

台风风场与 B 类风场作用下输电塔风效应对比研究

郑家松¹, 翁兰溪², 郑宁敏¹, 唐自强¹, 武奋前¹, 蔡虬瑞³, 陈伏彬^{3†}

(1. 国网福建省电力有限公司, 福建 福州 350003;

2. 中国电建集团福建省电力勘测设计院有限公司, 福建 福州 350003;

3. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:在边界层风洞中开展了台风风场与 B 类风场条件下某角钢输电塔气弹模型试验, 采用谐波合成法模拟了不同高度的风速时程, 在时域内进行了输电塔结构风致响应计算, 对比研究了两类风场条件下的风致响应与风振系数. 研究表明: 输电塔风致加速度响应随着来流风速的增大而明显增大, 台风风场条件下加速度响应更为剧烈, 比 B 类风场条件大约 20%~30%; B 类风场条件下风振系数为 1.59, 台风风场条件下达到 1.85, 总体增幅达到 16%; 数值模拟结果与风洞试验结果较为吻合. 因此, 台风多发地区的输电塔设计应考虑台风高湍流引起的动力风荷载增大效应.

关键词:输电塔; 台风风场; 风致响应; 风振系数; 风洞试验; 谐波合成法

中图分类号: TU973.32

文献标志码: A

Comparison Study of Wind Effects on Transmission Tower under Typhoon Wind Field and Terrain B Wind Field

ZHENG Jiasong¹, WENG Lanxi², ZHENG Ningmin¹, TANG Ziqiang¹,

WU Fenqian¹, CAI Qiurui³, CHEN Fubin^{3†}

(1. State Grid Fujian Electric Power Company, Fuzhou 350003, China;

2. Powerchina Fujian Electric Power Survey & Design Institute Co Ltd, Fuzhou 350003, China;

3. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Wind tunnel tests on a aeroelastic model of steel angle transmission tower under typhoon wind field and terrain B wind field were carried out, and then the time series of wind velocity for different height of the transmission tower were simulated by Weighted Amplitude Wave Superposition (WAWS) method and the wind-induced responses were calculated with FEM in time domain. The comparisons of wind-induced response and wind vibration factor between typhoon wind field and terrain B wind field were conducted. The results indicate that the wind-induced acceleration responses enlarge significantly with wind velocity increase, the wind-induced acceleration response un-

* 收稿日期: 2019-04-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778072), National Natural Science Foundation of China(51778072); 国网福建省电力有限公司科技项目(5213001600GW), Program of State Grid Fujian Electric Power Company(5213001600GW)

作者简介: 郑家松(1962—), 男, 福建永泰人, 国网福建省电力有限公司高级工程师

† 通讯联系人, E-mail: 75162016@qq.com

der typhoon wind field is more intensive than that under terrain B wind field, and the amplification is up to 20%~30%. The highly weighted wind vibration factor with value of 1.59 under terrain B wind field, and the value of 1.85 under typhoon wind field are found, the amplification is up to 16% in total. The results from numerical simulation are in good agreement with that from the wind tunnel tests. Therefore, the design of transmission tower in typhoon-prone areas should take the fluctuating wind load magnification effect into consideration.

Key words: transmission tower; typhoon wind field; wind-induced response; wind vibration factor; wind tunnel test; Weighted Amplitude Wave Superposition (WAWS)

输电线路系统故障可给当地经济和社会带来巨大灾难,且由强/台风、雷暴或者龙卷风作用引起的输电塔线系统倒塌占据绝大部分;同时,这些造成输电塔线系统破坏的强风参数范围很广(如风速剖面、湍流剖面等),其对输电塔线系统的作用不同,造成相关的研究工作更加复杂^[1].因此研究在强/台风作用下输电塔线系统的抗风性能是保障电力系统安全运营的首要基础.

国内外众多学者开展了大量卓有成效的研究工作,为输电塔线系统在强风作用下安全工作提供了技术支撑. Mara 等^[2]利用大气边界层风和下击暴流两种流场深入研究了来流风向对输电塔结构风致响应的影响,指出传统的大气边界层风场可近似地用于下击暴流作用下的抗风能力评估; Yang 等^[3]研究了斜风对输电塔风效应影响; Fu 等^[4]基于 Kikuchi 等^[5]提出的模型参数开展了风、雨耦合作用下的输电塔线系统研究,发现雨荷载提高了输电塔线系统位移响应,幅度高达 22%; 王述良^[6]、梁枢果^[7]等研究了输电塔-线体系在强风作用下的风致响应,指出输电塔与导线间存在明显的非线性耦合,导线对塔-线体系影响不可忽视; 楼文娟^[8]、沈国辉^[9]等通过刚性模型研究输电塔体型系数,发现均匀流场中角钢杆件体型系数试验值大于我国规范取值接近国外规范^[8]取值, B 类流场中圆钢塔的体型系数结果合理,表明流场对试验结果影响显著^[9]; 张庆华等^[10]研究了两类风振系数的差异,发现基于加速度响应的风振系数大于基于位移响应的风振系数,二者均小于荷载规范值^[11]; 楼文娟^[12]和邓洪洲^[13]等均开展了良态风与台风风场条件下风振系数的对比研究,前者指出台风风场条件下风振系数比 B 类风场大约 25%, 后者也发现了同样规律,但放大系数约为 7%; 张宏杰等^[14]对比分析了不同流场下的杆塔构件的内力,指出台风作

