

文章编号: 1002-0268 (2009) 06-0064-05

西堍门大桥索塔风致结构内力响应研究

刘 高, 刘 波, 宋 辉

(中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088)

摘要: 针对西堍门大桥北索塔施工最大悬臂、成桥运营和成桥阶段百年一遇大风作用 3 种状态, 建立索塔结构的有限元计算模型。考虑 0° 和 90° 风偏角, 分析索塔的风致内力响应及阵风响应系数。其中, 静风引起的结构内力响应采用静力有限元法计算, 脉动风引起的结构抖振内力响应采用动力有限元法和虚拟激励法计算。计算结果表明: 在上述 3 种状态, 随着塔柱标高的降低, 塔柱风致弯矩响应呈现逐渐增大的趋势, 而阵风响应系数呈现逐渐减小的趋势。

关键词: 桥梁工程; 结构风致内力响应; 有限元法; 虚拟激励法; 索塔; 阵风响应系数

中图分类号: U443.38

文献标识码: A

Study on Wind-induced Structural Internal Force Response of Xihoumen Bridge Pylon

LIU Gao, LIU Bo, SONG Hui

(CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100088 China)

Abstract: In order to analyze the longest cantilever status in construction, the bridge service status and the status under the strongest gale in a century of the north pylon of Xihoumen Bridge, three-dimensional finite element model of the pylon was established. Then, with consideration of 0° and 90° wind yaw angles, the wind-induced structural internal force responses and the gust response factors of the pylon were studied. The static wind-induced structural internal force responses were computed by the static finite element method, while the fluctuating wind-induced structural buffeting internal force responses were computed by the dynamic finite element method in conjunction with the pseudo-excitation method. The result shows that the wind-induced bending moment responses have a gradually increasing trend while the gust factors have a gradually decreasing trend with the pylon elevation declines in the above-mentioned three statuses.

Key words: bridge engineering; wind-induced structural internal force response; finite element method; pseudo-excitation method; pylon; gust response factor

0 引言

舟山大陆连岛工程西堍门大桥跨越西堍门水道, 主桥为主跨 1 650 m 的 2 跨连续钢箱梁悬索桥^[1], 北边跨及主跨为悬吊结构, 主缆矢跨比为 1/10, 索塔为塔柱和横梁组成的门式框架混凝土结构, 塔高为 211.286 m, 桥梁总体布置见图 1, 北索塔结构见图 2。西堍门大桥东临东海, 西望大陆, 位于北亚热带, 属东亚季风气候区。桥位区域受台风影响频繁,

风速大, 风况复杂, 桥位处设计基本风速为 41.12 m/s。

在施工期间和成桥阶段, 风荷载作用下结构的内力响应是控制西堍门大桥索塔设计的 1 项关键因素。以大桥北索塔为例, 针对施工最大悬臂、成桥阶段运营和成桥阶段百年一遇大风作用 3 种状态, 考虑 0° 和 90° 水平风偏角, 基于空间有限元模型计算索塔在静风及脉动风作用下的内力响应, 分析了塔柱结构在不同工况下的风致内力总响应和阵风响应系数。其中,

收稿日期: 2008-11-27

基金项目: 国家高技术研究发展计划(八六三计划)资助项目(2007AA11Z101); 交通部西部交通建设科技资助项目(200531800019, 200631849426)

作者简介: 刘高(1970-), 男, 河北滦南人, 博士, 研究方向为大跨桥梁设计与抗风研究。(liuga077@163.com)

索塔在静风作用下的内力响应采用常规的结构静力有限元法计算, 索塔在脉动风作用下的抖振内力响应则采用桥梁多模态耦合抖振内力分析的虚拟激励法进行求解^[2-3]。

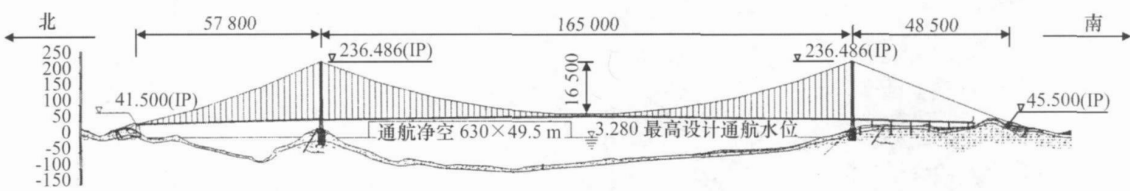


图 1 西垭门大桥总体布置 (单位: cm)

