

文章编号: 1001-4888(2018)06-0869-08

雷暴冲击风下输电塔风振特性试验研究^{*}

刘慕广¹, 黄琳玲¹, 邹云峰²

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东广州 510641; 2. 高速铁路建造技术国家工程实验室, 湖南长沙 410075)

摘要: 基于自主开发的试验装置, 在常规边界层风洞中实现了大比例稳态雷暴冲击风剖面的模拟, 并以输电塔气弹模型为研究对象, 采用非接触式位移测量仪测量模型的风振响应, 分析了不同类型雷暴冲击风场下输电塔的平均位移特性, 并与常规 B 类风场下的风振特性进行了对比。试验结果显示, 输电塔的风振响应均以两个方向的一阶弯曲振型为主, 扭转响应和高阶弯曲响应不显著。随风速增加, 不同风场下输电塔位移响应均呈抛物线趋势增大, 最大风速处于塔头部位的冲击风场引起的输电塔位移响应明显高于最大风速处于塔身中部冲击风下的响应值, B 类风场下的响应介于两类冲击风场间, 且不同风场下位移响应间的差距也随风速增加不断增大。

关键词: 风洞试验; 风振响应; 气弹模型; 雷暴冲击风; 输电塔

中图分类号: TU317⁺.1; TU973⁺.213 **文献标识码:** A DOI: 10.7520/1001-4888-18-096

0 引言

输电塔作为电力系统的主要基础设施, 其安全可靠直接关乎工业生产和人民的日常生活。由于输电塔为高耸轻柔结构, 对风荷载激励较为敏感, 尤其是雷暴冲击风等局部强风气候, 被认为是输电塔线体系倒塌的主要原因^[1]。雷暴冲击风是短时间内冲向地面的强下降气流, 其瞬时风速高, 且最大风速一般出现在近地面附近, 对输电塔下的安全存在极大威胁。

由于雷暴风发生时范围小、时间短, 为非平稳的局部风气候, 通过试验进行雷暴冲击风下的输电塔体系风振研究较为困难, 现有研究多采用数值方法进行。楼文娟等^[2]分析了冲击风下输电塔的风振响应特性, 认为冲击风尺度对输电塔响应影响较大, 但对其动力响应放大系数影响轻微, 并进一步探讨了运动雷暴风下输电线的风荷载计算参数^[3], 得到了基于 3s 阵风风速的线路风荷载完整表达式。Shehata 和 Damatty^[4]分析了雷暴风作用下拉线输电塔杆件的内力特性, 并分区域探讨了雷暴风参数和空间位置对轴力的影响。Elawady 和 Damatty^[5]通过分析雷暴风作用下导线对输电塔的不平衡张力特性, 给出了估算张力的计算图表。Mara 等^[6]分析了雷暴风作用下输电塔的荷载—变形特性, 认为不同参数雷暴风和常态风下的荷载—变形曲线具有一定的相似性。Yang 等^[7]分析了雷暴风下塔线系统的非线性响应, 指出塔与线间的动力交互作用对塔的承载力曲线的影响是可以忽略的。

虽然雷暴风对工程结构的风致试验研究存在一定困难, 但仍有部分研究者成功地进行了一定的尝试。徐挺等^[8]参考低速直流风洞的设计准则, 研制了雷暴冲击风风洞试验装置, 并分析了射流参数对风速剖面的影响。赵杨等^[9]采用主动控制风洞模拟了雷暴风阵风剖面, 并分析了高层建筑的风压和气动参数, 认为雷暴风会使结构产生较大的非定场升力和风压。Elawady 等^[10]利用三维风洞(Wind En-

^{*} 收稿日期: 2018-05-07; 修回日期: 2018-06-15

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2015ZZ018); 高速铁路建造技术国家工程实验室开放基金(2017HSR06)

通讯作者: 刘慕广(1981-), 男, 博士, 副教授, 主要从事风工程研究。Email: liumg@scut.edu.cn

gineering, Energy and Environment (WindEEE) Dome),对7座拉线塔气弹模型组成的塔线系统在雷暴风下的风振响应进行了试验研究,指出塔的共振响应约为峰值响应的5%~10%,且在高雷暴风速下,塔和线的响应均以背景为主。

