

带转向机构HCA在杭州湾跨海大桥斜拉索减振中的应用

王中文 陈儒发

(广东省长大公路工程有限公司 广州 510620)

摘要:杭州湾跨海大桥北航道桥为主跨448m的钻石型双塔双空间索面钢箱梁斜拉桥,通航净空为47m,按双向六车道高速公路设计,设计时速100km/h。为改善行车安全性,国内首次在栏杆外侧设置了风障(高度从近塔4.27m至远塔3.4m),为了确保整桥隽秀的景观前提下开发了带转向机构的拉索减振器,对全桥拉索进行了理论分析和安装减振器后的实桥测试。

关键词:斜拉索 风致振动 粘性剪切阻尼器 转向机构

引言

斜拉桥作为一种新型的具有大跨越能力的柔性结构在近十多年内得到了飞快的发展。随着其跨度的日益增大,拉索也日益长大。由于多车道大跨度桥的经济性,A型塔方案的增多,采用空间索和并列索的情况也日渐增多,再加上从施工角度考虑,密索体系已经成为倾向。鉴于斜拉索是一种质量轻、柔度大、阻尼小的细长构件,由此引起的斜拉索的各种风致振动也日益突出。我国具有18000km陆地海岸线,据估计我国已建成近250座斜拉桥,而且大部分是在东部沿海的经济较发达地区。在已建和在建的斜拉桥中,不少是沿海的连岛桥和海湾桥,从桥址风环境来看,大多属台风多发区,因此风环境比较严峻,桥的拉索将在风作用下大幅振动^[1-3]。众所周知,拉索是斜拉桥极其重要的受力构件,桥跨的恒载与活载大部分通过斜拉索传递到塔位。如不将拉索的风振控制在安全范围内,不仅危及拉索乃至整桥的安全,而且影响其使用寿命,由此造成的社会效益和经济效益的损失将是巨大的。因此必须采取一种比较有效的减振措施,确保其拉索乃至整桥的安全。

1 HCA的研究开发与应用

杭州湾跨海大桥按双向六车道高速公路设

注:《杭州湾跨海大桥北航道桥》项目获第三届欧维姆预应力技术奖三等奖。本文原载《广东公路交通》2009年第3期

计,其中北航道桥为主跨448m的钻石型双塔双索面钢箱梁斜拉桥,通航标准35000t,通航净空47m,共112根斜拉索(空间索)。根据桥址处在东南沿海的台风多发区,而且从风向玫瑰图看出主要风向与桥轴向的夹角为12.5°~35.0°范围的西北风和33.5°~55.0°范围的东南风,虽然拉索外包的PE套上附有螺旋箍条的气动力措施,施工过程中以及桥面合拢后均观察到拉索明显的风致振动,因此进行了粘性剪切阻尼器的研究。

1.1 粘性剪切阻尼器的原理

HCA^[2]原理是增加拉索的等效模态阻尼来抑制振动。如图1所示,阻尼器利用高粘性的材料填充主体,借助其与拉索同步运动的插板的剪切力达到减振目的。由于高分子粘性材料受到温度的影响,而插板与粘性材料的相互作用对于拉索振动的控制又受到拉索振动频率、插板面积、拉索振幅等多种因素影响,因此必须对拉索阻尼器系统进行综合分析,选择最优参数,来实现拉索的振动控制。考虑阻尼器刚度的拉索振动方程如下:

$$T \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c \frac{\partial u}{\partial t} \delta(x-x_c) + ku \delta(x-x_c) \quad (1)$$

式中: T 为拉索的初始张力, u 为拉索横向位移, m 为拉索单位长度质量, c 为阻尼系数, k 为阻尼器刚度, x_c 为阻尼器位置, δ 为狄拉克函数, t 为时间(模型见图2)。

