

文章编号:1671-6833(2009)03-0026-04

斜拉索参数共振分析及控制

薛晓锋, 刘健新

(长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘 要: 针对斜拉桥拉索的参数振动问题, 结合工程实例, 采用4种不同的计算公式计算了斜拉索的基频, 通过分析比较, 推荐采用考虑垂度的常用基频计算公式进行斜拉索的参数共振分析。分析结果表明, 黄浦桥的中长斜拉索可能会发生参数共振。采用的黏性剪切型外置式阻尼器可以给斜拉索提供足够的附加阻尼, 使拉索各受控振型的对数衰减率均达到0.03以上。

关键词: 斜拉索; 基频; 参数振动; 振动控制; 黏性剪切型阻尼器

中图分类号: U 443.38 **文献标识码:** A

0 引言

斜拉桥是多索系统, 全桥的振动频率很容易与索的振动频率接近, 当桥面或索塔的振动频率与某一拉索的横向振动频率成整倍数关系时, 微小的桥面振动会激起斜拉索大幅的横向振动^[1-4]。1988年3月, 比利时 Ben2Ahin 桥的9根索发生了振幅达1 m以上的振动, 同年10月, Wander 桥也发生了类似现象。因此现代斜拉桥建设时应该考虑斜拉索的参数振动。

汪至刚、孙炳楠^[5]通过数值计算分析的方式进行了拉索参数振动的特性研究, 刘人怀、王波^[6]采用数值分析计算的方法分析了拉索自身阻尼对参数振动的抑制影响及附加阻尼对振动的衰减作用。哈尔滨工业大学的陈文礼、李惠^[1]研究了黏滞阻尼器对拉索参数振动的控制效果。

基于不同的假定分析, 不同的文献给出了斜拉索基频不同的计算公式^[5-6], 但是斜拉索参数振动分析时采用哪一种比较合适, 这个问题尚没有文献论及, 笔者结合黄浦桥工程实例, 采用4种不同的计算公式, 分别计算了实桥44根长短不同的斜拉索的固有频率, 分析了各种方法的特点, 推荐出适于斜拉索参数振动分析的斜拉索基频计算方法, 采用推荐的方法进行了黄浦桥斜拉索参数振动分析, 并提出了制振方法。

1 参数振动的分析方法

有限元软件建立整桥模型进行模态分析, 得到全桥整体的振动频率与模态, 然后采用合适的斜拉索固有频率计算方法得到全桥斜拉索的固有频率, 将其与全桥整体的振动频率匹配, 找出可能发生参数振动和线性内部共振的斜拉索。

2 斜拉索固有频率计算

不同的文献有不同的方法, 目前除有限元建模进行模态分析外, 还有以下几种:

2.1 方法一

不考虑初始挠度时, 拉索的第1阶固有频率:

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T_0}{m}} \quad (1)$$

式中: f 为拉索频率, Hz; L 为拉索自由索长, m; T_0 为拉索初张力, N; m 为拉索容重, kg/m。

2.2 方法二

考虑拉索的初始挠度(抛物线形), 建立斜拉索振动的力学模型如图1。拉索两端铰接, 索的右锚固点(即图1中的B点)发生竖直向的振幅为 χ , 圆频率为 Ω 的简谐振动。利用 Halmiton 原理建立方程, 推导^[5]得考虑斜拉索初始挠度后拉索的一阶模态固有频率为

$$f_0 = f_0 \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{4}{\pi} \right)^4 \frac{LEAx^2}{T_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中: L 、 T_0 与上式相同; EA 为拉索的弹性刚度; χ

收稿日期: 2009-02-08; 修订日期: 2009-04-17

作者简介: 薛晓锋(1976-), 女, 河南襄城人, 长安大学博士生, 从事振动控制研究, E-mail: xuexiaofeng001@126.com。

$= mgsin\gamma/T_0$, 为考虑拉索具有初始挠度, 其初始挠度的形状假设为抛物线形; γ 为索的轴线方向与竖直方向的夹角.

