

文章编号: 1001-4888(2005)01-0102-07

斜拉索模态试验参数研究^{*}

任伟新^{1,2}, 胡卫华¹, 林友勤¹

(1. 福州大学 土木建筑工程学院, 福州 350002; 2. 中南大学 土木建筑工程学院, 长沙 410057)

摘要: 试验模态分析是斜拉桥索力测试中广泛应用的方法。该方法的关键之一是采取合理的试验方案获取可靠的响应信号以识别出正确的索振动频率。本文通过试验, 详细讨论了斜拉索模态测试中若干试验参数, 如激振类型、激振位置、传感器位置以及频率分辨率对试验结果的影响; 比较环境激励与锤击激励的效果, 验证了环境激励的方法也可以准确识别索的频率; 最后给出了较为合理的斜拉索模态试验方案, 用该方案确定的索力与理论计算结果相差不超过 1.5%。

关键词: 模态试验; 环境振动; 激励; 传感器; 频率分辨率; 斜拉索

中图分类号: U443.6

文献标识码: A

1 引言

斜拉索是现代斜拉桥最重要的构件, 斜拉索的索力控制着整个桥面系的内力分布和线型。因此, 索力在斜拉桥的施工控制和长期健康监测中起着关键作用。斜拉索在锚固区的高度应力集中、腐蚀、疲劳和风雨作用下的振动, 均会引起斜拉桥索力的改变^[1]。因此, 需要对斜拉桥的索力进行经常性的监测和评估, 方便实用的索力测试方法显得十分重要。

动测法是目前工程应用中广泛采用的实测斜拉索索力的方法。该方法应用试验模态分析技术, 首先由实测数据识别斜拉索的频率, 进而换算为斜拉索的索力。而实测索振动频率的关键是采取合理的试验方案, 获取可靠的分析数据。本文重点讨论了斜拉索模态试验中几个试验参数, 如激振类型、激振位置、传感器的位置和频率分辨率对实测频率的影响, 给出了较为合理的斜拉索模态试验方案, 可供实际应用参考。

2 斜拉索模型模态试验

试验的索采用单根 7 ϕ 5 钢绞线, 模型索的参数尽可能满足实际斜拉桥拉索的几何相似率, 索的参数如表 1 所示。钢索一端通过钢铰固定在反力墙上, 另一端用千斤顶张拉, 如图 1(a)、(b) 所示, 两端边界条件介于铰支与固支之间, 较接近于固支。

模型试验共有两根平行的斜拉索, 如图 2(a) 所示。每根钢索上固定五个 9818 型压电式加速度传感器, 分别布置在索的两端(模拟实际索人手所能及的位置), 索的四分之一、中间和四分之三处。用磁性底座将传感器固定在钢索上, 如图 2(b) 所示。

试验过程中, 通过千斤顶(YCJ25 $\times$ 200 型)在钢索上施加不同的荷载, 从 50kN 到 120kN 分级加载, 步长为 10kN。荷载由压力表读数控制, 在不同的荷载等级下给予不同的激励采集加速度信号。数据采集设备使用北京东方振动和噪声技术研究所的 INV-16 多功能抗混滤波放大器 and INV306D(F)-16 通道数字

^{*} 收稿日期: 2004-03-11; 修订日期: 2004-10-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50378021); 福建省科技计划重点项目(2002H027)

通讯作者: 任伟新(1960-), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要从事桥梁结构稳定与振动研究。E-mail: ren@fzu.edu.cn

采集仪,采样频率 2000Hz。

表 1 斜拉索模型参数

Tab.1 Parameters for cables used in tests

水平长度(m)	竖直长度(m)	斜拉长度(m)	线密度(kg/m)	截面面积(mm ²)	弹性模量(MPa)
6.27	12.1	13.6	1.2031	1237.44	1.8×10^5



