

文章编号: 1000-582X(2012)10-051-06

# 大跨度中承式拱桥静风稳定性分析

熊 辉<sup>1</sup>, 晏致涛<sup>1</sup>, 李正英<sup>1</sup>, 邓 暖<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;  
2. 重庆科技学院 建筑工程学院, 重庆 401331)

**摘 要:** 在大跨度中承式拱桥中, 主拱为受压构件, 静风荷载不仅会引起结构的动力特性改变, 还将导致结构强度破坏和失稳。尤其当桥梁跨度较大、横撑又较少时, 其静风稳定规律与斜拉桥、悬索桥等桥梁有较大的区别。文中以重庆菜园坝长江大桥为例, 通过节段模型试验, 获取了静风荷载在重庆菜园坝长江大桥上作用的全过程位移响应, 分析了静风作用下结构的屈服失稳机制。分析表明, 静风的初始攻角、材料的强度、静力三分力系数等因素对大跨度中承式拱桥的静风稳定性均有较大的影响。

**关键词:** 中承式拱桥; 静风稳定; 静风荷载; 失稳机理

**中图分类号:** TU311.3; TU317.1

**文献标志码:** A

## Aerostatic stability analysis of long span half-through arch bridges

XIONG Hui<sup>1</sup>, YAN Zhitao<sup>1</sup>, LI Zhengying<sup>1</sup>, DENG Nuan<sup>2</sup>

(1a. Department of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401311, China)

**Abstract:** The main arch of a long-span arch bridge is a compression member. The static wind loads on the bridge not only causes changes of dynamic characters, but also leads the structure to collapse or buckling. Especially, when the arch bridge has longer span and less lateral braces, its stability is much different from the long span cable-stayed bridges and suspension bridges. This paper takes Chongqing Caiyuanba Yangzi River Bridge as a typical example and conducted the wind section tunnel tests. The displacement response of the bridge is obtained and its yield and static stability mechanism under static wind is analyzed. The results show that those factors, such as initial attack angle of the static wind, material yield strength and the static forces coefficients, have great effects on the aerostatics stability of a long span half-through arch bridge.

**Key words:** half-through arch bridge; aerostatics stability; static wind loads; instability mechanism

随着桥梁跨度的不断增大, 桥梁结构在风荷载作用下的动、静力稳定问题日益突出<sup>[1-4]</sup>。根据国内外风洞模型试验成果, 大跨度桥梁发生静风稳定性问题的临界风速可能低于动力失稳的临界风速。另外, 在强静风荷载作用下, 大跨度桥梁的几何非线性、静风荷载非线性的影响均不容忽视。

性、静风荷载非线性的影响均不容忽视。

国内外学者在大跨度悬索桥以及斜拉桥非线性空气静力稳定方面做了较为详尽的研究。Shum K M<sup>[5]</sup>与 Salyatori Luca 等<sup>[6]</sup>学者研究了气动参数和非线性特性对悬索桥的影响。于伟<sup>[7]</sup>、罗建辉<sup>[8]</sup>、许

收稿日期: 2012-03-09

基金项目: 中央高校基本科研费资助项目(CDJZR112000); 重庆市建设科技计划项目(城科学 2011 第(2-88)号)

作者简介: 熊辉(1978-), 男, 重庆大学博士, 主要从事结构风工程研究, (E-mail) xionghui@cqu.edu.cn.