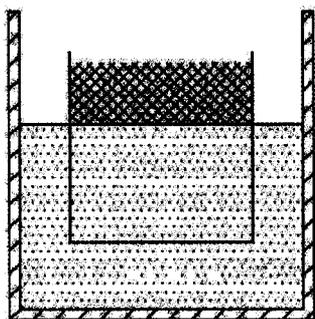


图1 HCA原理

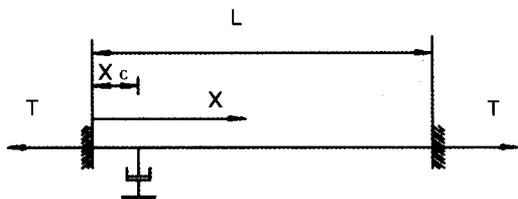


图2 HCA模型

设位移 u 有以下形式:

$$u(x, t) = \sum_{i=1}^n b_i(t) \sin \frac{i\pi x}{L} \quad (2)$$

其中 n 为自由度数, L 为拉索长度。将(2)式代入(1)式, 由伽辽金法, 利用 $\sin \frac{i\pi x}{L}$ 的正交性即:

$$\int_0^L \sin \frac{i\pi x}{L} \sin \frac{j\pi x}{L} dx = \frac{1}{2} L \delta_{ij} \quad (3)$$

可得:

$$\ddot{\underline{b}} + C\dot{\underline{b}} + K\underline{b} = 0 \quad (4)$$

其中:

$$\underline{b} = [b_1(t), b_2(t), \dots, b_n(t)] \quad (5)$$

$$C_{ij} = \frac{2c}{mL} \sin \frac{i\pi x_c}{L} \sin \frac{j\pi x_c}{L} \quad (6)$$

$$K_{ij} = \frac{T}{m} \left(\frac{i\pi}{L}\right)^2 \delta_{ij} + \frac{2k}{mL} \sin \frac{i\pi x_c}{L} \sin \frac{j\pi x_c}{L} \quad (7)$$

在给定阻尼器 k 和 c 的情况下, 通过迭代福斯解法^[4], 可以求解系统的复特征值问题, 从而得到拉索振动的对数衰减率, 通过调整参数 k 、 c , 可以得到对数衰减率与控制参数的曲线, 进而按要求实现阻尼器配置的优化。阻尼器的阻尼系数和刚度系数公式分别为:

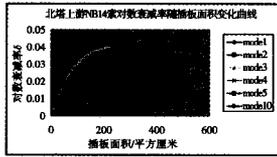
$$c = a_c a^{\eta_1} e^{-\beta_1} S^{\gamma_1} \omega^{\xi_1} \quad (8)$$

$$k = a_k a^{\eta_2} e^{-\beta_2} S^{\gamma_2} \omega^{\xi_2} \quad (9)$$

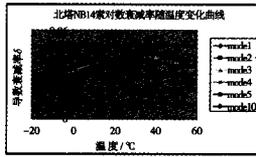
其中 a_c 、 a_k 、 β 、 η 、 ξ , 针对所用粘性材料通过实验拟合得到。 a 是振幅, ω 是圆频率, t 是温度, 面积 S 是优化对象, 利用前述方法可以便捷地得到阻尼器插板面积的优化值, 从而为实际施工提供了理论上的依据和参考。