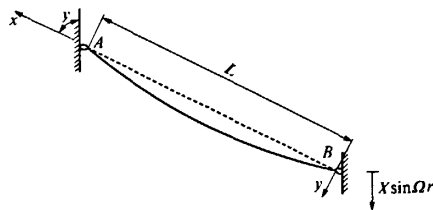


图 1 斜拉索非线性振动模型
Fig. 1 Vibration modal of cable

2.3 方法三

假定斜拉索一端固定, 一端施加激励, 在拉索的两端不设转动约束, 建立单根斜拉索的模型如图 2, 考虑非线性性的影响, 用牛顿定律建立索的振动微分方程. 不考虑索的重力对索弦向张拉力的影响, 索的重力垂度曲线假定为抛物线, 经过推导^[6]得单根斜拉索的基频为

$$\begin{cases} f_0' = f_0 \left(1 + \frac{8L^3 A_1^2 x^2}{\pi^4 X_0} \right) \\ X_0 = TL/EA \\ A_1 = mg \cos \gamma / T \end{cases} \quad (3)$$

式中符号意义同公式(1)、(2).

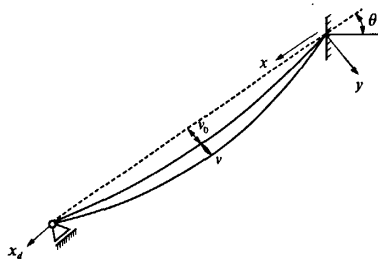


图 2 拉索参数振动分析模型
Fig. 2 Parametric vibration modal of cables

2.4 不同计算方法得到的计算结果比较

为了直观定量的比较不同计算方法的特点, 笔者以黄埔斜拉桥为例进行计算分析. 珠江黄埔大桥斜拉桥是一座独塔双索面斜拉桥, 全长 705 m, 北引桥侧和中引桥侧各有拉索 44 根, 采用非对称布置. 其立面布置图如图 3.

分别按 4 种方法计算得到斜拉索基频, 他们的大小及相对关系见图 4. 其中方法一、二、三分别为按照公式(1)、(2)、(3)计算得到的基频, 方法四为采用有限元建模分析得到的基频. 限于篇幅, 笔者用 Z 索(边引桥侧)的计算来比较各种方

法的计算结果, 见图 4.

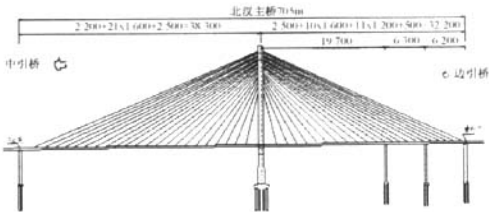


图 3 黄埔桥立面布置图(单位:m)
Fig. 3 Elevation drawing of Huangpu Bridge (unit:m)

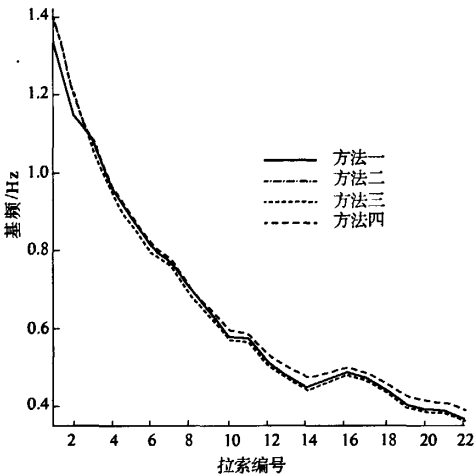


图 4 斜拉索的基频
Fig. 4 Basic frequency of all cables

由图 4 可见 4 种方法得到的基频很相近. 斜拉索的自由长度小于 5 号索(自由索长为 142 m)之前, 方法一计算的结果与方法二、三差别不大; 长度大于 9 号索(自由索长为 195.5 m)的斜拉索, 采用方法一计算得到的基频明显较方法二、三偏小. 这是因为方法一没有考虑重力作用引起的挠度作用, 而长索受重力挠度的影响较短索大. 方法二、三均考虑了垂度的影响, 长度小于 9 号索时两者计算结果基本一样, 对于大于 9 号索长的斜拉索, 方法三要大于方法二和方法四的计算结果. 这是因为方法三更加突出了长索非线性性的影响, 而长索的非线性效应较显著; 方法四是采用 10 个节段的 link 单元建模, 两端采用固结的约束方式, 很好的模拟了工作状态时斜拉索重力作用下的挠度作用, 计算结果与方法二最为接近.

