

文章编号:1673-2049(2010)04-0019-06

大跨高墩城市轨道交通斜拉桥动力特性及抗风性能

李永乐, 邸月龙, 赵 彤, 姜孝伟

(西南交通大学 桥梁工程系, 四川 成都 610031)

摘要:以大跨高墩城市轨道交通斜拉桥的 3 种桥型方案为工程背景, 分别建立空间有限元模型, 并进行结构的动力特性计算, 对其自振频率和振型特点进行对比分析; 基于自主研究开发的桥梁结构分析软件 BANSYS, 利用二维平面流场理论和多模态耦合振动分析的方法, 对大跨高墩城市轨道交通斜拉桥结构在静风荷载下的稳定性和由脉动风引起的抖振位移及抖振内力进行了对比分析。结果表明: 大跨高墩城市轨道交通斜拉桥结构整体较柔, 各方案之间因结构差异导致的动力特性和风致响应的差别不容忽视。

关键词:大跨度斜拉桥; 动力特性; 多模态耦合振动; 风致响应; 抗风性能

中图分类号:U448.27 **文献标志码:**A

Dynamic Characteristic and Wind Resistance Behavior of High-pier Long-span Cable-stayed Bridge for Urban Rail Transit

LI Yong-le, DI Yue-long, ZHAO Tong, JIANG Xiao-wei

(Department of Bridge Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: Taking the three schemes of high-pier long-span cable-stayed bridge for urban rail transit as the engineering background, the spatial finite element models were built respectively. The dynamic characteristics of the structures were calculated, and the natural frequencies and vibration mode characteristics were comparatively analyzed. Based on a self-developed bridge structure analysis software BANSYS, the stabilities of the structures under the static wind load were studied with the theory of two-dimensional flow field, meanwhile, the buffeting displacement and buffeting internal force induced by fluctuating wind of high-pier long-span cable-stayed bridge for urban rail transit were comparatively analyzed by using the multi-mode coupled vibration analysis method. Results show that the whole structure of the high-pier long-span cable-stayed bridge for urban rail transit is flexible; moreover, the differences of dynamic characteristics and wind-induced responses among the three schemes should not be neglected due to the discrepancy in structures.

Key words: long-span cable-stayed bridge; dynamic characteristic; multi-mode coupling vibration; wind-induced response; wind resistance behavior

收稿日期: 2010-08-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(90915006); 四川省杰出青年学科带头人计划项目(2009-15-406)

作者简介: 李永乐(1972-), 男, 河南洛阳人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: ceyongle@gmail.com。

0 引言

随着国民经济的发展及技术水平的提高,桥梁建设也向着大跨径方向发展。斜拉桥因其跨越能力大、造型优美、造价较经济等优点在现代桥梁建设中得到了广泛的应用,成为目前最有竞争力的桥型。

斜拉桥是柔性结构,对风荷载很敏感,容易因风的动力影响而发生不稳定的振动^[1],抗风性能已成为大跨度斜拉桥设计的控制性因素。迄今为止,用于城市轨道交通的大跨高墩斜拉桥实例甚少,中国缺乏相关的经验,对此类结构动力特性和抗风性能进行比选和优化非常必要。

1 工程概况

某城市轨道交通斜拉桥跨度组合为 60 m+135 m+250 m+135 m+60 m(图 1),主桥主跨达 250 m,跨度较大。桥塔最高达 186 m,桥墩最高达 105 m。该桥设计为城市轨道双线通行,桥面宽度较窄。根据桥位和线路高程的特点,共设计了 3 种桥型方案——A 形桥塔双索面、菱形桥塔双索面、菱形桥塔单索面。因为轨道交通荷载相对较小,3 种方案中桥梁结构的整体刚度较柔,而且在不同的方案中主梁的断面形式(图 2)有很大差异,3 种方案中桥塔类型不同(图 3),另外,拉索布置也有很大的区别,结构形式的差异可能使 3 种桥型方案的自振特性及在风荷载作用下引起的风致内力和风致位移差别较大。

