

大跨度斜拉桥的参数识别

刘文峰， 柳春图

(中国科学院力学研究所, 北京, 100080)

摘要：本文基于鄂黄长江大桥的动力测试，从实验的角度出发，对大跨度斜拉桥体和桥塔参数识别的激励方式、参数识别技巧等多方面进行了较为详细的叙述。文中针对索力引起桥塔固有频率的改变进行了理论分析，对测试结果给出了合理的解释。

关键词：参数识别；斜拉桥；固有频率；振型

1. 前言

交通是社会的经济命脉，桥梁则是交通的枢纽，我国有着大量的桥梁已投入使用，而且随着我国经济的发展，目前有大量大型桥梁在建或者即将建设^[1]，如果这些桥梁出现问题，将给国民经济造成极大损伤。因此定期或者实时的对桥梁进行状态检测是非常重要的。

模态识别的理论目前已经比较成熟^[2,3]，本文不再赘述。大跨度的桥梁（斜拉桥、悬索桥等）由于其自重很大、频率较低等多种原因，一般实际测试中，大多采用天然脉动作为激励，在进行模态识别的时候，将激励假定为平稳白噪声进行处理，另外为了提高频率分辨率，并且消除随机误差，一般测试时间需要较长^[3-5]。

鄂黄长江大桥是 106 国道上横跨长江的特大型公路桥，为双向四车道公路桥，全长 3245 米，主桥 1290 米。该桥是五跨连续双塔双索面预应力混凝土斜拉桥，大桥主跨径 480 米，目前居同类型桥梁亚洲第三、世界第四，于 2002 年 9 月 26 日通车。2002 年 8 月在鄂黄长江大桥建成通车之前对其进行了详细的检测，作者参加了动力部分的测试。测试内容包括主跨斜拉桥的模态识别以及桥塔的模态识别。

2. 桥体的模态参数识别

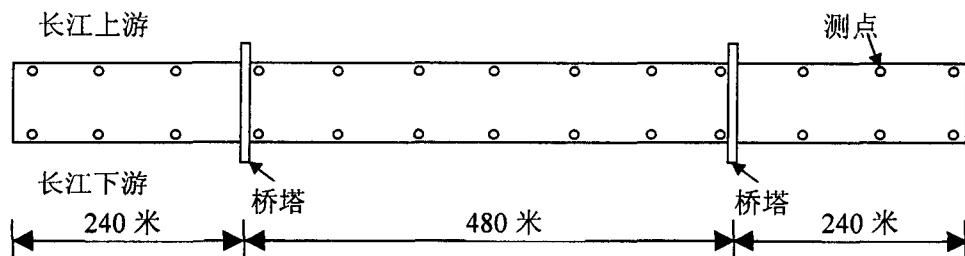


图 1 鄂黄长江大桥主跨测点示意图

根据桥体和桥塔二者不同的固有频率，分别选择了不同频带范围的传感器，测桥体使用国家地震局哈尔滨工程力学所的 991 传感器，其可测试的最低频率为 0.07Hz，能满足桥梁的要求；桥塔的频率高些，采用国家地震局哈尔滨工程力学所的 891-II 型传感器，其可测试的最低频率为 0.5Hz，灵敏度较高。桥体和桥塔的测试均采用天然脉动作为激振力。

测试时桥梁的两侧各布置 13 个测点，共 26 个测点作为垂直向测试点，选取上游的 13 个测点作为水平向测试点，如图 1 所示。采样频率为 10Hz，滤波频率为 2Hz。采样时间为 1800s。采用频域模态分析方法，在表 1 列出了结果中的 5 阶模态频率以及相关的振型情况。

作者简介：刘文峰（1976.8），男，江西南昌人，博士生，从事结构动力分析和桥梁损伤识别

柳春图（1935.2），男，北京人，研究员，博士生导师，主要从事工程结构断裂和疲劳分析

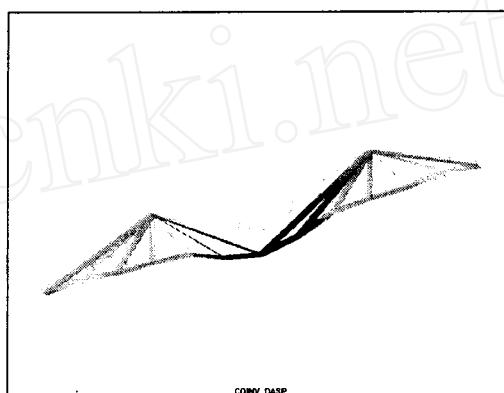
表 1 桥体模态测试数据

振型阶数	振型特征	模态频率(Hz)
1	水平一次弯曲	0.21
2	垂直一次弯曲	0.21
3	垂直二次弯曲	0.36
4	水平二次弯曲	0.46
5	水平三次弯曲	0.55