基于以上的分析, 后面进行斜拉索参数共振分析时, 长度小于 200 m 的拉索基频采用方法一计算, 大于 200 m 的拉索基频采用方法二计算结果.

3 支撑结构的固有频率计算

支撑点桥塔或桥面的固有特性计算借助于 ANSYS 有限元分析程序. 忽略塔基桩基与基础之间的相互作用, 采用固结. 梁和塔采用 beam4 单元、拉索采用不分节段的 link10 单元建立全桥分析模型见图 5. 可能会引起斜拉索参数振动的振形特性描述见表 1.

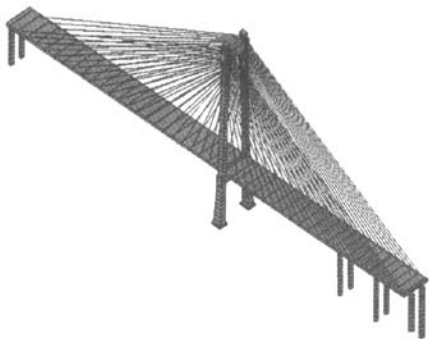


图 5 全桥三维有限元分析模型
Fig. 5 Three-dimensional finite element model of global bridge

表 1 全桥振动特性及可能发生参数振动的斜拉索
Tab. 1 Global vibration characteristic and cables may occur parametric oscillation

序号	振形阶数	频率/Hz	振形描述	可能引发参数共振的斜拉索
1	3	0.305 268	一阶竖弯	
3	5	0.560 888	二阶竖弯	
4	12	0.721 217	三阶竖弯	J20、Z1、Z22
5	13	0.754 092	一阶扭转	J19、Z0、Z22、Z1
6	15	0.896 632	四阶竖弯	J14、15、16、Z14、15
7	16	0.951 653	五阶竖弯	J13、14、Z13
8	19	1.107	二阶扭转	J10、11、12、Z11
9	22	1.218	六阶竖弯	Z10
10	24	1.312	七阶竖弯	J8、Z9
11	28	1.502	八阶竖弯	J7、Z7
12	29	1.568	三阶扭转	J6、7、Z6、7

4 参数振动分析

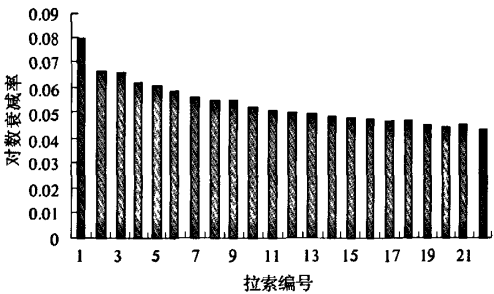
主梁高阶振动振幅值较小, 认为参数振动引起的负阻尼不足以抵消拉索本身结构阻尼而使拉索振动发散. 所以取前 30 阶桥梁振型模态分析与斜拉索固有频率的关系, 桥面或者主塔以 2 倍于拉索基频的固有频率发生竖弯或者扭转时可能引发斜拉索的参数振动, 稳定区间取为 5%. 分析结

果见表 1. 由表 1 看出, 发生参数振动的斜拉索主要集中在中长索上.