Fig 1 General layout of the Xihoumen Bridge (unit: cm)

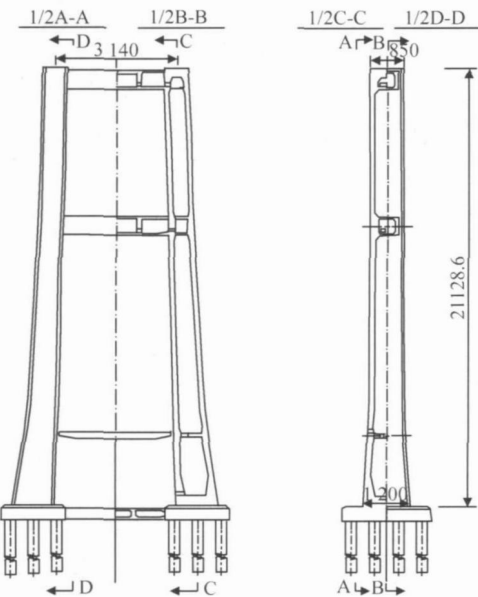


图 2 北索塔结构图 (单位: cm)

Fig 2 Structural drawing of north pylon (unit: cm)

1 索塔计算模型

在风荷载作用下, 索塔上将会产生沿顺风方向的阻力和沿横风方向的升力。因此, 本文建立结构空间计算模型分析索塔的风载内力响应。根据索塔的受力特点, 建模时假定索塔在塔底固结, 并考虑了结构初始轴力对结构几何刚度的贡献。

在施工期间, 索塔处于悬臂状态, 可以方便地采用空间梁单元建立结构的计算模型。在成桥状态, 索塔塔顶将受到主缆的弹性约束作用^[6], 本文将主缆的弹性约束作用模拟为弹簧。对于西垭门大桥的北索塔, K_S 为北边跨对北索塔提供的弹性约束刚度, K_C 为中跨和南边跨主缆对北索塔提供的弹性约束刚度。 K_S 和 K_C 可按式近似计算:

$$K_S = EA_{S1} / L_{S1}, \quad (1)$$
$$K_C = EA_C / (L_C + L_{S2}), \quad (2)$$

式中, E 为主缆的弹性模量; A_{S1} 和 A_C 分别为北边跨和中跨主缆的截面积; L_{S1} , L_C 和 L_{S2} 分别为北边跨、中跨和南边跨主缆的跨度。

在成桥状态, 进行索塔动力分析时需要考虑由主缆、吊索和加劲梁等上部结构产生的惯性效应。借鉴桥墩抗震研究成果^[7], 为了模拟上部结构的惯性效应, 本文在索塔塔柱的顶部设置了 1 个集中质量 M , 即

$$M = P / g, \quad (3)$$

式中, P 为由上部结构传来的竖向力; g 为重力加速度。

2 索塔动力特性计算

采用作者研发的桥梁动力分析软件^[8] BDAS (Bridge Dynamic Analysis System) 对西垭门大桥北索塔进行固有动力特性分析。分析中采用子空间迭代法进行特征值计算, 采用集中质量矩阵及计入几何刚度矩阵影响的刚度矩阵。索塔在施工最大悬臂状态的结构前 4 阶模态频率和振型见图 3, 在成桥运营状态的结构前 4 阶模态频率和振型见图 4。

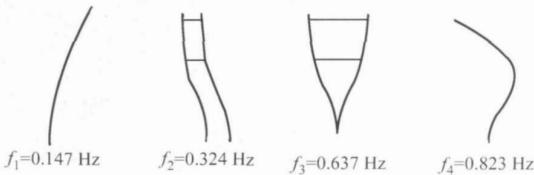


图 3 索塔在施工最大悬臂状态的结构模态频率和振型

Fig 3 Structural modal frequencies and mode shapes of pylon in the longest cantilever stage of construction