用下杆塔的内力提高了 20%. 随着数值模拟技术发展,风速时程模拟也广泛应用于输电塔线系统抗风研究中, Zhang 等基于输电线路现场破坏情况,通过模拟不同高度风速时程,基于规范考虑截面体型系数,开展了输电塔线系统有限元分析,评估其极限承载能力并识别了薄弱位置^[15]; Li 等应用高斯过程模拟脉动风速,并用于输电塔线在强风作用下的风效应评估中,取得较好效果^[16].

本文基于某输电塔气弹模型,研究了不同流场与不同来流风向下的杆塔结构风致响应与风振系数,并与数值模拟进行了对比. 本研究丰富了台风作用下的输电塔结构抗风研究成果,为其安全设计提供有效的技术支撑.

1 气弹模型风洞试验

1.1 模型设计与制作

试验对象塔呼高 33 m, 根开 10.9 m, 结构简图如图 1 所示. 根据现有风洞截面尺寸与输电塔原型尺寸, 确定模型缩尺比为 1:40.

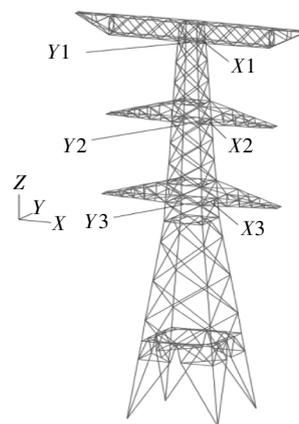


图 1 输电塔模型

Fig.1 Model of transmission tower

气弹模型采用离散刚度法.该方法综合考虑了结构构件的刚度相似与几何相似,能做到模型体型与原型结构的相似,能够准确模拟原结构的动力特性与气动特性,同时可测塔身的扭转效应.模型主材料采用细圆管和钢片,模型严格满足构件拉压刚度相似,采用薄 ABS 板制成角钢外衣,粘贴在模型相应杆件上,模拟杆件外形.各相似系数如表 1 所示,风洞模型如图 2 所示.

表 1 模型与原型的相似系数

Tab.1 Similarity coefficient for model and prototype

参数	单位	相似比
几何尺寸	m	1 : 40
风速	m/s	1 : 6.379 57
频率	Hz	6.270 02 : 1
面积	m ²	1 : 402
空气密度	kg/m ³	1
结构密度	kg/m ³	1.1
质量	kg	1.1 : 403
加速度	m/s ²	1 : 1.017 47
抗拉刚度	N	1 : 641 01
位移	m	1 : 40
结构阻尼比	—	1

