

特高压输电塔气弹模型风洞试验研究

邓洪洲¹, 司瑞娟¹, 胡晓依¹, 陈强²

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092; 2. 福建省电力勘测设计院, 福建 福州 350003)

摘要: 为进一步了解特高压输电塔风振响应的特点, 以正在建设的淮南-上海 1 000 kV 特高压线路中的一基双回路直线塔为原型, 采用离散刚度法制作了输电塔气弹模型, 进行了输电塔在紊流场中不同风速、不同风攻角下的气弹模型风洞试验。试验结果表明: 输电塔模型的响应随风速的增大而增大; 位移响应受风攻角的影响比较明显, 在 15° 风时位移响应最大; 各试验工况下, 输电塔模型横风向的振动比较显著, X 向和 Y 向的加速度响应处于同一量级且数值比较接近; Y 向的加速度响应在 0° 风时最大, X 向的加速度响应在 90° 风时最大, 但任何工况下, 输电塔 X 向的加速度响应均大于 Y 向的加速度响应。

关键词: 特高压; 输电塔; 风洞试验; 气弹模型; 风振响应
中图分类号: TB 123; TU 317+.1 **文献标识码:** A

Wind Tunnel Test on Aeroelastic Model of UHV Latticed Transmission Tower

DENG Hongzhou¹, SI Ruijuan¹, HU Xiaoyi¹, CHEN Qiang²
(1. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Fujian Electronic Power Survey and Design Institute, Fuzhou 350003, China)

Abstract: An aeroelastic model was designed with discrete stiffness method to investigate the wind-induced response of ultra-high voltage (UHV) transmission tower. Prototype structure is a typical suspension tower, a part of 1 000 kV UHV double-circuit transmission line from Huainan to Shanghai. Wind tunnel test on the model was conducted with different wind speeds and wind directions in a turbulent flow. Test results show that wind-induced response of the model increases with the wind speed, displacement reaches maximum at 15° wind angle of attack, the vibration response of X-direction is close to that of Y-direction and the transverse response is evident. And acceleration response on the Y-direction reaches the maximum at 0° wind angle of attack, while X-direction reaches the maximum at 90° wind angle of

attack, but for all cases acceleration root mean square (RMS) of X-direction is more evident than that of Y-direction.

Key words: ultra-high voltage (UHV); transmission tower; wind tunnel test; aeroelastic model; wind-induced response

特高压输电线路在中国已进入建设期。正在建设中的淮南-上海 1 000 kV 特高压双回路输电线路塔高一般都在 100 m 以上, 塔体更高, 横担较通常的 500 kV 输电塔架几乎长一倍, 塔体结构形式和受力特点与传统塔型有本质的不同, 风振响应也更加明显。此外, 该线路拟全部采用钢管塔, 而钢管构件本身对风致振动的敏感性使得本就存在气动弹性作用的输电塔在风荷载下的动力响应更为复杂。针对 1 000 kV 特高压双回路钢管塔的理论 and 试验研究目前亦鲜有相关研究文献。因此对 1 000 kV 特高压双回路钢管塔的风振响应开展相应的理论和试验研究显得非常紧迫和必要。

风荷载是特高压双回路塔的主要荷载, 动力风效应分析的正确性直接影响到结构的安全性与合理性。然而, 风荷载本身的复杂性、结构和来流风间的耦合作用等问题使得输电塔结构的风振响应计算在理论上无法得到完善的解决。迄今, 通过风洞试验研究输电塔结构的风振特性仍是较为直接有效的手段。Ballio^[1]和 Glanville^[2]对钢管塔架进行的风振实测表明, 该类结构横风向的风振力略大于顺风向。国内外现有文献[3-5]的研究结果也指出, 强风作用下格构式塔架横风向与顺风向风振响应相当。而在现行的输电塔设计中, 对风荷载作用仍是以结构的一阶振型为基础进行其顺风向的风振计算来考虑。针对江阴大跨越输电塔线体系的研究表明^[6], 塔线耦合作用对顺风向的加速度响应影响较小。因此对

收稿日期: 2009-03-04

基金项目: 福建省电力公司科研项目(科 2007-45)

作者简介: 邓洪洲(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士。主要研究方向为高耸结构抗风、输电塔结构优化设计。

E-mail: Denghongzhou@online.sh.cn

于风振系数而言,单塔与塔线体系的计算结果相差不大.为进一步了解风和结构相互耦合下 1 000 kV 特高压钢管塔风振响应的特点,特进行输电塔模型的气动弹性风洞试验.测试输电塔气弹模型在紊流场中不同风速、不同风向角下的风振响应,对输电塔各种风振响应的特点进行分析和总结.