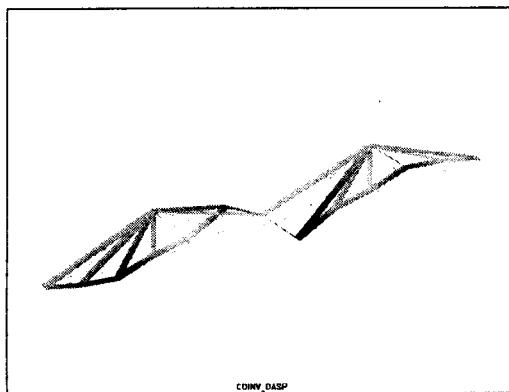
表 1 中可见, 大跨度桥梁的水平振动的模态频率甚至比垂直向的频率还低, 这是大跨桥梁的特点, 其水平向的振动往往比垂直向的更为重要。



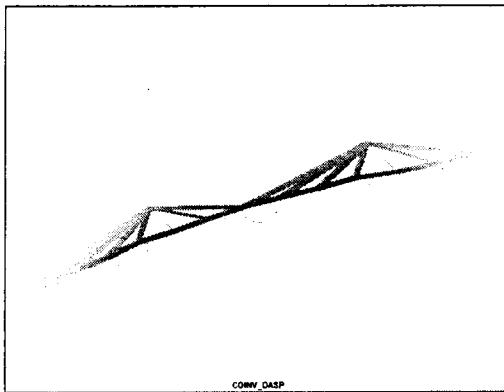
2a 鄂黄长江大桥局部



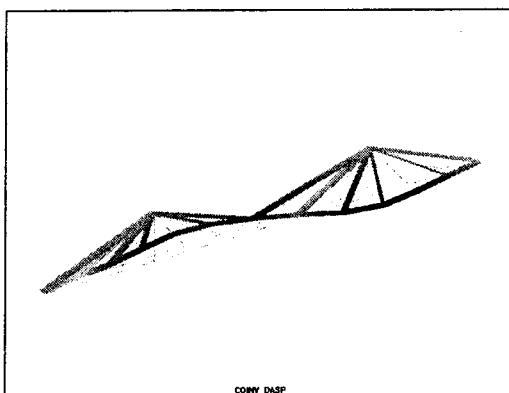
2b 垂直向一次弯曲



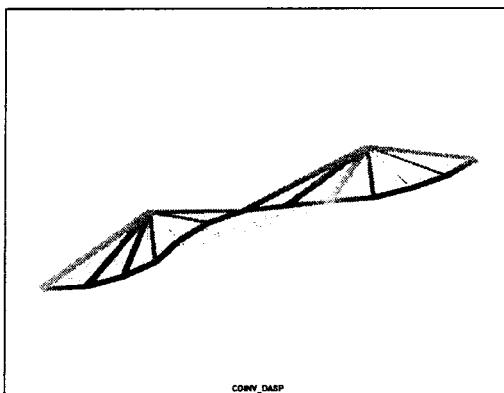
2c 垂直向二次弯曲



2d 水平向一次弯曲



2e 水平向二次弯曲



2f 水平向三次弯曲

图 2 鄂黄长江大桥局部及桥体部分振型图

大跨桥梁的测试中由于其固有频率很低, 因此采样频率也应该低些, 这样可以保证 1024 点 FFT 时的

频率分辨率。为了得到较为理想的结果，应该进行长时间的采样，以便得到较长的数据，长数据可以很好的将偶然误差在平均分析中降低。

表 2 部分大桥的测试频率结果

桥梁名称	桥梁主跨	水平一阶(Hz)	垂直一阶(Hz)
覃家沱长江大桥	130 米	1.12	1.55
万县长江大桥	420 米	0.20	0.39
南京长江二桥南汊	628 米	0.26	0.27
香港青马大桥	1377 米	0.067	0.119

表 2 中列出了部分大桥的基本频率测试结果，由表中可见大跨桥梁的固有基本频率属于低频，因此大跨桥梁测试时传感器的选择非常重要。加速度传感器虽然在频带上可以满足要求，但是由于大跨桥梁的低频，加速度对低频的信号不敏感，其灵敏度很低，所以一般很少选取加速度传感器作为大跨桥梁测试使用。低频的速度传感器工艺要求较高，但是其灵敏度一般较高，能较好的拾取桥梁的振动信号。

3. 桥塔的模态参数识别

鄂黄桥的桥塔约 90 米高，为了解桥塔的动力特性，对其也进行了模态识别，测试分两个方向进行，即顺桥向和垂直桥向。由于塔的条件所限，不方便布置太多的测点，仅在每个方向各布置 4 个传感器。依然得到了较为理想的测试结果，表 3 中列出了桥塔顺桥向和垂直桥向的前 3 阶频率和振型形式。