福友<sup>[9]</sup>、张文明<sup>[10]</sup>、李翠娟<sup>[11]</sup>、欧阳克俭<sup>[12]</sup>等学者分析了悬索桥的静风稳定性,主要探索了几何非线性影响以及施工状态的失稳可能性。韩大建<sup>[13]</sup>、张陆等<sup>[14]</sup>学者讨论了斜拉桥的非线性静风稳定性,探讨了初始风攻角对汀九桥静风稳定性的影响。相比较于大跨度的悬索桥和斜拉桥等桥型,大跨度中承式拱桥主拱为受压构件,更容易失稳。尤其当桥梁跨度较大,横撑又较少的情况下,其静风稳定规律与常规桥梁有较大的区别。其风振响应计算理论研究尚不成熟,目前拱桥结构的风荷载计算以及相应的模型风洞试验理论基本上还是沿用已有的悬索桥和斜拉桥的研究经验和理论。大跨度中承式拱桥的主拱为压弯结构,随着跨径的增大,呈现出结构轻柔、低频和低阻尼的力学特征,导致桥梁对风的作用更加敏感和对风的反应更加复杂。程进<sup>[15]</sup>分析了静风荷载下大跨度钢拱桥施工稳定性分析,以上海卢浦大桥为例,讨论了其在 2 个不同施工状态的稳定性,明确了最不利施工状态。显然,对于这种大跨度的钢拱桥,运营状态下的失稳机理同样需要考虑。针对其双拱干扰下的静力三分力系数研究,讨论气动参数、材料的初始屈服应力以及静风初始攻角等因素对大跨度中承式系杆拱桥这种结构静风稳定性影响是有必要的。下面以重庆菜园坝长江大桥为工程背景,通过节段模型试验,对中承式拱桥静风荷载的分布与取值、失稳破坏机制等进行了深入的研究。

## 1 静风荷载

类似于重庆菜园坝长江大桥型式的中承式提篮拱桥,是由内倾的两榀拱和主梁和吊索组成的空间结构,主拱的非线性静风荷载随变形的变化比较复杂,与单拱的静风荷载大不一样。风荷载的变化将显著影响大跨度中承式拱桥的静风稳定性。

笔者在中国空气动力研究与发展中心低速所 1.4 m×1.4 m 风洞中进行了均匀流下的主桥及主拱静力三分力试验。主桥的静力三分力测试和悬索桥、斜拉桥等桥型类似。主拱风洞试验包括单拱与双拱静力三分力系数测量。由于每一段拱肋的曲率不一样,因此,分成多段拱肋分别测得单拱与双拱的静力三分力系数。当两榀拱相距较远时,分别按照单榀拱测定双拱的静力三分力系数,单拱的静力三分力系数如图 1 所示。

单拱静力三分力数据表明,对于类似于拱体的矩形钝体结构,力矩系数与升力系数的平均值较小,因此,在测试类似于矩形拱的钝体的静力三分力系数时,只需考虑阻力系数。当两榀拱相距较近时,需

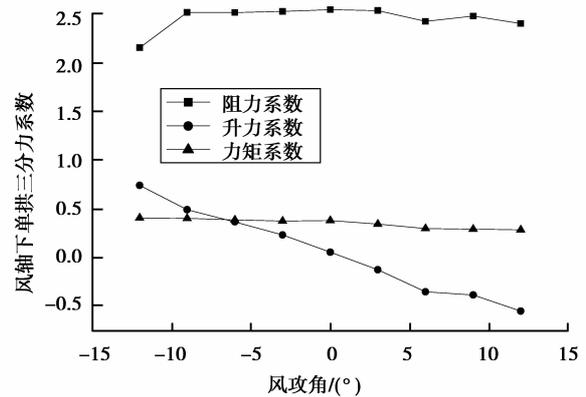


图 1 单拱静力三分力系数

要考虑两拱风荷载随主拱攻角变形的变化。由于主梁扭转刚度不同而导致主梁变形不同,从而使两榀拱的相对转角与单拱转角不一致。重庆菜园坝长江大桥主拱跨中按两拱相对转角与单拱转角随主梁扭转刚度变化如图 2 所示。