鉴于冲击风的剖面形态是其区别于常规边界层风场的最典型特征,本文在文献[11]的基础上,改进并优化了雷暴冲击风模拟装置,在常规边界层风洞中成功模拟出两类适用于输电塔结构的大比例雷暴冲击风剖面,并分析了冲击风下输电塔的风振位移响应特性。

1 风场模拟

风洞中分别选取 Vicroy^[12]与 Wood 等^[13]提出的雷暴风剖面理论模型作为模拟目标。Vicroy 水平风剖面表达式为

$$\frac{V(z)}{V_{\max}} = 1.22 \left[\exp\left(-0.15 \frac{z}{z_{\max}}\right) - \exp\left(-3.2175 \frac{z}{z_{\max}}\right) \right] \quad (1)$$

式中, $V(z)$ 为 z 高度处水平风速; z_{\max} 为水平最大风速 V_{\max} 所在高度。Wood 等提出的冲击风剖面表达式为

$$\frac{V(z)}{V_{\max}} = 1.55 \left(\frac{z}{\delta} \right)^{1/6} \left[1 - \operatorname{erf} \left(0.70 \frac{z}{\delta} \right) \right] \quad (2)$$

式中, δ 为高度参数,指风速达到 $0.5V_{\max}$ 时的离地高度; $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ 为容错函数。

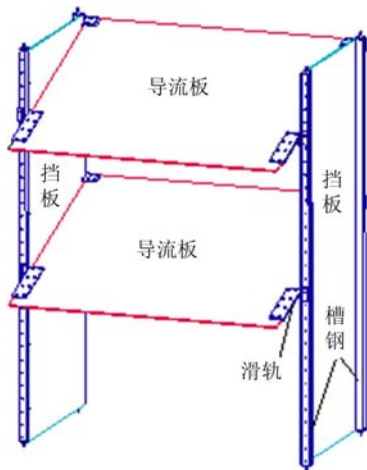


图1 冲击风模拟装置

Fig.1 Device for downburst simulation

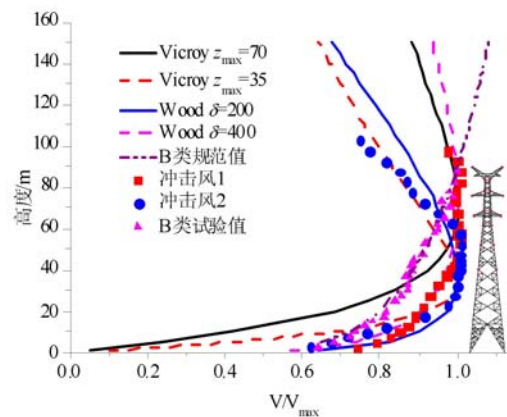


图2 试验风场

Fig.2 Wind field for test

冲击风模拟装置由左右两侧竖向布置的挡板和两挡板间倾斜布置的导流板构成,如图1所示。挡板与导流板均为合板,通过调整导流板的相对位置、角度及数量等参数,在华南理工大学边界层风洞中较好地模拟出两类冲击风剖面,风场缩尺比为1:50,其最大风速位置分别位于80m和45m高度附近,定义为冲击风1和冲击风2,图2为归一化的风剖面曲线。冲击风1的目标值对应于 $z_{\max}=70\text{m}$ 的Vicroy剖面和 $\delta=400\text{m}$ 的Wood剖面,其试验值更接近于Vicroy剖面。冲击风2的目标值为 $z_{\max}=35\text{m}$ 的Vicroy剖面和 $\delta=200\text{m}$ 的Wood剖面,最终结果介于两理论模型间。整体看来,模拟出的两组冲击风剖面并不是很完美,但考虑自然界中的雷暴风剖面形态受雷暴中心强度及距雷暴中心距离等因素的影响,实际剖面形态差异性较大,本文模拟结果基本具备了雷暴冲击风的典型特征。考虑到当前冲击风湍流度剖面并无统一且明确的理论值,本文暂且侧重于对比分析冲击风平均稳态风速剖面下的杆塔风振特性。同时,在风洞中利用尖塔和粗糙元模拟了《建筑结构荷载规范》^[14]中的B类地貌,其剖面特征见图2。

