

台风风场下的 1 000 kV 输电塔风洞试验与风振响应分析

李 涛^{1,2}, 王 谦³, 吴登国⁴, 苏 杰^{1,2}, 程 远^{1,2}, 楼文娟⁴

(1. 南瑞集团有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉 430074;
3. 国网浙江省电力有限公司温州供电公司, 浙江 温州 325000; 4. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘 要:以东南沿海地区的特高压角钢塔为对象, 针对台风风场在极值风速与风荷载分布相对常规风的差异性, 进行风洞试验与风振响应分析。首先, 基于台风实测数据, 对风剖面指数进行拟合, 并对 A 类地貌下的湍流强度设定进行修正以更符合实际台风风场; 然后, 针对 1 000 kV 输电塔采用高频天平测力风洞试验, 获得各项平均风力系数随风向角的变化以及全塔、塔头、塔身体型系数, 并基于谐波叠加法模拟输电线路各点脉动风速, 获得不同工况下的等效静风荷载及风振系数; 最后, 进行特高压杆塔在台风风场下的结构阻尼、结构频率、塔顶加速度、最大基底荷载等参数的敏感性分析。结果表明: 加速度响应对阻尼较为敏感, 位移响应和加速度响应对自振频率较为敏感。

关 键 词: 1 000 kV 输电塔; 台风风场; 高频天平测力; 风洞试验; 风振响应计算

DOI: 10. 19781/j. issn. 1673-9140. 2021. 02. 009 中图分类号: TM753 文章编号: 1673-9140(2021)02-0076-07

Wind tunnel test and wind-induced response analysis of 1 000 kV transmission line under typhoon wind fields

LI Tao^{1,2}, WANG Qian³, WU Dengguo⁴, SU Jie^{1,2}, CHENG Yuan^{1,2}, LOU Wenjuan⁴

(1. NARI Group Operation, Nanjing 211106, China; 2. Wuhan NARI Limited Company of State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 3. Wenzhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Wenzhou 325000, China; 4. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Aiming at the differences in maximum wind speed and wind pressure distribution between typhoon wind field and conventional wind, this paper conducts wind tunnel test and wind-induced response analysis of 1 000 kV transmission tower in southeastern coastal areas. Based on the real data of typhoon, the wind profile index is fitted and the turbulence intensity is modified in landform category A for more fulfilling the real wind field. Through the high-frequency force balance test on 1 000 kV transmission tower, the average wind coefficients vary with different wind direction and the shape coefficients of whole tower, tower head and tower body is acquired. By using the harmonic wave superposition method to simulate turbulent wind velocity of all nodes in tower, equivalent static wind loads and wind vibration coefficients in varies operation conditions are obtained. Then, the sensitivity analysis of the structure damping, structure frequency, tower acceleration and maximum base load of the 1 000 kV tower in typhoon wind field is

收稿日期: 2018-03-06; 修回日期: 2018-05-09

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5211WZ16002S)

通信作者: 李 涛(1987-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事输电通道环境监测技术研究; E-mail: litao3@sgepri. sgcc. com. cn

performed. Results indicate that acceleration response is sensitive to damping. Displacement response and acceleration response are sensitive to natural frequency.

Key words: 1 000 kV transmission tower; typhoon wind field; high-frequency force balance test (HFFB); wind tunnel test; wind-induced responses calculation

输电塔是电网系统的重要设施,作为支撑输电线路的骨骼,输电铁塔在灾害性天气下有可能发生损坏甚至倒塌事故。造成输电塔损坏倒塔事故原因不尽相同,但主要因素在于荷载工况与大小。风荷载是输电塔线体系的主要外荷载,因此,风荷载导致的输电线路结构体系的严重损伤甚至破坏也是屡见不鲜。2004 年“云娜”台风在浙江登陆,造成 89 座变电所全所失电^[1];2013 年强台风“天兔”登陆广州,造成 220 kV 线路铁塔倒塌 2 基,110 kV 线路铁塔倒塌 4 基^[2];2016 年台风“莫兰蒂”登陆福建,对厦门电网造成严重破坏^[3]。针对沿海地貌下的输电线路,全面了解和掌握输电塔在台风风场各荷载作用下的静动力特性,研究塔线耦合体系的风振响应特征,对于提高沿海地区电网的安全性具有重要的理论和工程意义。