以正在建设的淮南-上海 1 000 kV 特高压线路中的一基双回路直线塔为原型设计制作气弹性模型并进行了风洞试验.该塔高 105.4 m,呼高 75 m,塔身平面形状为正方形,结构形式为格构式钢管塔,塔身主材及塔身斜材为钢管构件,地线支架和导线横担杆件采用角钢.

1 气弹模型的设计与制作

1.1 模型设计方法

目前,输电塔气弹模型的设计主要有三种方法:集中刚度法^[6]、离散刚度法^[3]和刚性节段加 V 型弹簧片法^[5,7].集中刚度法是采样芯棒模拟结构总刚度,用轻质外衣来模拟结构外形,该方法虽模型制作简单,但无法考虑模型的扭转效应,而且会导致气动力传递途径失真等,故无法准确模拟输电塔的风致振动响应.刚性节段加 V 型弹簧片法是把输电塔按几何相似加工成若干刚性段,使各段与原型质量分布一致,各段间用 V 型弹簧片连接来模拟结构的动力特性^[5],该法只能近似反映输电塔的整体响应情况,而对杆件的振动情况无法进行模拟,同样会引起气动力传递的失真而无法对输电塔的风振响应进行很好地模拟.离散刚度法是将输电塔的各个杆件进行刚度和几何的模拟,模型制作难度大,但可以真实地反应结构的风致振动情况.本文采用离散刚度法

进行输电塔气弹模型的设计.

结合气动弹性运动方程,通过量纲分析可导出输电塔气动弹性模型风洞试验所需要满足的相似准则.根据推导,模型除要满足几何相似、刚度相似和质量分布一致外,原则上还要满足雷诺数、弗劳德数、弹性参数、惯性参数和阻尼参数的相似.由于所有相似参数不可能同时得到满足,因此在模型设计时,根据研究的对象和关心的响应对相似参数的满足进行一定的取舍,最终保证重要参数严格相似,忽略次要参数的影响.风洞试验中,除非采用高密度的流体,模型的雷诺数相似实际中很难满足.而对于高耸钢管塔来讲,雷诺数的影响不可忽略,其主要表现在三分力系数的数值上,本文根据已有研究^[8]通过对试验结果的修正来考虑这一影响.同时,试验重点在于测试单塔在水平风荷载下的气动弹性响应,因此也不考虑弗劳德数的严格相似.

就模型材料的选择来讲,弹性参数的相似决定了模型材料的弹性模量.由于很难找到既满足弹性模量相似要求又便于加工的材料,弹性模量的相似难以实现.但是,弹性模量总是伴随着结构刚度的表达,因此可以将弹性模量的相似溶于结构刚度分布的相似.计算表明,采用杆系模式计算其动力特性参数便可具有足够的计算精度,故模型设计时可以采用等代离散刚度法,对杆件只进行拉压刚度的模拟.

模型材料选用黄铜,全塔所有杆件均采用毛细黄铜管制作以满足杆件刚度的相似要求.根据输电塔高度、风洞试验段截面尺寸和试验风场的要求,确定输电塔模型的几何缩尺比为 80,通过模型动力特性标定的频率比为 1/22.36,风速比为 3.58,模型的主要相似系数见表 1.

表 1 输电塔模型主要相似系数(原型/模型)

Tab.1 Similarity coefficients of transmission tower model

几何 λ_L	风速 λ_V	结构密度 λ_ρ	质量 λ_M	轴向刚度 λ_{EA}	空气密度 λ_{ρ_a}	位移 λ_y	加速度 $\lambda_{\ddot{y}}$	频率 λ_f	面积 λ_A
80	3.58	1.3	665 600	57 600	1	80	1/6.25	1/22.36	28 800

1.2 气弹模型的制作

由于模型材料规格的限制,不能使每个杆件的刚度都完全严格满足,在模型制作时对输电塔刚度贡献大的杆件,其刚度误差控制在 5% 以内.以此为基础,在模型杆件的选取中首先保证截面面积的相似,而对于受风面积的相似要求则通过外加轻质 PP 管或 ABS 板的方法来满足.