2 试验概况

2.1 输电塔模型

试验采用的输电塔原型为 100kV 双回路角钢塔，塔高 89.6m，呼高 66m，基底宽度为 17.315m，塔身顶部宽度为 2.5m，在塔顶段 23.6m 范围内设置有三层横担，如图 3 所示。输电塔气弹模型缩尺比为 1:50，模型材料为铝材。为了尽量减小输电塔模型各杆件节点处胶接导致的阻尼问题，采用线切割方式沿高度方向分段整体雕刻输电塔的主杆及斜直杆，而后沿各杆件轴线弯折为 L 型模拟角钢横断面，最后采用高强粘结剂连接模型各段，输电塔模型的横担和塔腿也采用类似的制作方式。

考虑到角钢塔具有尖锐棱缘，试验模型放宽了雷诺数、弗劳德数的模拟，重点保证了几何、Strouhal 数、Cauchy 数、质量等参数的相似。表 1 给出了输电塔原型和模型的一些重要参数。

2.2 试验方案

前文模拟出的两类冲击风场，其最大风速位置分别处于输电塔的中横担及塔身中部位置，图 4 为风洞中的模型。对于三种风场，试验中均以 15°步长测量了模型 0°~90°风向角下的风振位移响应，图 5 为风向角定义，垂直和平行横担风向分别定义为 0°和 90°风向角，风向角 β 逆时针旋转为正。风洞试验中采用 Cobra 探头测量试验风速，参考高度取为 0.9m，对应的试验工况如表 2 所示。由于常规边界层剖面风速随高度增大而增大，而冲击风最大风速出现于中间部位，为了保证不同风场类型下输电塔风振响应的可比性，表 2 中风速值为输电塔高度范围内各风场的最大风速值。

表 1 原型和模型基本参数

Tab.1 Basic parameters of prototype and model

参数	质量 /kg	频率 /Hz			阻尼比			风速比		
		一阶弯 f_x	一阶弯 f_y	一阶扭 f_z	x 向	y 向	扭转	x 向	y 向	扭转
原型值	80500	1.128	1.122	4.533	/	/	/	/	/	/
相似系数	1:50 ³	24.241:1	23.5:1	16.588:1	1:1	1:1	1:1	1:2.063	1:2.128	1:3.014
模型值	0.641	27.344	26.367	75.195	0.025	0.024	0.016	/	/	/

表 2 试验工况

Tab.2 Test conditions

试验风场	试验风向	试验风速/(m/s)
B		8.9, 11.4, 12.9, 14.5, 15.7
冲击风 1	0°~90°/15°	8.0, 10.5, 13.0, 15.7, 18.1, 19.4
冲击风 2		8.0, 10.7, 13.4, 16.2, 18.7, 20.1

采用英国 Imetrum 公司生产的非接触式高精度位移测量系统，测量输电塔模型不同高度处的风振响应。测量系统主要由数采电脑、千兆网线及高分辨工业摄像机构成，能同步获取各测点的三维位移响应。试验测量系统安装于风洞外，透过风洞壁的玻璃识别各测点的位移响应，这一方式避免了常规测量手段中存在的仪器自身风致振动及仪器与模型相互间的气动干扰问题，确保了测量结果的可靠性和准确性，图 6 为风洞外的其中一台测量设备。试验中在模型高度方向分别布置了 7 个测点层，每层 2 个测点，分别位于输电塔模型主要杆件的节点位置，见图 3 所示。若同一层有两个测点，则左侧定义为 a 测点，右侧定义为 b 测点。由于每个测点需同时处于两台摄像机的视窗范围内，所以不同风向角下试验测