3 风参数和结构气动参数

3.1 风参数

假定大气边界层内风速沿铅直高度的分布服从幂指数律, $V_z / V_{10} = (Z / Z_{10})^\alpha$, 其中 Z 为离开水面的高

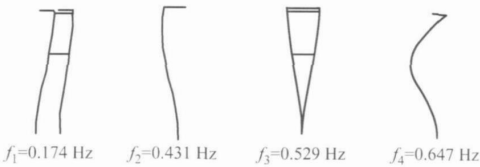


图 4 索塔在成桥运营状态的结构
模态频率和振型

Fig 4 Structural modal frequencies and mode
shapes of pylon in the service stage

度, α 为幂指数。西堠门大桥桥位处设计基本风速为 $V_{10}=41.12\text{ m/s}$, 幂指数在海拔高度 70 m 以下取 0.16 , 在海拔高度 70 m 以上取 0.14 。

对索塔这类高耸结构, 其抖振响应分析中需考虑水平顺风向和水平横风向的脉动风速。这 2 种脉动风速的功率谱密度分别为 $S_u(n)$ 和 $S_v(n)$, 其表达式如下^[9]:

$$\frac{nS_u(n)}{u_*^2} = \frac{200f}{(1+50f)^{5/3}}, \frac{nS_v(n)}{u_*^2} = \frac{15f}{(1+9.5f)^{5/3}}, \quad (4)$$

式中, n 为脉动风速的频率; $f=nZ/V(Z)$; u_* 为气流摩阻速度, 地表粗糙高度取为 0.01 。

3 2 结构气动力参数

3 2 1 阻力和升力系数

索塔塔柱的阻力系数 C_D 和升力系数 C_L 分别定义为: $C_D=F_D/(0.5\rho V^2 B)$, $C_L=F_L/(0.5\rho V^2 B)$, 其中, ρ 为空气密度; B 为索塔的特征宽度; F_D 和 F_L 分别作用在索塔塔柱上的阻力和升力, 如图 5 所示。在图 5 中, β 为风的水平偏角。塔柱的阻力系数和升力系数随塔柱的截面位置和水平风偏角的变化而变化, 2 个典型塔柱横断面的气动力系数的 CFD 数值计算结果见表 1。

表 1 塔柱的气动力系数(CFD 数值计算)

Tab. 1 Aerodynamic coefficients of pylon (computed
by CFD method)

B/m	$\beta/^\circ$	$C_{D\text{前塔柱}}$	$C_{L\text{前塔柱}}$	$C_{D\text{后塔柱}}$	$C_{L\text{后塔柱}}$
8.5	0	1.45	0.00	0.90	-0.04
	90	0.17	0.82	-0.14	0.82
9.377	0	1.31	0.06	1.54	0.06
	90	0.19	1.06	-0.28	1.06

3 2 2 气动导纳函数

本文选用 Davenport 气动导纳函数^[10]来修正准定常抖振力。Davenport 气动导纳函数的表达式为:

$$|\chi_D(n)|^2 = 2(c-1+e^{-c})/c^2, c = \lambda n D/V, \quad (5)$$

式中, λ 为衰减系数, 通常取为 7; D 为构件沿展向的

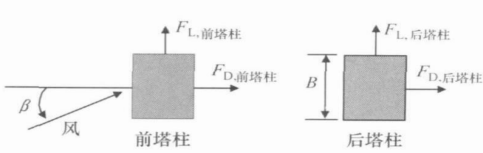


图 5 作用在塔柱上的气动力示意图

Fig 5 Schematic diagram of aerodynamic forces on pylon
宽度; V 为平均风速; $||$ 为绝对值符号, c 为衰减系数。

3 2 3 气动导数

对于桥塔结构, 考虑与结构顺风向运动有关的气动阻尼。与结构顺风向有关的气动阻尼可以通过气动导数 P_1^* 描述。 P_1^* 的准定常表达式为 $P_1^* = -2C_D/K$, 式中, C_D 为阻力系数, K 为折算频率。

4 索塔风致内力响应分析

4 1 分析工况

针对北索塔在施工最大悬臂状态和成桥阶段, 同时考虑 0° 和 90° 水平风偏角, 见表 2。

表 2 分析工况

Tab. 2 Cases of analysis

工况	结构状态	$\beta/^\circ$	$V_{10}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
1	施工阶段最大悬臂状态	0	36.19
2	施工阶段最大悬臂状态	90	36.19
3	成桥阶段, 运营状态 *	0	18.77
4	成桥阶段, 运营状态 *	90	18.77
5	成桥阶段, 百年一遇大风作用状态	0	41.12
6	成桥阶段, 百年一遇大风作用状态	90	41.12