目前,针对 1 000 kV 输电单塔或塔线体系的风致响应试验研究已有不少,文献[4]对 1 000 kV 汉江大跨越特高压输电塔线体系进行了气弹模型风洞试验,分析了单塔及塔线体系在均匀流及紊流下的风振响应;文献[5]设计制作了双回路 8 分裂导线的完全气弹模型,得到了不同风向角和风速情况下导线的动应变;文献[6]分析了 1 000 kV 单塔和塔一线体系在紊流风场中的横风向风振响应;文献[7]对皖电东送 1 000 kV 特高压送电线路直线钢管塔进行风洞试验,总结出了导线、绝缘子和输电塔风致振动规律。

台风风场特性不同于良态风,其往往对输电线路更为不利。目前,对于强风作用下的 1 000 kV 输电塔的各类风洞试验与风振响应分析,其研究参数多取用于荷载规范,未能充分考虑到台风风场下极值风速与风荷载分布相对常规风的较大差异。该文基于台风卡努实测数据,对风剖面指数进行拟合,并对 A 类地貌下的湍流强度设定进行修正,以更符合实际台风风场。在该风场下进行高频天平测力风洞试验与风振响应分析,获得角钢塔的体型系数及等效静风荷载,进行加速度响应与位移响应的参数敏

感性分析,为现行的输电线路设计规程和特高压输电塔的设计提供一定参考。

1 输电铁塔高频天平风洞试验设计

1.1 试验模型设计

由于角钢塔相对于钢管塔表现有体型较差、迎风面大、回转半径存在各向异性等特点,总体对风的敏感度更高^[8-10],故该文选取某沿海地区 1 000 kV 线路格构式角钢塔作为分析对象。对象塔高为 91.6 m,横担处宽为 47.4 m。鉴于风洞试验室的尺寸限制以及模型缩尺效应的影响,几何缩尺比选为 1:50。角钢的宽度和厚度按比例缩小后很小,难以完全按比例制作,因此,该试验模型只保证角钢宽度的几何相似。为了增加模型刚度,适当增大角钢模型的厚度,统一采用 0.35 mm 厚不锈钢。在进行输电线路塔风荷载 CFD 模拟时,参考文献[11]采用三角形断面代替角钢断面以简化计算,结果差别在 7% 以内,因此角钢厚度对试验结果的影响有限。塔头的部分构件按比例缩小后角钢边长仅 1~2 mm,此类小截面构件采用碳纤维材质,用 AB 胶粘于不锈钢模型。天平底座安装时通过螺栓将模型锚固到正方形铝板上,再将铝板与高频动态测力天平相连。

试验前对模型系统的自振频率进行测量,用力锤作为激励系统,数据测量时采用德国 ME-SYSTEM 的高频动态测力天平,使用 Matlab 的自带谱分析函数进行模态参数识别。全塔 X、Y、Z 三向固有频率分别为 17.2、17.9、38.8 Hz;塔身 X、Y、Z 三向固有频率分别为 35.8、35.9、79.2 Hz。

1.2 台风风场模拟

该文台风风场的模拟基于东海塘测风塔对台风卡努(Khanun 0515)实测数据。根据 Davenport^[12]实测获得的平均风剖面经验公式,结合台风卡努在不同高度近地风特性实测值得到指数律风剖面:

$$U(z) = \left(\frac{z}{10}\right)^{\alpha} U(10) \quad (1)$$

式中 $U(z)$ 、 $U(10)$ 分别为 z 、10 m 高度处的风速, α 为风剖面系数。由于台风的时变特性, 其风剖面系数 α 并不稳定。荷载规范中规定 A 类地貌下 $\alpha = 0.12$, 通过台风卡努实测数据得知, 台风登陆后 α 平均值为 0.159。