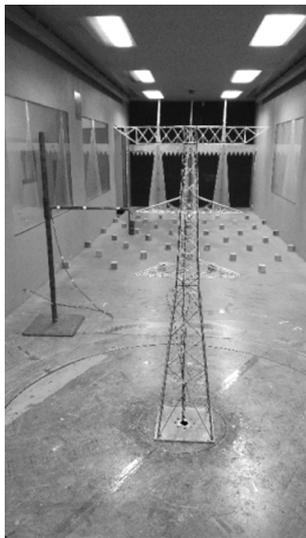


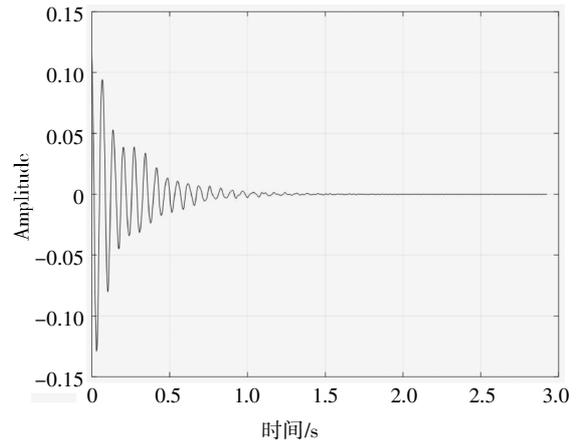
图 2 风洞试验模型

Fig.2 Model in wind tunnel

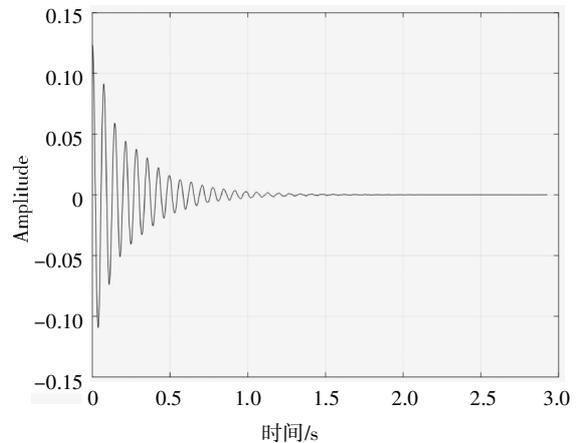
1.2 模型标定

本文对模型动力标定采用结构静力拉伸的方法,通过拉线的办法使结构发生初位移后突然剪断拉线让结构自由振动.模态试验过程加速度传感器

的采样频率为 500 Hz,6 个通道的加速度传感器信号同步采集,通过滤波处理之后进行 EMD 经验分解,采用随机减量法获取自由振动衰减信号,利用 Hilbert 变换对结构进行模态参数识别.图 3 给出了输电塔两个主轴方向的自由衰减曲线,表 2 给出了输电塔动力标定试验模态识别结果.需要指出的是原型频率结果为有限元分析结果.从表 2 可以看出,实测频率与理论频率吻合较好.



(a)顺导线方向



(b)垂直线方向

图 3 输电塔自由衰减曲线

Fig.3 Free decay curve of transmission tower

表 2 模态参数识别结果

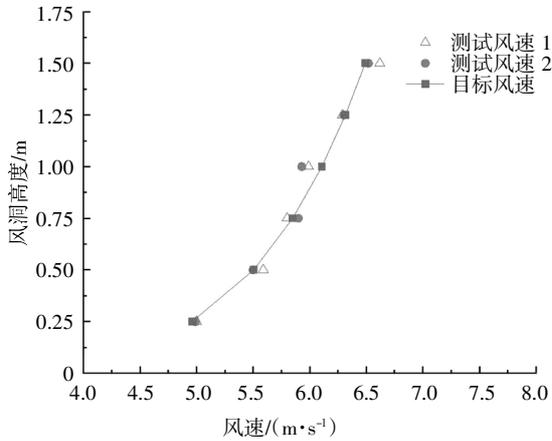
Tab.2 Results of modal parameter identification

模态阶数	原型频率 /Hz	模型理论频率/Hz	实测频率 /Hz	偏差 /%	振型
1	2.162 2	13.793 9	13.793 9	0	X 向弯曲
2	2.413 7	15.398 4	15.777 6	2.4	Y 向弯曲
3	3.135 0	20.000 0	21.380 1	6.9	一阶扭转

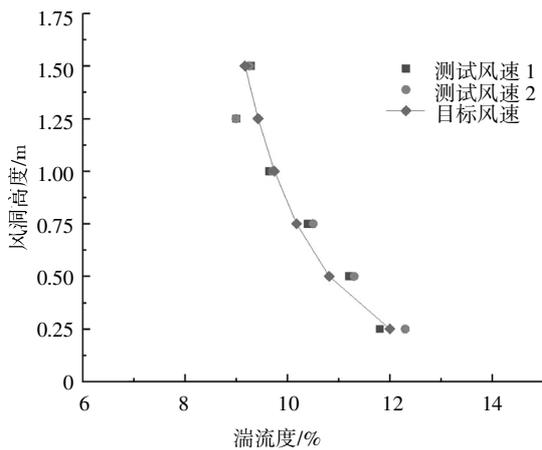
1.3 风场模拟

试验流场采用被动模拟技术,采用尖劈和粗糙

元模拟了《建筑结构荷载规范》^[11] 规定的 B 类风场;基于前人关于台风研究成果^[12-13],台风风场采用尖劈、挡板和粗糙元的 3 种组合,亦采用被动模拟方式进行风场模拟.常规 B 类风场和台风风场模拟结果分别如图 4 和图 5 所示.



