

基于高频天平测力试验的500kV单回路输电塔风致响应研究

张庆华^{1,2}, 顾明²

(1. 华北水利水电大学, 郑州 450011; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 基于高频测力天平风洞试验的结果, 采用平稳激励下随机振动的模态叠加法, 计算了典型500kV单回路酒杯型输电塔的风致响应。结果表明: 输电塔结构顺风向和横风向脉动位移响应、加速度和基底弯矩值都较大, 横风向响应值甚至大于顺风向。各个方向一阶振型在响应中起主导作用。位移阵风响应因子和基底弯矩响应因子随风向变化趋势相近, 顺风向关键节点位移响应因子最大值不超过1.8, 弯矩响应因子约为1.5。

关键词: 输电塔; 风洞试验; 模态叠加法; 风致响应; 阵风响应因子

中图分类号: TU761.3; TU317 **文献标识码:** A

Wind-induced response of a 500 kV single-circuit transmission tower based on high-frequency force-balance technique

ZHANG Qing-hua^{1,2}, GU Ming²

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China;

2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Wind-induced responses of a 500kV single-circuit transmission tower were computed based on wind forces acting on the tower obtained from wind tunnel tests using high-frequency force-balance technique and the modal superposition method. The results showed that the dynamic response displacements, accelerations and base bending moments (BBM) are all large in both along and across wind directions, and furthermore, the across wind dynamic responses are generally larger than the along wind responses; the first mode has dominant contributions to the total response in both the two wind directions; in addition, the displacement gust response factor and the BBM response factor have similar trends; the maximum displacement gust response factor in along wind direction of key nodes is no more than 1.8, and the maximum moment gust response factor is about 1.5.

Key words: transmission tower; wind tunnel test; modal superposition method; wind-induced response; gust response factor

轻质、高柔、小阻尼是高压输电塔-线体系的主要特性, 其风损和风毁事故在世界各地频发, 风致输电体系动力特性已成为国际、国内风工程和结构工程界长期关注的重要研究课题。

目前输电体系风致响应研究主要包括两类方法, 第一类方法是直接测量响应的方法, 即通过现场实测^[1-4]或气动弹性模型风洞试验^[5-9]直接测量结构的响应。现场实测能够直接得到输电体系实际风致响应特性, 是检验现有试验方法和理论模型的最为权威的依据, 但其费用大、周期长、难度大, 因为条件的限制,

得到的风振动力响应特性有限。由于外形复杂, 输电体系气弹模型试验多为单自由度气弹模型试验。现有气弹风洞试验多是对导线^[5-6]或大跨越线路^[7-8]的研究。遗憾的是, 目前尚无模拟非线性作用的相似律, 所以无法较好地模拟大垂度导线的非线性作用; 此外, 导线雷诺数效应的精确模拟也是目前难以解决的问题。第二类方法基于风力的响应分析法, 即采用高频动态测力天平试验获得作用在结构上的气动力^[9-11], 或基于准定常理论利用数值方法人工模拟风荷载^[12-14], 再将其作用在结构有限元模型上进行顺风向风振计算。

输电塔与一般格构式塔架结构最大的区别在于其塔头部具有较大的质量和复杂的几何外形, 由于其处于塔顶部, 对风荷载更为敏感。文献[15]中虽然给出了典型格构式输电塔一阶振型的广义风荷载谱解析模型, 但是其解析模型过于简单, 且为整塔模型, 获得整

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50638010); 科技部国家重点实验室基础研究资助项目(SLDRCE08-A-03); 河南省教育厅科学技术研究重点项目(13A560691)

收稿日期: 2013-03-05 修改稿收到日期: 2013-10-10

第一作者 张庆华 男, 讲师, 1977年生

通讯作者 顾明 男, 教授, 长江学者, 博士生导师, 1957年生

塔的风力并不能很好地用于计算结构的响应。

针对输电塔结构特点,为了获得输电塔结构上的风荷载分布,特别是获得塔头和塔体这两类体型的风力,在同济大学土木工程防灾国家重点实验室 TJ-1 边界层风洞中完成了塔头、塔身结构节段模型高频测力天平试验^[16-17]。本文在此试验基础上,采用平稳激励下随机振动的模态叠加法进行计算,细致研究典型 500kV 单回路酒杯型输电塔的风致响应,分析了关键点位移响应、加速度响应、基底弯矩、杆件轴力以及阵风响应因子等随风向的变化。