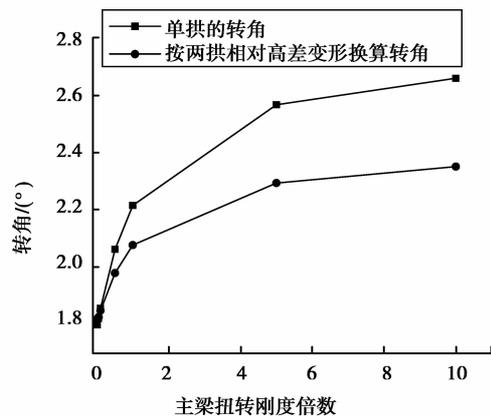


图 2 主梁刚度对拱角的影响

可见,随着主梁扭转刚度增大,两拱相对转角较单拱转角偏小。试验也表明,单拱自身的转角对阻力系数的影响较小,而两榀拱的相对转角对后拱的遮挡和干扰影响较大,尤其是对其阻力系数的影响较大。因此,采用两榀拱相对转角作为静风稳定分析的攻角是合理的。按照上述转角定义进行了不同角度、不同间距宽度比的双拱静力三分力测试试验<sup>[16]</sup>。当间距较远时,前拱的三分力系数结果与单拱相差不大。后拱阻力系数与两榀拱的间距宽度比有关,当相距较近时,后拱的阻力系数为负数,随着间距的增大后拱的阻力系数逐渐变成正数,如图 3 所示( $d=0.65$  m,为重庆菜园坝长江大桥模型拱的最小间距)。

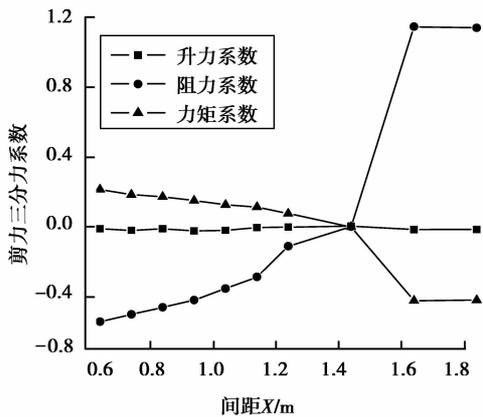


图 3 后拱三分力系数随间距变化

## 2 非线性静风稳定求解

静风作用下拱桥的稳定问题是静风荷载的非线性行为与桥梁结构空间稳定理论的结合,在力学上该问题仍属于目前应用较为成熟的杆系结构空间稳定理论的范畴,是一种关于大变形的几何非线性求解过程,运动求解方程如下<sup>[6]</sup>

$$\mathbf{K}_Z(\delta_{j-1})^{G+W} \cdot \Delta\delta_j = R_j(U_i, \alpha_j) - R_{j-1}(U_i, \alpha_{j-1}), \quad (1)$$

式中: $\mathbf{K}_Z$  为结构的非线性刚度矩阵; $\Delta\delta$  表示位移增量; $R$  为结构外荷载;上标  $G$  和  $W$  分别代表重力和风力; $\alpha$  为有效攻角; $U$  为结构位移。该式反映了荷载、刚度以及位移的非线性变化过程。根据上节求得主桥、单双拱的静力三分力系数之后,采用如下所述双重迭代循环增量法求解:

1) 施加重力荷载步,求解;

2) 风速分级。考虑到结构在风载较小情况下,结构三分力改变较小,因此开始可以采用较大风速;

3) 在结构其它部分如拉索、塔架、桥墩等处施加随高度变化的风载,求解;

4) 对主桥和主拱施加静力三分力,第一次迭代时,采用零度下的三分力系数;

5) 求得结构在静风下考虑几何非线性和材料非线性的解,得到主桥攻角和两拱的攻角。材料及几何非线性迭代法的收敛判别使用位移收敛准则或不平衡力收敛准则。若不收敛,则退出计算;