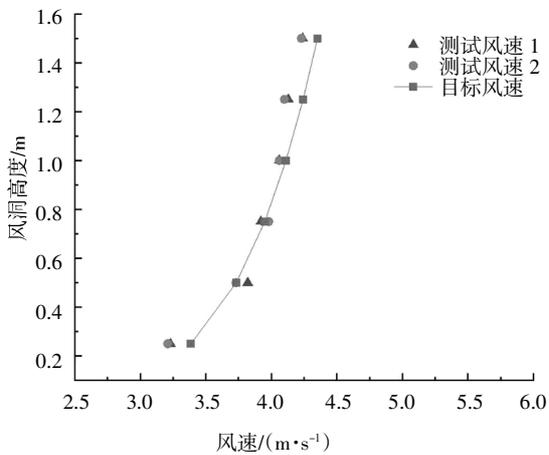
(a)平均风速剖面



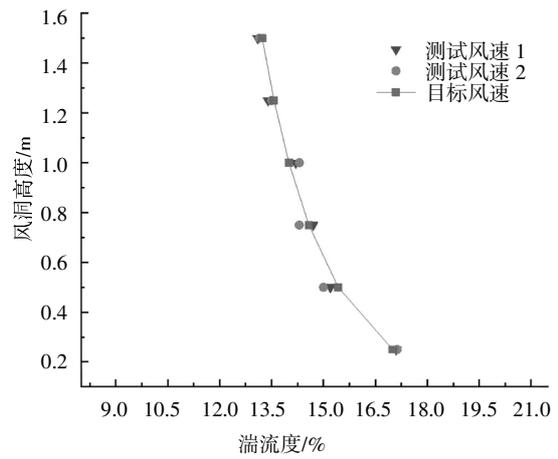
(b)湍流度剖面

图 4 B 类风场

Fig.4 Wind field for terrain B



(a)平均风速剖面



(b)湍流度剖面

图 5 台风风场

Fig.5 Typhoon wind field

1.4 试验工况

风洞试验在湖南大学 HD-3 边界层风洞中完成.沿模型高度布置 3 层双向加速度测点,分别为 3 个高度的横担处(顶部横担、中间横担、底部横担),如图 1 所示.考虑结构的对称性,试验风向角分别为 0°~90°,间隔 15°,共 7 个风向角,其中 0°为顺导线方向,如图 6 所示.试验采样频率为 500 Hz,采样时间为 120 s.

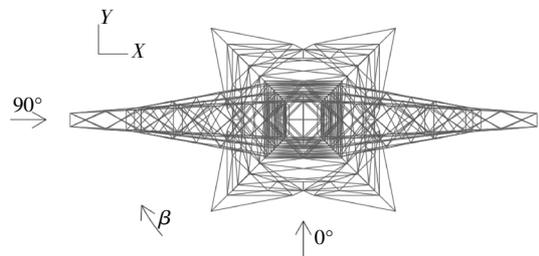


图 6 风向角与坐标轴示意图

Fig.6 Diagram of wind direction and coordinate axis

两类风场条件下,均采集了 4 组风速下的加速度响应.其中 B 类风场参考风速为:3.081 m/s、4.024 m/s、5.017 m/s、6.214 m/s、6.972 m/s(对应实际 20.669 m/s、26.995 m/s、33.66 m/s、41.6879 m/s、46.7731 m/s);台风风场参考风速为:3.079 m/s、4.026 m/s、5.038 m/s、5.930 m/s、6.920 m/s(对应实际 20.656 m/s、27.009 m/s、33.800m/s、39.782 m/s、46.424 m/s).参考点位置为 0.75 m,对应实际高度为 30 m.

2 数值模拟

谐波合成法(WAWS)主要思想为利用三角函数

的线性组合,通过对一系列余弦函数序列求和的办法模拟随机脉动风荷载^[18-19],该方法具有较高精度且无条件稳定等优点,被广泛应用于输电塔风致效应的数值模拟中^[20].基于谐波合成法获得不同高度处的风速,转化为不同高度处的风压力,根据规范方法(如公式(1)所示)获得不同高度处的节点力^[15],施加到有限元模型上(有限元模型如图 7 所示).

$$P(t) = \frac{1}{2}\rho U(z)^2 A \mu_s \quad (1)$$

式中: $U(z)$ 为高度 z 处脉动风速时程,本文取参考高度为 30 m,参考点平均风速参考风洞试验取值; ρ 为空气质量密度,取 1.25 kg/m^3 ; A 为输电塔构件投影面积; μ_s 为输电塔体型系数,本文根据《架空输电线路杆塔结构设计技术规定》^[21],取 $\mu_s = 1.6$.

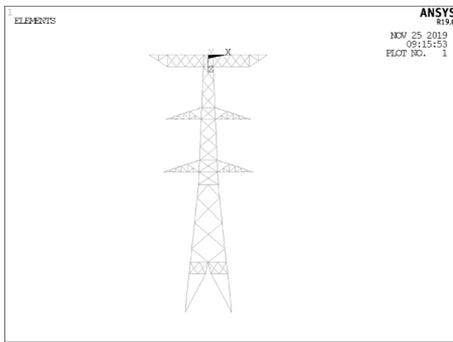


图 7 输电塔有限元模型

Fig.7 FE model of transmission tower

本文采用谐波合成法模拟 11 个高度处的脉动风速时程,表 3 给出了模拟点对应的高度,图 8 为 30 m 高度处模拟的时程结果示例.两类风场参数分别如图 9、图 10 所示.从图 9、图 10 可以看出,平均风速剖面和湍流剖面与目标值较为吻合,且脉动风速谱与 Davenport 谱也吻合良好.

