

典型窄基输电塔风致响应气弹模型风洞试验*

张庆华¹, 马文勇², 赵 龙^{2,3}

(1. 华北水利水电大学土木与交通学院 郑州, 450000) (2. 石家庄铁道大学风工程研究中心 石家庄, 050043)

(3. 中铁六院集团中铁隧道勘测设计院有限公司 天津, 300133)

摘要 首先,采用离散刚度法,设计制作了典型窄基输电塔气动弹性模型;然后,通过大气边界层风洞试验,对窄基输电塔不同高度及风向下的位移、加速度响应特性进行了测试分析;最后,基于风洞试验结果计算了窄基输电塔风振系数并与规范结果进行了比较。结果表明,窄基输电塔位移均值响应主要为顺风向;顺、横风向脉动位移、加速度响应值都较大,随风向变化不明显,呈上下波动趋势;高度变化对脉动位移和加速度的响应影响略有不同。此外,根据中国荷载规范给出的输电塔横担处的风振系数值大于本次试验结果。

关键词 输电塔; 气动弹性模型; 风洞试验; 风致响应; 风振系数

中图分类号 TM753; TH113.1; TU317+.1

引 言

输电杆塔作为输电塔线体系的支撑结构,其安全性将直接影响整个输电系统的可靠性及稳定性。近年来,强风引起输电塔破坏时有发生,除了恶劣天气本身复杂多变之外,作用在输电塔上的风荷载估算方法不成熟也是重要的因素之一。

风荷载在格构式结构上的分布规律复杂,同时输电塔又不同于一般的格构式结构,其顶部质量大、外形复杂,风荷载作用下的响应也不同于一般的结构。输电体系风致响应研究主要包括两类方法:第一类方法是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^[1-4]或基于准定常理论利用数值方法人工模拟风荷载^[5-6]再将其作用在结构有限元模型上进行顺风向风振计算。天平测力试验能够准确获得作用于格构式结构上的风荷载,但计算响应时,无法考虑气动弹性效应。数值法模拟风荷载虽然在研究费用、时间等方面均具有优势,但仅适用于顺风向响应分析,而横风向和扭转向由于激励机制不同,尚无准确可靠的风荷载作用模型。第二类方法是直接测量响应的方法,即通过现场实测^[7-9]或气动弹性模型风洞试验^[10-13]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。目前,气动弹性模型风洞试验已成为直接获得格构式输电塔线体系风致动力响应最直接的方法,理论分析和计算所得的结果都要借助其来验证结果的近似程度和可靠程度。

1 气弹模型风洞试验

本研究选取典型的 220 kV 双回路紧凑型窄基输电塔为研究对象,采用气弹模型风洞试验方法,对输电塔的风致位移、加速度响应特性进行了详细分析,并根据响应结果对窄基塔风振系数进行了分析计算,通过与现行的结构荷载规范计算结果进行比较,为准确获得窄基输电塔风荷载提供试验参考及理论依据。

试验对象塔 48 m 呼高,根开 4 m,由于该塔根开明显较小,是典型窄基输电塔,其结构简图参见图 1,图中为结构原型尺寸。

目前,输电塔气弹模型设计方法有 3 种:集中刚度法^[14]、刚性节段和“V(U)”型弹簧片法^[15-16]及离散刚度法^[10-11]。其中,集中刚度法模型制作简单,无法考虑模型的扭转效应,其轻质外衣会增加结构的

* NSFC-河南人才培养联合基金资助项目(U1504502)
收稿日期:2016-06-22;修回日期:2016-09-27

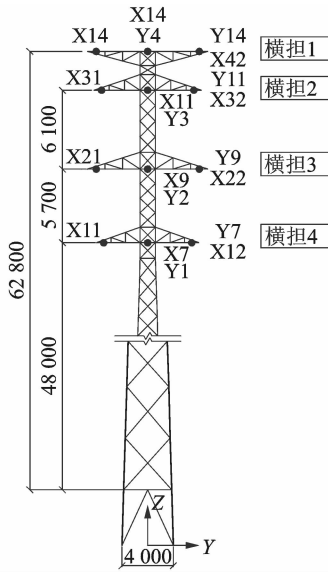


图 1 窄基输电塔结构简图及试验传感器布置(单位: mm)
Fig. 1 Prototype of transmission tower and sensors location of test (unit: mm)