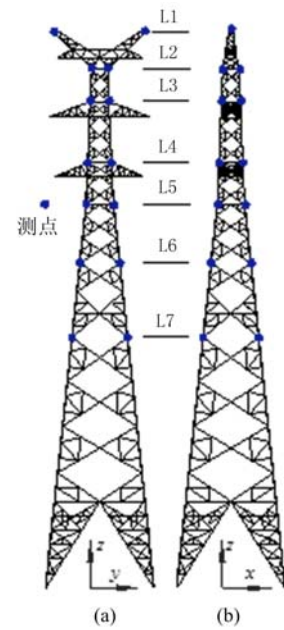


图 3 输电塔布置图
Fig.3 Layout of the transmission tower

点位置少许不同。其中 $0^\circ\sim 30^\circ$ 风向角对应图3(b)中测点, $60^\circ\sim 90^\circ$ 风向角对应图3(a)中测点, 45° 风向角分别对应图3(a)(b)中部分测点。试验中数据采集时间长度约为120s,采样频率为250Hz。



图4 风洞中的模型

Fig. 4 View of the model

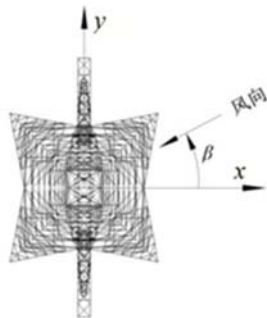


图5 风向角定义

Fig. 5 Definition of wind direction



图6 测量系统

Fig. 6 Measurement system

3 试验结果与分析

3.1 位移响应谱

图7给出了 30° 风向角时三组风场相近风速下输电塔模型L1测点两个轴向的位移幅值谱曲线,图中风速为模型试验风速。由图7中可见,冲击风场与B类风场下气弹模型的风致响应主要以两个轴向的一阶弯曲振动为主,不同风场中输电塔均未激发出明显的扭转响应及高阶弯曲风振响应,因此下文主要讨论输电塔两轴向的弯曲位移响应。图中50Hz和100Hz的频率成分为电信号干扰,而16Hz~17Hz附近的频率成分经后期数据分析也非气弹模型的风振信号。

3.2 位移响应与风速的关系

图8中给出了三个典型风向下测点层L1处两个轴向平均位移响应随风速的变化。图中所给风速和位移值均已按表1中相似比换算至原型,且图中的响应值为同层左右两个测点代数平均后的结果(下文中如无特别说明,均指按此方式处理后数据)。由图8中可见:随风速增大,测点位移响应基本呈抛物线趋势逐渐增大,且风速越大,三风场下位移响应间的差距也越大;相同风速下,输电塔在冲击风1下产生的位移明显高于冲击风2下所产生的位移值,B类风场位移响应约处于两冲击风场之间;不同风速时,输电塔在冲击风场和B类风场下的位移响应变化规律基本一致。

3.3 位移响应与风向的关系

图9为不同风场下输电塔L1层位移响应随风向角的变化,图中同时给出三个典型风速下的结果。由图9可见,在风向角 $0^\circ\sim 90^\circ$ 变化过程中,输电塔x向位移响应整体上呈减小趋势,y向位移响应呈增大趋势;x向约在 15° 风向角、y向约在 60° 风向角分别存在响应极值,且风速越大,这一特征越显著。综