1.2 杭州湾跨海大桥拉索减振分析

杭州湾跨海大桥是国道主干线三线跨越杭州湾的便捷通道, 跨越宽阔的杭州湾海域, 全长36km, 是目前世界上建成的最长的跨海大桥, 按双向六车道高速公路设计, 设计时速100km/h。大桥设南、北两个通航通道, 南航道桥为主跨318m的A型单塔双索面钢箱梁斜拉桥, 通航净空31m; 北航道桥跨径为230m+448m+230m的钻石型双塔双索面(空间索)钢箱梁斜拉桥, 通航净空47m。为了改善通航孔桥上行车安全性, 中交公路规划设计院在南北航道桥的桥面两侧栏杆外设计安置了风障, 风障高度分别为远塔段 $h_1=3.4$ m, 近塔段 $h_2=4.27$ m。应该说, 风障设施的初衷是针对大桥跨越宽阔的杭州湾海域比较严峻的风环境下确保行车安全性的设施。而作为斜拉索减振器的实施却带来了困难, 如上所述半主动控制的磁流变阻尼器可以将安装高度降低, 但制造成本却成倍的增加, 还因为属有源控制, 其运行成本以及可靠性、稳定性都有待于改进。而粘性剪切型阻尼器属于被动型减振器, 其安装高度 X_c/L 一般均保持在 ≥ 0.025 。考虑到近塔索可能受到顺桥向风时, 塔后紊流尾流的影响, 我们将近塔索的粘性剪切阻尼器的安装高度保持在 $X_c/L=0.03$ 的理论位置, 而远塔索由于斜拉索垂度影响导致的模态阶跃确保 $X_c/L \geq 2.7\%$, 作为抑振效果的保证措施, 但是在实施过程中却因为近塔索的桥轴向水平偏角较大而与风障设施重叠, 因此设计了一个带传递和转向功能的机构, 不但避免冲突而且因为降低了减振器安装的高度而改善了整桥的景观。以北塔边跨上游索NB14和NB6, 北塔中跨上游索NZ5和南塔边跨上游索SB5为例, 说明其减振器优化参数的计算分析及实桥的减振效果的观测结果(图3~图6), 其拉索参数如表1。

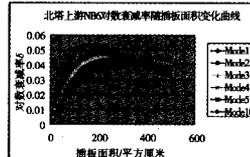


北塔上游NB14索对数衰减率—插板面积曲线
(计算温度: 30℃)

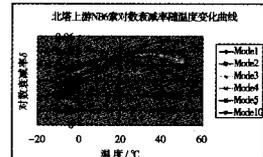


北塔上游NB14索对数衰减率—温度变化曲线
(优化插板面积270cm²)

图3 北塔边跨上游NB14索HCA阻尼器减振效果计算

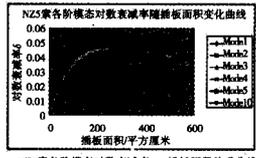


北塔上游NB6索对数衰减率—插板面积曲线
(计算温度: 30℃)

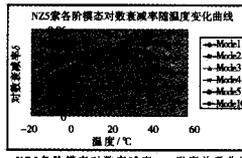


北塔上游NB6索对数衰减率—温度关系曲线
(优化插板面积260cm²)

图4 北塔边跨上游NB6索HCA阻尼器减振效果计算

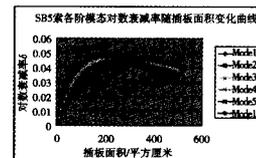


NZ5索各阶模态对数衰减率—插板面积关系曲线
(计算温度: 30℃)

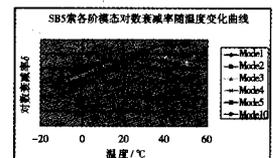


NZ5索各阶模态对数衰减率—温度关系曲线
(优化插板面积270cm²)

图5 北塔中跨上游NZ5索HCA阻尼器减振效果计算



SB5索各阶模态对数衰减率—插板面积关系曲线
(计算温度: 30℃)



SB5索各阶模态对数衰减率—温度关系曲线
(优化插板面积240cm²)

图6 南塔边跨上游SB5索HCA阻尼器减振效果计算

表1 拉索参数

索号	索长 L_0/m	线质量 $l/(kg/m)$	空间角 $l(^{\circ})$	索上安装点 X_c/m	X_c/L_0 $l(\%)$	安装高度 $/m$	索力 $/kN$	拉索基频 $/Hz$
NB14	299.316	64.2	29.261	6.732	2.70	3.700	2790	0.4181
NB6	145.278	52.9	47.771	4.358	3.00	3.602	2198	0.7016
NZ5	132.559	44.8	51.406	3.977	3.00	3.458	2176	0.8313
SB5	134.054	44.8	51.833	4.022	3.00	3.512	1923	0.7728

(阻尼材料参数: 刚度系数 $a_1=1297.6N \cdot S/(m \cdot cm^2)$, 刚度温度系数 $\beta=0.029$, 粘性系数 $a_2=1083.2N/(m \cdot cm^2)$, 粘性温度 $\gamma=0.027$.)