台风卡努登陆后期 10 m 高度处湍流度平均值可达 0.189, 明显大于荷载规范中规定值 0.12。该文将台风区和非台风区的湍流强度系数定为 1.6, 并采用 Sharma^[13] 等提出的湍流强度修正公式模拟台风卡努的湍流剖面:

$$I_u(z) = 1.6 \times 0.12 \left(\frac{z}{10} \right)^{-0.12} \quad (2)$$

式中 $I_u(z)$ 为台风区 z 高度处的顺风向湍流强度, 按式(2)计算所得 10 m 高度处的湍流度为 0.19, 与实测平均值较为接近。

采用 Von Karman 模型的台风顺风向脉动风速谱表达式:

$$\frac{f S_u(z, f)}{\sigma^2} = \frac{4\bar{f}}{(1 + 70.8\bar{f}^2)^{5/6}} \quad (3)$$

式中 $\bar{f} = f L_u / U(z)$, 其中湍流积分尺度 $L_u(z) = 100(z/30)^{0.5}$ 。

1.3 试验布置及试验工况

该试验在浙江大学边界层风洞 ZD-1 中进行, 试验段尺寸为 4 m × 3 m × 18 m, 风速范围为 3 ~ 55 m/s。输电塔的高频动态天平试验在模拟 A 类地貌台风风场下进行^[14-15], 根据式(1)台风卡努实测数据拟合所得的剖面指数 $\alpha = 0.159$ 模拟平均风速剖面。

在风洞试验段入口处设置 5 个尖塔及不等距格栅, 并在风洞底壁上布置不同大小的立方体粗糙元。风道内采用皮托管测量不同高度处的试验风速, 从而得出风场的平均风剖面, 采用眼镜蛇传感器测得湍流度剖面, 如图 1 所示。该试验取 0.8 m 高度处平均风速, 对应实际高度 40 m。

对输电塔模型分全塔、塔身 2 种工况进行试验。输电塔模型沿线路法线方向为 X 轴, 沿线路方向为 Y 轴, 风向与 Y 轴夹角为风向角 β ; 试验模型风洞阻塞比满足 $< 5\%$ 的要求。试验时将模型放到转盘上, 通过转动转盘模拟不同风向。基于角钢塔的对称性, 风向角变化范围 $\beta = 0^\circ \sim 90^\circ$, $\Delta\beta = 15^\circ$ 。