在模型制作时,对于塔身的钢管构件,用毛细铜

管来模拟各杆件的刚度,各杆件的外形按原杆件直径缩尺尺寸选用相应的 PP 管来模拟.为保证毛细铜管杆件位于外套的 PP 管中心,先把具有和毛细管外径同样大小的中心圆孔的轻质薄圆片固定在铜管上定位,然后再把 PP 管套在该薄圆片上.薄圆片直径和 PP 管的内径相同,由数控雕刻机雕刻而成,内孔和外径能够准确满足各个杆件的要求.对于横担的角钢杆件,用毛细铜管来模拟各杆件的刚度,根据各

杆件的角钢肢宽缩尺,用轻质的ABS板粘贴在铜管外侧形成各杆件的角钢外形.

模型制作的主要步骤如下:①按照设计模型的空间杆件和结点位置,用数控雕刻机制作精确的定位模型支架;②严格根据各杆件的模型尺寸放样取料,根据定位支架对模型杆件进行精细的锡焊连接,形成模型的骨架;③根据各杆件原型的形状,按相应的外形缩尺粘贴ABS板或外套PP管.为消除杆件外形的材料对杆件刚度的影响,把充当外形的ABS杆件和PP管断开为若干段,以保证结构刚度由毛细铜管提供.制作完成的输电塔整体模型见图1.

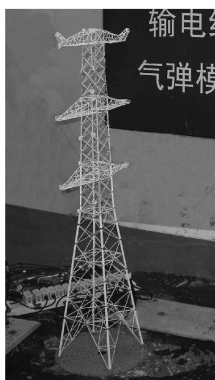


图1 输电塔试验模型

Fig.1 Test model of transmission tower

1.3 模型动力特性

动力特性标定试验采用人工激振法进行,采样频率100 Hz,采样时间20 s.通过分别对X、Y主轴方向的激振,得到由外力激励下模型在各主轴方向的自由振动,记录下自由振动的衰减曲线,由对自由振动衰减曲线的对数分析、频响函数分析等,得到模型的频率和阻尼比.

表2 模型频率(Hz)及阻尼比(%)

Tab.2 Frequencies and damping of the model

理论值		标定值		阻尼比	
X	Y	X	Y	X	Y
1.28	1.30	28.75	28.71	1.60	1.60

2 风场模拟与试验工况

试验在同济大学 TJ-2 边界层风洞中进行,试验段尺寸 $2.5 \times 3 \times 15$ m,最小稳定风速 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大风速 $68 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,试验风速取 $6 \sim 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

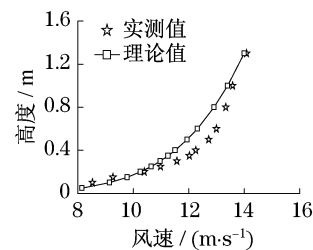
风场模拟 B 类地貌,地貌指数.试验中采用尖劈和粗糙元的组合来实现紊流风场的模拟.为保证风场的剖面宽度,减少风洞边界墙体对风场的影响,在

风洞试验段的入口处采用3个尖劈,尖劈高2 m,迎风板底宽10 cm,分离板底宽20 cm,间距75 cm.在风洞地面上交错摆放 $6.0 \times 7.5 \times 4.5$ cm 的粗糙元,风场模拟装置如图2所示.实测得到的风场模拟结果如图3所示.模拟所得的风速剖面与理论风速剖面符合较好.湍流度的模拟与理论值存在一定的偏差,模拟值在下部偏大而在上部偏小,这与实际情况相符.模拟风场在10 m处湍流度为14%,保证了规范中10 m高度处10%湍流度的要求,可认为模拟的风场是合理的.

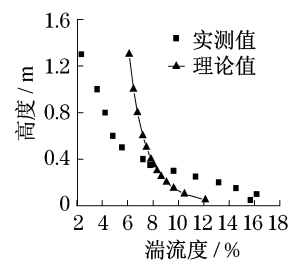


图2 风场模拟装置

Fig.2 Simulant settings of wind field



a 风速剖面



b 湍流度剖面

图3 风场模拟结果

Fig.3 Simulant results of wind field

根据原型输电塔的动力分析结果,结合模型振动变形的特点,同时考虑工程中所关心位置,在模型上确定了6个不同高度的测试截面.每个测试截面上沿X、Y方向各布置一个测点,在地线横担端部布置一个测点.整个模型共计13个测点,其中1,3,5,7,9,11等

6个奇数点量测垂直导线方向的位移响应;2,4,6,8,10,12等6个偶数点量测顺导线方向的位移响应;100点测量横担端部位移.测点布置情况见图4.