6) 更新三分力系数。通过主桥和主拱攻角修正三分力系数,检查三分力系数的欧几里德范数是否小于允许值。

## 3 静风稳定分析

### 3.1 位移全过程分析

图 4 表示重庆菜园坝长江大桥计算简图<sup>[10]</sup>,该

桥是特大公轨两用无推力式中承式系杆拱桥。采用刚构与提篮式钢箱系杆拱、桁梁的组合结构。主桥全长为 800 m,由 420 m 中跨和两侧对称布置的 102 m+88 m 边跨组成,提篮拱跨度达 420 m,中间只有 6 根横撑,侧向刚度较小。对该桥的成桥运营态进行风载下位移全过程分析。三分力改变时,风速分级迭代步数越多精度越好,但计算时间较长。考虑到结构在风载较小情况下,各种非线性因素较小,因此在风速分级时,采用  $2^n$  递减变步长分级的办法。如风速分为 6 级时,各级风速增量与最高风速的比值分别为  $\frac{32}{63}, \frac{16}{63}, \frac{8}{63}, \frac{4}{63}, \frac{2}{63}, \frac{1}{63}$ ,这样就保证了当进入结构弹塑性及三分力非线性程度越大时,风速增量越小。通过采用较少的风速分级步数,实现较为精确的静力非线性分析。

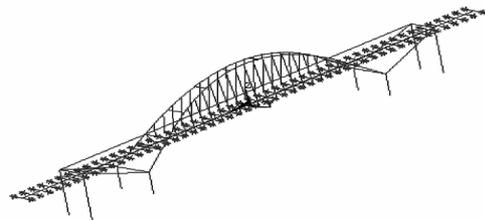


图 4 重庆菜园坝长江大桥计算模型

图 5~图 7 为静风作用下大跨度拱桥的位移全过程分析,沿桥向为  $X$  向,顺风向为  $Y$  向,竖向为  $Z$  向。从计算结果可以看出,结构响应与风速呈非线性变化。一方面由于力与风速呈平方关系;另一方面由于静力三分力系数与结构变形有关。主桥的三分力系数的变化对稳定的影响和悬索桥、斜拉桥等类似。主拱的三分力变化对桥梁稳定也有较大的影响。当结构变形时,两拱转角增大,导致后拱的迎风受前拱干扰较少,后拱阻力系数增大。阻力系数增大反过来又导致两拱转角增大,从而使拱桥的极限承载力降低。

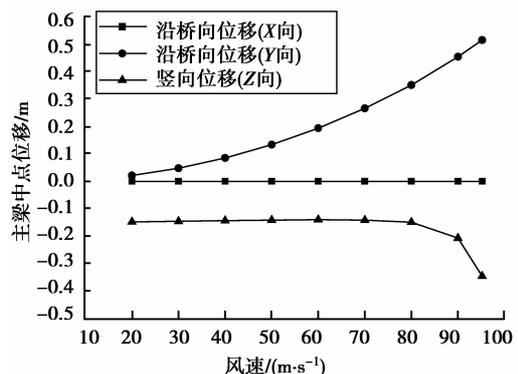


图 5 主梁中点位移随风速变化

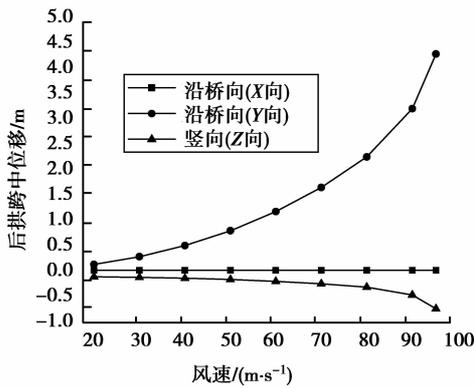


图 6 前拱跨中点位移随风速变化

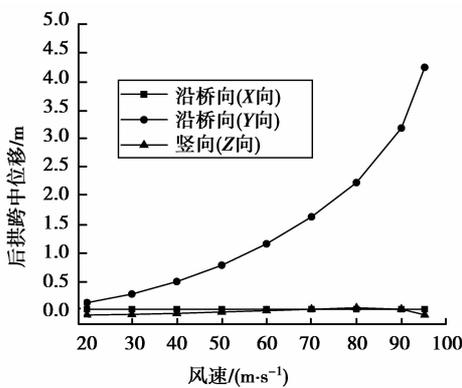


图 7 后拱跨中点位移随风速变化

### 3.2 屈服机制

通过对大跨度拱桥静风非线性分析,可以进一步研究主拱失稳破坏的全过程,如图 8~图 12 所示。假定风速沿 +Y 方向,-Y 方向的失稳过程类似。

1) 风速在 77.2 m/s 时,结构在拱 1/4 悬臂处构件边缘在压弯状态下出现应力屈服。具体位置在拱的横撑下部,如图 8 所示。随着风速递增,截面应力屈服范围加大。