1 风洞试验

格构式输电塔头、塔身高频动态天平测力风洞试验是在同济大学土木工程防灾国家实验室的 TJ-1 大气边界层风洞中进行的。试验时通过转动转盘模拟不同风向。试验由被动格栅紊流发生器生成的空间均匀紊流场中进行,取输电塔地貌为 C 类,20m 高度基本风速为 35m/s(B 类地貌)。试验参考高度及紊流度等相关参数见表 1。详细的试验过程和试验结果见文献[16-17]。由风洞试验结果,根据相似理论,可以得到作用于塔头、塔身实际结构上 X、Y 向基底风力谱和 Z 向扭矩谱。

风荷载空间分布通过各层的面积分配。不考虑塔头、塔身和塔腿间的相关性。

需要注意的是,由于输电塔主要由角钢构成,结构复杂,模型制作时可选材料有限,实验结果通常只能保证实际结构各方向一阶振型处于有效频带范围内,为了考虑高阶振动模态的影响,高频段的风力谱将采用拟合风荷载功率谱^[19]。

2 风致响应计算方法及基本计算参数

2.1 计算方法

由于输电塔结构模型复杂,节点较多,风力施加时,根据附属面积,直接将风力施加于关键节点,输电塔风力关键节点的选取及编号参见图 1,其中,Y 向关键节点 20 个,X 向关键节点 18 个。

利用平稳激励下线性系统随机振动的模态叠加法,位移响应功率谱密度矩阵为:

$$[S_{yy}(\omega)] = [\Phi][H]^*[\Phi]^T[S_{pp}(\omega)][\Phi][H][\Phi]^T \quad (1)$$

其中, $[\Phi]$ 为质量归一的振型矩阵, $[H]$ 为传递函数矩阵, $|H_i(\omega)|^2 = [(\omega_i^2 - \omega^2)^2 + (2\xi\omega_i\omega)^2]^{-1}$, $[S_{pp}(\omega)]$ 为风力谱矩阵,由高频天平测力风洞试验获得^[16-17]。根据位移响应谱,计算得到加速度响应功率谱:

$$S_{\ddot{y}y}(\omega) = \omega^4 S_{yy}(\omega) \quad (2)$$

基底弯矩功率谱:

$$S_{BM} = \{z_1, z_2, \dots, z_n\} [K][S_{yy}(\omega)] \times [K]^T \{z_1, z_2, \dots, z_n\}^T \quad (3)$$

其中, n 为输电塔节点数, $[K]$ 为刚度矩阵, $\{z_1, z_2, \dots, z_n\}$ 为所有节点的高度向量。

假设输电塔各杆件只受轴力作用,则杆件杆端力(轴力)与位移的关系为:

$$\{P_i\}_j = [T_{ij}][K_{ij}](\{U_i\} - \{U_j\}) \quad (4)$$

其中, $\{P_i\}_j$ 为杆端力(轴力); $[T_{ij}]$ 为结构单元 ij 的转换矩阵; $[K_{ij}]$ 为杆件单元对塔架结构坐标的刚度矩阵, U_i, U_j 为单元节点位移。

2.2 结构模态分析

对输电塔有限元模型进行模态分析,计算了结构的前 40 阶模态,限于篇幅,图 2 仅给出了酒杯型输电塔结构的前 3 阶振型,都为整体振动特性,前两阶分别为两个方向的侧向弯曲振型,第三阶为结构的扭转振型。

表 1 片段模型及试验相关参数

Tab. 1 Parameters of model and test

	参考高度/m	实际紊流度	试验紊流度	几何缩尺比 λ_L	试验风速/ $(m \cdot s^{-1})$	风速比 λ_v	时间缩尺比 λ_t
塔头	22	0.219	0.19	1/45	12.08	1/2.420	1/18.597
塔身	46	0.179	0.19	1/30		1/2.846	1/15.812