表 3 桥塔模态测试数据

振型阶数	顺桥向		垂直桥向	
	振型特征	模态频率(Hz)	振型特征	模态频率(Hz)
1	一次弯曲	1.10	一次弯曲	0.52
2	二次弯曲	1.54	二次弯曲	1.35
3	三次弯曲	2.48	三次弯曲	2.72

桥塔的自由振动方程可表达如下：

$$y(x,t) = \varphi(x) \sin(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

式中 $\varphi(x)$ 为桥塔的振型函数， ω 为桥塔的固有频率， α 为相位角。

则桥塔的动能为：

$$W = \frac{1}{2} \int m \dot{y}^2 dx = \frac{1}{2} \omega^2 \cos^2(\omega t + \alpha) \int m \varphi'^2(x) dx \quad (2)$$

式中 m 为桥塔单位长度的质量， l 为桥塔的有效长度。

塔的势能为：

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{2} \int EI y''^2 dx + \frac{1}{2} \int T y'^2 dx \\ &= [\frac{1}{2} \int EI \varphi''^2(x) dx + \frac{1}{2} \int T \varphi'^2(x) dx] \cdot \sin^2(\omega t + \alpha) \end{aligned} \quad (3)$$

式中 EI 为塔的抗弯刚度， T 为桥塔受到的外力。

结构的最大动能等于最大势能，即 $V_{\max} = W_{\max}$ ，得到：

$$\frac{1}{2} \omega^2 \int m \varphi'^2(x) dx = \frac{1}{2} \int EI \varphi''^2(x) dx + \frac{1}{2} \int T \varphi'^2(x) dx \quad (4)$$

$$\text{即 } \omega^2 = \frac{\int EI \varphi''^2(x) dx + \int T \varphi'^2(x) dx}{\int m \varphi'^2(x) dx} \quad (5)$$

可见得出结构的固有频率除了与质量 m 和刚度 EI 有关外，还和结构受到的外力有关，当 T 为拉力时，

结构的频率增大,当 T 为压力时,则结构频率降低,因此可见虽然垂直向抗弯刚度较大,可是由于受到斜拉索传递过来的压力作用,使其频率降低,第一阶固有频率仅为 0.52Hz; 顺桥向虽然同样有此问题,而且其抗弯刚度比垂直桥向还小,但是此方向还存在斜拉索传递过来的水平张力作用,使其频率还高于垂直桥向。