* 成桥阶段运营状态, 桥面高度处的风速为 25 m/s 。

4 2 结构运动方程的建立及求解

4 2 1 结构运动方程的建立

基于有限元法, 索塔结构在风荷载作用下运动方程的矩阵表达式为:

$$M^s \ddot{\Delta}(t) + C^s \dot{\Delta}(t) + K^s \Delta(t) = F^{st} + F^{bu}(t) + F^{se}(t), \quad (6)$$

式中, M^s 、 C^s 和 K^s 分别为结构质量、阻尼和刚度矩阵; F^{st} 、 $F^{bu}(t)$ 和 $F^{se}(t)$ 分别为空气静力、抖振力和气弹自激力列向量; $\Delta(t)$ 、 $\dot{\Delta}(t)$ 和 $\ddot{\Delta}(t)$ 分别为位移、速度和加速度列向量。

为了便于分析, 按是否与时间有关, 将式(6)分解为以下 2 个方程的叠加:

$$K^s \Delta_{st} = F^{st}, \quad (7)$$

$$M^s \ddot{\Delta}_{dy}(t) + C^s \dot{\Delta}_{dy}(t) + K^s \Delta_{dy}(t) = F^{st} + F^{bu}(t) + F^{se}(t), \quad (8)$$

式(7)、(8)分别对应于结构在静风作用下的空气静力运动方程和在脉动风作用下的抖振运动方程。

4 2 2 结构内力响应的求解

基于索塔结构空间计算模型、风参数和结构气动参数,采用静力有限元法,按式(7)计算索塔结构在静风荷载作用下的内力响应 f_{st} ;采用动力有限元法和桥梁多模态耦合抖振内力分析的虚拟激励法^[2-5],按式(8)计算索塔结构在脉动风作用下的抖振内力响应均方差 $\sigma_{f_{bu}}$ 和统计峰值因子 $g_{f_{bu}}$ 。因此,索塔结构风致内力总响应 f_w 及阵风响应系数 G_w 分别为:

$$f_w=|f_{st}|+g_{f_{bu}}\sigma_{f_{bu}}, \tag{9}$$

$$G_w=f_w/|f_{st}|. \tag{10}$$

4.3 分析结果

限于篇幅,本文仅列出了索塔塔柱上 4 个控制截面的弯矩响应。这 4 个控制截面的位置为:(1)上塔柱与上横梁连接处截面 S1;(2)上塔柱与中横梁连接处截面 S2;(3)中塔柱下部截面突变处截面 S3;(4)塔柱塔底截面 S4。

4.3.1 施工最大悬臂状态

在施工最大悬臂状态,北索塔塔柱在风荷载作用下的弯矩响应及阵风响应系数见表 3。在 90°风偏角下,塔柱塔底截面 S4 沿横桥轴向的弯矩响应谱见图 6。

表 3 塔柱在施工最大悬臂状态的弯矩响应

Tab. 3 Bending moments of pylon in the longest cantilever stage of construction

截面位置	0°风偏角,顺桥轴向弯矩响应/(t·m)				90°风偏角,横桥轴向弯矩响应/(t·m)			
	静风	抖振	总响应	阵风响应系数	静风	抖振	总响应	阵风响应系数
S1	2 211	1 725	3 936	1.780	252	219	471	1.871
S2	9 498	6 310	15 808	1.664	8 771	5 314	14 085	1.606
S3	-9 641	6 305	15 946	1.654	32 210	16 795	49 005	1.521
S4	-24 080	14 449	38 529	1.600	47 290	23 432	70 722	1.495

注:本表中所列“静风”为静风引起的结构内力响应,“抖振”为脉动风引起的结构抖振内力响应的统计峰值,“总响应”为两者绝对值的总和,以下同。

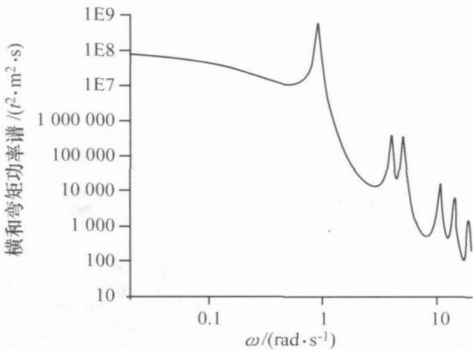


图 6 塔底截面的横桥轴向弯矩响应谱(90°风偏角)

Fig. 6 PSD of lateral bending moment in pylon bottom cross-section (90° yaw angle of wind)