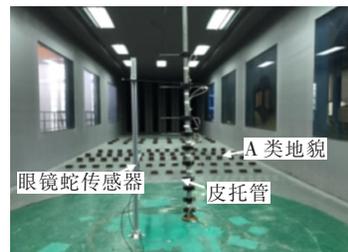


图 1 风洞试验布置

Figure 1 Wind tunnel test arrangement

2 高频天平测力试验结果

2.1 风洞流场校核

如图 2 所示, 可以看出, 风洞边界层模拟的风剖面曲线、湍流剖面曲线、湍流功率谱密度与目标曲线接近, 表明该次试验模拟的 A 类地貌台风风场比较理想。

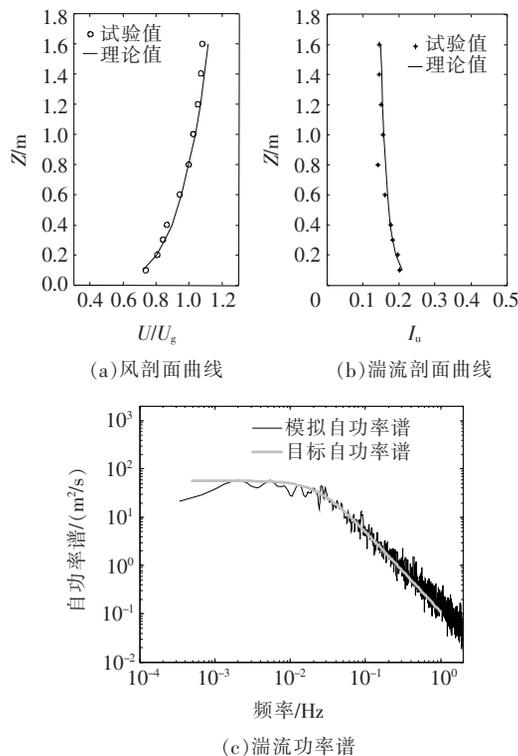


图 2 风洞流场校核

Figure 2 Wind tunnel flow field checking

2.2 模型气动力系数

通过高频天平测力试验获得的作用在模型上的沿 X、Y 向的总水平风力和绕 Z 轴的总扭转风力矩的时程, 其平均值 (静态部分) 记为 F_x 、 F_y 、 M_z , 均方根值记为 σ_x 、 σ_y 、 σ_M 。测试时将输电塔模型移至天平底座中心点, 并以此点为体轴坐标系的原点。

无量纲的基底剪力平均风力系数 C_x 、 C_y 以及平均力矩系数 C_{Mz} 为

$$\begin{cases} C_x = F_x / 0.5\rho U_H^2 S \\ C_y = F_y / 0.5\rho U_H^2 S \\ C_{Mz} = M_z / 0.5\rho U_H^2 SB \end{cases} \quad (4)$$

式中 S 为参考面积,取 0° 风向角时全塔的正迎风面积为 0.056 m^2 ,塔身为 0.030 m^2 ,塔头为 0.026 m^2 ; B 为参考长度,取 0° 风向角时模型在垂直于风速方向上的底部宽度,全塔和塔身为 0.39 m ,塔头为 0.136 m ; U_H 为参考风速,取参考高度 $H = 0.8 \text{ m}$ 处的 $U_H = 11 \text{ m/s}$ 。

试验测量各分量平均风力系数随风向角变化情况如图 3 所示,其中,脚标 QT、TT、TS 分别代表“全塔”、“塔头”、“塔身”。

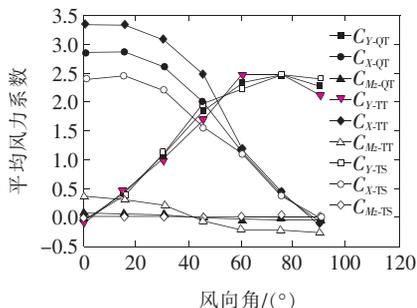


图 3 平均风力系数随风向角变化

Figure 3 Average wind coefficient varies with different wind direction

2.3 模型体型系数

根据风洞试验测得的基底剪力平均值可以求得格构式塔架的风荷载阻力系数与升力系数。阻力系数和升力系数的分母项应该沿高度方向积分,但是对于实际角钢塔而言,其高度方向上的面积并没有统一表达式^[16-17]。因此,本文将输电塔分为 12 层,选取各层中间高度为代表高度,各层迎风面积为代表迎风面积。风荷载阻力系数 C_D 、升力系数 C_L 表示为

$$\begin{cases} C_D = \frac{-F_x \cos \theta - F_y \sin \theta}{\int_0^H \frac{1}{2} \rho U_{10}^2 \left(\frac{z}{10}\right)^{2\alpha} A(z) dz} \\ C_L = \frac{F_x \sin \theta - F_y \cos \theta}{\int_0^H \frac{1}{2} \rho U_{10}^2 \left(\frac{z}{10}\right)^{2\alpha} A(z) dz} \end{cases} \quad (5)$$

式中 θ 为风向角。

对于输电塔而言,塔头和塔身形状差异较大,塔头和塔身的阻力系数如表 1 所示。忽略测力过程中塔头对塔身的气动干扰,各工况下全塔测得的力依次减去塔身测得的力,即为塔头的受力。带入式(5)所得到的阻力系数即为规范意义上的体型系数。