表 3 输电塔风速模拟点位置

Tab.3 Position of the simulation point

模拟点	荷载施加高度/m
1	10
2	15
3	20
4	25
5	30
6	35
7	40
8	45
9	50
10	55
11	60

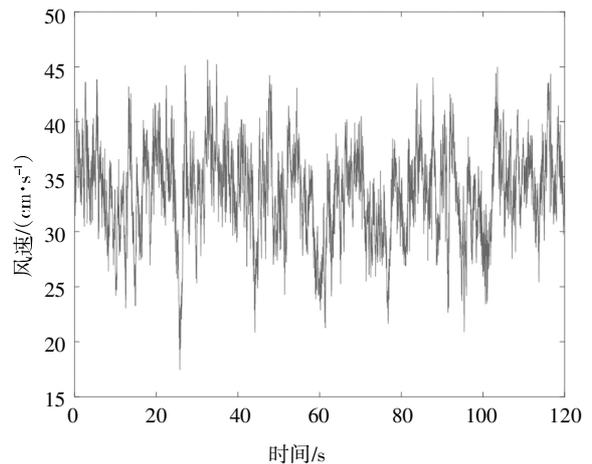
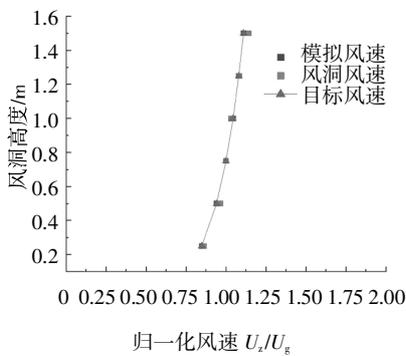
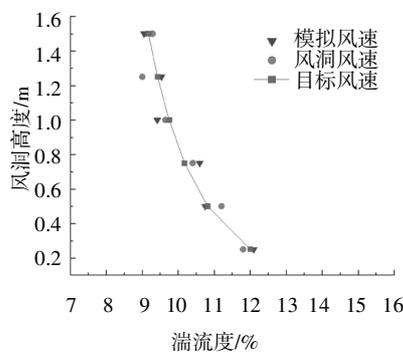


图 8 B 类风场 30 m 高度处风速时程

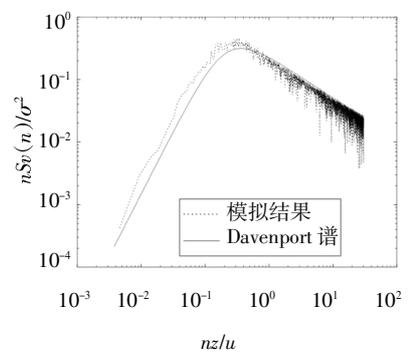
Fig.8 Time series of the wind velocity in the height of 30 m for B wind field



(a) 风速剖面



(b) 湍流剖面



(c) 功率谱

图 9 B 类风场模拟结果

Fig.9 Simulation results for B wind field

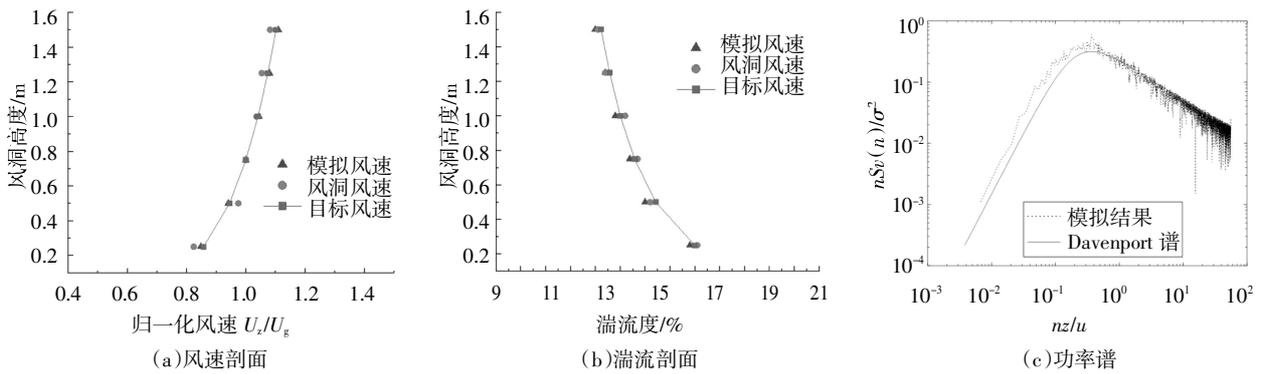


图 10 台风风场模拟结果

Fig.10 Simulation results for typhoon wind field

3 结果分析

3.1 加速度响应

在风洞试验或时域分析中均得到输电塔正交主轴上的两个加速度响应,将两个沿主轴方向(正交主轴)的响应进行矢量合成即得到顺风向和横风向加速度响应,计算公式为:

$$\sigma_s = \sqrt{(\text{std}(a_y \cos \beta))^2 + (\text{std}(a_x \sin \beta))^2} \quad (2)$$

$$\sigma_h = \sqrt{(\text{std}(a_x \sin \beta))^2 + (\text{std}(a_y \cos \beta))^2} \quad (3)$$

式中: σ_s 为顺风向加速度响应均方根; σ_h 为横风向加速度响应均方根; β 为来流风向角; a_y 和 a_x 分别为顺线路方向和垂直于线路方向测点的加速度响应;std 为均方根/标准差.

通过相似关系,可将模型加速度转化为原型加速度,其换算关系式如下:

$$\sigma_p = \sigma_m / C_a \quad (4)$$

式中:下标 p 和 m 分别代表原型和模型; σ 为加速度均方根; C_a 为加速度相似系数(本文取 $C_a=1:1.017$).

图 11 为两类风场条件下 3 个横担位置加速度响应随风速变化规律.从图 11 可以发现:试验结果与时域分析结果均表明加速度响应沿输电塔高度出现逐渐递增的趋势,加速度响应随风速的增大而增大并且增幅也越来越大.台风风场时域分析结果与风洞试验结果均比 B 类风场对应值大 20%~30%.由于风洞试验风场调试所得的湍流剖面与脉动风速谱与谐波合成法生成的随机脉动风具有一定的差异,导致风洞试验与时域分析之间有偏差.

3.2 风振系数

现行的荷载规范^[1]与相关设计规范^[21-22]中规定等效静风荷载可由平均风荷载乘以风振系数来表达,其风振系数可采用下式计算:

$$\beta_z = \frac{P_c + P_d}{P_c} = 1 + \frac{P_d}{P_c} \quad (5)$$

$$P_c = \mu_s \mu_z(z) \omega_0 A(z) \quad (6)$$

$$P_d = gM(z) \sigma_s(z) \quad (7)$$

式中: P_c 和 P_d 分别表示静力荷载和动力荷载; μ_s 为

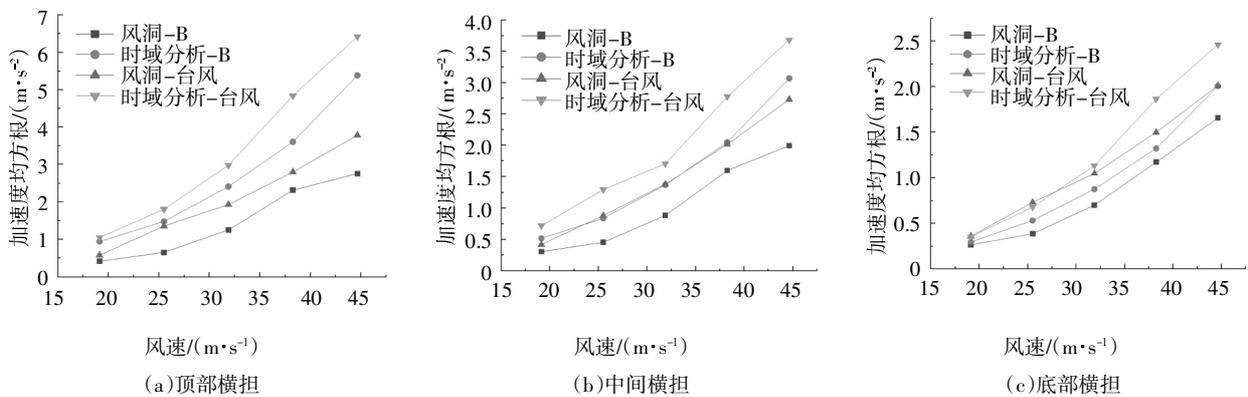


图 11 输电塔加速度响应对比

Fig.11 Comparison of wind-induced acceleration response of transmission tower

体型系数(本文取 1.6); $\mu_z(z)$ 为 z 高度处风压高度变化系数,根据《建筑结构荷载规范》^[11]查表得到;风压 $\omega_0 = V_{10}^2/1600$; $M(z)$ 为原型分布在 z 高度处的集中质量; $\sigma_s(z)$ 为原型 z 高度处顺风向加速度响应均方根值; g 为峰值因子(本文取 4.0).