型制作选用铝模拟刚度,所有杆件均切割成矩形截面,采用铝箔制作成角钢形外衣,黏贴在模型相应杆件上,模拟杆件外衣。节点板、螺栓等辅件质量通过增加铅丝配重考虑。

考虑输电塔原型结构高度、风洞断面尺寸、边界层流场的高度,同时考虑杆件加工的可行性,本气弹模型几何缩尺比取 1/40,风速相似系数取 1.3。其他相似参数由量纲分析得出,参见表 1。

表 1 相似系数

Tab. 1 Similarity coefficients of model

相似参数名称	数值	相似参数名称	数值
几何相似系数 C_L	1/40	质量相似系数 C_m	1.9/40 ³
面积相似系数 C_A	1/1600	拉伸刚度相似系数 C_{EA}	1/2 704
空气密度相似系数 C_ρ	1	频率相似系数 C_f	30.77
结构密度相似系数 C_ρ	1.9	加速度相似系数 C_a	23.67
风速相似系数 C_v	1/1.3	位移相似系数 C_y	1/40

1.2 试验设备及测点布置

本次风洞试验在石家庄铁道大学风工程研究中心完成,气弹模型风致响应测试在 STU-1 风洞低速试验段进行。该研究中心的风洞为串联回/直流大型多功能边界层风洞。风洞的低速试验段高 3.0 m,宽 4.4 m,长 24 m,风速连续可调,最高试验风速能达到 30 m/s。低速试验段流场达到优秀边界层风洞流场标准。低速试验段的圆形工作平台直径 1.5 m,由计算机控制自动转动角度,360°风向角连续可调。本次试验测试设备主要有 Cobra 三维风速探头、加速度传感器、激光位移计、DH-5922 动态信号测试分析系统。

考虑到输电塔与一般格构式结构最大的不同在于塔头具有较大的外伸质量和复杂的外形,且由于其位于塔的顶端,对风荷载更为敏感。因而本次试验重点关注塔头特别是横担处的位移及加速度响应特性。试验时在每个横担处分别布置 3 个加速度传感器和 2 个位移传感器,传感器方向分别沿 X 向和 Y 向布置。传感器的位置及编号统计见表 2。为了减小传感器导线对试验模型气动力的影响,传感器的导线紧贴支杆传递。详细的传感器布置点参见图 1。

表 2 传感器编号统计表

Tab. 2 The sensor number of wind tunnel test

传感器位置	加速度传感器编号	位移传感器编号
第 1 横担	X41, X42, Y4	X14, Y14
第 2 横担	X31, X32, Y3	X11, Y11
第 3 横担	X21, X22, Y2	X9, Y9
第 4 横担	X11, X12, Y1	X7, Y7

附加刚度,存在气动力传递失真现象等;刚性节段和“V(U)”型弹簧片法虽然能够较好地模拟出模型两个方向的一阶自振频率及振型,但是无法考虑气弹模型的扭转效应;离散刚度法综合考虑了结构杆件的刚度相似和几何相似,虽然模型杆件加工难度大且杆件材料的选择比较困难,但能够做到模型体型与原结构体型一致,准确模拟原结构气动特性及动力特性,同时可测试塔身扭转效应。本次试验即选择离散刚度法完成。

1.1 模型的设计与制作

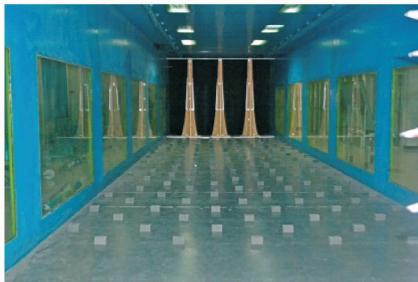
相似理论对如何进行模型试验以获得正确的结果,提供了理论依据。输电塔模型设计除了满足几何相似、运动相似、动力相似及质量相似外,还要考虑模型与原型无量纲的相似参数是相同的。实际上,在试验过程中做到相似参数的绝对相似是不可能的。首先,由于本试验中输电塔原型大部分构件为角钢,是一种典型的钝体结构,其绕流场分离点不受雷诺数差异的影响,因而可以放松对雷诺数相似性的要求;其次,本试验主要研究输电塔水平向振动, $P-\Delta$ 效应不明显,因此放松对弗劳德数的模拟。文中气弹模型的制作将重点考虑柯西数、斯托罗哈数、阻尼比等参数的相似性。