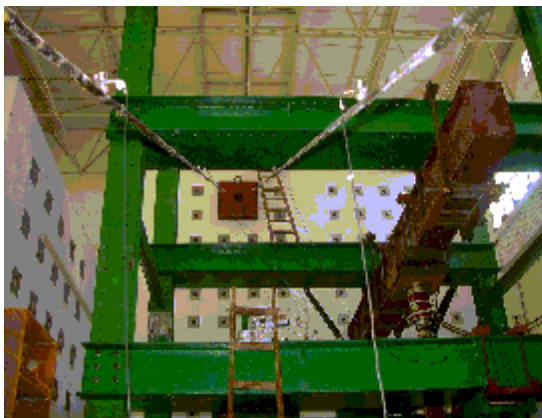
(a) 固定端



(b) 张拉端

图 1 斜拉索模型

Fig. 1 Tested stay cables



(a) 斜拉索



(b) 加速度传感器

图 2 斜拉索模型与安装的加速度传感器

Fig. 2 Arrangement of accelerometers on the cables

频率识别采用频域的峰值法,这种方法是基于这样的事实:频率响应函数(FRFs)在结构的固有频率处取极值。本次试验仅记录输出数据,此时频响函数被输出数据的自功率谱取代。功率谱由测得的加速度时程经过离散傅立叶变换得到,拾取功率谱密度图上的峰值,频率即可简单确定^[2]。

3 斜拉索模态试验方案和参数分析

3.1 激振类型

为了比较激振方式的影响,试验中采用了两种激振形式:一种是用小木锤锤击索,另一种是自然环境激励。采样频率均为 2000Hz,锤击时采样时间为 5 分钟,锤击位置为索的下端人手能及的地方。环境激励采样时间为 20 分钟。在作功率谱图时分辨率取 0.1。下面就两种激励形式对荷载 50kN 与荷载 120kN 情况下的功率谱进行比较:

索拉力 50kN 时,锤击激励功率谱如图 3(a),一阶频率为 7.62Hz,二阶频率为 15.17Hz;环境激励功率谱如图 3(b),一阶频率为 7.60Hz,二阶频率为 15.12Hz。