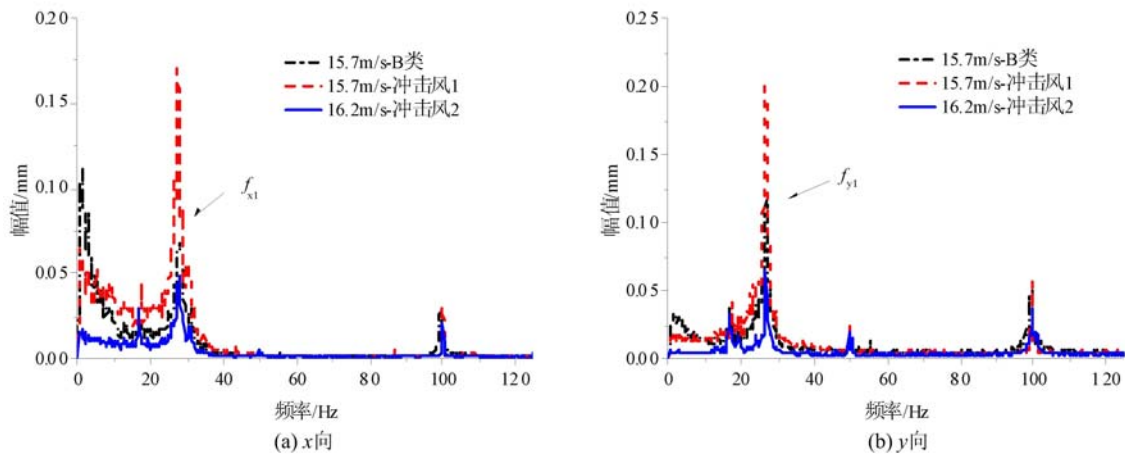


图 7 不同风场下 L1 测点位移谱($\beta=30^\circ$)

Fig. 7 Displacement spectrum of L1 under different wind field ($\beta=30^\circ$)

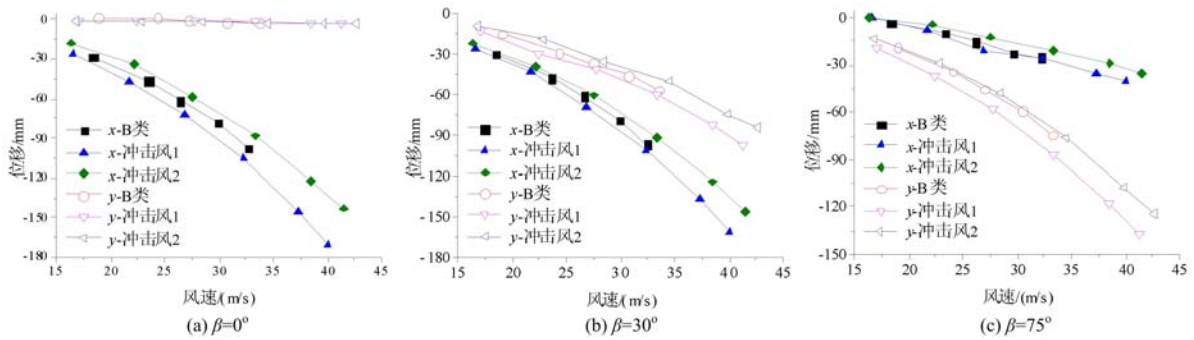


图 8 不同风速下 L1 测点位移响应

Fig. 8 Displacement response of L1 under different wind speed

合不同风向下位移响应来看, x 向位移响应要高于 y 向位移响应, 这主要与 x 向的投影面积较大有关。从响应随风向的变化规律看, 冲击风场与 B 类风场具有一定的相似性。