表 1 全塔、塔头、塔身体型系数

Table 1 Shape coefficient of whole tower, tower head and tower body

风向角/ (°)	C_D		
	全塔	塔头	塔身
0	2.645	2.650	2.639
15	2.672	2.644	2.706
30	2.604	2.510	2.718
45	2.519	2.339	2.738
60	2.412	2.161	2.718
75	2.305	1.975	2.706
90	2.115	1.684	2.639

3 基于高频天平风洞试验的输电塔风振响应数值模拟计算

3.1 数值模拟计算模型

如图 4 所示,将实际输电塔结构沿高度分为 12 层,并在 Ansys 中建模,每段计算参数如表 2 所示。将脉动风速时程分段转化为空间离散的集中力作用到有限元模型上,其中,Ansys 模型的输电塔前三阶结构频率为 1.078、1.250、1.589 Hz,分别对应为 Y、X、T3 个方向的第一阶振型。结构阻尼比采用 2.0%。

通过对全塔和塔身测力结果的计算,可以得到

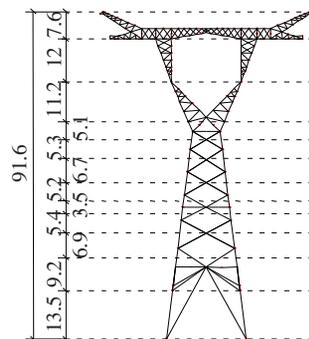


图 4 输电塔结构分层尺寸(单位:m)

Figure 4 Delamination size of transmission tower(Unit:m)

试验风向角下全塔、塔头和塔身的分力系数,其中,塔头部分系数由全塔荷载减去塔身荷载后计算得到,不同风向角下的分力系数如表3所示。其中, X 向分力系数 C_{Dx} 绝对值随着风向角的增大逐渐减小,塔身、塔头和全塔的值大小接近; Y 向分力系数 C_{Dy} 随着风向角增大逐渐增大, 90° 时塔身、塔头和全塔的分力系数值差异较为明显。

表2 计算选用的1 000 kV输电塔结构参数

Table 2 1 000 kV transmission tower structure parameters in calculation

层数	迎风面积/ m^2	集中质量/kg	标高/m	转动惯量/ $(kg \cdot m^2)$	层高/m
1	39.60	26 837	85.70	14 756 083	5.70
2	13.60	11 543	80.00	1 129 050	13.60
3	12.00	12 202	66.40	450 290	8.40
4	8.00	9 971	58.00	222 296	5.00
5	5.80	6 844	53.00	163 178	6.20
6	6.80	7 808	46.80	443 546	6.60
7	5.80	6 625	40.20	251 651	3.40
8	5.60	7 487	36.80	332 543	3.60
9	6.20	7 352	33.20	465 146	7.80
10	7.40	9 024	25.40	734 646	5.40
11	17.00	22 325	20.00	1 942 816	10.00
12	11.60	14 331	10.00	2 137 471	10.00

表3 不同风向角下 X 、 Y 方向分力系数

Table 3 X and Y force component coefficients under different wind directions

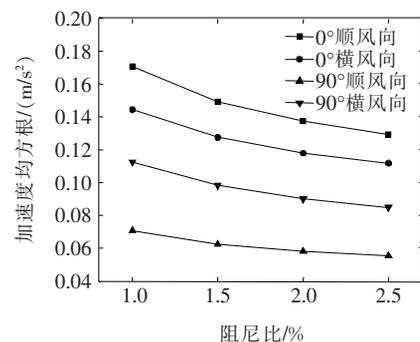
风向角/ $^\circ$	C_{Dx}			C_{Dy}		
	全塔	塔头	塔身	全塔	塔头	塔身
0	-2.65	-2.65	-2.64	-0.04	-0.05	-0.02
15	-2.66	-2.64	-2.69	0.38	0.36	0.41
30	-2.43	-2.43	-2.43	1.00	0.81	1.23
45	-1.86	-1.98	-1.72	1.70	1.33	2.15
60	-1.07	-0.93	-1.23	2.17	1.96	2.43
75	-0.38	-0.35	-0.41	2.29	1.95	2.69
90	0.06	0.09	0.02	2.12	1.68	2.64