考虑材料所限,很难直接满足弹性参数相似,因此,模型制作时转为模拟杆件拉压刚度 EA 相似,保证模型杆件实际刚度值与期望值误差尽可能小。模

1.3 风场的模拟及动力标定

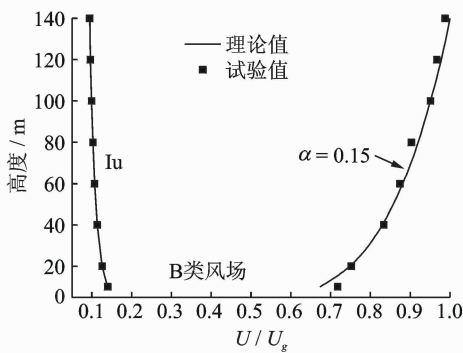
依据我国《建筑结构荷载规范》^[17],本次试验在输电塔常见的B类风场中进行。其中,平均风剖面满足指数律,地貌指数 α 取0.15。湍流沿高度的分布公式为 $I_z(z) = I_{10}(z/10)^{-\alpha}$, I_{10} 为10 m高度处名义湍流度,对应B类地面粗糙度,取0.14。

试验风场采用被动模拟技术,被动模拟装置包括粗糙元和尖塔阵。通过在风洞低速试验段入口处布置尖塔,在低速试验段布置粗糙元模块模拟大气边界层B类风场。风场布置如图2(a)所示。图2(b)给出了模拟得到的B类风场的速度剖面和湍流度剖面。图中可以看到,模拟的大气边界层流场符合我国结构荷载规范的要求,可以进行气弹模型风洞试验。



(a) B类风场模拟

(a) The simulation of terrain category B



(b) 平均风剖面 and 湍流度剖面

(b) Mean velocity and turbulence intensity profile

图2 试验模拟风场

Fig. 2 The simulation of wind field

为了验证输电塔模型制作的准确性,需要对输电塔模型进行动力标定试验,采用锤击法得到模型自由振动的衰减信号,通过信号分析可以得出模型自振频率(表3),可以看出,输电线塔一阶模态两个方向的自振频率同模型模态分析值吻合,频率误差最大不超过3%。由于模型加工时对称部分分布质量存在差异,造成一阶扭转的频率误差略大。总的来说,气弹模型能够与期望值较好的吻合。

表3 模型与原型自振频率比较

Tab. 3 The comparison of natural frequencies

模态	原型 频率/Hz	模型 频率/Hz	实测 频率/Hz	误差 [*] / %	振型
1	0.866	26.65	26.00	-2.44	一阶横向
2	0.868	26.71	26.62	-0.34	一阶纵向

* 误差=(实测频率-模型频率)/模型频率 $\times 100\%$

1.4 试验工况

试验采样频率为500 Hz,采样时间为32 s。考虑结构的对称性,试验风向角分别为 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$ 及 90° ,共11个风向角。对每种工况分别记录模型不同高度处的位移响应和加速度响应信号。图3给出了模型在风场中的安装图及模型坐标系。

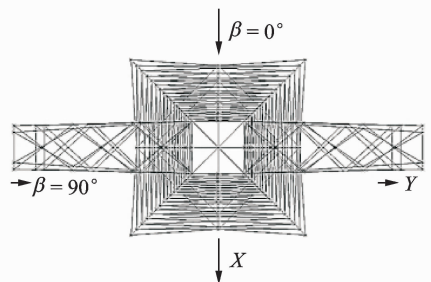


图3 模型安装图及坐标系

Fig. 3 The model installation and coordinate system

2 试验结果分析

试验采集了不同风向角下窄基输电塔气弹模型的各个测点的位移、加速度时程,从而根据统计方法可以获得输电塔不同高度关键节点处位移响应的均值、均方根值,加速度响应的均方根值。

2.1 位移响应

图4(a),(b)给出了输电塔不同高度各测点位移响应的均值和根方差值随风向角的变化曲线。图中可见,平均位移响应呈现出规律性变化,其中,X向先增大后减小,在 30° 风向附近达到最大值,Y向

在 70°风向附近达到极值。X,Y 向位移响应均值随测点高度的增加而增大。随测点高度的变化,X,Y 向的位移均方根值相差不大,基本在 1.5~4 mm 附近上下波动。0°风向时,X 为结构的顺风向,Y 为横风向,可以看出,输电塔位移均值响应主要为顺风向,横风向值较小,基本可以忽略。而顺、横风向脉动位移响应值都较大。