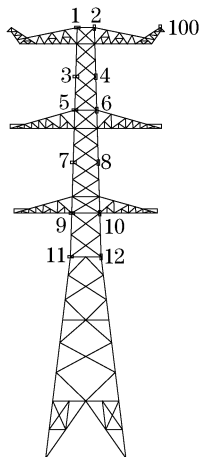


图4 测点布置示意

Fig.4 Sketch map of tested points on the model

试验中使用激光位移计对模型的风振响应进行测量:由于气弹模型质量小,对附加质量敏感,应尽量少使用加速度传感器以减少或避免传感器及相关数据线对模型的巨大影响.使用激光位移计可避免附近质量的问题,但由于激光位移计是由顶在地面和风场顶板间的金属杆固定的,过多的金属杆将会对塔架模型周围的风场产生明显的扰动,可导致测量结果失真.因此,本次试验采用同一根金属杆上沿高度固定多个激光位移计的方法以尽可能地削弱试验装置对试验结果的影响.模型的13个测点全部使用激光位移计进行测量.

为研究风速对输电塔风振响应的影响,根据试验风速比,取6,8,10,12,14 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 这5种试验风速进行测定.为考查风攻角对输电塔风振响应的影响情况,每种风速下分别采集模型在0,15,30,45,60,75,90°风向角下的响应数据.风向角方向的定义如图5所示.其中: β 表示风攻角; X 为垂直导线方向;

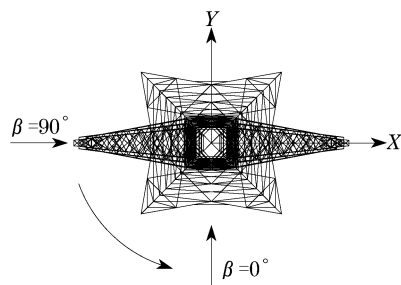


图5 风向角定义

Fig.5 Definition of wind direction

Y 为顺导线方向.试验中,风向角的改变通过模型的转动实现.每个工况的采样时间为61.44 s,采样频率为300 Hz.

3 模型风振响应的结果分析

通过有限元计算的模型二阶频率值在80~90 Hz.为保证数据质量和体现结构可能的高阶振型对响应的贡献,采用100 Hz的低通滤波器对采集的时程信号进行数字滤波.同时对信号进行去初始项、去直流项、去趋势项等处理以尽可能地还原结构的真实振动状态.

3.1 风速对风振响应的影响

测点位移均值随风速的变化曲线如图6所示.可以看出:顺风向的位移响应随风速的增加而增加,横风向的位移响应随风速的变化无明显规律且横风向位移均值的变化幅度不大,但随着高度的降低,同一高度处顺风向和横风向的位移均值呈接近趋势.

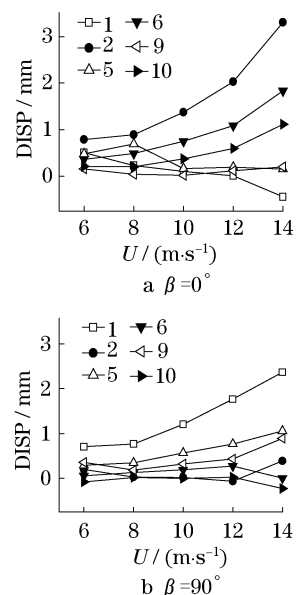


图6 位移响应均值和风速

Fig.6 Mean value of displacement and wind speed of the model

测点加速度根方差随风速的变化见图7.由图7可以看出,加速度响应随风速的增大而增大.输电塔X向和Y向的加速度响应处于同一个量级且比较接近,再次说明了钢管塔的横风振动效应比较明显,在输电塔的设计和计算分析时必须考虑横风共振作用.

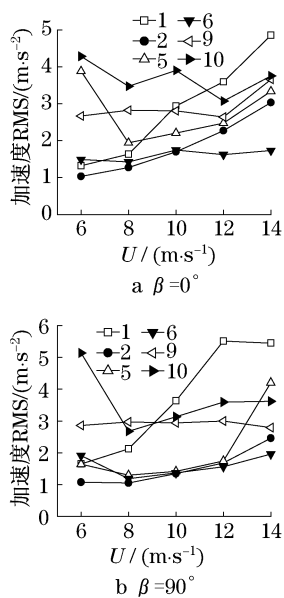


图7 加速度根方差和风速

Fig.7 RMS of acceleration and wind speed of the model

3.2 风攻角对风振响应的影响

不同风速下,塔顶位移响应均值随风攻角的变化曲线如图8,塔顶加速度响应根方差随风攻角的变化曲线如图9.图中测点1量测的是X向响应,测点2量测的是Y向响应.

