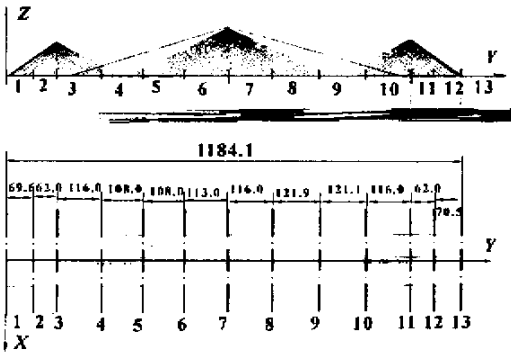


图 2 桥面测点布置及测量坐标系

Fig.2 Locations of measurement sections

现场测试及数据处理过程如下:

(1) 确定试验方法、目的. 采用随机环境激励下的振动法测试桥面和塔, 主要是测量桥面的振型, 以确定斜拉桥的自振特性. 前 12 阶振型具有复杂的空间模态, 但振动还是以某一方向为主, 从而可把空间模态当作某一方向的模态来测量.

收稿日期 2001 - 03 - 02; 修订日期 2001 - 03 - 02

作者简介: 王卫锋 (1967 - ) 男, 湖南省双峰县人, 华南理工大学讲师, 博士研究生, 主要从事大跨度桥桥梁方面的研究.

(2) 参考有限元分析结果<sup>[1]</sup>中的前 12 阶振动的特征布置测点.在主跨的 1/4, 1/2, 3/4 处,在边跨的 1/2 处及 3 个塔和 2 个边墩处布置 13 个测点,参考点布置在主跨 1/2 处,共两个,这大大减少了工作量,又能达到测量的目的.在塔顶、与桥同水平面处、横向稳定索及塔根处布置加速度计.测点布置及测量坐标系见图 2、3.塔的立面图见图 4.

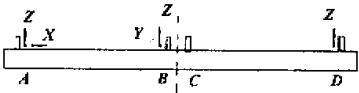


图 3 桥面测点加速度计布置  
Fig.3 Locations of accelerometers at measurement sections

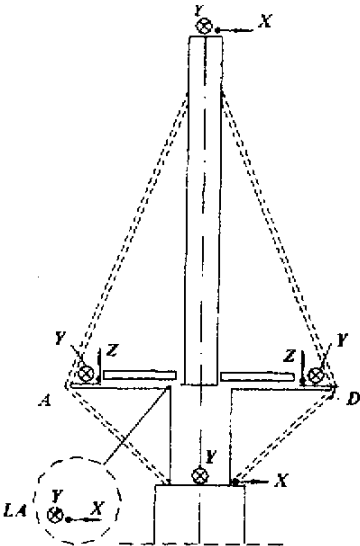


图 4 桥塔传感器布设图  
Fig.4 Locations of accelerometers on tower

(3) 桥面测量时,同时测量一个移动点和最近的参考点.测量塔和桥面的振动耦合时塔分别按纵向和横向两种情况布置加速度计和最近的参考点同时测量.按 1.1 所述的方法记录桥的振动数据.

2 数据处理与模式识别

谱分析是识别模式的方法.当移动测点和参考点在相同位置自谱出现峰值,同时互谱的相位角是 0°或 180°时,表明这是振型的位置.自谱峰值对应位置的频率就是模式频率,用移动测点和参考点的自谱峰值的比值的开方来表示振型,其互谱的相位角来确定相对运动的方向,180°表示振动方向相同,0°表示振动方向相反.

当分析桥面竖向(Z 向)或横向(X 向)振型时,取 A、D 点的 Z 向或 X 向信号之和为分析信号.当测量扭转( $\theta_y$ )振型时,取 A、D 点的 Z 向信号之差为分析信号.

3 桥的振型及对应的频率

汀九大桥测量所得自振特性的详细结果已在文献[2]给出.实测前十二阶振型的频率及对应振型特点见表 1,有限元解也列在其中,以供对比.实测振型和计算振型曲线的比较见图 5.有限元模型中,塔柱采用三维梁单元,索用桁架单元,桥面系用两个三主梁模型<sup>[3,4]</sup>.

由上述图表可知,采用双三主梁模型的有限元计算结果和实测结果基本一致.在所测得的振型中,计算和实测频率间的最大误差为 15.8%.另外,在实测数据中,无法识别第三、四阶扭转振型,这证实了测量前的推测——是由于参考点在这两阶振型的节点上.

