

斜拉桥拉索振动及其减振措施

黄红梅

(湖南资兴市市政工程公司, 湖南资兴 423400)

摘 要:拉索是斜拉桥的关键构件, 承受桥梁的全部荷载, 在风(雨)等作用下容易产生大幅振动。该文介绍了拉索的常见振动及其振动机理, 拉索振动控制措施与技术, 对斜拉桥拉索振动与减振问题具有一定的参考作用。

关键词:斜拉桥; 拉索; 振动; 减振

中图分类号:U441.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2007)03-0037-04

0 前言

拉索是斜拉桥的关键构件之一, 承受及传递着桥梁的全部荷载。随着斜拉桥跨度的增大, 目前最长的斜拉桥拉索长度已超过 500 m。拉索具有很小的刚度和阻尼, 拉索往往具有很低的固有频率和极低的模态阻尼比, 在外部激励下极易发生大幅振动^[1-4]。特别是在风雨气候条件下拉索发生的所谓风雨振现象, 引发的振幅最大可达到拉索直径的 3~5 倍。斜拉索的振动特别是风雨引起的大幅振动容易引起索的疲劳, 在索锚结合处产生疲劳裂纹, 破坏索的防腐蚀系统, 严重的还会造成索的失效^[5]。索的振动还会引起司乘人员的不舒适, 并质疑桥梁的安全性。拉索振动及其控制已成为大跨度斜拉桥需要研究解决的关键问题之一。

国内外对斜拉索减振进行了许多研究, 提出了多种减振技术^[6-20]。如采用辅助索、粘性阻尼器、振动吸收器、粘性阻尼器、磁流变阻尼器等多种减振方法。

本文对斜拉桥拉索常见的振动形式进行了分析, 介绍和评述了现有的拉索减振措施, 对认识斜拉桥拉索振动机理及采取相应的减振措施具有一定的参考作用。

1 斜拉桥拉索振动

1.1 Karman 涡激共振(Vortex shedding)

拉索横断面一般为圆形。当风流经过索时, 在其横断面尾流中将出现交替脱落的漩涡, 此即所谓的 Karman 涡旋。研究表明, 漩涡脱落频率由下式描述^[1]:

$$f_v = \frac{S_v U}{D} \quad (1)$$

式中: f_v 为风速; D 为拉索直径; S_v 为 Strouhal 数, 对圆形断面的二维柱体而言, 其值为 0.2。当漩涡脱落频率和拉索某阶固有频率相等时, 便发生涡激共振。

在 Karman 涡的作用下, 拉索的大幅振动以基频或低频出现, 而根据实际拉索频率和 Strouhal 数的分析, 拉索低频涡激振动的临界风速一般仅为 0.5~2 m/s。如此低的风速所产生的涡激力, 难以提供激起拉索的低频大幅振动的能量。

1.2 参数共振(Parameter resonance)

斜拉桥拉索的上、下端分别与桥塔、桥面相连接。桥梁在风作用下以频率发生抖振, 当正好等于拉索某阶模态频率的 2 倍时, 拉索即发生参数共振。拉索的参数共振往往表现为拍振, 振动能量在拉索和桥梁之间转换^[4], 参数共振的典型形态见图 1。因为桥梁设计时均要考虑避免参数共振的发生, 所以实际桥梁结构一般不会出现此类振动。

1.3 尾流驰振(Wake galloping)

两索沿风向斜列时, 来流方向的下游拉索发生比上游拉索更强烈的风致振动^{[6][8]}。上游拉索的尾流中存在一个不稳定的驰振区, 如果下游拉索正好位于这一不稳定区中, 其振动就会不断加大, 直至达到一个稳态大幅度的极限环。当两拉索相距较远, 超出尾流驰振不稳定区时, 就不会发生尾流驰振。

1.4 风雨激振(Wind-rain induced vibration)