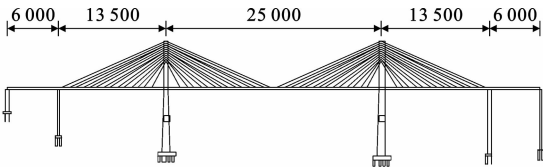


图 1 斜拉桥总体布置(单位:cm)

Fig. 1 General Layout of Cable-stayed Bridge (Unit:cm)

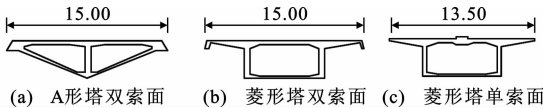


图 2 3 种方案主梁断面(单位:m)

Fig. 2 Girder Sections of Three Schemes (Unit:m)

本文中基于 ANSYS 有限元建模理论,建立了 3 种方案的空间有限元模型,并进行动力特性的对比,为 3 种方案的抗风设计提供依据^[2],然后基于自主研究开发的桥梁结构分析软件 BANSYS,采用多模态耦合振动^[3]分析的方法,对 3 种桥型方案在静

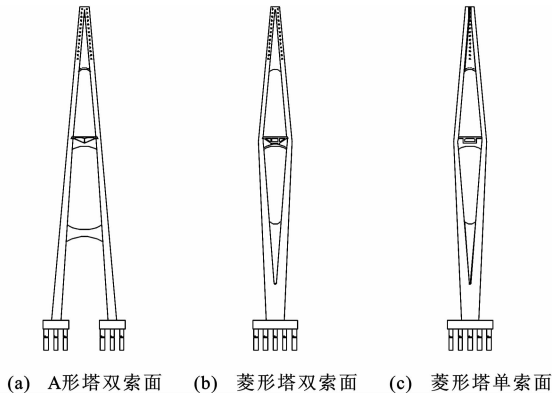


图 3 桥塔类型

Fig. 3 Forms of Pylon

风及脉动风荷载作用下引起的静风位移和内力、抖振位移和内力进行对比分析。

2 结构动力特性的对比

针对 3 种桥型方案,分别建立空间有限元模型,其中主梁、桥塔、桥墩等采用梁单元模拟,拉索采用杆单元模拟,对于塔梁固接、墩顶铰接等约束,采用节点耦合的方法进行模拟。二期恒载采用集中质量点单元模拟^[4]。

结构自振特性反映了结构动力学行为的基本性能,是频域抖振分析的依据^[5]。3 种桥型方案前 20 阶自振频率对比如图 4 所示,典型振型及自振频率对比如表 1 所示。

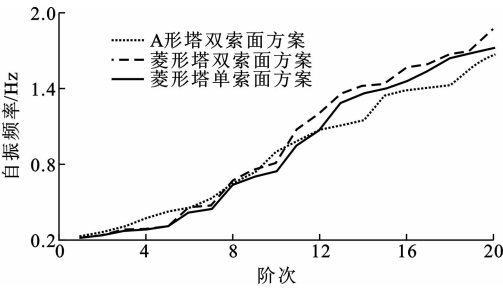


图 4 3 种方案前 20 阶自振频率对比

Fig. 4 Comparisons of the First Twenty Natural Frequencies of Three Schemes

由图 4 可见:虽然菱形塔单索面方案和菱形塔双索面方案整体的自振频率走势基本一致,但是由于菱形塔双索面方案的横向和竖向刚度都比菱形塔单索面的略大,所以其自振频率也相对较大;A 形塔方案整体频率低阶较菱形塔方案偏高,其高阶较菱形塔方案偏低。这是由于 3 种方案的振型低阶多与桥塔有关,高阶多与主梁有关,而 A 形塔方案桥塔横向刚度比菱形塔大,主梁竖向刚度比菱形塔小。