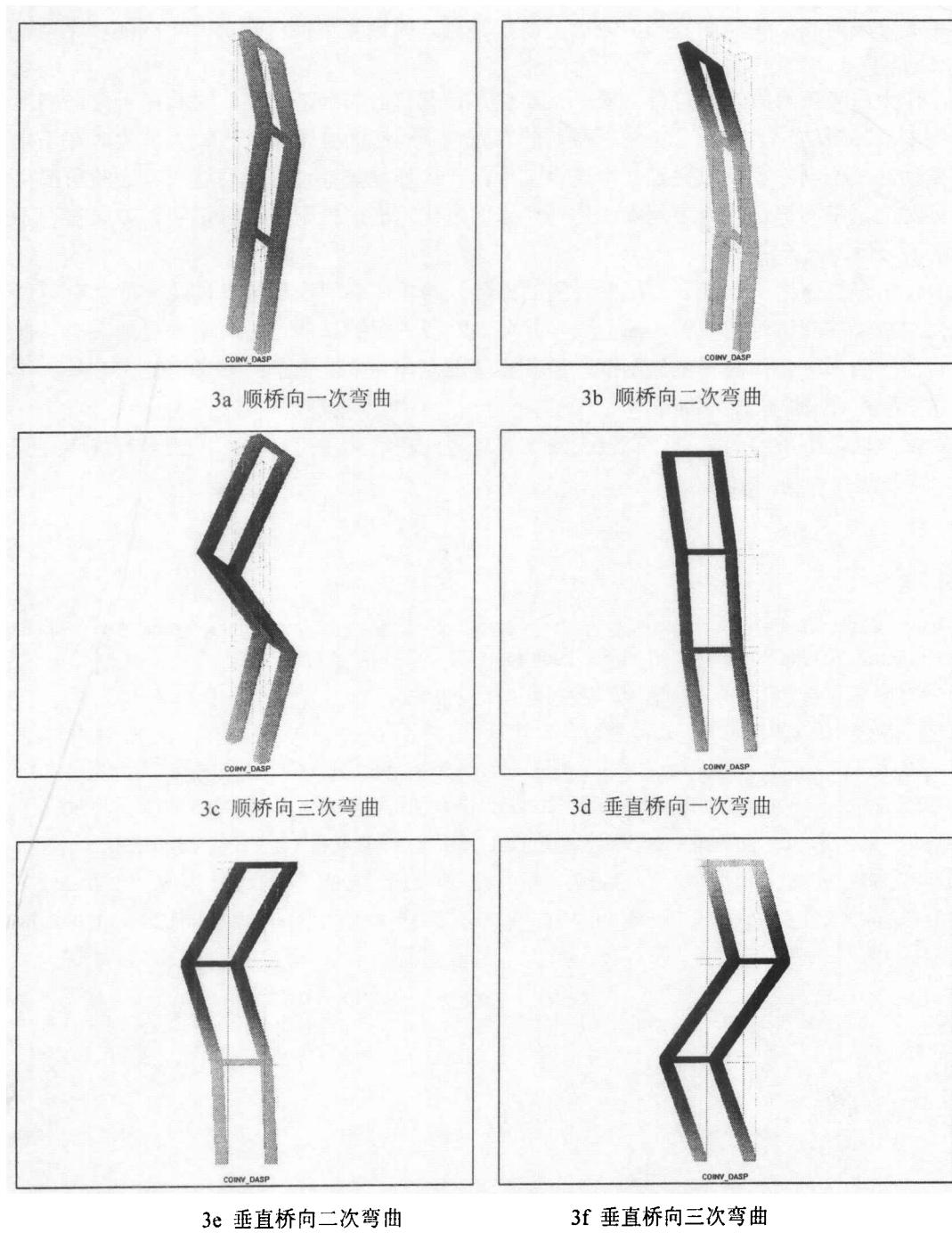


图 3 鄂黄长江大桥桥塔部分振型图

桥塔作为高耸结构,其固有频率较低,而且一般桥塔上不易放置传感器,一般测试点较少,因此虽可以得到固有频率,但不容易识别出高阶模态振型。由于斜拉索的作用,桥塔顺桥方向的频率一般较高,如果注意对桥塔频率变化的检测,也可以推测总索力的变化。

4. 小结

上面桥体和桥塔参数的识别情况以及索力的识别情况可表明^[6-8], 斜拉桥的状态监测需要进行较为复杂的测试, 其考虑的因素也是多方面的。当然通过多参数的测试可以得到更为丰富的数据, 也更有利于损伤识别。

由于采取了天然脉动作为激励, 此方法的前提是激励假设为平稳白噪声, 实际测试之中此假定条件是难以成立的。

首先, 作为白噪声的假设不符合, 随机振动总是具有自己的频谱特性, 因此在桥梁的响应中不仅在自身固有频率附加振动较大, 而且由随机振动的卓越频率引起的强迫振动也较大, 此时在识别是需要注意将强迫振动的成份剔除。一般通过几个途径进行, 一个途径是通过与正问题或者经验所提供的桥梁固有频率进行对比, 将不符合的结果剔除, 另外可以通过识别出的振型来进行识别, 如果振型不合理也可认为此频率不合理, 应予剔除。

另外假设中平稳的性质不成立, 随着时间的推移, 随机振动的卓越频率以及峰值都有可能会发生变化。一般大型桥梁的测试时间较长, 而且大多是分几阶段进行测试的, 此时问题更加突出, 此时虽然有参考点, 目前一般都将其作为相位的基准, 但其实基准点作为幅值修正的意义也很大, 只有这样最后识别出的模态振型相对来说才较为准确。

索力对桥体以及桥塔的固有特性有较大的影响, 因此在活动载荷很大时, 结构的特性改变也会比较明显, 此时应加强对结构的监测。

参考文献:

- [1] Haifan Xiang, China major bridge projects facing 21st century. Proceeding of the International Symposium of Civil Engineering in the 21st century, Beijing, China, 11-13 October, 2000, 160-167.
- [2] 李德葆 陆秋海 实验模态分析及其应用. 北京:科学出版社 2001年
- [3] 傅志方 振动模态分析与参数识别. 机械工业出版社 1990年
- [4] 应怀樵 李俊宝 赵增欣. 环境激励海湾大桥模态测试分析. 现代振动噪声技术第二卷.北京航空工业出版社,1999,207-213.
- [5] 李中付 宋汉文等,基于环境激励的模态参数识别方法综述. 振动工程学报增刊 Vol.13, No.S, 2000, 578-585.
- [6] 斜拉桥索力测试方法研究, 吴海军、陈思甜、龚尚龙等, 重庆交通大学学报 Vol. 20, No. 4, 2001, 23-25
- [7] 固端刚性拉索索力分析能量法, 宋一凡、贺栓海、吴小平, 西安公路交通大学学报 Vol. 21, No. 1, 2001, 55-57.
- [8] 斜拉桥的索力测试及其参数识别, 王卫锋、韩大建, 华南理工大学学报(自然科学版) Vol. 29 No.1, 2000, 18-21.