1984 年日本学者 Hikami 第一次提出了风雨激振概念^[2]。所谓风雨激振, 是指风、雨共同作用引起的拉索大幅振动现象, 简称为雨振或风雨振, 它是目前所有拉索风致振动中最强烈的一种, 在许多斜拉桥上都观察到了这种现象^[2,3,10]。如 Hikami 观察到直径 140 mm 的斜拉索在 14m/s 风速下振幅达到 175 mm; 日本的 Arastu 桥在建造时就有强烈的索振动, 观察到的最大振幅为 300 mm, 大约是拉索直径的 2 倍; 法国的布鲁东桥、泰国的

收稿日期: 2006-11-23

作者简介: 黄红梅(1968-), 女, 湖南人, 工程师, 从事市政工程建设施工工作。

Rama IX 桥, 日本的名港西桥报道的拉索振幅甚至大到相邻拉索发生碰撞的程度; 荷兰的 Erasmus 桥发生风雨振时单边振幅达到 800 mm, 桥管当局为此紧急关闭全桥的交通。国内杨浦大桥和武汉三桥都观察到了风雨作用下的强烈振动, 其最大振幅超过 1 m; 湖南岳阳洞庭湖大桥也观测到了强烈的风雨振, 振幅(峰-峰)超过 800 mm。观测表明, 拉索风雨振有如下特点: 大、中、小雨的情况都可能发生风雨振; 主要发生在外包裹为聚乙烯套管的索上; 振动频率约为 0.6~3 Hz, 一般为单阶模态频率振动; 风速范围约为 6~18 m/s; 索振主要是面内振动; 索的表面能清楚看到水线的运动。图 2 为洞庭湖大桥观测到的风雨振, 最大振动加速度超过 100 m/s^2 。

2 斜拉桥拉索的振动控制

基于对拉索风致振动机理的认识, 提出了一系列相应的振动控制方法, 主要分为空气动力学措施和机械措施。前者主要通过改变拉索的断面形状, 使其空气动力学性能得到改善。后者通过在拉索上附加阻尼器或辅助索等机械(结构)装置, 增加拉索的阻尼或形成有干扰效应的索组, 达到减小振动的目的。

2.1 主要空气动力学措施

因为圆形断面容易引起拉索的涡振、驰振, 研究表明将圆形的拉索断面改为多边形断面可以改变拉索的气动性能。风洞试验表明, 六边形索是不稳定的, 而八边形索具有很好的稳定性。

风雨振主要是拉索上水线振动激励引起拉索大幅振动, 研究表明在拉索 PE 套管上采取开槽及增加 U 形套的方法, 能避免拉索上水线的相差, 对控制风雨振非常有效, 已分别在日本的 Higashi-Kobe 桥和 Yuge 桥应用。另一种方法则是增加拉索表面的粗糙度, 在拉索表面制造凹痕能防止水线的形成, 控制风雨振的方法, 风洞试验表明, 该措施对抑制风雨振具有较好的效果, 并且由于雷诺数的增大减小了拉索的阻力, 这对于大跨度斜拉桥来说是非常有利的, 因为在大跨度斜拉桥中拉索的阻力已和主梁的阻力一样大, 此方法已在 Tatara 大桥应用。再一种方法是在索表面沿轴向加螺旋带的方法, 干扰或截断水线的形成, 起到减振作用。该方法已在 Normandy 桥和我国南京长江二桥应用, 作为辅助减振措施。

2.2 机械减振措施

最常用的机械减振措施是增加拉索系统的阻尼。由于拉索振动主要是拉索具有非常低的固有结构阻尼, 因此增加拉索阻尼是控制拉索振动, 特别是风雨振控制最直接和最有效的方法。