2 实桥拉索减振效果测试

试验设备及数据处理过程框图见图7, 数据采集采用美国惠普公司HP3560A和丹麦B&K公司加速度传感器与电荷放大器组成一个数据采集系统, 进行多次采样并记录, 采用HP公司信号分析专用软件进行数据处理。

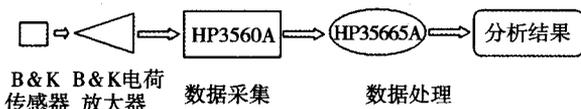


图7 实测框图

共选取如下8根索进行实测:

上游: B10塔边跨: NB14, NB13; B10塔中跨: NZ5, NZ4。

下游: B11塔边跨: SB6, SB5, SB14; B11塔中跨: SZ13。

(1) 对所选8根索进行了装有HCA与无HCA阻尼器对比试验3根(NZ5, NZ4, SB5, 且装有转向机构)和5根有HCA的测试。选择的依据是: 按照理论分析, 长索(长度为L)最易在风力作用下发生振动, 且不易衰减, 而装阻尼器的效果最差, 因为安装阻尼器位置离固定端距离

(X_c)变化不大时, 索越长则阻尼器离其最大振幅点越远, 效果越差, 即 X_c/L 越小, 减振效果越差, 因此选择长索、中长索进行测试是正确的, 具有典型性, 亦即如果中、长索达到减振要求, 短索一般是能达到要求的。

(2) 在自然风环境下, 按照装HCA与未装HCA阻尼器两种情况, 分别将加速度计安装在拉索的索夹板上, 用HP3560A动态信号分析仪记录加速度功率谱(取8块数据平均)、加速度时程曲线、位移时程曲线, 以分析随机风响应有效值、峰-峰值及它们的减小倍率, 但这些数据受当时风速、风向和环境等条件影响很大, 只能供参考。

(3) 在装与未装HCA阻尼器情况下, 分别采用人工激振方法使拉索发生自由振动, 用HP3560A记录位移时程信号, 获得位移自由衰减曲线, 分析拉索对数衰减率即阻尼值, 以验证是否达到预期要求的阻尼值, 此值为核心数据。

(4) 有5根索只测量了装HCA的情况, 从实测数据计算对数衰减率, 同样可判断减振效果。

测试结果见表2及图8~14, HCA图片见图15、16。

表2 拉索基频频率及对数衰减率实测数据
(基频及基频对数衰减率)

索号	HCA	频率基频/Hz	对数衰减率
NB14	有	0.440	0.1106
	无	-	-
NB13	有	0.530	0.0664
	无	-	-
NZ5	有	0.840	0.0304
	无	0.850	0.01952
NZ4	有	0.884	0.0345
	无	0.885	0.01518
SZ13	有	0.531	0.0439
	无	-	-
SB6	有	0.695	0.0299
	无	-	-
SB5	有	0.805	0.0314
	无	0.805	0.01955
SB14	有	0.438	0.1068
	无	-	-

(注:数据由人工激励后自由衰减振动时测得)