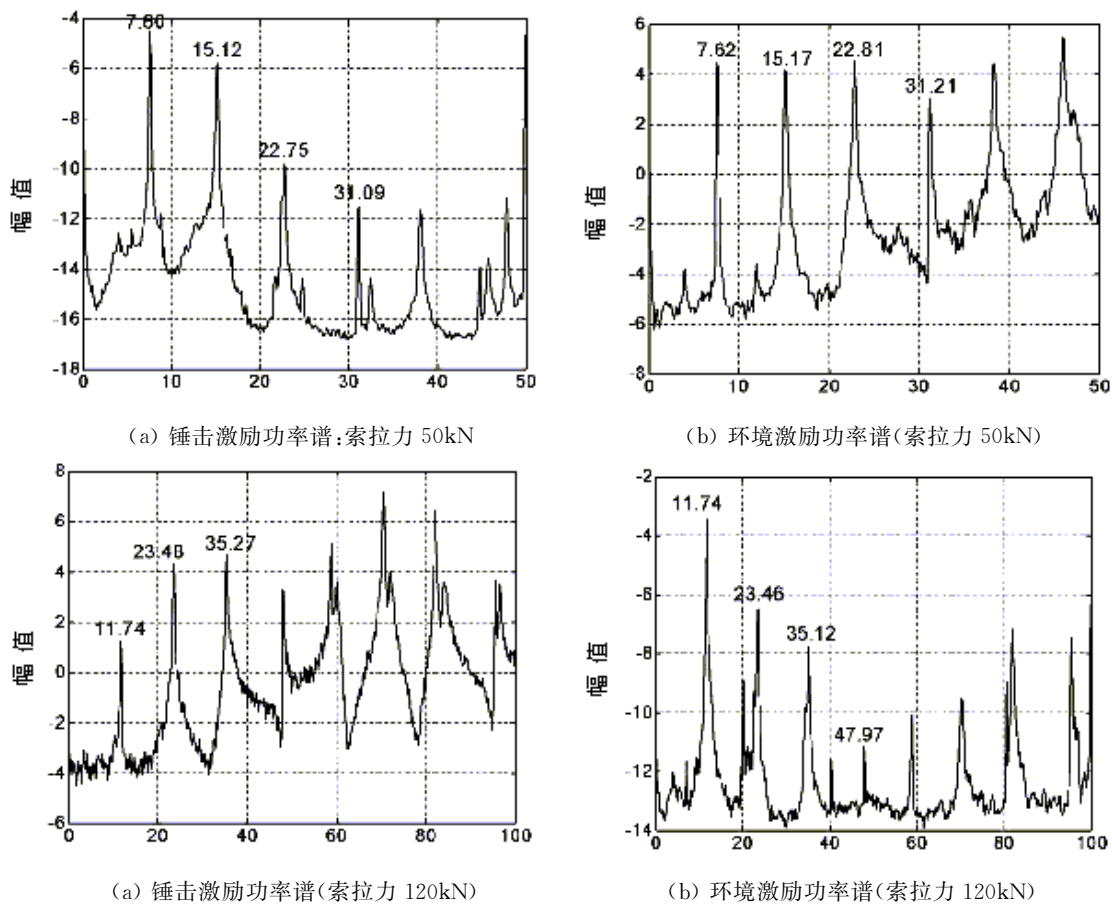


图3 锤击和环境激励斜拉索功率谱

Fig. 3 Power spectral densities excited by hammer and ambient vibration

索拉力 120kN 时,锤击激励功率谱如图 3(c),一阶频率为 11.74Hz,二阶频率为 23.48Hz;环境激励功率谱如图 3(d),一阶频率为 11.74Hz,二阶频率为 23.46Hz。

由以上分析结果可以看出,在 50kN 和 120kN 不同荷载情况下,用小木锤锤击索得到的自功率谱峰值明显,倍频关系显著,高阶频率成份表现的更为明显;用环境振动得到的功率谱图也可以得到较好的基频和低阶频率,但高阶频率成份幅值较小,这是因为环境激励的信号较弱,不易激起索的高阶振动所致。但两种不同的激振方式,识别出的一、二阶频率都十分接近,由此可以看出在模态试验中采用两种激振方式均可以较好的识别索的较低阶频率。

小木锤锤击激励类似于多次脉冲激励,这种激励方式具有很高的峰值/平均能量比,容易激出索的非线性现象^[3]。所以在锤击时,要注意控制力度,不要为加大信号强度而过分增大振幅,采用这种激励方式测试速度比较快,记录时间短,节省测试时间。环境激励在长时间采集数据的情况下可以近似为一种稳态的白噪声随机激励,这种激励方式可以利用多次平均消除测试中各种噪声的干扰、非线性等影响,但采集数据时间较长。然而环境激励方式不需人为激励,简单方便,更适合现场测试。在实际应用中,这两种激励方式可以灵活采用。

3.2 传感器布置位置

为了研究传感器布置位置的影响,每一根索上布置了五个传感器。索拉力 50kN、小木锤锤击时,索端部传感器、四分之一处传感器和二分之一处传感器采集的加速度信号自功率谱分别如图 4(a,b,c)所示。结果表明,当传感器布置在不同位置时,识别出的一阶频率均为 7.62Hz,二阶频率均为 15.17Hz,但识别的效果略有不同。

由功率谱图 4(a)看出,传感器布置在端部时,得到的一、二阶频率基本是可以接受的。但是其低频部分幅值较小,而高阶振幅比较明显。在作模态试验时,传感器的布置应避开支承点(悬挂点)^[3-5]。索的端