由表 1 可见,3 种方案中,A 形塔双索面方案第

表 1 3 种方案的典型振型及自振频率对比

Tab. 1 Comparisons of Typical Vibration Modes and Natural Frequencies of Three Schemes

典型振型	A 形塔双 索面方案		菱形塔双 索面方案		菱形塔单 索面方案	
	阶次	自振 频率/Hz	阶次	自振 频率/Hz	阶次	自振 频率/Hz
双塔横向反向振动	6	0.470	3	0.293	3	0.290
主梁纵飘	2	0.278	4	0.297	4	0.295
右边墩纵飘	3	0.321	5	0.322	5	0.323
1 阶正对称竖弯	5	0.434	6	0.475	6	0.423
1 阶正对称横弯	7	0.540	7	0.491	7	0.457
1 阶反对称竖弯	8	0.670	9	0.763	9	0.712
1 阶反对称横弯	9	0.754	8	0.683	8	0.637
右辅助墩振动	20	1.668	18	1.668	19	1.668

6 阶出现双塔横向反向振动比其他 2 种方案要晚,而且这个振型的自振频率比其他 2 种方案也要大得多,这主要是由于 A 形塔横向刚度比菱形塔要大得多,故 A 形塔方案不容易出现横向振动。

因为菱形塔方案的主梁采用单箱单室的混凝土箱型截面,而 A 形塔方案的主梁采用的是单箱双室的三角形截面,菱形塔方案的主梁竖弯刚度要比 A 形塔方案的大,并且 A 形塔横向的刚度要比菱形塔的小,所以竖弯振型菱形塔方案的自振频率比 A 形塔方案要大。菱形塔双索面的竖向刚度比菱形塔单索面的要稍大,所以其自振频率也略大。由于 3 种方案主梁的横向刚度相差不是很大,但 A 形塔的横向刚度要比菱形塔大得多,所以 A 形塔方案横弯振型的自振频率要比菱形塔的大。

3 抗风性能的对比

3.1 静风响应

自然风作用下桥梁结构的响应主要由 2 个部分构成:一是结构在静风荷载作用下的响应;二是结构受脉动风作用发生抖振所引起的响应。静风响应在一定程度上反映了结构横桥向的静力刚度性能,抖振响应则反映了结构的动力性能。静风荷载是定常荷载,可采用动压、定常系数和结构特征尺寸组合的表达式^[6]表示,按公式计算出作用于桥道上的静风荷载分别为

$$F_H = \frac{1}{2} \rho U^2 H L C_H \tag{1}$$

$$F_V = \frac{1}{2} \rho U^2 B L C_V \tag{2}$$

$$M = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 L C_M \tag{3}$$

式中: F_H 、 F_V 、 M 分别为阻力、升力和力矩; ρ 为空气密度; U 为平均风速; H 为梁高; B 为梁宽; L 为梁长; C_H 、 C_V 、 C_M 分别为主梁的阻力系数、升力系数和力矩系数^[7]。

在计算分析静风荷载的基础上,基于自主研发的桥梁结构分析软件 BANSYS 进行有限元分析,得到结构的位移和内力。设计风速($37\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)下主梁的静风位移及内力如图 5、6 所示,其中,主梁坐标以梁中心为原点。