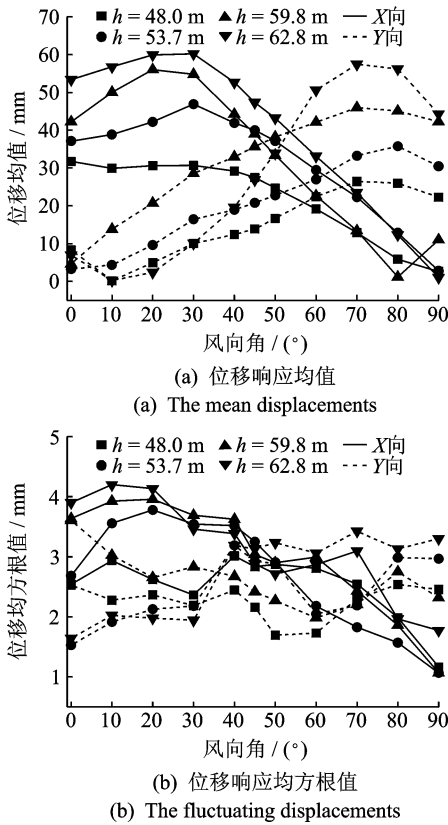


图 4 风致位移响应随风向变化

Fig. 4 The variations of displacements with wind angles

2.2 加速度响应

图 5 给出了不同高度各测点加速度响应根方差值随风向变化曲线。可以看出,各测点 X,Y 向的加速度响应沿塔身高度呈现增大趋势,0°风向角时塔体受风面积大,各杆件的尾流激荡对塔体的作用显著,因而加速度响应值最大。考虑到输电塔 X,Y 向的自振频率大致相等,在湍流的激励下将同时激发起输电塔 X,Y 向的振动,因而其 X,Y 向加速度响应随风向变化不大,呈上下波动趋势。

已知 0°(90°)风向时,X(Y)为结构的顺风向,Y(X)为横风向,图中可见,输电塔结构顺、横风向加速度响应属于同一个量级,甚至在 90°风向下,横风向加速度要略大于顺风向。

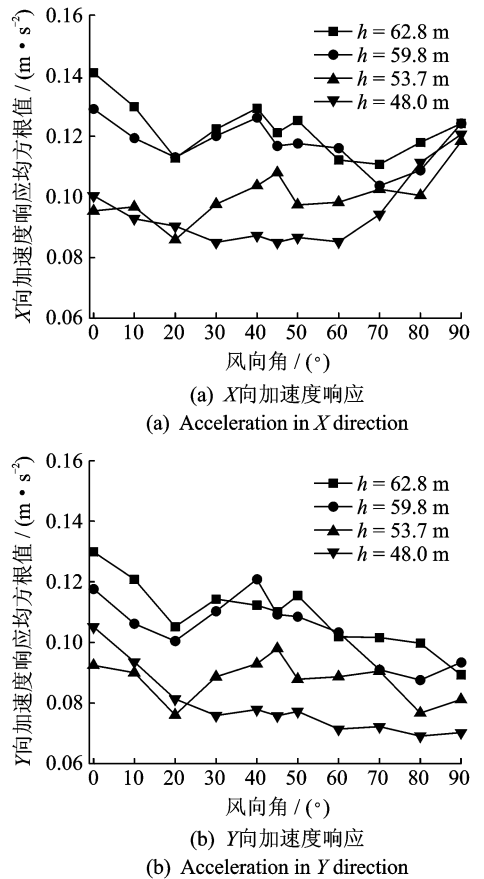


图 5 加速度响应随风向变化

Fig. 5 The variations of accelerations with wind angles

2.3 风振系数分析

我国《建筑结构荷载规范》^[17]和输电塔设计规范《110~750 kV 架空输电线路设计规范》^[18]中,用杆塔风荷载调整系数来考虑脉动风对格构式塔架的风振放大作用,调整系数的取值通常仅考虑体型和质量沿高度均匀分布的格构式结构。输电塔横担有较大的外伸臂,挡风面积和质量存在明显的突变,因此,对横担结构直接应用结构荷载规范必然会造成较大的偏差。通过风洞试验响应测试结果,可以较为准确地估计横担的风振系数。