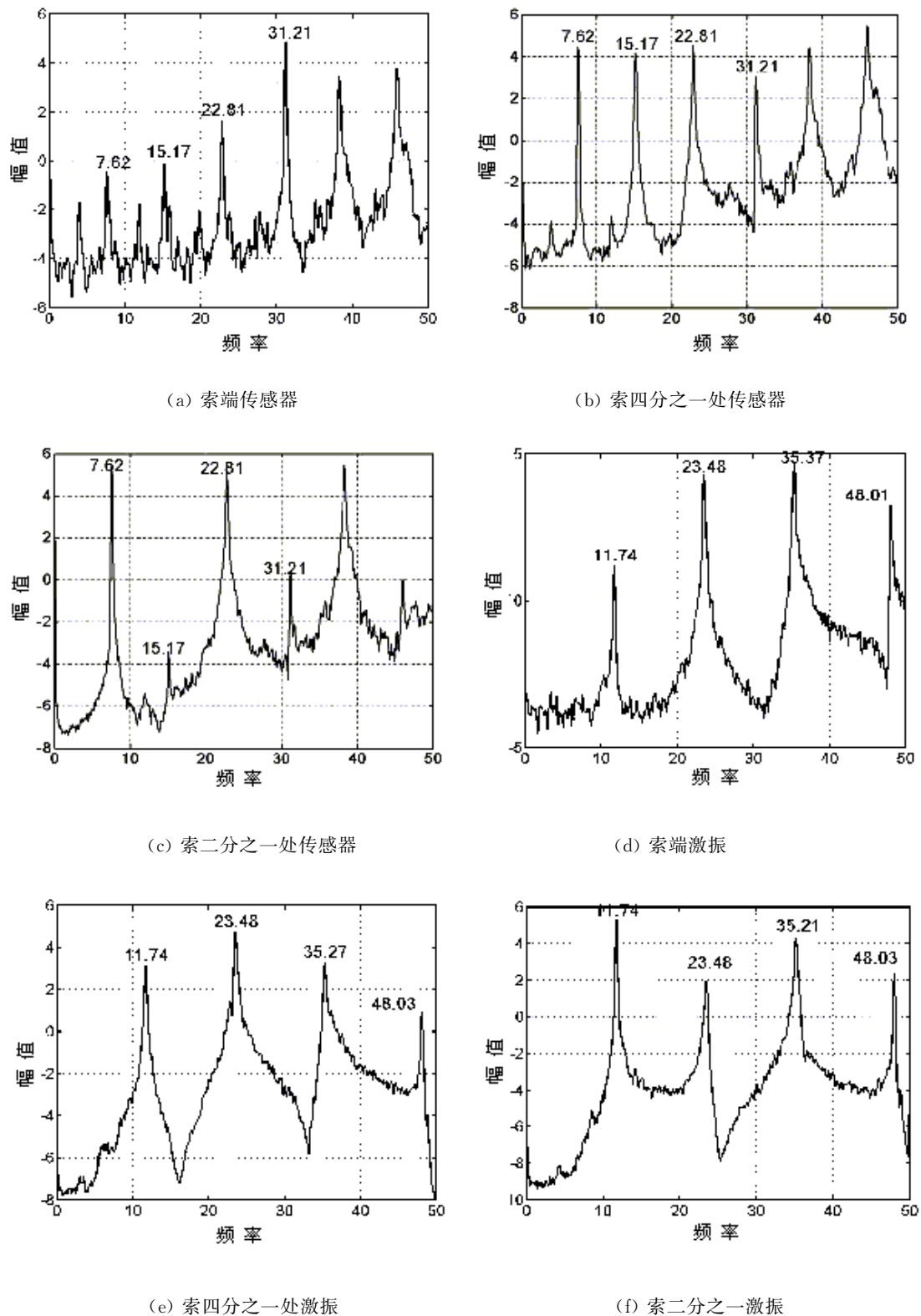


图 4 不同位置传感器和锤击位置时斜拉索功率谱

Fig. 4 Power spectral densities measured and excited at different placements

部接近支承点,所以布置在索端部的传感器测得的低阶频率不突出而高次谐振峰值很大,不利于低阶频率的识别,斜拉索模态试验中应尽可能避免这种传感器布置方式。

由功率谱图 4(c) 看出, 当把传感器布置在索的二分之一处时, 偶数阶频率不明显, 会出现明显的“漏频”现象。在作模态试验时, 传感器应避免布置在振型的模态点上^[3-5]。索的二分之一处是偶数阶振型的模态点, 当索作奇数阶振动时, 测得的响应最大, 当索作偶数阶振动时, 这点的响应趋近于零, 因此导致功率谱上偶数阶振动频率的峰值不明显。