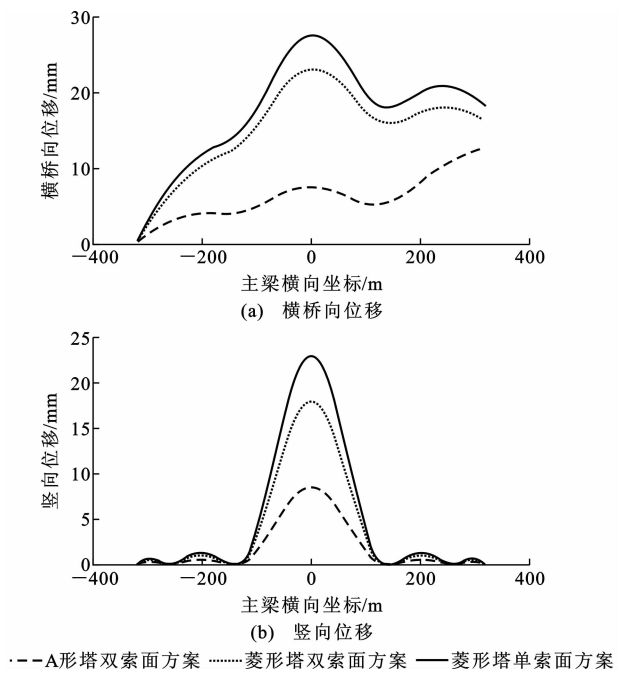


图 5 设计风速下主梁的静风位移

Fig. 5 Displacements of Main Girder Induced by Mean Wind at Design Wind Speed

由图 5 可见:由于左边墩的高度相对较小,刚度很大,右边桥塔及桥墩的高度较大,刚度较小,所以在静风荷载作用下,横桥向位移左边墩处很小,跨中最大,右边墩处也较大。菱形塔单索面方案的静风横桥向位移最大,这与菱形塔单索面方案的横向刚度最小相符。A 形塔双索面方案的横向刚度最大,而且其静力三分力系数最小,所以其横桥向位移最小。菱形塔单索面方案的静风竖向位移比菱形塔双索面方案要大,因为其竖向刚度要小。A 形塔双索面方案的竖向刚度最小,其静力三分力系数也最小,所以综合作用下由静风荷载引起的竖向位移响应最小。