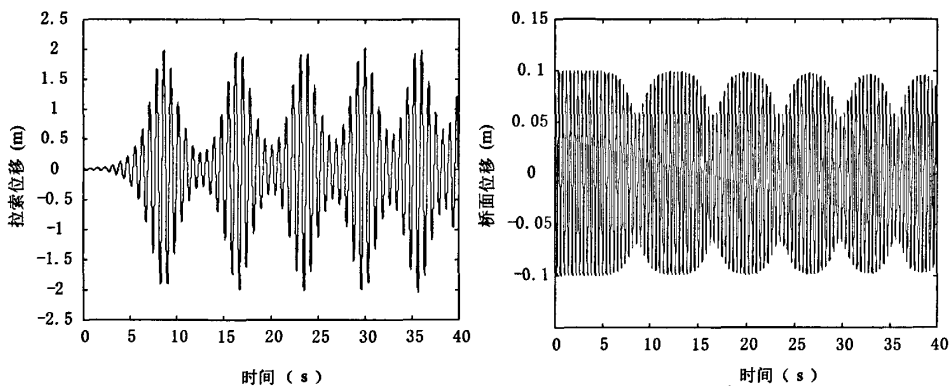


图 1 参数共振时拉索及桥面振动响应形

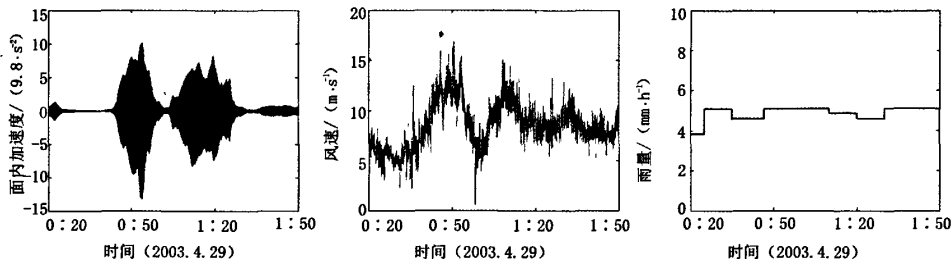


图 2 风雨振时实测的拉索加速度、风速及雨量(洞庭湖大桥)

在索锚处加设高阻尼橡胶阻尼器(High Damping Rubber, HDR)是国内外应用最广的方法之一。它的减振原理是利用高阻尼橡胶吸收振动的能量,国内大多数斜拉桥都在锚固端的钢护筒内安装了高阻尼橡胶阻尼器。实践证明,因为橡胶阻尼器安装高度较低,拉索在该处振动位移很小,吸收振动能量有限,难以对风雨振等大幅强烈的振动产生有效的控制。如杨浦大桥、洞庭湖大桥都安装了橡胶减振阻尼器,仍都发生了强烈的风雨振。

增加拉索阻尼最有效和最广泛使用的方法是在拉索和桥面之间安装油阻尼器(Oil damper),如法国的 Brotonne 桥、美国的 Sunshine Skyway 桥、日本的 Aratsu 桥和我国的南京二桥等都使用这个方法。

关于油阻尼器的性能及优化设计, Kovacs (1982)的研究认为,第一阶优化阻尼系数为:

$$c_{opt} = mL\omega_{01}/(2\pi \cdot \frac{x_c}{L}) \quad (2)$$

式中, m 、 L 、 ω_{01} 、 x_c 分别表示拉索每 m 质量、拉索长度、拉索第一阶模态频率及阻尼器安装点到锚固端的距离。

Pacheco (1993)等同样研究了带阻尼器的张紧水平弦的动力模型,经过简化分析,将阻尼器设计归结为两个无量纲参数 $\zeta_i \frac{x_c}{L}$ 、 $\frac{i_c}{m\omega_{01}L} \frac{x_c}{L}$ 的综合优化,最后得到使拉索各阶模态阻尼达到最大的阻尼系数和最大模态阻尼比为:

$$c_{opt} = 0.10mL\omega_{01}/(ix_c/L), \quad \zeta_{max} = 0.52(x_c/L) \quad (3)$$

式(3)说明拉索各阶模态阻尼的最优阻尼系数数值是不同的,各阶最大模态阻尼比与阻尼器安装位置距锚固端的距离成正比。要使系统取得最优的阻尼,必须进行综合优化。

另一种控制拉索振动的方法是在主要拉索之间设置辅助索,该方法能增加拉索的刚度,使拉索相互牵制,达到消能减振的效果。Yamaguchi、Nagahawatta (1995)对辅助索的减振机理进行了试验研究,结果表明柔性的辅助索比刚性的辅助索具有更好的减振效果。林志兴等分析了辅助索对斜拉索的风致涡激共振、参数共振、风雨振等的减振作用。此方法已在法国的 Normandy 大桥应用。但采用辅助索影响美观,并需要解决辅助索连接件疲劳问题。