索四分之一处传感器的功率谱最理想, 如图 4(b) 所示, 各阶频率对应的幅值都很明显。因为这时传感器避开了支承点和低阶振型的模态点(反弯点)。所以在现场试验中, 建议将传感器布置在离索端部尽量远、接近索四分之一长度的地方采集信号, 可以得到较满意的结果。

3.3 激振位置

采用小木锤锤击时, 为了确定在何处激振可以采集到较好的响应信号, 分别在索的端部, 索的四分之一处和接近索的二分之一处激振, 其相对应的加速度响应自功率谱密度分别如图 4(d), (e), (f) 所示, 此时, 索的拉力 120kN。根据图 4(d)、(e) 和 (f) 看出, 在不同的位置对索给予激振, 识别出的一阶频率均为 11.74Hz, 二阶频率为 23.48Hz, 并且所得功率谱图峰值明显, 倍频关系明确。

激振位置与传感器布置位置一样, 最好不要位于支承点和振型的模态点上激振^[3-5], 由图 4(f) 可以看出, 当锤击位置接近索的二分之一处时, 其偶数阶频率峰值较奇数阶峰值小。在索的四分之一处激振的功率谱峰值最明显。在现场测量中, 在索的下端进行激振比较方便, 建议在离索端尽量远、接近索四分之一长度的地方进行激振, 可以得到最佳的效果。

3.4 频率分辨率

频率分辨率对斜拉索模态参数识别是至关重要的。频率分辨率是由采样频率和采样点数所决定的, 由于采样频率受到采样定理的限制, 频率分辨率 Δf 最终是由采样点数决定的:

$$\Delta f = f_s / N \quad (1)$$

其中 f_s 是采样频率, N 是采样点数。进行功率谱分析时, 若选取较高的分辨率, 则采集数据量巨大, 由于实测噪音的存在, 功率谱密度曲线不清晰; 若分辨率过低, 则平均次数太多, 有些频率会“湮没”在功率谱图中, 无法准确识别频率, 并会出现“漏频”的现象。所以在作模态试验时要综合两方面的因素采取适当的频率分辨率。在采样频率 f_s 一定的情况下, 可以通过适当选取窗口宽度(Window length), 来实现不同的频率分辨率。

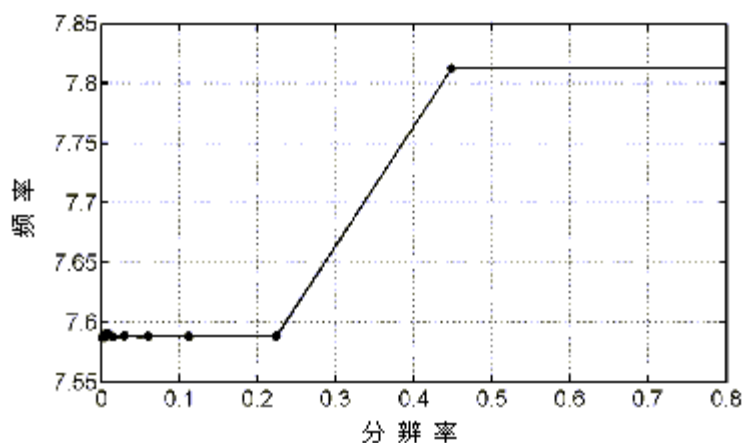


图5 分辨率与所识别基频的关系曲线

Fig. 5 Identified fundamental frequency (Hz) versus frequency resolution

索拉力 50kN、环境振动情况下, 不同频率分辨率时由自谱密度曲线的峰值, 识别出的索振动的一阶频率如表 2 所示, 两者关系图如图 5 所示。可以明显看出, 在进行功率谱分析时, 当分辨率取 0.2 时, 识别出的一阶频率已经比较稳定, 其相应的功率谱也比较理想。所以, 在进行斜拉索环境振动试验模态分析时, 建议分辨率 Δf 至少取 0.2 以上。