由图 6 可见:在静风荷载作用下,主梁跨中弯矩最大,在塔梁结合处及边墩位置主梁的剪力较大且发生突变。3 种方案中,由于 A 形塔双索面方案的

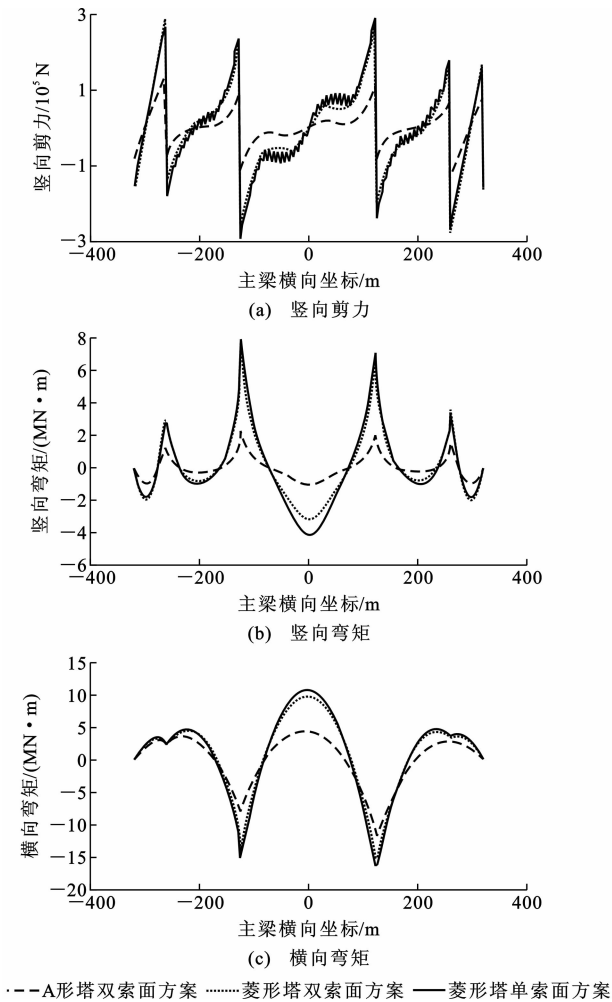


图6 设计风速下主梁的静风内力

Fig. 6 Internal Forces of Main Girder Induced by Mean Wind at Design Wind Speed

Wind at Design Wind Speed

静力三分力系数最小,所以由静风荷载引起的弯矩和剪力也最小。菱形塔单索面和菱形塔双索面方案由于其静力三分力系数和自重都比较接近,所以静风内力也基本一致。

3.2 抖振响应

抖振力是拟定常荷载,可采用 Scanlan 基于拟定常理论的气动力表达式^[8]表示,考虑到主梁断面较为钝化,分析中均偏于安全地取气动导纳函数值为 1。抖振力的计算公式分别为

$$D_{bu} = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[\frac{A}{B} C_D \left(2 \frac{u}{U} \right) + \frac{A}{B} C'_D \frac{w}{U} \right] \quad (4)$$

$$L_{bu} = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[C_L \left(2 \frac{u}{U} \right) + \left(C'_L + \frac{A}{B} C_D \right) \frac{w}{U} \right] \quad (5)$$

$$M_{bu} = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 \left[C_M \left(2 \frac{u}{U} \right) + C'_M \frac{w}{U} \right] \quad (6)$$

式中: D_{bu} 、 L_{bu} 、 M_{bu} 分别为抖振阻力、抖振升力和抖振力矩; A 为梁高; C_D 、 C_L 、 C_M 分别为主梁断面的阻

力系数、升力系数和力矩系数, C'_D 、 C'_L 、 C'_M 分别为阻力系数、升力系数和力矩系数的斜率; u 、 w 分别为横桥向及竖向的脉动风速^[9]。

抖振分析基于随机振动理论,采用频域分析方法,通过对结构抖振响应功率谱密度函数的积分得到抖振位移响应均方根^[10-15]。由于振型的正交性,由所得到的抖振位移响应均方根可计算抖振内力。设计风速 ($37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 下主梁的抖振位移及内力见图 7、8。

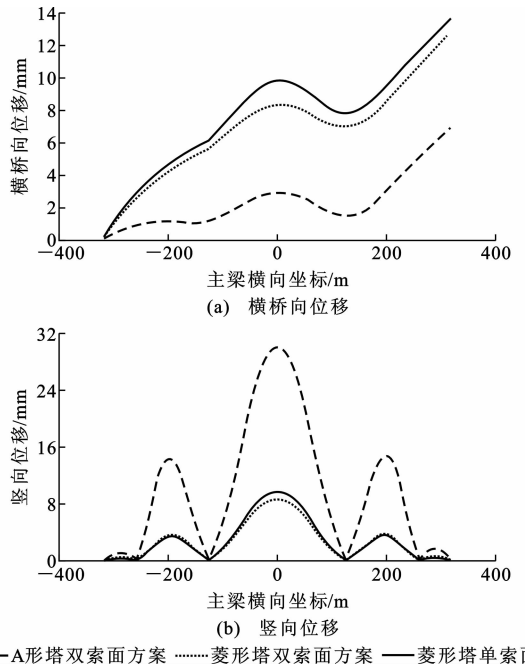


图7 设计风速下主梁的抖振位移

Fig. 7 Buffeting Displacements of Main Girder at Design Wind Speed

Design Wind Speed

由图 7 可见:由于左边墩高度较小,刚度较大,右边桥塔及其他墩的高度较大,刚度相对较小,所以 3 种桥型方案在左边墩处的抖振位移较小,在右边墩处的抖振位移较大。3 种方案中菱形塔单索面和菱形塔双索面方案的横向和竖向抖振位移都比较接近,这与它们横向和竖向刚度接近相符。A 形塔双索面方案的横向刚度比其他 2 种方案要大,所以其横向抖振位移比其他 2 种方案要小。A 形塔双索面方案的竖向刚度比其他 2 种方案要小,所以其竖向抖振位移比其他 2 种方案要大。