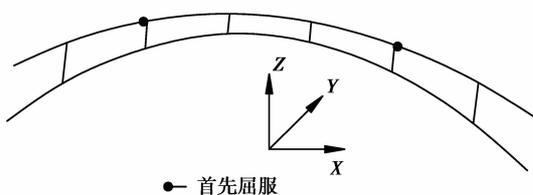


图 8 主拱屈服点(第 1 步)

2) 风速在 80 m/s 时,主拱拱脚与混凝土钢构和最下一根横撑上部构件边缘在压弯状态下出现应力屈服,如图 9 所示。随着风速递增,截面应力屈服范

围加大。

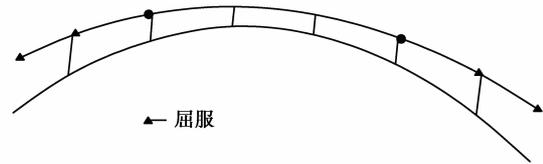


图 9 主拱屈服点(第 2 步)

3) 风速增大到 85 m/s 时,主拱下部屈服截面继续发展,屈服位置逐渐增多,如图 10 所示。

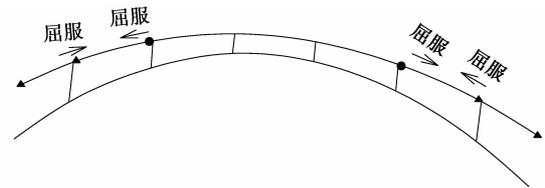


图 10 主拱屈服点(第 3 步)

4) 风速增大到 90 m/s 时,主拱横撑出陆续出现屈服面,拱脚在压弯状态下出现应力全截面屈服,出现塑性铰,如图 11 所示。

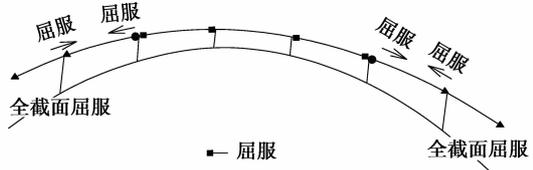


图 11 主拱屈服点(第 4 步)

5) 风速增大到 95.2 m/s 时,前拱横撑也开始出现屈服面,拱脚和主拱第一横撑下单元在压弯状态下出现应力全截面屈服,出现塑性铰,如图 12 所示,至此,主拱变成可变机构,计算发散。

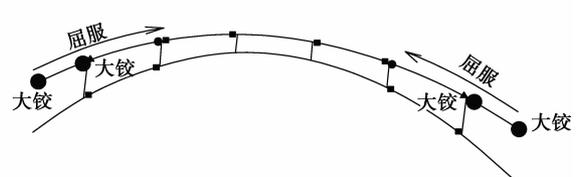


图 12 主拱屈服点(第 5 步)

### 3.3 参数分析

1) 静力三分力不变化。结构的静力三分力的变化对极限承载力有着较大的影响。不考虑静力三分力的非线性求出的极限风速较考虑静力三分力随攻

角变化时要大的多,为 106.2 m/s。同样风速下计算的內力和位移偏小。在 95.2 m/s 的风速下桥梁沿桥向的攻角和位移如图 13~图 15 所示。可以看出,当静力三分力变化时,主桥的攻角响应、主拱的攻角与位移响应明显增大。主拱的攻角响应主要集中在主拱的中部。在中部,两拱的间距较小,对攻角的变化较为敏感,因此,对于两拱间距较小时三分力的求解相当重要的。