表 2 不同分辨率时所识别的基频 (Hz)

Tab. 2 Experimentally identified fundamental frequencies (Hz) using different frequency resolutions

分辨率	0.976	0.448	0.224	0.112	0.06	0.03	0.015	0.007	0.004	0.002	0.001
基 频	7.81	7.81	7.59	7.59	7.59	7.59	7.59	7.59	7.59	7.59	7.59

4 斜拉索力的确定

理想细长斜拉索的索力与自振频率之间存在下面简单的关系式(弦理论):

$$T = \frac{4\rho L^2 f_n^2}{n^2} \quad (2)$$

其中 T 是索的张力; ρ 是索的线密度; L 是索的计算长度; f_n 是索的第 n 阶固有频率。上述公式过于简化, 没有考虑索的垂度、弯曲刚度、固定端条件等因素的影响。实际应用中, 根据索的具体情况, 需对公式(2)进行某种程度的修正^[6-9]。索的垂度影响和两端固定时索的抗弯刚度影响取决于下面的两个索的无量纲参数^[9,10]:

$$\xi = L \sqrt{\frac{H_h}{EI}}, \quad \lambda^2 = \frac{LEA}{H_h L_e} \left(\frac{mgL}{H_h} \right)^2 \quad (3)$$

式中 H_h 索拉力的水平分量; I 是索截面的惯性矩; 索的长度参数 L_e 由下式计算:

$$L_e = \int_0^L \left(\frac{ds}{dx} \right)^3 dx \approx L \left[1 + \frac{1}{8} \left(\frac{mgL}{H_h} \right)^2 \right] \quad (4)$$

本次试验模型中的斜拉索, 这两个无量纲参数的范围满足 $\xi \geq 210$ 和 $\lambda^2 \leq 0.01$, 说明索的垂度影响很小, 而且索本身的抗弯刚度可以忽略不计, 也就是说基本满足弦理论, 可以用(2)式由频率换算索力。

表 3 实测频率与理论值的比较

Tab. 3 Comparison of theoretical and experimental cable frequencies

索拉力(kN)	50	60	70	80	90	100	110	120
试验结果(Hz)	7.60	8.32	8.96	9.59	10.16	10.74	11.23	11.74
理论结果(Hz)	7.49	8.21	8.87	9.48	10.06	10.60	11.12	11.61
误差(%)	1.45	1.32	1.00	1.15	1.00	1.30	0.98	1.11

如果采用索的一阶振动频率 f_1 (基频) 来计算索力, 则(2)式可进一步简化为:

$$T = 4\rho L^2 f_1^2 \quad (5)$$

在不同荷载等级, 即不同的索拉力下, 发现理论计算的基频均小于模态识别的结果, 两者吻合良好, 误差不超过 1.5%, 具体结果见表 3。索拉力与索振动基频的关系如图 6 所示, 由两者比较可以看出, 随着索拉力的增加, 索的基频随之增加, 且这种增加不是线性的。

5 结束语

目前, 试验模态分析技术已经成为解决工程振动问题的常用方法之一。本文根据斜拉索模型的模态试验结果, 详细讨论了激振类型、传感器布置位置、激振位置和频率分辨率几个试验参数对试验结果的影响。综上所述, 在作斜拉桥拉索模态试验时, 可以采用环境激励的方式, 也可以采用锤击的激励的方式。结果表明, 环境振动模态测试, 足以识别出所感兴趣的频率。

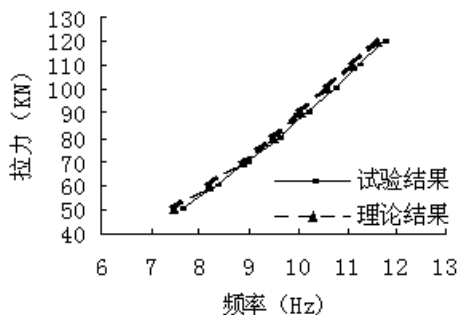


图 6 斜拉索拉力与基频的关系

Fig. 6 Fundamental frequency (Hz) versus cable tension (kN)