由图 8 可见:由于 A 形塔双索面方案的竖向刚度小,竖向抖振位移大,抖振力和抖振位移成正比,所以其由抖振力引起的竖向剪力和竖向弯矩最大,且在辅助墩处取得最大值,而菱形塔双索面和菱形塔单索面方案的竖向剪力和弯矩比较接近且相对较

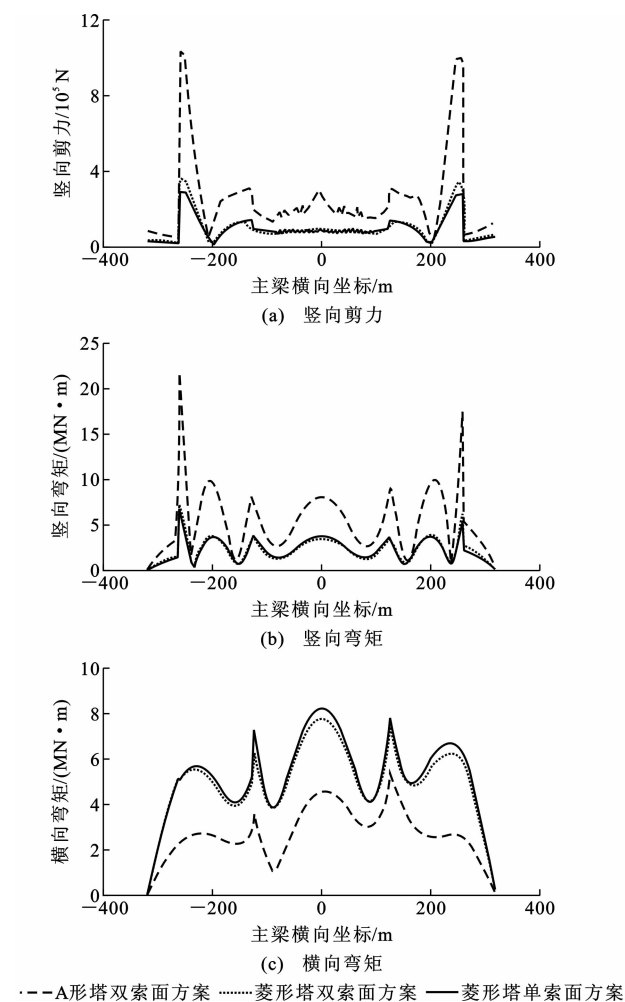


图 8 设计风速下主梁的抖振内力

Fig. 8 Buffeting Internal Forces of Main Girder at Design Wind Speed

小,这与 2 种菱形塔方案刚度和抖振位移都比较接近且相对较大相符。由于 A 形塔方案的横向刚度要大,其横向抖振位移要小,抖振力与抖振位移成正比,所以 A 形塔双索面方案的横向内力比其他 2 种方案要小。

基于自主研发的桥梁结构分析软件 BAN-SYS,采用多模态耦合振动的分析方法,得到主梁跨中节点的抖振位移响应,如图 9 所示。由图 9 可见,由于边墩较高,刚度较小,3 种方案最早出现由于边墩侧弯引起的横弯。A 形塔双索面方案较早地出现竖弯,且其竖弯的幅度要比其他 2 种方案大,主要是由于 A 形塔双索面方案的竖向刚度小。A 形塔双索面方案出现横弯振型较晚,且其横弯的幅度比其他 2 种方案小,这与 A 形塔方案的横向刚度较大相符。菱形塔双索面和菱形塔单索面这 2 种方案在横向和竖向刚度都比较接近,所以其振型及其幅度基本一致。3 种方案的横向和竖向抖振位移响应都是