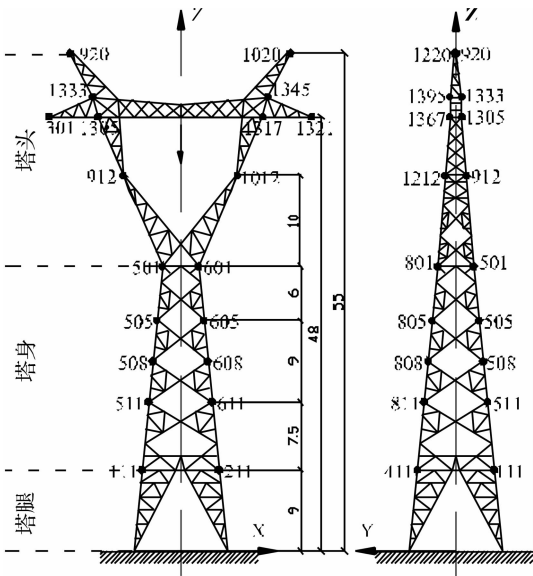


图 1 酒杯型输电塔关键点编号

Fig. 1 Transmission Tower Key Node Number

试验中并未包含输电塔塔腿结构。塔腿约占整塔高的 1/6,但由于其迎风面积小,并且更靠近地面,故其风力对结构响应的影响相比塔头和塔身是很小的。本文的塔腿风力采用文献[18]CFD 模拟得到的结果。

风洞试验只能分别得到塔头、塔身结构整体风荷载(已经考虑结构内不同高度处风荷载的空间相关性),而不能获得荷载沿结构的分布特性。塔头、塔身

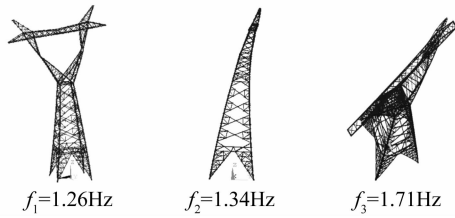


图2 酒杯型输电塔前三阶固有频率
Fig. 2 Natural frequencies of transmission tower

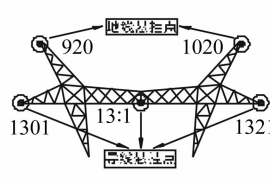


图3 导线和地线悬挂点
Fig. 3 Key nodes of lines

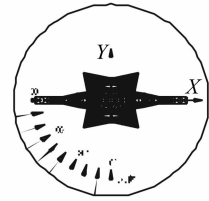


图4 风致响应风向
Fig. 4 Wind angle

2.3 选取计算参数

计算输电塔结构风致位移响应的参数:①地貌类型:C类;②基本风速:离地面20m高度处35m/s;③结构阻尼比:0.02;④参振模态数目:40阶;④频率范围[0,8]Hz。

3 风致响应计算结果及分析

3.1 响应随风向变化

图3所示为酒杯型输电塔连接导线和地线的关键节点,导线和地线受到的不平衡张力、风压以及断线张力等相关荷载都将通过绝缘子作用于这些关键节点,即输电塔通过这些关键点为导线和地线提供了机械支撑。其中1301与1321,920与1020结构对称,这里选取点920、1301和1311为主要研究对象。风向及结构坐标参见图4。

图5(a)给出了节点920、1301和1311X、Y向平均位移响应和脉动位移响应根方差值随风向变化曲线(图4为风致响应的风向定义)。X、Y向平均位移随风

向都呈先增大后减小趋势。其中,Y向平均位移在20°风向附近值最大,X向平均位移最大值出现在70°附近。由于节点1301、1301位于横担处,高度相同,其X、Y向平均位移随风向变化趋势较为接近,节点920位于塔架的顶部,X、Y向平均位移明显大于横担部的另外两点。相对平均位移而言,各点位移响应的均方根值随风向变化的规律性较差,基本呈减小趋势。

各点加速度响应随风向变化(图5(b)所示)与脉动位移响应随风向变化基本一致,X向加速度单调减小,Y向加速度在10°风向时值最大,然后不断减小。

对比响应随风向变化可以看到,位于塔顶最高点的920加速度和脉动位移都要大于横担处节点1301和1311。点1301和1311高度相同,分别位于横担的边缘和中心处,两者X向脉动位移与加速度基本吻合,但Y向1301点响应却明显大于1311点,对比图6(a)所示的功率谱图可知,扭转模态的贡献是1301点Y向响应大于1311点的主要原因。