由表 3 可以看出,在北索塔施工最大悬臂状态,0°和 90°风偏角下,随着塔柱标高的降低,塔柱风致弯矩响应呈现逐渐增大的趋势,而阵风响应系数呈现逐渐减小的趋势。在塔柱塔底截面 S4 处,结构风致弯矩响应达到最大值,其中,在 0°风偏角下,结构风致顺桥轴向弯矩总响应为 38 529 t·m;在 90°风偏角下,结构风致横桥轴向弯矩总响应为 70 722 t·m。塔柱风致弯矩阵风响应系数在控制截面 S1 处最大,但截面 S1 处的弯矩响应值很小,与塔柱塔底截面 S4 处的弯矩响应相比相差 1 个数量级。除 S1 截面外,在 0°风偏角下,塔柱风致顺桥轴向弯矩阵风响应系数的变化范围为 1.600~1.664;在 90°风偏角下,塔柱风致横桥轴向弯矩阵风响应系数的变化范围为 1.495~1.606。

由图 6 可知,塔柱塔底截面 S4 横桥轴向弯矩响应的背景分量和共振分量都很重要;对于共振分量部分,索塔的第 1 阶侧弯模态起主导作用,表现为横桥轴向弯矩响应谱曲线在第 1 阶侧弯模态频率($\omega_1=2\pi f_1=0.92\text{ rad/s}$)附近出现高耸的尖峰,峰值为 $5.346\times 10^8\text{ t}^2\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}$ 。

4.3.2 成桥运营状态和百年一遇大风作用状态

在成桥运营状态和百年一遇大风作用状态,北索塔塔柱在风荷载作用下的弯矩响应分别见表 4 和表 5。

表 4 塔柱在成桥阶段的弯矩响应(运营状态)

Tab. 4 Bending moment of pylon in the completed stage (service stage)

截面位置	0°风偏角,顺桥轴向弯矩响应/(t·m)				90°风偏角,横桥轴向弯矩响应/(t·m)			
	静风	抖振	总响应	阵风响应系数	静风	抖振	总响应	阵风响应系数
S1	496	573	1 070	2.155	-328.2	78	406	1.238
S2	2 523	1 442	3 965	1.572	-1 242	369	1 611	1.297
S3	-2 570	1 448	4 018	1.563	1 193	355	1 548	1.297
S4	-6 370	3 209	9 579	1.504	3 477	930	4 407	1.267

表 5 塔柱在成桥阶段弯矩响应(百年一遇大风作用)

Tab. 5 Bending moment of pylon in the completed stage (under the strongest gale in a century)

截面位置	0°风偏角,顺桥轴向弯矩响应/(t·m)				90°风偏角,横桥轴向弯矩响应/(t·m)			
	静风	抖振	总响应	阵风响应系数	静风	抖振	总响应	阵风响应系数
S1	2 383	4 393	6 776	2.843	-1 576	447	2 023	1.284
S2	12 110	9 146	21 256	1.755	-5 962	2 121	8 083	1.356
S3	-12 330	9 151	21 481	1.742	5 727	2 031	7 758	1.355
S4	-30 570	19 588	50 158	1.641	16 690	5 301	21 991	1.318

由表 4 和表 5 可以看出,在 0°风偏角下,在北索塔成桥运营状态和百年一遇大风作用状态,随着塔柱

标高的降低,塔柱风致弯矩响应呈现逐渐增大的趋势,而阵风响应系数呈现则逐渐减小的趋势。在塔柱塔底截面S4处,结构风致弯矩响应达到最大值。其中,在成桥运营状态,结构风致顺桥轴向弯矩总响应为 $9\,579\text{ t}\cdot\text{m}$;在成桥百年一遇大风作用状态,结构风致顺桥轴向弯矩总响应为 $50\,158\text{ t}\cdot\text{m}$ 。在控制截面S1处,塔柱结构风致弯矩阵风响应系数最大,但弯矩响应值很小,比塔柱塔底截面S4处的弯矩响应值低1个数量级。除S1截面外,与施工最大悬臂状态相比,在成桥阶段塔柱结构风致顺桥轴向弯矩阵风响应系数变化不大,其中,在成桥运营状态,塔柱结构风致顺桥轴向弯矩阵风响应系数的变化范围为 $1.504\sim 1.572$;在成桥百年一遇大风作用状态,塔柱结构风致顺桥轴向弯矩阵风响应系数的变化范围为 $1.641\sim 1.755$ 。