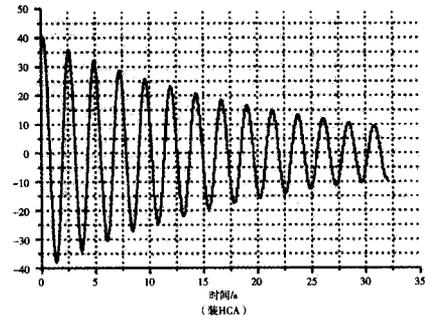


图11 B10塔边跨上游NB14号索人工激励时程

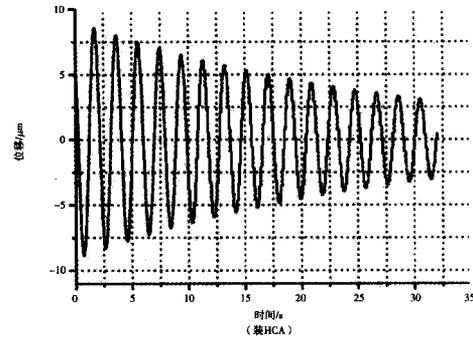


图12 B10塔边跨上游NB13号索人工激励时程

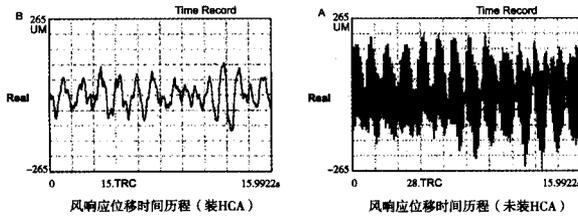


图8 B10塔上游中跨 NZ5号索风响应位移时程曲线装与未装HCA比较图

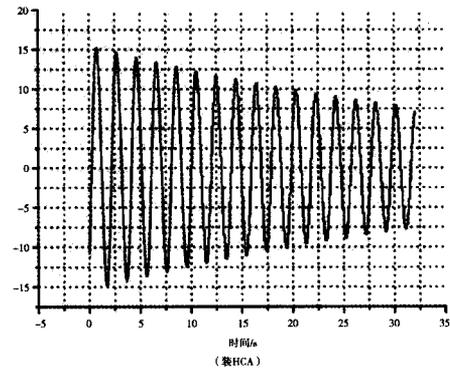


图13 B11塔中跨下游SZ13号索人工激励时程

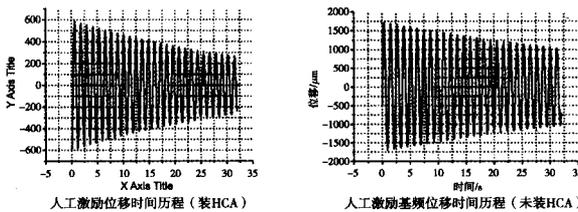


图9 B10塔上游中跨 NZ5号索人工激励位移基频时程衰减曲线有无HCA比较图

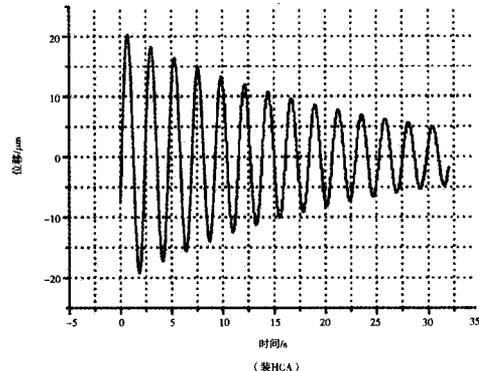


图14 B11塔边跨下游SB14号索人工激励时程

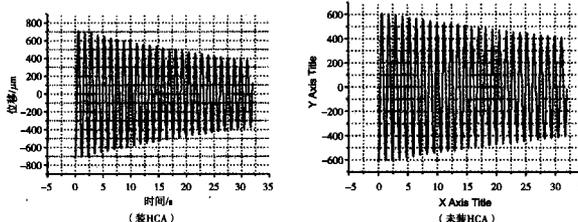


图10 B10塔上游中跨NZ4号索人工激励位移时间历程

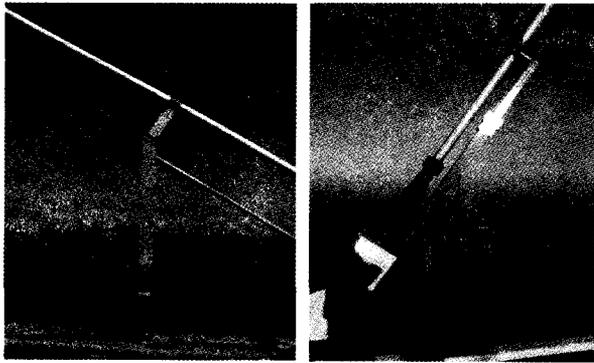


图15 HCA照片图

图16 带转向机构HCA照片

3 结论

(1) 杭州湾跨海大桥被测索在无HCA阻尼器时的1阶对数衰减率(对基频)在0.015~0.019之间,装了HCA阻尼器后其对数衰减率可达0.03~0.1,提高约2~5倍不等(不同索提高倍率不同,表2)。由此可得出结论:以上典型索的实测数据表明,安装阻尼器HCA后对数衰减率达到了0.03以上(表1)。根据有关资料分析表明:拉索的对数衰减率达到0.03以上就足以抑制涡激共振、参数共振、抖振和风雨振等风致振动^[5]。实测还表明安装阻尼器HCA后亦有效地减小了随机风引起的拉索振动响应,达到了减振效果及设计目标。同时这些典型索的数据可反映其他索的效果,具有典型性,因此可以认为本次杭州湾跨海大桥的索的减振效果达到了预期目标。

(2) 拉索的风响应加速度功率谱有效值在自然风环境下减小0.8~20.0余倍,风响应位移功率谱有效值在自然风环境下减小0.70~1.04倍。拉索的风响应位移时程曲线峰~峰值减小0.9~1.9倍,风响应加速度时程曲线峰~峰值减小0.5~4.0倍。

(3) 根据粘性剪切阻尼器(HCA)减振效果计算分析可知,在确定 X_c/L 值情况下,只要拉索的一阶模态的等效阻尼 $\delta_e \geq 0.025 \sim 0.03$,则更高阶模态的等效阻尼更能满足抑制拉索高阶的风致振动要求。