2.3 斜拉索智能阻尼减振技术

磁流变阻尼器是由高科技亚纳米材料—磁流变体制造的一种智能阻尼器,通过调节磁场强度,

可以控制阻尼力的大小。应用磁流变阻尼器控制拉索振动具有明显的优点,因为磁流变阻尼器的智能特点,能通过调节电压取得理想的阻尼力,对于不同结构参数的拉索,采用同一种阻尼器都能取得最佳的减振效果。同时,磁流变阻尼器受温度等环境因素影响小,能保持长期稳定地工作。

陈政清等通过大量理论与试验研究,开发了磁流变式拉索减振系统,并成功应用于洞庭湖大桥的风雨振控制。该工程也是世界上第一个应用磁流变阻尼技术进行振动控制的桥梁工程(见图3)。为了进一步提高磁流变拉索减振系统的可靠性和工程适用性,一种新型永磁调节式磁流变阻尼器已被开发并应用于长沙洪山大桥的拉索风振控制(见图4)。

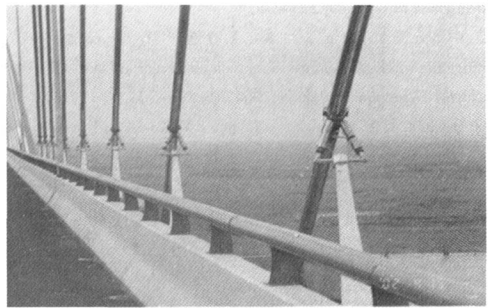


图3 岳阳洞庭湖大桥拉索减振系统

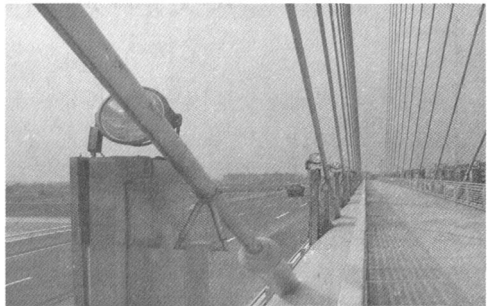


图4 洪山大桥拉索减振系统

3 结语

斜拉桥拉索振动及其控制,是目前桥梁工程界研究解决的重要问题之一,但拉索振动的机理目前尚未完全清楚,需要更深入的理论和试验研究。随着各种新技术和新材料的应用,拉索减振技术也开始向智能化方向发展,特别是磁流变阻尼器及其半主动控制技术,具有非常广阔的工程应用前景。