表 1 实测振型和计算振型及对应频率的比较

Table 1 Measured and theoretical characteristics of Tingkau Bridge

实测及计算序号	频率/Hz		振型(主要形态)	阻尼比/%	
	实测值	计算值		范围	平均值
1	0.165	0.191	桥面竖弯	1.16 ~ 1.73	1.41
2	0.220	0.220	主塔侧弯	0.85 ~ 1.42	1.21
3	0.266	0.241	桥面侧弯	0.98 ~ 1.32	1.18
4	0.293	0.284	汀九塔和青衣塔同向侧弯	0.62 ~ 1.23	0.98
5	0.311	0.336	桥面竖弯	0.88 ~ 1.46	1.26
6	0.323	0.308	汀九塔和青衣塔反向侧弯	0.55 ~ 1.03	0.87
7	0.366	0.354	桥面竖弯	0.57 ~ 1.11	0.89
8	0.372	0.348	桥面侧弯	0.85 ~ 1.43	1.20
9	0.385	0.390	桥面竖弯	0.71 ~ 1.32	1.03
10	0.481	0.481	桥面竖弯	0.73 ~ 1.11	0.90
11	0.547	0.531	桥面扭转	0.24 ~ 0.64	0.41
12	0.569	0.547	桥面扭转	0.19 ~ 0.65	0.35

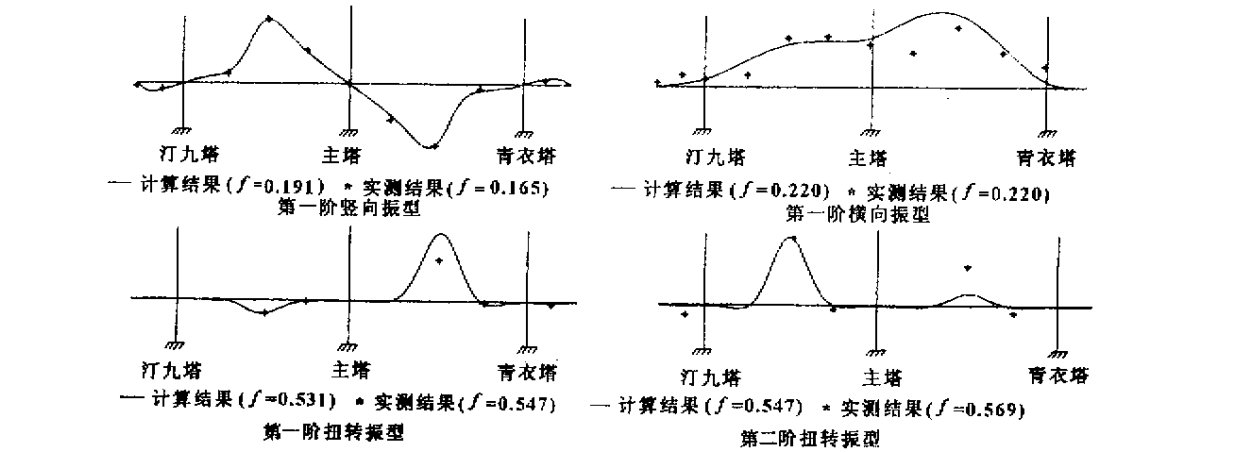


图 5 实测主梁振型振型图

Fig.5 Mode shape measured

通过对塔和主梁上的参考点的测量结果的谱分析,我们发现桥塔主梁的振型耦合在一起.桥塔的纵向弯曲振型和主梁的竖向振型耦合,横向弯曲振型和主梁的横向振型耦合.

在所测振型中,第 6,7 及 10 阶振型信号较弱,分析比较困难,所测结果误差也相对较大,前 5 阶振型及信号比较强,容易识别;第 11,12 阶在两参考点(5 点及 9 点处)信号明显,其他测点信号弱,识别困难.

4 用插值方法测量阻尼比

表 1 中的阻尼比是应用细化 FFT 求得半功率点获得的.本文应用线性插值方法,在功率谱上求

得半功率点,从而求得阻尼比,发现其精度和通过细化 FFT 得出半功率点来求得的阻尼比接近.

本文通过比较频率分辨率为 0.0122,0.0031,0.0061 和 0.0015 的 4 种功率谱,应用插值方法求解出阻尼比,来说明线性插值对结果的改善情况.