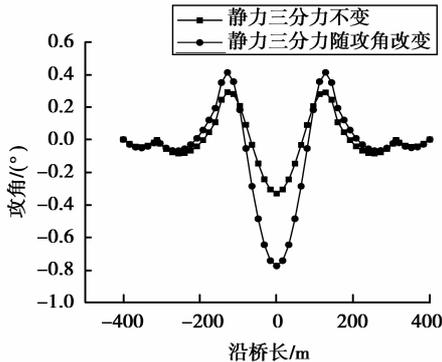


图 13 主梁沿桥向攻角

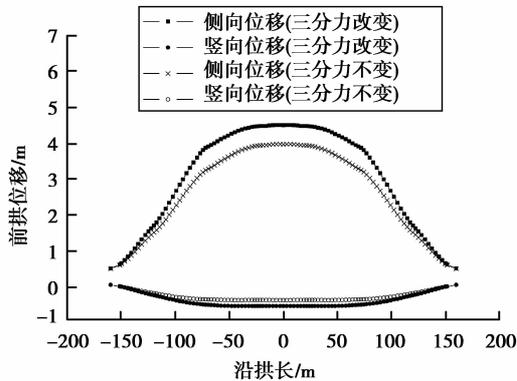


图 14 前拱位移

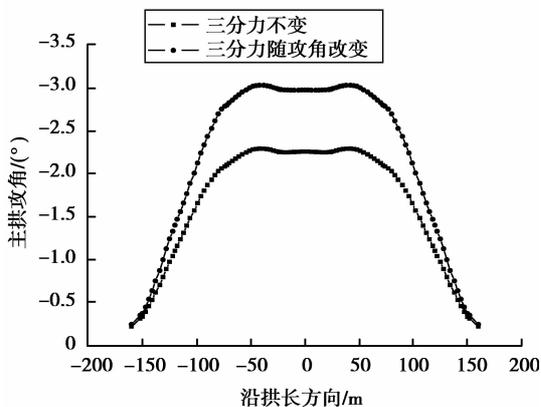


图 15 主拱沿桥向攻角

2)材料强度的影响。在考虑材料为完全弹性时,结构的静风极限承载力可以达到 201 m/s。材料的屈服强度对于拱的极限承载力影响较大,强度越高,极限风速越高,如表 1 所示。

表 1 材料强度与极限风速

材料强度/MPa	345	400	500
极限风速/(m·s <sup>-1</sup> )	95.2	104	115

3)静风初始攻角的影响。静风初始攻角对静风承载力影响较大,如表 2 所示。负攻角极大地降低了结构静风承载力,正攻角增加了结构的静风承载力。

表 2 静风初始攻角与极限风速

初始攻角/ (°)	-3	-2	-1	0	1	2	3
极限风速/ (m·s <sup>-1</sup> )	86	88.5	91.5	95.2	98.5	102.5	107.5

## 4 结 论

大跨度中承式钢拱桥属于柔性空间结构,在风荷载容易发生静力失稳。由于主拱为受压构件,静风荷载不仅会引起结构的动力特性改变,还将导致结构强度破坏和失稳。尤其当桥梁跨度较大,横撑又较少,其静风稳定规律与斜拉桥、悬索桥等桥梁有较大的区别。采用双重迭代循环增量法实现了静风荷载在菜园坝长江大桥上作用的全过程位移响应求解,分析表明:

1)单拱力矩系数及升力系数较小,只需考虑阻力系数。双拱的三分力系数主要由两拱的间距宽度比  $e/d$  以及两拱转角决定。

2)静风作用下结构的屈服失稳分析表明,随着风速增大,拱脚和主拱第一横撑下单元在压弯状态下出现应力全截面屈服,出现钢铰,主拱变成可变机构,失稳破坏。

3)静风的不同初始攻角、材料的强度、静力三分力系数变化等因素对桥梁静风稳定性都有较大的影响。不考虑三分力系数随静风攻角的变化将低估桥梁结构的响应,高强度的钢材能有效提高静风承载能力,而静风初始负攻角将降低桥梁的承载力。

## 参考文献:

- [1] Cheng J, Jiang J J, Xiao R C, et al. Nonlinear aerostatic stability analysis of Jiang Yin suspension