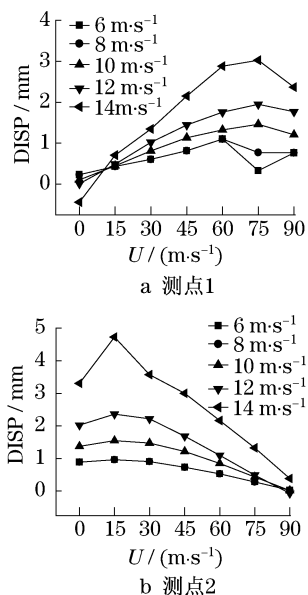


图8 位移响应均值和风攻角

Fig.8 Mean value of displacement and wind direction of the model

由图8可以看出,在各风速下,位移响应随风攻角呈现规律性变化,说明风攻角对位移响应的影响比较明显;45°风时,X向和Y向的位移响应值基本

相当;风攻角在0°~45°时,Y向的位移响应均比X向的位移响应大,Y向的位移起控制作用,风攻角在45°~90°时,Y向的位移响应均比X向的位移响应小,X向的位移起控制作用.Y向位移响应在15°风时出现最大值,X向的位移响应在75°风时最大.这主要是因为输电塔为非对称结构,15°风时塔架正面的受风面积较大而75°风时塔架侧面的受风面积较大,从而使得输电塔在相应方向所受风荷载作用变大所致.即沿塔架主轴方向的位移响应的最不利风向与相应的主轴呈15°夹角,而现行的杆塔设计规范中并没有考虑15°时的最不利风向角这一情况.

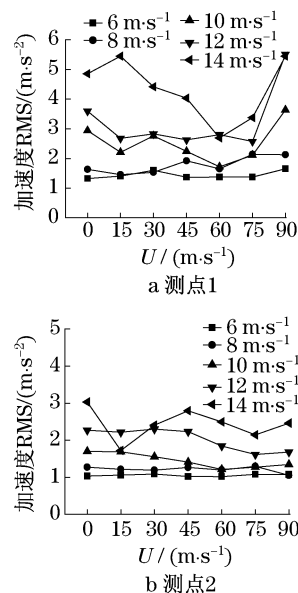


图9 加速度根方差和风攻角

Fig.9 RMS of acceleration and wind direction of the model

由图9可以看出,输电塔X向和Y向的加速度响应处于同一量级,表明钢管塔的横风效应明显.同一风速下,加速度响应随风攻角的变化呈现出了比较明显的规律,说明加速度响应对风攻角的变化敏感.在任何工况下,输电塔X向的加速度响应均大于Y向的加速度响应,这是X向的结构刚度大于Y向的结构刚度,而使得X向的回复力大于Y向的回复力.Y向的加速度响应在0°风时最大,X向的加速度响应在90°风时最大.对于X、Y两个主轴向刚度不同的钢管塔来讲,刚度较大方向的加速度响应将起控制作用.

3.2 塔架风振系数

在试验已测得模型风振时程响应的基础上,可直接根据其定义计算输电塔模型的顺风向风振系数,即

$$\beta(z) = 1 + \frac{gm(z)\sigma_a(z)}{\mu_s\mu_z w_0 A(z)} \quad (1)$$

式中: $m(z)$, $\sigma_a(z)$, $A(z)$ 分别为 z 高度处的集中质量、加速度方差以及挡风面积; g 为保证系数, 取为 2.2. 根据风速和加速度根方差即可求出风振系数值, 表 3 给出了 0° 和 90° 风时塔顶的顺风向风振系数计算值.

表 3 塔顶顺风向风振系数计算值

Tab.3 Longitudinal wind vibration coefficient value of the tower top

试验风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	10 m 高风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$\beta(H)$	
		0°	90°
8	19.2	1.13	1.78
10	24.1	1.11	1.85
12	29.5	1.10	1.90
14	34.4	1.10	1.65

可以看出, 90° 风(沿横担方向)的风振系数明显大于 0° 风(垂直横担方向), 这是因为该塔顶为横担所在部位, 而横担 90° 方向的迎风面积要明显小于 0° 方向, 故对于输电塔设计而言, 风振系数计算时必须考虑横担引起的塔身质量突变的影响; 0° 风时塔顶风振系数随风速的变化规律不明显, 在设计风速(10 m 高度处 $32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 范围内, 90° 风下风振系数随风速的增大而增大. $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 试验风速时, 由于塔腿主材超过了设计承载力, 模型出现了过大的变形而导致加速度响应明显减小, 故风振系数计算值反而减小.