从表 2 和表 3 可看出,当频率分辨率  $\Delta f = 0.0031$  时,阻尼比就已经收敛,与表 1 的结果接近.从谱线来看,通过对应主瓣的谱线为 6~8 条,可以推测,当通过主瓣的谱线有 8 条,也就是主瓣宽为 8 个频率分辨率时,在功率谱上用插值的方法求得的阻尼比与细化 FFT 基础上求得的阻尼比精度是一致的.

表 2 前三阶桥面竖向弯曲振型在不同频率分辨率下求得的阻尼比

分辨率 $\Delta f/\text{Hz}$	第一阶竖向弯		第二阶竖向弯		第三阶竖向弯	
	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
0.0123	3.61~5.78	5.10	3.08~4.14	3.41	3.73~4.63	4.03
0.0062	2.18~3.20	2.53	1.13~1.94	1.42	1.00~1.94	1.56
0.0031	1.16~1.73	1.41	0.88~1.46	1.26	0.85~1.43	1.20
0.0015	1.04~1.61	1.35	0.97~1.52	1.31	1.02~1.45	1.24

表 3 前三阶桥面横向弯曲振型在不同频率分辨率下求得的阻尼比

分辨率 $\Delta f/\text{Hz}$	第一阶横弯		第二阶横弯		第三阶横弯	
	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
0.0123	3.85~4.98	4.61	3.23~4.26	3.50	2.45~3.28	2.86
0.0062	1.34~1.97	1.54	1.27~1.83	1.51	1.28~2.08	1.71
0.0031	0.85~1.42	1.21	0.98~1.32	1.18	0.62~1.23	0.98
0.0015	0.80~1.31	1.12	1.12~1.44	1.22	0.71~1.21	1.03

通过主瓣的谱线到达 8 条后,就可以在功率谱的基础上,使用插值方法求阻尼比.对比使用细万方数据

化 FFT 变换来说,具有求解快,功率谱比较光滑的优点,且该方法对测量时间的要求也不高,对于千

扰频繁时的测量具有更大的优势.

5 结 论

- (1)通过实测与分析,说明用环境振动法测量柔性结构的动力特性是可行的,特别是对低阶振型,效果令人满意.
- (2)端部的两个支墩因振动很小,无法测量出相应振型,这说明支墩处是接近刚性的,在以后的测量中,可以不必布置测点.
- (3)对扭转振型的分析表明,扭转振动发生在局部位置,要精确测量,需要更密的布点.
- (4)阻尼比的离散性较大,但是平均阻尼比符合斜拉桥阻尼比的规律和范围.阻尼比是在小振动情况下获得的,要应用到高阶振动,必须修

正.

参考文献:

[ 1 ] HAN D J , PKK L. Dynamic Behavior of Ting Kau Bridge Structure[ R ]. Hong Kong :The University of Hong Kong , 1998 .

[ 2 ] HAN D J , PKK L. Ambient Vibration Studies of the Hong Kong Ting Kau Bridge[ R ]. Hong Kong :The University of Hong Kong ,1999 .

[ 3 ] AHMED M , ABDEL Chaffar. Ambient vibration studies of golden gate bridge[ J ]. Journal of Engineering Mechanics , 1985 ,111( 4 ) 463 - 499 .

[ 4 ] 韩大建 苏 成 王乐文 ,等.香港汀九大桥动力特性研究[ J ].华南理工大学学报 ,1999( 11 ) 29 - 35 .

Modal Identification of the HK Ting Kau Bridge

WANG Wei - feng<sup>1</sup> , WANG Wen - dong<sup>2</sup>

( 1 . College of Communication ,South China University of Technology ,Guangzhou 510640 ,China ; 2 . College of Architecture ,South China University of Technology ,Guangzhou 510640 ,China )

**Abstract** :HK Ting Kau Bridge is a long span cable - stayed bridge with unique features. It has three single - legged towers and four inclined planes of cables. For the advanced analysis and health monitoring of the bridge , the vibration characteristics of the structure must be measured. This paper introduces how to measure and determine the vibration characteristics , such as natural frequencies , corresponding mode shapes and damping ratios. Based on the ambient vibration method , 9 vertical bending modes , 5 lateral bending modes and 4 torsion modes as well as the corresponding natural frequencies and damping ratios are given. The results agree with those of 3D finite element analysis. And in this paper , the damping ratios determined by high resolution power spectrum and those by linear interpolation of low resolution power spectrum are compared. The linear interpolation method works well.

**Key words** :vibration characteristics ; mode analysis ; ambient vibration