- bridge [J]. *Engineering Structures*, 2002, 24 (6): 773-781.
- [2] Cheng J, Jiang J J, Xiao R C, et al. Wind-induced load capacity analysis and parametric study of a long-span steel arch bridge under construction [J]. *Computers and Structures*, 2003(81): 2513-2524.
- [3] Øiseth O, Rönquist A, Sigbjörnsson R. Simplified prediction of wind-induced response and stability limit of slender long-span suspension bridges, based on modified quasi-steady theory: a case study [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2010, 98(12): 730-741.
- [4] Cheng J, Li Q S. Reliability analysis of long span steel arch bridges against wind-induced stability failure [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2009, 97(3/4): 132-139.
- [5] Shum K M, Xu Y L, Guo W H. Wind-induced vibration control of long span cable-stayed bridges using multiple pressurized tuned liquid column dampers [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(2): 166-192.
- [6] Salvatori L, Spinelli P. Effects of structural nonlinearity and along-span wind coherence on suspension bridge aerodynamics: some numerical simulation results [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2006, 94(5): 415-430.
- [7] 于伟. 大跨度悬索桥静风稳定性非线性分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [8] 罗建辉, 陈政清, 刘广东, 等. 大跨度缆索承重桥梁非线性静风扭转失稳机理的研究 [J]. *工程力学*, 2007, 24 (z2): 145-154.  
LUO Jianhui, CHEN Zhengqing, LIU Guangdong, et al. Research on instability mechanism of long-span cable-stayed bridges due to nonlinear aerostatic torsion [J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(z2): 145-154.
- [9] 许福友, 陈艾荣. 苏通大桥静风响应分析 [J]. *工程力学*, 2009, 26(1): 113-119.  
XU Fuyou, CHEN Airong. Aerostatic response analysis on SuTong bridge [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(1): 113-119.
- [10] 张文明, 葛耀君. 大跨度悬索桥非线性静风稳定性优化迭代分析方法 [J]. *武汉理工大学学报: 交通科学与工程版*, 2010, 34(6): 1141-1145.  
ZHANG Wenming, GE Yaojun. Optimum iteration method for nonlinear aerostatic stability analysis of long-span suspension bridges [J]. *Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering*, 2010, 34(6): 1141-1145.
- [11] 李翠娟, 诸葛萍. 大跨悬索桥非线性静风稳定性分析 [J]. *中外公路*, 2010, 30(4): 160-166.  
LI Cuijuan, ZHU Geping. Nonlinear aerostatic stability analysis of long-span suspension bridges [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2010, 30(4): 160-166.
- [12] 欧阳克俭, 陈政清, 李红利, 等. 空间主缆悬索桥非线性静风稳定分析 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2010, 32 (3): 83-87.  
OUYANG Kejian, CHEN Zhengqing, LI Hongli, et al. Nonlinear aerostatic stability of suspension bridge with spatial main cables [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2010, 32 (3): 83-87.
- [13] 韩大建, 邹小江. 大跨度斜拉桥非线性静风稳定分析 [J]. *工程力学*, 2005, 22(1): 206-210.  
HAN Dajian, ZOU Xiaojiang. Nonlinear aerostatic stability analysis of a long span cable-stayed bridge [J]. *Engineering Mechanics*, 2005, 22(1): 206-210.
- [14] 张陆. 大跨度斜拉桥静风非线性稳定分析 [D]. 长沙: 中南大学硕士学位论文, 2009.
- [15] 程进, 肖汝诚, 夏旻. 静风荷载下大跨度钢拱桥施工稳定性分析 [J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2004, 32(1): 15-19.  
CHENG Jin, XIAO Rucheng, XIA Min. Wind-induced stability analysis of long-span steel arch bridges under construction [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science Edition*, 2004, 32 (1): 15-19.
- [16] 李正良, 张亮亮, 晏致涛, 等. 重庆菜园坝长江大桥的抗风试验研究报告 [R]. 重庆: 重庆大学, 2004.

(编辑 陈移峰)