(4) 斜拉索的风致振动响应存在拉索面内和面外两个方向的分量,即使是平行索面由于斜桥向风也会产生面外分量的动力响应,更何况对空间索而言,面外的动力响应必然存在,实桥观测证实面外分量约为 $\leq 1/3$ 面内分量。这就是采用油压减振器和磁流变阻尼器之所以每根索必须设置两个相交的原因,而粘滞阻尼器由于是插板结构可以只装一个减振器。由于杭州湾跨海大桥跨越宽阔的海面,该桥的设计风速为39m/s钻石型桥塔,而且为改善行车安全,首次采用风障设施,因此对近塔索安装粘性剪切阻尼器,既要保证被动式减振器的安装高度,又要确保分别抑制面内和面外的风振响应而又不会与风障设施相碰撞,而设计了一种传递振动响应的转向机构,既保证了减振器在索上的安装高度,又避免了减振器本体与风障的冲突,维护了整桥的景观,实桥减振效果检测证实了它的效果。这在国内外是首次应用,将对今后更大跨径斜拉桥尤其是空间索的减振设施提供了一种新的方案。

参考文献

- [1] Verwiebe C, Ruscheweyh H. Recent research results concerning the exciting mechanisms of rain-wind-induced vibrations[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, (74-76): 1005~1013.
- [2] Takano H, Ogasawara M, Ito N, Shimosa T, Takeda K, Murakami T. Vibrational damper for cables of the tsurumi tsubasa bridge [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, (69-71): 807~818.
- [3] J. A. Main and N. P. Jones, Evaluation of viscous dampers for stay-cable vibration mitigation [J]. Journal of Bridge Engineering (ASCE), 2001, 6, (6): 385~397.
- [4] 大崎顺彦(谢礼立等译). 振动理论[M]. 北京:地震出版社, 1990.
- [5] 刘万峰, 刘建新, 胡兆同. 斜拉桥拉索粘性剪切型阻尼器的试验研究[J]. 西安公路交通大学学报, 2000, 20(3): 41~44.
- [6] 任文敏, 王波. 杭州湾跨海大桥斜拉索减振效果测试报告[R]. 北京:清华大学航天航空学院工程力学系, 2007.