由表4和表5可以看出,在 90° 风偏角下,在北索塔成桥运营状态和百年一遇大风作用状态,随着塔柱标高的降低,塔柱风致弯矩响应呈现逐渐增大的趋势,而阵风响应系数则变化不大。在塔柱塔底截面S4处,结构风致弯矩响应达到最大值。其中,在成桥运营状态,结构风致横桥轴向弯矩总响应为 $4\,407\text{ t}\cdot\text{m}$;在成桥百年一遇大风作用状态,结构风致横桥轴向弯矩总响应为 $21\,991\text{ t}\cdot\text{m}$ 。在控制截面S1处,塔柱结构风致弯矩阵风响应系数最小,弯矩响应值也很小,比塔柱塔底截面S4处的弯矩响应低1个数量级。除S1截面外,主缆在成桥阶段为索塔顺桥轴向运动提供强大的约束作用,与施工最大悬臂状态相比,成桥阶段塔柱结构风致横桥轴向弯矩阵风响应系数较小,其中,在成桥运营状态,塔柱结构风致横桥轴向弯矩阵风响应系数的变化范围为 $1.267\sim 1.297$;在成桥百年一遇大风作用状态,塔柱结构风致横桥轴向弯矩阵风响应系数的变化范围为 $1.318\sim 1.356$ 。

5 结论

西堠门大桥北索塔在施工最大悬臂、成桥运营和百年一遇大风作用3种状态下,随着塔柱标高的降低,塔柱风致弯矩响应呈现逐渐增大的趋势,而阵风响应系数呈现逐渐减小的趋势。在 0° 风偏角下,塔柱塔底截面在上述3种状态下顺桥轴向弯矩总响应分别为 $38\,529$ 、 $9\,579$ 、 $50\,158\text{ t}\cdot\text{m}$,阵风响应系数分别为 1.600 、 1.504 、 1.641 ;在 90° 风偏角下,塔柱塔底截面在上述3种状态下横桥轴向弯矩总响应分别为 70 、 $4\,407$ 、 $21\,991\text{ t}\cdot\text{m}$,阵风响应系数分别为 1.495 、 1.267 、 1.318 。

参考文献:

References:

- [1] 中交公路规划设计院. 舟山西堠门大桥施工图设计[Z]. 北京: 中交公路规划设计院, 2004.
CCCC Highway Consultants Co., Ltd Detail Design of Zhoushan Xihoumen Bridge[Z]. Beijing: CCCC Highway Consultants Co., Ltd, 2004.
- [2] LIU Gao, ZHU Ledong, XIANG Haifan Structural Internal Force Prediction of a Suspension Bridge due to Buffeting[J]. Journal of Wind Engineering, 2006, 31(3): 769-772.
- [3] 刘高, 林家浩, 王秀伟. 考虑全桥耦合的大跨斜拉桥抖振内力分析[J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(4): 479-483.
LIU Gao, LIN Jiahao, WANG Xiuwei Buffeting-induced Structural Internal Force Analysis for Long-span Cable-stayed Bridges Based on Entire-bridge Model[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2003, 43(4): 479-483.
- [4] LIN Jiahao. A Fast CQC Algorithm of PSD Matrices for Random Seismic Responses[J]. Computers and Structures, 1992, 44(3): 683-687.
- [5] 林家浩, 张亚辉. 随机振动的虚拟激励法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
LIN Jiahao, ZHANG Yahui Pseudo Excitation Method in Random Vibration[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [6] ABDEL-GHAFFAR A M, SCANLAN R H, DIEHL J G Analysis of the Dynamic Characteristics of the Golden Gate Bridge by Ambient Vibration Measurements[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1985, 111(4): 463-482.
- [7] 朱唏. 桥墩抗震计算[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1982.
ZHU Xi Earthquake Resistant Analysis of Bridge Piers[M]. Beijing: China Railway Press, 1982.
- [8] 刘高. 大跨悬索桥颤振分析理论及控制措施研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2000.
LIU Gao. Study on Flutter Analysis and Control Means of Long-span Suspension Bridges[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2000.
- [9] SIMIU E, SCANLAN R H. Wind Effects on Structures[M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [10] DAVENPORT A G. Buffeting of a Suspension Bridge by Storm Winds[J]. Journal of Structural Division, 1962, 88(3): 233-268.