参考文献

- [1] 顾明,刘慈军,罗国强,等.斜拉桥拉索的风(雨)激振及控制[J].上

- 海力学,1998,19(4):281-288.
- [2] Hikami, Y and Shiraiishi, N. Rain-wind induced vibrations of cables in cable-stayed bridges [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1988, 29: 409-418.
- [3] Swan, R. Vibrations damped [J]. Bridge Design and Engineering, 1997, (9): 44-45.
- [4] Verwiebe, C. Exciting mechanisms of rain-wind-induced vibration [J]. Structural Engineering International, 1998, (8): 129-135.
- [5] 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(4): 14-22.
- [6] Kovacs, I. Zur frage der seil-schwingungen und der seildämpfung [J]. Die Bautechnik, 10, 325-332.
- [7] Pacheco, B M, Fujino, Y and Sulekh, A. Estimation curve for modal damping in stay cables with viscous damper [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1993, 119(6): 1961-1979.
- [8] Spencer Jr., B F, Dyke, S J, Sain, M K and Carlson, J D. Phenomenological model for magnetorheological dampers [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123(3): 230-238.
- [9] Z Q Chen, X Y Wang, J M Ko, Y Q Ni. MR damping system for mitigating wind-rain induced vibration on Dongting Lake cable-stayed bridge [J]. Wind and Structures, 2004, 7(5): 293-304.
- [10] Z Q Chen, X Y Wang, Y Q Ni and J M Ko. Field measurements on wind-rain-induced vibration of bridge cables with and without MR damper [Z]. Proceedings of the Third World Conference on Structural Control (ed. F Casciati), Como, Italy, April, 2002, 393-402.
- [11] Z Q Chen, X Y Wang, J M Ko, Y Q Ni, B F Spencer, Jr., G Yang. MR Damping System on Dongting Lake Cable-Stayed Bridge, Smart Structures and Materials 2003: Smart Systems and Nondestructive Evaluation for Civil Infrastructures [Z]. Shih-Chi Liu, Editor, Proceedings of SPIE, Vol. 5057(2003), 229-235.
- [12] X Y Wang, Y Q Ni, J M Ko and Z Q Chen. Optimal design of viscous dampers for multi mode-vibration control of bridge cables [J]. Engineering Structures, 2005, 27 (5): 792-800.
- [13] 王修勇, 陈政清, 倪一清. 斜拉桥拉索风雨振观测及其控制 [J]. 土木工程学报, 2003, 36(6): 53-59.
- [14] 王修勇, 陈政清, 倪一清, 等. 斜拉桥拉索磁流变阻尼器减振技术研究 [J]. 中国公路学报, 2003, 16(2): 52-56.
- [15] 王修勇, 陈政清, 高赞明, 等. 磁流变阻尼器对斜拉索振动控制研究 [J]. 工程力学, 2002, 19(6): 22-28.
- [16] 王修勇, 陈政清, 何旭辉, 等. 洞庭湖大桥风雨振减振试验研究 [J]. 桥梁建设, 2002, 2: 11-14.
- [17] 王修勇, 陈政清, 何旭辉, 等. 斜拉桥拉索风雨振控制的智能阻尼技术 [J]. 振动与冲击, 2002, 21(3): 26-30.
- [18] 王修勇, 陈政清, 倪一清. 斜拉索-磁流变阻尼器系统半主动控制的神经网络法 [J]. 振动与冲击, 2003, 22(4): 49-53.
- [19] 王修勇, 戚跃然, 陈政清, 等. 磁流变阻尼器控制拉索振动的优化参数研究 [J]. 湘潭矿业学院学报, 2003, 18(1): 31-35.
- [20] 王修勇, 陈政清. 确定斜拉索减振阻尼器优化参数的一种方法 [J]. 振动与冲击, 2002, 21(1): 89-91.

福州三大交通项目将开建 力争完成投资 30 亿

今年福州市交通固定资产投资确保完成 27.1 亿元, 力争完成 30 亿元。其中, 重点项目 21 亿元, 重要网络公路 2.2 亿元, 农村公路、陆岛交通码头、渡口渡船更新改造与农村客运站建设 3.9 亿元。在多渠道筹措建设资金的同时, 确保交通规费征收达到 8 200 万元。

三大重点项目开工建设 今年福州市将加快建设湾边大桥、湾边互通项目; 全面开工建设机场高速公路二期、绕城高速西北段、平潭海峡大桥等三个重点项目; 力争动建京台线福清段江阴疏港支线; 推进沈海复线福州段、京台线古田至闽侯鸿尾段、罗源湾南岸疏港高速公路以及绕城高速公路东南段等储备项目的前期工作。

开通 30 条农村客运线路。今年计划安排 600 km 农村公路路面硬化和 110 km 乡通县破损沥青路改造; 计划建设 20 个以上等级客运站, 开通农村客运线路 30 条, 建设 5 座陆岛交通码头, 安排改造渡口 29 处、更新渡船 22 艘、撤渡建桥 1 座。

完成洪塘大桥维修改造。完成罗源可湖至碧里疏港公路建设、国道 316 线路面与洪塘大桥维修改造, 加快连江浦口至山坑、官岭至可门、罗源碧里至将军帽疏港公路建设与国道 104 线路面修复。