结构 z 高度处总的顺风向风荷载 P 由静力风荷载 P_c和动力风荷载 P_d两部分组成。顺风向风振系数 β_z为总的风荷载与静力风荷载的比值。其表达式为

$$\beta_z = 1 + P_d/P_c \tag{1}$$

$$P_c = \mu_s(z)\mu_z(z)\omega_0 A(z) \tag{2}$$

其中:μ_s(z)为 z 高度处体型系数;μ_z(z)为 z 高度处风压高度变化系数;ω₀为基本风压;A(z)为 z 高度处杆件投影面积。

动力风荷载 P_d可分别根据位移响应和加速度

响应测试结果计算得到,即

$$P_d = gM(z)\omega_1^2\sigma_u(z) \quad (3)$$

$$P_d = gM(z)\sigma_a(z) \quad (4)$$

其中: g 为峰值因子,取3.5; $M(z)$ 为 z 高度处的集中质量; ω_1 为结构顺风向一阶固有频率,即,根据位移响应计算动力风荷载时将仅考虑结构顺风向一阶频率; $\sigma_u(z)$ 为顺风向位移响应均方根值; $\sigma_a(z)$ 为顺风向加速度响应的均方根值。

表4给出了 $0, 90^\circ$ 风向下不同横担位置横担风振系数。其中, β_{uz} 为基于脉动位移响应(式(3))计算得到的风振系数; β_{az} 为基于加速度响应(式(4))计算得到的风振系数。高度加权均值计算: $\beta = \sum \beta_i h_i / \sum h_i$;考虑横担质量突变明显, $\beta_z^{[17]}$ 计算时,背景分量因子 β_z 不考虑修正系数 θ_B 和 θ_v 。

表4 横担风振系数

Tab. 4 Wind-induced vibration coefficients of crossarms

横担位置	β_{uz}		β_{az}		$\beta_z^{[17]}$ 规范结果
	0°	90°	0°	90°	
第1横担	1.309	1.560	1.377	1.513	1.842
第2横担	1.369	1.504	1.443	1.687	1.800
第3横担	1.277	1.579	1.333	1.535	1.731
第4横担	1.345	1.461	1.460	1.446	1.659
高度加权均值	1.325	1.528	1.402	1.550	1.765

输电塔横担处的质量、迎风面积突变明显,且由于横担位于塔的顶部,不同高度处的风振系数值存在较大的离散性(见表4),此时已很难用统一的风振系数值来表示整个结构的风振响应特征^[9]。

由于式(3)仅考虑了一阶共振的影响,由表4可以看到,同一风向下,基于加速度响应的风振系数 β_{az} 大于基于脉动位移响应的风振系数 β_{uz} ,因而可以说,对所研究的窄基输电塔而言,高阶模态对脉动位移响应有较大的影响,仅考虑第1阶模态可能导致计算得到的风振系数偏小。

输电塔风振系数沿高度加权均值是衡量输电塔结构设计风振力大小的重要指标,可以看到, 90° 风向下的风振系数明显大于 0° 风向计算结果。

此外,表4还给出了根据《建筑结构荷载规范》GB50009^[15]计算得到横担不同节段风振系数值,可以看到,无论是横担节段结果还是加权均值,本次气弹试验结果明显小于规范值。

3 结束语

输电塔位移均值响应主要为顺风向,随高度的

增加而明显增大,横风向值较小,基本可以忽略。顺、横风向脉动位移响应值都较大,随高度及风向变化不明显,呈上下波动。

输电塔加速度响应沿塔身高度呈现增大趋势,随风向改变加速度响应值变化不大。需要注意的是,在某些特定风向下(90°),输电塔横风向加速度响应值甚至略大于顺风向。

考虑到输电塔横担处的质量、迎风面积突变明显,不同高度处的风振系数值存在较大的离散性。通过对比风振系数沿高度加权均值可以看到, 90° 风向下的风振系数明显大于 0° 风向结果。对所研究的窄基输电塔而言,高阶模态对脉动位移响应有较大的影响,仅考虑第一阶模态可能导致计算得到的风振系数偏小。此外,根据中国建筑结构荷载规范给出的输电塔横担处的风振系数值,无论是节段结果还是高度加权值都明显大于试验结果。