输电塔属于高耸结构,我国《建筑结构荷载规范》^[11]和《高耸结构设计规范》^[22]均规定了 z 高度处风振系数计算方法,分别如式(8)和式(9)所示:

$$\beta_z = 1 + 2gI_{10}B_z\sqrt{1+R^2} \quad (8)$$

式中: g 为峰值因子,本文取 4.0; I_{10} 为 10 m 高度处名义湍流强度; R 为脉动风荷载共振分量因子; B_z 为脉动风荷载背景分量因子.

$$\beta_z = 1 + \xi\varepsilon_1\varepsilon_2 \quad (9)$$

式中: ξ 为脉动增大系数; ε_1 为风压脉动和风压高度等的影响系数; ε_2 为振型、结构外形的影响系数.

表 4 给出最不利风向下(0°风向角)3 个典型高度处风振系数的试验值与时域分析结果,同时给出了 3 种规范下的风振系数取值.这里需要着重指出的是,在计算风振系数时,其保证因子均取为 4.0.

从表 4 可以看出:对于整体风振系数,《建筑结构荷载规范》的计算值最大,《高耸结构设计规范》的计算值次之,《架空输电线路杆塔结构设计技术规定》的计算值最小,但均大于常规 B 类风场试验值,小于台风风场试验值;时域分析结果与试验值较为吻合;台风风场条件下的风振系数试验值比常规风场大约 16%,时域分析值大约 10%,放大效应介于楼文娟等人^[12]的试验结果与邓洪洲等人^[13]的试验结果之间,验证了强风参数与研究对象的差异对研究结果的影响^[1].

表 4 风振系数对比

Tab.4 Comparison of wind vibration factor

高度/m	风振系数						
	B 类风场		台风风场		《建筑结构荷载规范》 ^[11] 计算值	《高耸结构设计规范》 ^[22] 计算值	《架空输电线路杆塔结构设计技术规定》 ^[24] 计算值
	试验值	时域分析	试验值	时域分析			
57.8	1.64	1.78	1.95	1.95	1.945	1.88	
48.2	1.58	1.62	1.83	1.80	1.770	1.69	1.60
45.4	1.54	1.55	1.74	1.70	1.480	1.49	
高度加权值	1.59	1.66	1.85	1.83	1.75	1.70	1.60

4 结论

1) 高湍流的台风作用下,输电塔风致加速度响应明显高于常规 B 类风场条件,增幅达到 20%~30%.

2) B 类风场条件下输电塔风振系数试验值与《架空输电线路杆塔结构设计技术规定》^[21] 较为吻合,取为 1.6;台风风场下的风振系数明显高于 B 类风场,达到了 1.85,因此在台风多发地区进行输电塔结构设计时应考虑高湍流台风风场的影响.

3) 数值模拟结果与试验结果较为吻合,表明谐波合成法是一种有效的风速时程模拟方法,能有效应用于输电塔抗风研究中.

4) 不同地貌情况下,台风特性各异,其流场特征

有较大差异,仍需更多实测的台风信息确定合适的流场特征,以开展此类结构的风洞试验,提供更为丰富的台风作用下输电塔结构抗风设计的技术支撑.

5) 需要指出的是,本文在开展风致响应计算时并未考虑气动阻尼的影响,研究表明气动阻尼能降低输电塔结构的风致效应^[12].因此,研究精细化气动阻尼及其对输电塔系统的影响是下一步的一个重点工作.

参考文献

[1] ABD-ELAAL E, MILLS J E, MA X. A review of transmission line systems under downburst wind loads[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 179: 503-513.
 [2] MARA T G, HONG H P. Effect of wind direction on the response