由于输电塔结构具有明显的振型非线性,该文在计算模态力时采用改进的模态力计算方法,即分别计算扭转风荷载、各层水平向风荷载、模态力与模态响应,并采用CQC法计算得到结构位移及加速度响应,获得结构响应后采用LRC法计算输电铁塔等效静力风荷载,最终获得输电塔结构的响应与

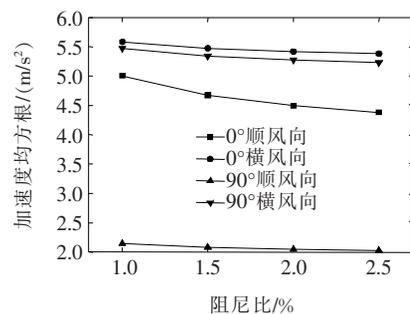
等效静风荷载。由于试验输电塔模型与天平系统的自振频率较低,在利用其基底荷载计算模态力时需要将模态力荷载谱进行半刚性模型修正,将模型一天平系统的一阶共振分量去除。

3.2 数值模拟计算结果

在塔顶 0° 、 90° 风向角下,顺风向和横风向响应随阻尼比变化的影响如图5所示,在阻尼比为 $1.0\% \sim 2.5\%$ 的范围内,结构加速度响应相对阻尼比为 2.0% 时的变化范围为 $1.24 \sim 0.94$,位移响应的相对值变化为 $1.1 \sim 0.97$ 。因此,在阻尼比 $1.0\% \sim 2.5\%$ 范围内,加速度响应较位移响应对阻尼比变化更敏感。



(a) 加速度响应随阻尼比变化



(b) 位移响应随阻尼比变化

图5 塔顶响应随阻尼比变化

Figure 5 Tower head response varies with damping ratio

以阻尼比为 2.0% 时的最大基底荷载值为标准计算得到的不同阻尼比下基底荷载的相对值如图6所示。当阻尼比在 $1.0\% \sim 2.5\%$ 变化时,水平向基底力变化在 2.5% 以内,扭矩变化为 $15\% \sim -3\%$,因此,可认为最大基底力荷载对于阻尼比在 $1.0\% \sim 2.5\%$ 范围内变化较不明显。

试验风向角下全塔基底荷载的分布情况如图7所示,可见基底水平荷载值在各风向角下均在 0.3 MN 以下,且在 0° 、 90° 风向角下, F_x 与 F_y 分别

达到最大值,即 0° 、 90° 均为塔身荷载的不利风向角。

加速度与位移响应均方根随风向角变化情况如图 8 所示,其中,在 0° 、 90° 风向角下塔顶顺风向和横风向的加速度与位移响应数值较为接近,其他情况下横风向均大于顺风向响应。

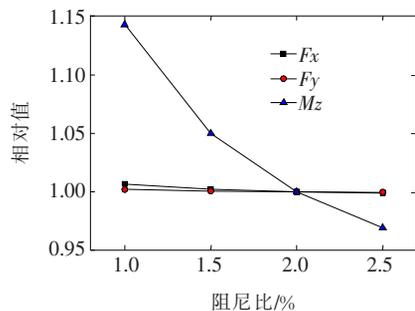
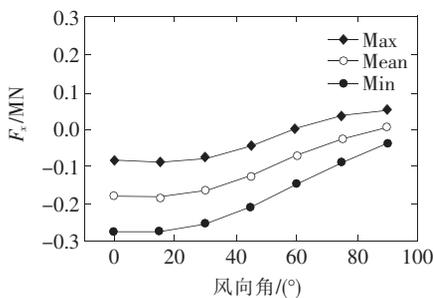
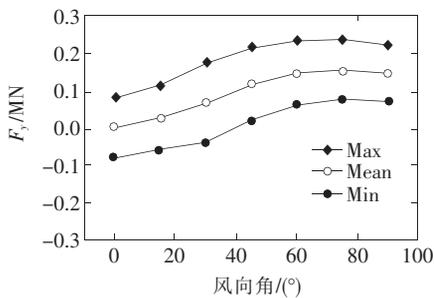