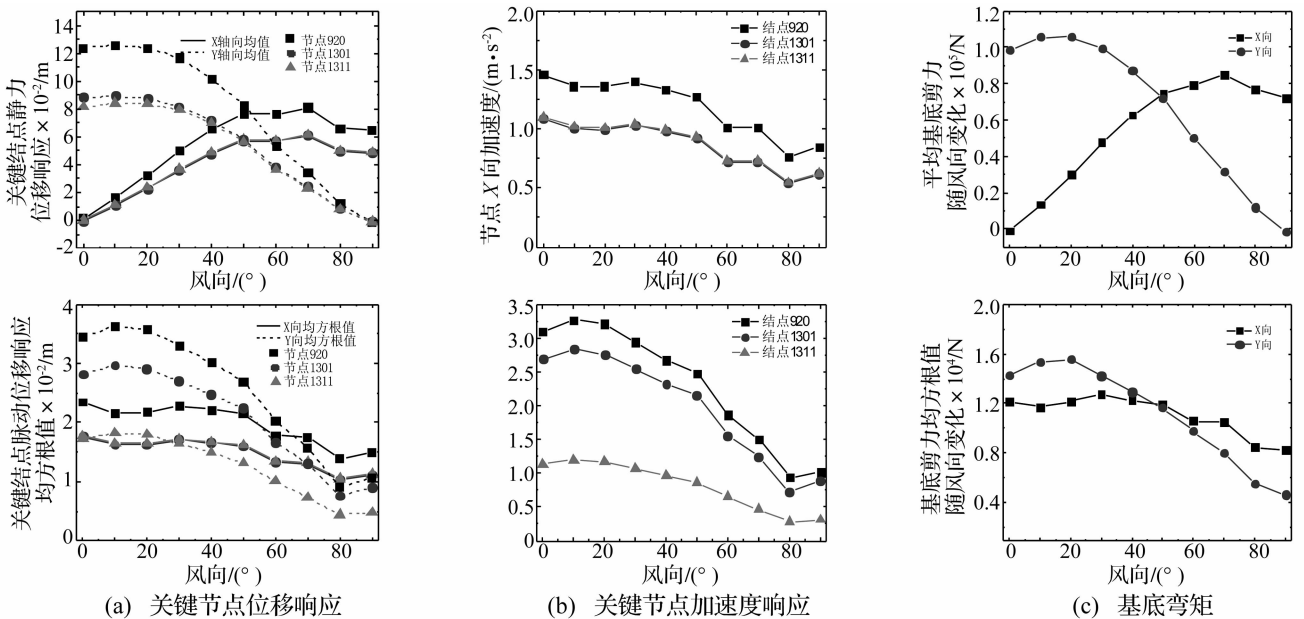


图5 位移响应和基底弯矩值随风向变化曲线

Fig 5 The variations of displacements and base moments with wind angles

图 5(c) 为输电塔结构 X、Y 向基底弯矩随风向变化曲线。平均基底弯矩随风向变化与图 5(a) 中平均位移响应变化趋势十分相近, 最大值出现的风向也相同。结构脉动基底弯矩随风向单调减小, X、Y 向脉动基底弯矩值较为接近。0°(90°) 风向时, Y 轴(X 轴) 为结构的顺风向, X 轴(Y 轴) 为结构的横风向。可以看出, 横风向节点平均位移响应和平均基底弯矩值接近于零, 但顺、横风向脉动位移响应和脉动基底弯矩值都较大, 横风向脉动响应甚至会大于顺风向。例如: 0° 风向时, 1311 点顺、横风向脉动位移和加速度响应非常接近, 横风向响应要大于顺风向。

3.2 响应谱特性分析

图 6(a) 给出了关键点 0°、90° 风向位移响应谱。可以看出, X 向(90° 风向为顺风向, 0° 风向为横风向) 动力响应基本上都由 1 阶 X 向侧弯振型贡献。Y 向响应主要由二阶 Y 向侧弯振型和三阶扭转振型贡献。这主要是由于输电线路电器设计的需要, 输电塔 Y 向较 X 向要宽(见图 1) 很多造成的。节点 1311 位于横担中部, 三阶扭转振型对其位移响应基本无贡献。各关键点加速度响应谱曲线与位移响应谱相似, 篇幅所限, 这里未给出。

图 6(b) 给出了 0°、90° 风向输电塔结构顺、横风向基底弯矩功率谱图。图中可见, 各方向一阶整体振型在结构基底弯矩响应中起主导作用。90° 风向输电塔

结构迎风面面积要小于 0° 风向, 因而顺、横风向基底弯矩谱能量明显要小于 0° 风向。

3.3 输电塔构件轴力

由公式(5), 根据杆件两端位移响应, 可以得到杆件的轴向应力。表 2 为输电塔在不同风向下杆件平均轴向应力最大值和峰值。 $\bar{\sigma}_{AFmax}$ 为杆件平均轴向应力最大值, σ_{AF} 为脉动轴向应力的均方根值, σ_{peak} 为轴向应力的峰值($\sigma_{peak} = \bar{\sigma}_{AF} \pm g \tilde{\sigma}_{AF}, g = 2.5$)。