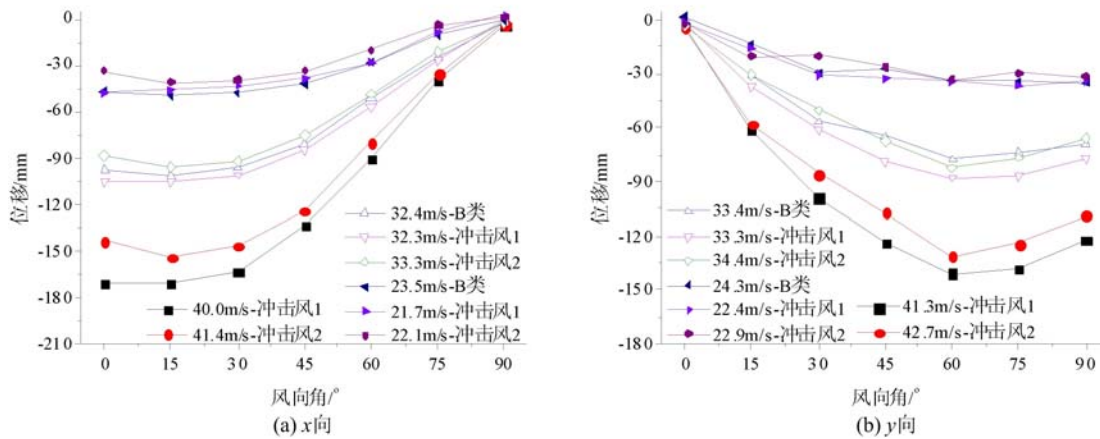


图 9 不同风向 L1 测点位移响应

Fig. 9 Displacement response of L1 in different wind direction

3.4 位移响应与高度的关系

图 10 给出了 30° 风向下不同高度处输电塔位移响应, 图中同时给出了三种典型风速的结果。由图 10 可见, 各风速区段内输电塔 x 、 y 向位移响应随高度增加均逐渐增大。其中 x 向不同高度的位移响应基本呈线性规律变化, y 向位移响应少许不同, 沿高度呈抛物线趋势变化, 且风速越大, 两轴向所表现出的这一规律性越显著。另外, 由图中可以看出, 塔顶位移随风速的增长率明显大于下部各测点的增长

率,尤其在 x 轴向。不过,从位移随高度和风速的变化趋势看,冲击风场与 B 类风场的位移响应规律区分度并不大。从数值来看,不同高度下冲击风 1 产生的位移响应整体上高于冲击风 2 下的响应,B 类风场不同高度下的响应基本上仍处于两类冲击风场间,且这一规律随风速和高度的增加越发明显。

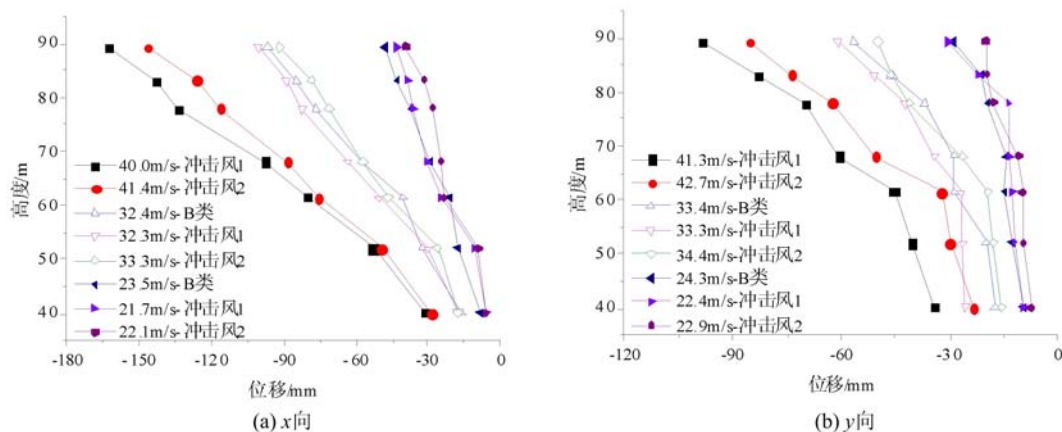


图 10 不同高度测点位移响应($\beta=30^\circ$)

Fig. 10 Displacement response at different heights ($\beta=30^\circ$)

4 理论风荷载及对输电塔的作用

将输电塔沿高度方向分为 14 个节段,并基于规范^[14]方法估算各段的体型系数,分别计算了 30° 风向角下 B 类剖面、Vicroy 剖面 ($z_{\max}=35\text{m}$ 、 $z_{\max}=70\text{m}$) 和 Wood 剖面 ($\delta=200\text{m}$ 、 $\delta=400\text{m}$) 的风荷载,各剖面 89.6m 高度内的最大风速均为 33m/s 时,如图 11 所示。由图 11 可见,虽然各风场的剖面形态不同,但输电塔中下部的风荷载要明显高于顶部,这主要与输电塔中下部的挡风面积大有关。输电塔横担以下高度,B 类和 Wood 剖面对应的风荷载基本沿高度递减,Vicroy 剖面由于底部风速偏小,导致风荷载沿高度先增大后再减小。在 ANSYS 中,将图 11 中的风荷载施加至本文输电塔的有限元模型中,计算了整体结构的变形,图 12 为不同高度下各风场的平均位移结果。由图 12 可见,输电塔在不同风剖面下的变形呈现出相似的变化规律,塔头处 B 类剖面的位移基本介于冲击风剖面间,这一结果与前文试验一致。不过,塔头的理论位移较试验结果偏小,这有可能是体型系数取值导致,但具体原因将在后续研究中进一步讨论。