参 考 文 献

- [1] Carril Jr C F, Isyumov N, Brasil R M L R F. Experimental study of the wind forces on rectangular latticed communication towers with antennas [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(8): 1007-1022.
- [2] Yang Fengli, Yang Jingbo, Niu Huawei, et al. Design wind loads for tubular-angle steel cross-arms of transmission towers under skewed wind loading [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 140: 10-18.
- [3] Yang Fengli, Dang Huixue, Niu Huawei, et al. Wind tunnel tests on wind loads acting on an angled steel triangular transmission tower [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 156: 93-103.
- [4] 张庆华, 顾明, 黄鹏. 格构式塔架风力特性试验研究 [J]. 振动与冲击, 2009, 28(2): 1-4.
Zhang Qinghua, Gu Ming, Huang Peng. Experimental study of wind force on latticed tower [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(2): 1-4. (in Chinese)
- [5] Loredou-Souza A M, Davenport A G. The influence of the design methodology in the response of transmission towers to wind loading [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(8): 995-1005.
- [6] 鞠彦忠, 门丽丽, 衣亚伟. ACCC塔线体系在风荷载

- 作用下的动力响应 [J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(4): 749-752.
- Ju Yanzhong, Men Lili, Yi Yawei. Aluminum conductor composite core wire transmission line towers and lines system in the dynamic response under wind loads [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(4): 749-752. (in Chinese)
- [7] Wang Ganjun, Chen Bo, Wu Yijiang, et al. Field investigation and assessment on base conditions of a transmission tower in coastal mound areas [J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 678: 716-719.
- [8] 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(1): 53-63.
- [9] Li Bo, Yang Qingshan, Yang Jingbo. Wind characteristics near ground in south-eastern coast area of China based on field measurement [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2016, 7(S1): 57-69.
- [10] 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): 1482-1486.
- Guo Yong, Sun Bingnan, Ye Yin, et al. Wind tunnel test on aeroelastic model of long span transmission line system [J]. Journal of Zhejiang Universtiy: Engineering Science, 2007, 41(9): 1482-1486. (in Chinese)
- [11] 邓洪洲, 司瑞娟, 胡晓依, 等. 特高压输电塔气弹模型风洞试验研究 [J]. 同济大学学报:自然科学版, 2010, 38(5): 673-678.
- Deng Hongzhou, Si Ruijuan, Hu Xiaoyi, et al. Wind tunnel test on aeroelastic model of UHV latticed transmission tower [J]. Journal of Tongji Universtiy: Natural Science, 2010, 38(5): 673-678. (in Chinese)
- [12] 邹良浩, 梁枢果, 王述良. 基于气弹模型风洞试验的输电塔气动阻尼研究 [J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(2): 268-275.
- Zou Lianghao, Liang Shuguo, Wang Shuliang. Analysis of aero-dynamic damping of transmission tower based on aero-elastic model wind tunnel [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(2): 268-275. (in Chinese)
- [13] Hua Xugang, Chen Zhengqing, Yang Jingbo, et al. Turbulence integral scale corrections to experimental results of aeroelastic models with large geometric scales: application to gust loading factor of a transmission line tower [J]. Advances in Structural Engineering, 2014, 17(8): 1189-1197.
- [14] 王世村, 孙炳楠, 楼文娟, 等. 单杆输电塔气弹模型风洞试验研究和理论分析 [J]. 浙江大学学报:工学版, 2005, 39(1): 87-91.
- Wang Shicun, Sun Bingnan, Lou Wenjuan et al. Wind tunnel test and theoretical analysis on aeroelastic model of single-rod transmission tower [J]. Journal of Zhejiang Universtiy: Engineering Science, 2005, 39(1): 87-91. (in Chinese)
- [15] 梁政平, 李正良. 特高压输电塔线体系的气动弹性模型设计 [J]. 重庆大学学报, 2009, 32(2): 131-136.
- Liang Zhengping, Li Zhengliang. An aeroelastic model design of ultra-high voltage power transmission systems [J]. Journal of Chongqing Universtiy, 2009, 32(2): 131-136. (in Chinese)
- [16] 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): 1-5.
- 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): 1-5. (in Chinese)
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50009-2012 建筑结构荷载规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [18] 中国电力企业联合会. GB50545-2010 110kV~750kV 架空输电线路设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.



第一作者简介:张庆华,男,1977年8月生,博士、讲师。主要研究方向为格构式结构抗风。曾发表《典型格构式结构风荷载及风致响应规范比较》(《振动与冲击》2015年第34卷第6期)等论文。

E-mail: zqh@ncwu.edu.cn