对典型 500 kV 单回路酒杯型角钢塔, 35 m/s 风速下, 采用 Q345 和 Q235 钢(其屈服强度分别为 3.45E8 N/m² 和 2.35E8 N/m²) 是能满足杆件及各零部件承载力要求的。

3.4 阵风响应因子

定义峰值响应与平均响应之比为“阵风响应因子”, 以此来表征结构对脉动风荷载的放大作用, 即:

$$G(x, y, z) = R_{peak}(x, y, z) / \bar{R}(x, y, z) \quad (5)$$

式中, \bar{R} 表示平均响应, $R_{peak}(x, y, z)$ 表示峰值响应, $R_{peak}(x, y, z) = \bar{R} \pm g \sigma_r$, g 为峰值因子, 取 $g = 2.5$ (按极值的概率分布来确定峰值因子, 当峰值因子取 2.5 时, 保证率为 99.38%)。 σ_r 为计算得到的响应均方根, 式中的“±”是为了 R_{peak} 取得最大值。公式(5)又可表示为:

$$G = 1 + g \sigma_r / \bar{R} \quad (6)$$

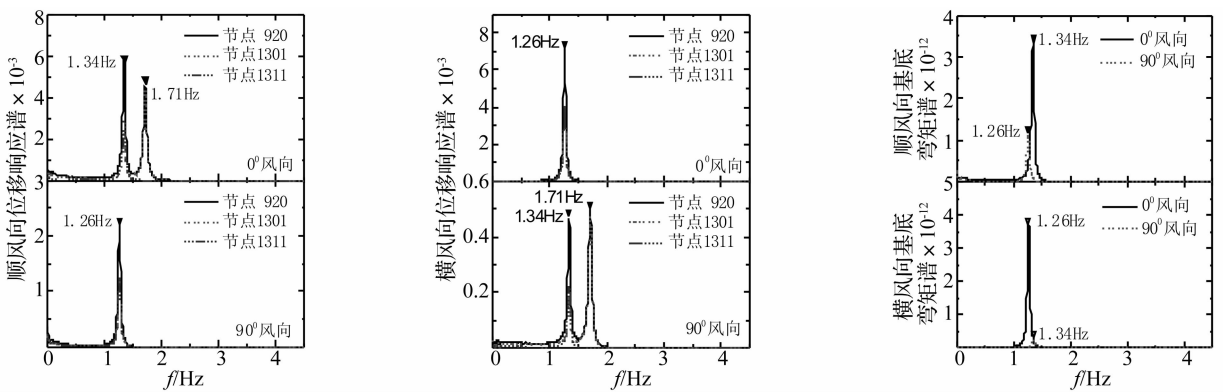


图 6 响应功率谱密度

Fig. 6 The response power spectral density

表 2 不同风向下杆件轴力 (N/m²)

Tab. 2 Axial forces under different wind angles

风向	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
$\bar{\sigma}_{max}$	-6.7E7	-7.2E7	-7.9E7	-8.4E7	-8.5E7	-8.2E7	-7.1E7	-6.5E7	-5.1E7	-4.5E7
σ_{peak}	-7.1E7	-8.9E7	-9.6E7	-1E8	-1E8	-9.7E7	-8.3E7	-7.6E7	-5.8E7	-5.5E7

根据响应的不同, 阵风响应因子可分为位移阵风响应因子 G_y 和基底弯矩阵风响应因子 G_M 。图 7 给出了输电塔阵关键点风位移响应因子 G_y 、基底弯矩响应

因子 G_M 随风向变化的情况。总的来说, G_y 和 G_M 随风向变化趋势十分相近, 其中, X 向的响应因子随风向单调减小, Y 向单调增加。关键点顺风向位移阵风响应因

子最大值不超过 1.8, 弯矩阵风响应因子稍低, 在 1.5 附近。

0°(90°)风向时, Y 轴(X 轴)为结构的顺风向, 当风向大于(小于)45°时, Y 轴(X 轴)趋向于横风向, 此时, 顺风向阵风响应因子已无实际意义, 图 7 中将其略去。