图 6 全塔基底荷载相对值随阻尼比改变

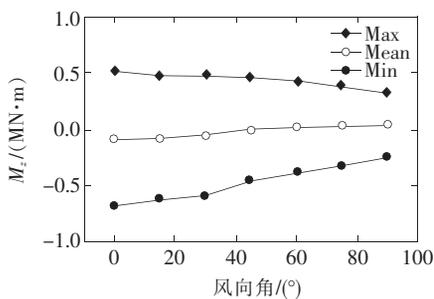
Figure 6 Relative value of rendering load varies with damping ratio



(a) 基底 F_x



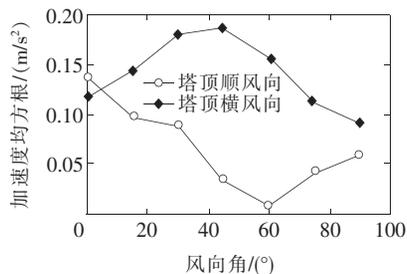
(b) 基底 F_y



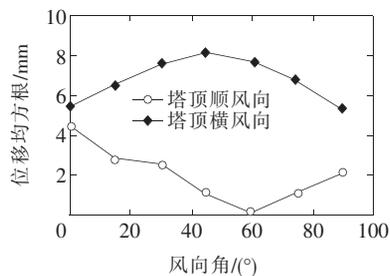
(c) 基底 M_z

图 7 最大基底荷载随风向角变化

Figure 7 Maximal base load varies with wind direction



(a) 加速度响应



(b) 位移响应

图 8 响应随风向角变化

Figure 8 Acceleration and displacement response varies with wind direction

4 结语

1) 与常态风相比,台风与常规风的差异及其对输电杆塔的影响主要体现在:台风样本的风速普遍偏高,在回归台风极值风速时引入常规风样本将导致输电杆塔设计风速被低估;台风中心区风剖面系数与湍流强度的增幅明显,风荷载沿塔身分布变化显著。该文基于台风卡努实测数据,重新取定剖面系数为 0.159,湍流强度基于 A 类地貌放大 1.6 倍。

2) 模拟台风风场下进行 1 000 kV 角钢塔高频天平测力试验,得到试验风向角为 90° 时全塔、塔身、塔头体型系数分别为 2.115、2.639、1.684。

3) 采用改进模态力计算方法进行响应计算,获得角钢塔各层等效静风荷载。进行参数敏感性分析,可以得到加速度响应对阻尼较为敏感,位移响应和加速度响应对自振频率较为敏感。

参考文献:

- [1] 龚坚刚.“云娜”台风对浙江输电线路的危害分析与对策[J]. 浙江电力,2005,24(3):17-19.
GONG Jianguang. Hazards of typhoon rananim to zhejiang power line and its preventive measures[J]. Zhejiang Electric Power,2005,24(3):17-19.
- [2] 吴俊雄. 输电线路遭受强台风“天兔”重创后应急抢修复电以及防风加固措施探讨[J]. 中国新通信,2014,16