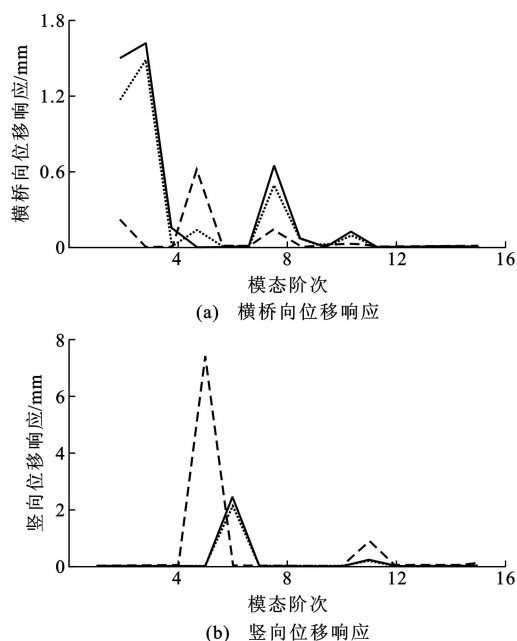


图 9 设计风速下主梁跨中节点的各阶模态抖振位移响应
Fig. 9 Buffeting Displacement Responses of Span Middle Node of Main Girder Under Each Mode at Design Wind Speed

在低模态时达到了最大值,低阶模态对抖振位移响应的贡献比高阶模态要大得多,所以大跨度桥梁抖振位移响应通常是以基频为主,对低频比较敏感。

4 结 语

(1)大跨度城市轨道交通桥梁,荷载相对较小,桥面窄,整体刚度较小,风荷载成为其设计的主要控制因素。

(2)高塔和高墩会使大跨斜拉桥整体结构变得更柔,对结构振动影响较大,易发生由墩、塔振动引起的全桥振动。拉索双索面布置比单索面布置更有助于提高结构的整体刚度,但总体而言,大跨高墩斜拉桥振动周期较长、自振频率较低、模态密集。

(3)大跨高墩斜拉桥在静风荷载作用下的风致响应取决于其刚度和结构断面的气动特性,为提高它的静风稳定性,应选择刚度相对较大的结构形式及具有最优气动特性的断面形式。

(4)脉动风对桥梁的作用与桥梁的整体刚度有很大的关系。大跨高墩斜拉桥横向抖振响由主塔的横向刚度控制,其竖向抖振响应主要取决于主梁刚度,所以为提高大跨高墩斜拉桥的抗风性能应适当加大主塔的横向刚度及主梁的竖向刚度。

(5)大跨度斜拉桥低阶模态抖振响应更强烈。

参考文献:

References:

- [1] 严国敏. 现代斜拉桥[M]. 成都:西南交通大学出版社,1996.
YAN Guo-min. Modern Cable-stayed Bridges[M]. Chengdu:Southwest Jiaotong University Press,1996.
- [2] 胡峰强,陈艾荣,林铁良. 杭州湾南航道独塔斜拉桥抗风性能试验研究[J]. 工程力学,2006,23(8):132-137,167.
HU Feng-qiang, CHEN Ai-rong, LIN Tie-liang. Experimental Investigation on Wind-resistant Behavior of the Single-tower Cable-stayed Bridge over South Channel of Hangzhou Gulf[J]. Engineering Mechanics,2006,23(8):132-137,167.
- [3] 李永乐,廖海黎,强士中. 三塔斜拉桥抖振的耦合行为研究[J]. 工程力学,2004,21(4):184-188.
LI Yong-le, LIAO Hai-li, QIANG Shi-zhong. Coupled Behavior in Buffeting Response of Three-pylon Cable-stayed Bridge[J]. Engineering Mechanics,2004,21(4):184-188.
- [4] 杨咏漪,廖海黎,李永乐. 基于 ANSYS 的斜拉桥抖振时域实用分析方法[J]. 空气动力学学报,2004,22(4):457-460.
YANG Yong-yi, LIAO Hai-li, LI Yong-le. Simplified Buffeting Analysis in Time Domain on the Basis of ANSYS for Cable-stayed Bridge[J]. Acta Aerodynamica Sinica,2004,22(4):457-460.
- [5] 李永乐,廖海黎,强士中. 桥梁抖振时域和频域分析的一致性研究[J]. 工程力学,2005,22(2):179-183.
LI Yong-le, LIAO Hai-li, QIANG Shi-zhong. Bridge Buffeting Analysis in Time and Frequency Domains[J]. Engineering Mechanics,2005,22(2):179-183.
- [6] 项海帆,林志兴,鲍卫刚,等. 公路桥梁抗风设计指南[M]. 北京:人民交通出版社,1996.
XIANG Hai-fan, LIN Zhi-xing, BAO Wei-gang, et al. Guidelines of Wind Resistance Design for Road Bridges[M]. Beijing:China Communications Press,1996.
- [7] 项海帆,葛耀君,朱乐东,等. 现代桥梁抗风理论与实践[M]. 北京:人民交通出版社,2005.
XIANG Hai-fan, GE Yao-jun, ZHU Le-dong, et al. Modern Theory and Practice on Bridge Wind Resistance[M]. Beijing:China Communications Press,2005.
- [8] SCANLAN R H. The Action of Flexible Bridge Under Wind II:Buffeting Theory[J]. Sound and Vibration,1978,60(2):201-211.
- [9] JAIN A, JONES N P, SCANLAN R H. Coupled Flutter and Buffeting Analysis of Long-span Bridges[J]. Journal of Structural Engineering,1996,122(7):716-725.
- [10] 李永乐. 风-车-桥系统非线性空间耦合振动研究[D]. 成都:西南交通大学,2003.
LI Yong-le. Nonlinear Three-dimensional Coupling Vibration of Wind-vehicle-bridge System[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2003.
- [11] 刘 崧,董 越. 用弯曲能量法确定斜拉桥成桥状态的参数研究[J]. 筑路机械与施工机械化,2008,28(11):62-63.
LIU Zhan, DONG Yue. Research on Parameters of Completion State for Cable-stayed Bridge Determined with Bending Energy Method[J]. Road Machinery & Construction Mechanization,2008,28(11):62-63.
- [12] 张建超,王 军,曹学峰. 基于 ANSYS 的移动模架造桥机结构风振响应分析[J]. 筑路机械与施工机械化,2007,27(11):41-43.
ZHANG Jian-chao, WANG Jun, CAO Xue-feng. Response Analysis of Wind Vibration of Bridge Fabrication Machine Structure with Form on Traveler Based on ANSYS[J]. Road Machinery & Construction Mechanization,2007,27(11):41-43.
- [13] 胡庆安,乔云强,刘健新. MSS62.5 移动模架造桥机风洞试验及抗风分析[J]. 筑路机械与施工机械化,2006,29(10):36-38.
HU Qing-an, QIAO Yun-qiang, LIU Jian-xin. Wind Tunnel Test and Anti-wind Analysis for MSS62.5[J]. Road Machinery & Construction Mechanization,2006,29(10):36-38.
- [14] 胡庆安,乔云强,刘健新,等. 斜风作用下桥塔施工阶段抖振性能[J]. 交通运输工程学报,2008,8(2):40-43.
HU Qing-an, QIAO Yun-qiang, LIU Jian-xin, et al. Buffeting Performance of Bridge Tower Under Yawed Wind During Construction[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2008,8(2):40-43.
- [15] 王统宁,马 麟,刘健新,等. 基于混合编程的大跨桥梁桥塔抖振时域分析[J]. 长安大学学报:自然科学版,2009,29(3):68-72.
WANG Tong-ning, MA Lin, LIU Jian-xin, et al. Time-domain Buffeting Analysis of the Tower of Long-span Bridges on the Basis of Mixed Programming[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2009,29(3):68-72.