4 结论

通过淮南-上海 1 000 kV 特高压线路中的一基双回路直线型钢管塔风振响应的气弹模型风洞试验, 得出如下结论:

(1) 离散刚度法设计输电塔气弹模型时, 将刚度相似和外形相似相结合, 可避免同时模拟刚度和外形的困难. 虽然制作难度较大, 但可较好地反映结构模型的真实振动情况, 是一种较好的试验方法.

(2) 特高压格构式塔架的顺风向位移响应均值随风速的增大而增大, 而横风向的位移均值较小, 且随风速无明显的变化规律.

(3) 该类结构的顺风向、横方向的加速度根方差处于同一量级且数值较为接近, 说明钢管塔的横风振动效应明显, 建议输电塔在设计和计算分析时考虑横风共振作用.

(4) 风攻角对位移响应的影响显著. 沿输电塔

架主轴方向的位移响应值的最不利风向与相应的主轴呈 15° 夹角, 现行杆塔设计规定中并未考虑该最不利风向的影响.

(5) 对于 X、Y 两个主轴向刚度不同的钢管塔来讲, 刚度较大方向的加速度响应将起控制作用. Y 向的加速度响应在 0° 风时达最大, X 向的加速度响应在 90° 风时达最大. 且 X 向的加速度响应大于 Y 向的加速度响应.

(6) 在设计风速范围内, 风振系数随风速的增大而增大. 对于输电塔设计而言, 风振系数计算时必须考虑横担引起的塔身质量突变的影响.

参考文献:

- [1] Ballio G, Meberini F, Solari G. A 60-year old 100 m high steel tower: limit status under wind actions[J]. J of Wind Eng and Indus Aerodyn. 1992, 41.
- [2] Glanville M J, Kwok C S. Dynamic characteristics and wind induced responses of a steel frame tower[J]. J of Wind Eng and Indus Aerodyn. 1995, 54.
- [3] 楼文娟, 孙炳南, 唐锦春. 高耸格构式结构风振数值分析及风洞试验[J]. 振动工程学报, 1996, (3): 318.
LOU Wenjuan, SUN Bingnan, TANG Jinchun. Wind tunnel test and numerical computation on wind-induced vibration for tall lattice tower [J]. Journal of Vibration Engineering, 1996, 9 (3): 318.
- [4] 郭勇, 孙炳楠, 叶尹, 等. 大跨越输电塔线体系气弹模型风洞试验[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2007, 41(9): 1482.
GUO Yong, SUN Bingnan, YE Yin, et al. Wind tunnel test on aeroelastic model of long span transmission line system [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2007, 41 (9): 1482.
- [5] 李正良, 肖正直, 韩枫, 等. 1 000 kV 汉江大跨越特高压输电塔线体系气动弹性模型的设计与风洞试验[J]. 电网技术, 2008, 32(12): 1.
LI Zhengliang, XIAO Zhengzhi, HAN Feng, et al. Aeroelastic model design and wind tunnel tests of 1 000 kV hanjiang long span transmission line system [J]. Power System Technology, 2008, 32(12): 1.
- [6] 邓洪洲, 朱松晔, 陈晓明, 等. 大跨越输电塔线体系气弹模型风洞试验[J]. 同济大学学报: 自然版, 2003, 1(2): 32.
DENG Hongzhou, ZHU Songye, CHEN Xiaoming, et al. Wind tunnel investigation on model of long span transmission line system [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2003, 31(2): 132.
- [7] Larsen A. Aerodynamics of large bridges [M]. Balkema: Rotterdam, 1992.
- [8] 埃米尔·希缪, 罗伯特·H·斯坎伦. 风对结构的作用—风工程导论 [M]. 刘尚培, 项海帆, 谢霖明译. 上海: 同济大学出版社, 1992.
Simiu Emil, Scanlan Robert H. Wind effect on structures: an introduction to wind engineering [M]. Translated by LIU Shangpei, XIANG Haifan, XIE Jiming. Shanghai: Tongji University Press, 1992.