当用锤击激励时,要注意锤击的力度,防止索的振幅过大引起非线性成份,锤击位置应离索端尽量远、接近索四分之一长度的地方。采集信号的传感器应布置在离索端尽量远、接近索四分之一长度的地方。在进行数据分析时,建议至少取0.2以上的分辨率,以满足精度要求。

参考文献:

- [1] 严国敏. 现代斜拉桥[M]. 成都:西南交通大学出版社,1995 (YAN Guo-min. Modern Cable-Stayed Bridges. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1995 (in Chinese))
- [2] 陈刚,任伟新. 基于环境振动的斜拉桥拉索基频识别[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(3):100~106 (CHEN Gang, REN Wei-xin. Ambient vibration based identification of fundamental frequencies of stay cables. Earthquake Engineering And Engineering Vibration, 2003,23(3):100~106(in Chinese))
- [3] 张令弥. 振动测试与动态分析[M]. 北京:航空工业出版社,1992 (ZHANG Ling-ni. Vibration Measurements And Dynamic Analysis. Beijing: Publishing House of Aircraft Industry, 1992 (in Chinese))
- [4] 傅志方,华宏星. 模态分析理论与应用[M]. 上海:上海交通大学出版社,2000 (FU Zhi-fang, HUA Hong-xing. Modal Analysis Theory And Application. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2000 (in Chinese))
- [5] Heylen W, Lammens S, Sas P. Modal Analysis—Theory and Testing [M]. Katholieke Universiteit Leuven, 1997
- [6] 刘志军,党志杰,罗元文等. 振动法测定缆索张力的研究 [J]. 桥梁建设,2002年第2期 (LIU Zhi-jun, DANG Zhi-jie, LUO Yuan-wen, et al. Study on the Determination of Cable Tension by Vibration Method. Bridge Construction, 2002,(2) (in Chinese))
- [7] 陈刚. 振动法测索力与实用公式 [D]. 福州大学硕士学位论文, 2004. 1, <http://bridge.fzu.edu.cn> (CHEN Gang, Practical Formulas for Estimation of Cable Tension by Vibration Method, M. Sc Thesis, Fuzhou University, 2004. 1, <http://bridge.fzu.edu.cn> (in Chinese))
- [8] Mehrabi A B, Tabatabai H A. Unified Finite Difference Formulation for Free Vibration of Cables [J]. Journal of Structural engineering, ASCE, 1998, 124(11): 1313~1322
- [9] Zui H, Shinke T, Namita Y. Practical Formulas for Estimation of Cable Tension by Vibration Method [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1996, 122(6): 651~656
- [10] Irvine H M. Cable Structures [M]. Cambridge: The MIT Press, 1981

A Study on Experimental Modal Analysis of Stay Cables

REN Wei-Xin^{1, 2}, HU Wei-Hua¹, LIN You-Qin¹

(1. Department of Civil Engineering, Fuzhou University. Fuzhou 350002, China;

2. Department of Civil Engineering, Central South University. Changsha 410075, China)

Abstract: Experimental modal analysis and testing is one of the most widely used techniques for the measurement of tension forces in stay cables. For the modal testing of stay cables, adoption of proper experimental methodology for acquiring the reliable signals plays a key role for accurate identification of the cable frequencies. In this paper, a stay cable model experiment was conducted in laboratory to determine the effects of the variables such as type and placement of excitations, arrangement of accelerometers, sampling frequency and frequency resolution etc. Comparing the frequencies identified by the ambient excitation with those by the hammer excitation, it is demonstrated that the ambient excitation is good enough to identify the frequencies of stay cables interested. A feasible experimental procedure was presented for accurate determination of the stay cables frequencies. The results show that the tensions of the stay cable experimentally determined achieve an error of less than 1.5% by comparing those with the theoretical prediction.

Key words: modal analysis; ambient vibration; excitation; accelerometer; frequency resolution; stay cables