- (11):19-20.
- WU Junxiong. The emergency repair and wind reinforcement measures after transmission line suffered from the severe typhoon "Tantu"[J]. *China New Telecommunications*, 2014, 16(11):19-20.
- [3] 李小芳, 杨伟军, 谢文平, 等. 强台风频发区输电塔破坏特征研究[J]. *中国高新技术企业*, 2016(12):28-30.
- LI Xiaofang, YANG Weijun, XIE Wenping, et al. Study on the damage characteristics of the transmission tower in areas prone to typhoons[J]. *China High Technology Enterprises*, 2016(12):28-30.
- [4] 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.
- [5] 谢强, 杨洁. 输电塔线耦联体系风洞试验及数值模拟研究[J]. *电网技术*, 2013, 37(5):1237-1243.
- XIE Qiang, YANG Jie. Wind tunnel test and numerical simulation on transmission tower-line coupling system[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(5):1237-1243.
- [6] 谢强, 管政, 严承涌. 1 000 kV 输电塔横风向振动风洞试验研究[J]. *电网技术*, 2011, 35(5):21-26.
- XIE Qiang, GUAN Zheng, YANG Chengyong. Wind tunnel test on across-wind vibration of 1 000 kV UHV transmission tower[J]. *Power System Technology*, 2011, 35(5):21-26.
- [7] 谢强, 李继国, 严承涌, 等. 1 000 kV 特高压输电塔线体系风荷载传递机制风洞试验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(1):109-116.
- XIE Qiang, LI Jiguo, YAN Chengyong. Wind tunnel test on wind load transferring mechanism in the 1 000 kV UHV transmission tower-line system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(1):109-116.
- [8] 路焕军. 风振响应下塔一线体系的动力特性分析[J]. *电网与清洁能源*, 2020, 36(11):39-44.
- LU Huanjun. Dynamic response analysis of tower-line system under wind-induced vibration[J]. *Power System and Clean Energy*, 2020, 36(11):39-44.
- [9] 庄文兵, 章涵, 王建, 等. 新疆 750 kV 特高压输电线路沿线地形及大风特征时空分析[J]. *高压电器*, 2019, 55(1):190-196.
- ZHUANG Wenbing, ZHANG Han, WANG Jian, et al. Temporal and spatial analysis of terrain and wind characteristics along 750 kV UHV transmission lines in Xinjiang[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(1):190-196.
- [10] 朱凌, 陈涛威, 周晨, 等. 考虑风速风向联合分布的大风灾害下电力断线倒塔概率预测[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(2):115-122.
- ZHU Ling, CHEN Taowei, ZHOU Chen, et al. Probability prediction of transmission line breakage and tower topple over under wind disaster considering the joint distribution of wind speed and wind direction[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(2):115-122.
- [11] 顾明, 郑远海, 张庆华. 典型输电塔平均风荷载和响应研究[J]. *中国工程机械学报*, 2008, 6(1):6-12.
- GU Min, ZHENG Yuanhai, ZHANG Qinghua. Response analysis on mean wind force of typical power transmission towers[J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2008, 6(1):6-12.
- [12] Loredou-souza A M, Davenport A G. A novel approach for wind tunnel modeling of transmission lines[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001, 89:1017-1029.
- [13] Milne I A, Sharma R N, Flay R G, et al. Characteristics of the turbulence in the flow at a tidal stream power site[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2013, 371(1985):20120196.
- [14] 韩晓亮, 高志鹰. 山脉对于风电场影响的计算分析[J]. *电网与清洁能源*, 2020, 36(8):112-115.
- HAN Xiaoliang, GAO Zhiying. Calculation and analysis of the influence of mountains on wind farms[J]. *Power System and Clean Energy*, 2020, 36(8):112-115.
- [15] 侯慧, 俞菊芳, 黄勇, 等. 台风侵袭下输电线路风偏跳闸风险评估[J]. *高电压技术*, 2019, 45(12):3907-3915.
- HOU Hui, YU Jufang, HUANG Yong, et al. Risk assessment of transmission line trip caused by windage yaw under typhoon[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(12):3907-3915.
- [16] 孙利朋, 蒋正龙, 赵纯, 等. 覆冰实验均匀风场形成方法研究[J]. *高压电器*, 2019, 55(4):185-192.
- SUN Lipeng, JIANG Zhenglong, ZHAO Chun, et al. Study on uniform wind field formation method in icing experiments[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(4):185-192.
- [17] 黄仁谋, 安利强, 张荣伦, 等. 台风风雨荷载作用下输电线路绝缘子串风偏特性[J]. *电力科学与技术学报*, 2018, 33(2):89-95.
- HUANG Renmou, AN Liqiang, ZHANG Ronglun, et al. Windage characteristic analysis of transmission lines under typhoon-rain loads[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2018, 33(2):89-95.