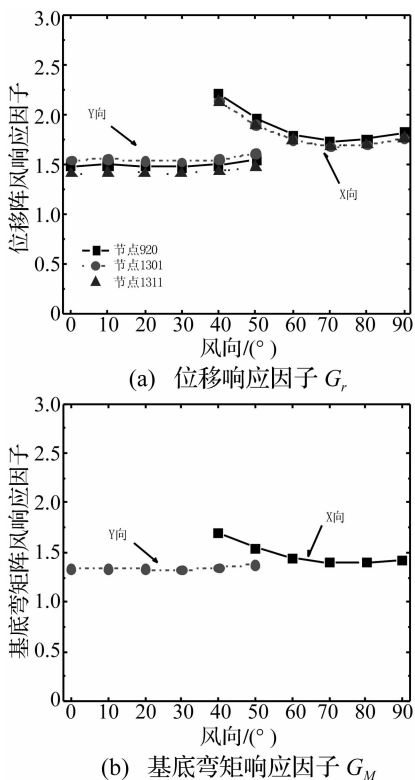


图 7 阵风响应因子随风向变化

Fig. 7 The variation of gust response factor with wind angles

表 3 根据规范计算得到的横担处的阵风响应因子

Tab. 3 Gust response factor calculated by codes

规范	阵风响应因子值
IEC60826	3.26
BS EN 1993-3-1	2.17
ASCE No. 74	0.98
DL/T 5154-2002	1.75

表 3 给出了在相同设计风速下, 根据中国架空送电线路杆塔设计规程 (DL/T 5154-2002^[20])、国际电工委员会架空输电线设计规范 (IEC60826 (2003)^[21])、欧洲 (英国) 的钢塔和桅杆设计规范 (BS EN 1993-3-1:2006)^[22] 以及 ASCE 输电塔线系统设计手册 (No. 74)^[23] 计算得到的横担处的顺风向阵风响应因子。

由于 ASCE No. 74 基本风速的风时距为 3s, 基本风速值明显大于 10min 风时距风速, 给出的阵风响应因子值最小。IEC60826 的阵风响应因子除反映脉动风对结构的作用, 还反映了高度对风力的影响^[23], 其响应因子值要明显大于欧洲 (英国) 规范和中国规范。中国规

范 DL/T 5154-2002 给出的阵风响应因子值与本文计算结果较为接近。

4 结论

本文基于高频天平测力试验的结果, 采用随机振动 CQC 方法, 对典型 500kV 单回路酒杯型输电塔进行了风振响应计算, 得到主要结论如下:

输电塔结构横风向平均基底弯矩和平均位移响应值接近于零, 但顺、横风向脉动位移响应和脉动基底弯矩值都较大, 某些情况下, 横风向脉动响应甚至大于顺风向响应。

结构基底弯矩和位移响应中共振能量占优, 各个方向一阶 (前三阶) 振型在响应中起主导作用。其中, X 向动力位移响应基本上都由 1 阶 X 向侧弯振型贡献, Y 向主要由二阶 Y 向侧弯振型和三阶扭转振型贡献。

各关键点位移阵风响应因子和基底弯矩响应因子随风向变化趋势相近, 顺风向位移响应阵风因子最大值不超过 1.8, 而基底弯矩阵风响应因子稍低, 在 1.5 附近。

参考文献

- [1] Momomura Y, Marukawa H, Okamura T, et al. Full-scale measurements of wind-induced vibration of a transmission line system in a mountainous area [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997 (72): 241-252.
- [2] Okamura T, Ohkuma T, Hongo E, et al. Wind response analysis of a transmission tower in a mountainous area [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, (91): 53-63.
- [3] 李杰, 阎启, 谢强, 等. 台风“韦帕”风场实测及风致输电塔振动响应 [J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(2): 1-8.
LI Jie, YAN Qi, XIE Qiang, et al. Wind field measurements and wind-induced vibration responses of transmission tower during typhoon Wipha [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(2): 1-8.
- [4] Huang M F, Lou W, Yang L, et al. Experimental and computational simulation for wind effects on the Zhoushan transmission towers [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2010, 8(8): 781-799.
- [5] Lin W E, Savory E, McIntyre R P, et al. The response of an overhead electrical power transmission line to two types of wind forcing [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012, 100(1): 58-69.
- [6] 谢强, 严承涌. 1000 kV 特高压交流同塔双回输电塔线耦联体系风洞试验 [J]. 高电压技术, 2010, 36(4): 900-906.
XIE Qiang, YAN Cheng-yong. Wind tunnel test on 1000 kV UHV AC double circuit transmission tower-conductor coupling system [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(4): 900-906.