- and capacity surface of a transmission tower[J]. *Engineering Structures*, 2013, 57:493—501.
- [3] YANG F L, YANG J B, NIU H W, *et al.* Design wind loads for tubular-angle steel cross-arm transmission towers under skewed wind loading [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015, 140: 10—18.
- [4] FU X, LI H N. Dynamic analysis of transmission tower-line system subjected to wind and rain loads [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2016, 157:95—103.
- [5] KIKUCHI N, MATSUZAKI Y, YUKINO T, *et al.* Aerodynamic drag of newdesign electric power wire in a heavy rainfall and wind[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, 91:41—51.
- [6] 王述良, 梁枢果, 熊铁华, 等. 基于气弹模型风洞试验的输电塔-线体系风致响应分析 [J]. *水电能源科学*, 2014, 32(8):169—173.
- WANG S L, LIANG S G, XIONG T H, *et al.* Analysis on wind-induced response of transmission tower-line system based on aero-elastic model wind tunnel test [J]. *Water Resources and Power*, 2014, 32(8): 169—173. (In Chinese)
- [7] LIANG S G, ZOU L H, WANG D H, *et al.* Investigation on wind tunnel tests of a full aeroelastic model of electrical transmission tower-line system[J]. *Engineering Structures*, 2015, 85:63—72.
- [8] 楼文娟, 王东, 沈国辉, 等. 角钢输电杆件风压及体型系数的风洞试验研究 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(4):114—118.
- LOU W J, WANG D, SHEN G H, *et al.* Wind tunnel tests for wind load distribution and shape coefficient of angle-made-transmission towers[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 41(4):114—118. (In Chinese)
- [9] 沈国辉, 项国通, 邢月龙, 等. 2种风场下格构式圆钢塔的天平测力试验研究 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2014, 48(4):704—710.
- SHEN G H, XIANG G T, XING Y L, *et al.* Experimental investigation of steel lattices towers with cylindrical members based on force balance tests under two wind flows[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2014, 48(4):704—710. (In Chinese)
- [10] 张庆华, 马文勇, 赵龙. 典型窄基输电塔风致气弹模型风洞试验 [J]. *振动、测试与诊断*, 2017, 37(2):326—331. (In Chinese)
- ZHANG Q H, MA W Y, ZHAO L. Wind-induced response analysis for the typical transmission tower with narrow base based on an aero-elastic model wind tunnel test [J]. *Journal of Vibration, Measurement and diagnosis*, 2017, 37(2):326—331. (In Chinese)
- [11] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012:220—221.
- GB 50009—2012 Load code for the design of building structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012:220—221. (In Chinese)
- [12] 楼文娟, 夏亮, 蒋莹, 等. B类风场与台风风场下输电塔的风振响应和风致系数[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(6):13—17.
- LOU W J, XIA L, JIANG Y, *et al.* Wind-induced response and wind load factor of transmission tower under terrain B wind field and typhoon wind field [J]. *Journal of vibration and Shock*, 2013, 32(6):13—17. (In Chinese)
- [13] 邓洪洲, 段成荫, 徐海江. 良态风与台风风场下输电塔线体系气弹模型风洞试验[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(8):257—262.
- DENG H Z, DUAN C Y, XU H J. Wind tunnel tests on an aeroelastic model of a transmission tower-line system under normal wind field and typhoon wind field [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(8):257—262. (In Chinese)
- [14] 张宏杰, 杨靖波, 杨风利, 等. 台风风场参数对输电杆塔力学特性的影响[J]. *中国电力*, 2016, 49(2):41—47.
- ZHANG H J, YANG J B, YANG F L, *et al.* Study on the influence of typhoon wind parameters on mechanical characteristics of transmission tower[J]. *Electric Power*, 2016, 49(2):41—47. (In Chinese)
- [15] ZHANG J, XIE Q. Failure analysis of transmission tower subjected to strong wind load [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 160:271—279.
- [16] XUAN L, ZHANG W, NIU H W, *et al.* Probabilistic capacity assessment of single circuit transmission tower-line system subjected to strong winds[J]. *Engineering Structures*, 2018, 175:517—530.
- [17] 陈伏彬, 李秋胜, 胡尚瑜, 等. 开阔地貌台风风场实测与风洞试验应用研究[J]. *建筑结构*, 2015, 45(2):89—94.
- CHEN F B, LI Q S, HU S Y, *et al.* Field measurement an wind tunnel test application research of typhoon wind field in open terrain [J]. *Building Structure*, 2015, 45(2):89—94. (In Chinese)
- [18] SHINOZUKA M, JAN C M. Digital simulation of random processes and its applications [J]. *Journal of Sound & Vibration*, 1972, 25(1):111—128.
- [19] 罗俊杰, 韩大建. 谐波合成法模拟随机风场的优化算法[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2007(7):105—109.
- LUO J J, HAN D J. Optimized algorithm of wave superposition method to simulate stochastic wind field[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2007(7):105—109. (In Chinese)
- [20] 甘凤林, 杨振伟, 代晓光. 基于谐波合成法的输电塔线体系风致响应分析[J]. *电网技术*, 2009, 33(18):186—190.
- GAN F L, YANG Z W, DAI X G. Analysis on wind-Induced dynamic response of transmission tower-line system based on weighted amplitude wave superposition [J]. *Power System Technology*, 2009, 33(18):186—190. (In Chinese)
- [21] DL/T 5154—2012 架空输电线路杆塔结构设计技术规定[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012:18—21.
- D/T 5154—2012 Technical code for the design of tower and pole structures of overhead transmission line[S]. Beijing: China Planning Press, 2012:18—21. (In Chinese)
- [22] GB 50135—2006, 高耸结构设计规范[S], 北京: 中国计划出版社, 2006:136—142.
- GB 50135—2006, Code for design of high-rising structures [S]. Beijing: China Planning Press, 2006:136—142. (In Chinese)