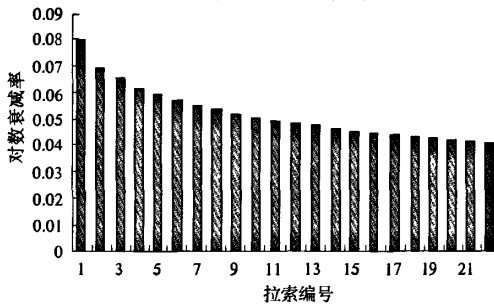
5 振动控制

实际斜拉索工作条件比较复杂, 拉索振动时很难区分哪些是强迫振动的成分, 哪些振动是参数振动的成分, 但是增大拉索的阻尼总可以使斜拉索的振动尽快的衰减下来^[7]. 本桥除了采用在斜拉索外套筒打眼和安装内置式阻尼器外, 还安装了外置式黏性剪切型阻尼器制振.

图 6(a)和图 6(b)分别为中引桥侧 22 根拉索和北引桥侧 22 根斜拉索安装黏性剪切型阻尼后, 由附加阻尼产生的最大对数衰减率.



(a) J1~J22号斜拉索



(b) Z1~Z22号斜拉索

图 6 安装了阻尼器的拉索的对数衰减率

Fig. 6 Maximum logarithmic decrement of cables with viscous shear damper

由图 6 可见: 黏性剪切型阻尼器的安装可以给斜拉索增加很大的附加阻尼, 使斜拉索的对数衰减率提高到 0.03 以上, 这能够很好地提高斜拉索抵抗强迫振动的能力, 提高斜拉索参数振动的发振振幅.

6 结语

笔者结合工程实例, 采用 4 种方法计算了斜拉索基频, 比较了各种方法的特点及使用情况, 进而对黄埔桥进行了斜拉索的参数共振分析并进行了振动控制设计, 主要得到如下结论:

(1)不考虑垂度的基频计算公式虽然最简单,但是对于长索的计算结果偏小,索长与索力比值越大,这个影响越大,故索力较小的长索计算基频时不能忽略重力垂度的作用;

(2)两端铰支的斜拉索非线性分析模型与有限元建模分析的结果最为一致,能较好地反映斜索的固有特性,且较建模分析要简单,斜拉索参数共振分析时,长度大于200 m的斜拉索的基频计算采用这种方法,长度小于200 m的斜拉索的基频采用不考虑初始挠度的计算方法;

(3)斜拉桥建造时,需考虑可能发生参数共振的斜拉索.采用黏性剪切型阻尼器可以有效提高斜拉索的附加阻尼,从而抑制参数共振的发生.

参考文献:

[1] 李寿英,顾明,陈政清.阻尼器对拉索风雨激振的

控制效果研究[J].工程力学,2006,24(8):1-8.

[2] 刘万峰.粘性剪切型阻尼器在斜拉桥拉索减振中的研究[D].西安:西安公路交通大学,1999.

[3] COSTA A, MARTINSJAC, BRANCOF, et al. Oscillations of bridge stay cables induced by periodic motions of deck and or towers[J]. Journal of Engineering Mechanics. 1996, (7):613-621.

[4] 亢战,钟万勰.斜拉桥参数共振问题的数值研究[J].土木工程学报,1998,31(8):14-22.

[5] 汪至刚,孙炳楠.斜拉索的参数振动[J].土木工程学报,2002,35(5):28-33.

[6] 杨素哲,陈艾荣.超长斜拉索的参数振动[J].同济大学学报:自然科学版,2005,33(10):1304-1308.

[7] 陈文礼,李惠.黏滞阻尼器对拉索参数振动的控制分析[J].地震工程与工程振动,2007,27(2):137-144.

Analysis and Control of Parametric Vibration of Inclined Cables

XUE Xiao-feng, LIU Jian-xin

(Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Parametric vibration of cables may bring damage to the cable and anchorage, so it must be considered during construction. This paper calculates the basic frequency of cables with four different formulations, and a suitable method is proposed to use in the analyzing of parametric vibration according to the results of calculation. This paper analyses the parametric vibration of Huangpu cable stayed bridge, and the result indicates that for cables not too long or too short, parametric vibration occur more easily. Viscous shear damper, outside set damper, can provide enough damping for the cables, and the logarithmic decrement of controlled mode can be enhanced up to more than 0.03.

Key words: cable; basic frequency; parametric vibration; control vibration; viscous shear damper