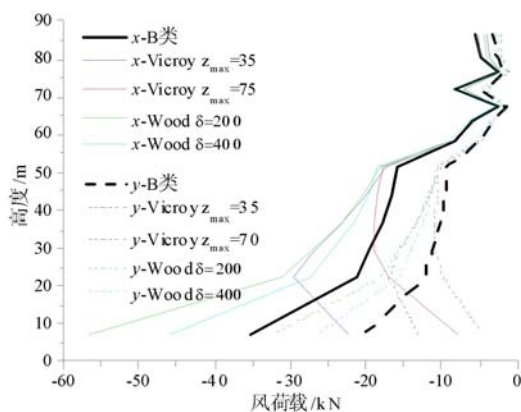


图 11 不同高度风荷载($\beta=30^\circ$)

Fig. 11 Wind loads at different heights($\beta=30^\circ$)

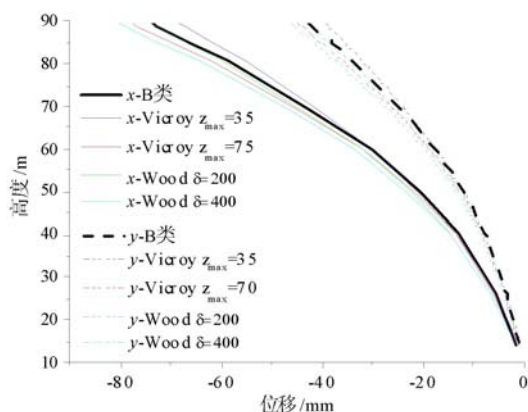


图 12 不同高度位移($\beta=30^\circ$)

Fig. 12 Displacement at different heights($\beta=30^\circ$)

5 结论

本文在常规边界层风洞中实现了大比例雷暴冲击风剖面的模拟,并以输电塔气弹模型为对象,对比分析了不同风场下输电塔的平均位移特性,主要结论有:

(1) 在常规边界层风洞中模拟了两类1:50大比例尺雷暴冲击风场,其最大风速位置分别处于输电塔塔头和塔身中部位置,且与雷暴冲击风理论剖面具有较好的吻合度。

(2) 冲击风场和常规边界层风场下,干字型输电塔的风振响应均以两个方向的一阶弯曲振型为主,扭转响应和高阶弯曲响应不显著。

(3) 随风速增加,三种风场下输电塔的位移响应呈抛物线逐渐增大,且不同风场位移响应间的差值也随之不断增大。最大风速处于塔头部位的冲击风1引起的位移响应明显高于最大风速处于塔身中部的冲击风2的响应值。随测点高度增加,输电塔的位移响应逐渐增大,且高度越高,位移随风速的增长率越高。

(4) 干字型输电塔 x 向和 y 向的位移响应极值分别出现在风向角 15° 和 60° ,且风场类型并不改变这一最不利的风向。B类风场的位移响应约介于两冲击风场间,且风速越大、测点高度越高,这一特征越明显。

应该指出的是,由于雷暴冲击风的湍流特性暂未有统一的理论值,本文也没有进行湍流剖面的模拟,所得结果和结论仅由输电塔平均位移响应得出,具有一定的局限性,如何考虑雷暴风的湍流特性及其对输电塔的影响是后续需要进一步研究的内容。

参考文献:

- [1] Dempsey D, White H. Winds wreak havoc on lines[J]. *Transmission and Distribution World*, 1996, 48(6):32-37.
- [2] 王昕,楼文娟,李宏男,等.雷暴冲击风作用下高耸输电塔风振响应[J].*浙江大学学报(工学版)*,2009,43(8):1520-1525(WANG Xin, LOU Wenjuan, LI Hongnan, et al. Wind-induced dynamic response of high-rise transmission tower under downburst wind load[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2009, 43(8):1520-1525 (in Chinese))
- [3] 楼文娟,王嘉伟,卢明,等.运动雷暴冲击风下输电线风载计算参数[J].*东南大学学报(自然科学版)*,2016,46(2):371-378(LOU Wenjuan, WANG Jiawei, LU Ming, et al. Wind load calculation parameter of transmission line in moving thunderstorm downburst[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2016, 46(2):371-378 (in Chinese))
- [4] Shehata A Y, EL Damatty A A. Behaviour of guyed transmission line structures under downburst wind loading[J]. *Wind and Structures*, 2007, 10(3):249-268.
- [5] Elawady A, EL Damatty A. Longitudinal force on transmission towers due to non-symmetric downburst conductor loads[J]. *Engineering Structures*, 2016, 127:206-226.
- [6] Mara T G, Hong H P, Lee C S, et al. Capacity of a transmission tower under downburst wind loading[J]. *Wind and Structures*, 2016, 22(1):65-87.
- [7] Yang S C, Hong H P. Nonlinear inelastic responses of transmission tower-line system under downburst wind[J]. *Engineering Structures*, 2016, 123(1):490-500.
- [8] 徐挺,陈勇,彭志伟,等.雷暴冲击风风洞设计及流场测试[J].*实验力学*,2009,24(6):505-512(XU Ting, CHEN Yong, PENG Zhiwei, et al. Wind tunnel design and steady flow field measurement for thunderstorm downburst experiment[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2009, 24(6):505-512 (in Chinese))
- [9] 赵杨,曹曙阳, Tamura Y, 等.雷暴冲击风模拟及其荷载的风洞试验研究[J].*振动与冲击*,2009,28(4):1-10(ZHAP Yang, CAO Shuyang, Tamura Y, et al. Study on the simulation of downburst and its loads by wind tunnel test[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(4):1-10 (in Chinese))
- [10] Elawady A, Aboshosha H, EL Damatty A, et al. Aeroelastic testing of multi-spanned transmission line subjected to downbursts[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2017, 169(1):194-216.

- [11] 段旻, 谢壮宁, 石碧青. 下击暴流风场的大气边界层风洞模拟研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(3):126—131 (DUAN Min, XIE Zhuangning, SHI Biqing. Experimental study on simulation of downburst in atmospheric boundary layer wind tunnel[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(3):126—131 (in Chinese))
- [12] Vicroy D D. Assessment of microburst models for downdraft estimation[J]. Journal of Aircraft, 1992, 29(6): 1043—1048.
- [13] Wood G S, Kwok K C S, Motteram N A, et al. Physical and numerical modelling of thunderstorm downbursts [J]. Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics, 2001, 89(6):535—552.
- [14] GB 50009—2012, 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012 (GB 50009—2012, Load code for the design of building structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012 (in Chinese))

Experimental investigation on dynamic response of transmission tower under downburst winds

LIU Mu-guang¹, HUANG Lin-ling¹, ZOU Yun-feng²

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. National Engineering Laboratory for High Speed Railway Construction, Changsha 410075, China)

Abstract: Based on self-developed experimental device, the simulation of large-scale steady state thunderstorm impact wind profile is realized in conventional boundary layer wind tunnel has been realized in this paper. Taking aeroelastic model of power transmission tower as study object, the average displacement characteristics of power transmission tower under different types of thunderstorm impact wind field are analyzed by using a non-contact displacement measuring instrument to measure the wind-induced vibration response of the model. The characteristics of wind-induced vibration are compared with those of conventional wind field category B. Experimental results show that the wind-induced vibration response of power transmission towers is mainly first-order bending mode along both directions, while torsional response and high-order bending response are not significant. With the increase of wind speed, the displacement response of power transmission tower increases parabolic type increase in different wind fields. The displacement response of power transmission tower caused by the maximum wind velocity at the head of the tower is significantly higher than that caused by the maximum wind velocity at the middle of tower. The response under category B is between two types of thunderstorm impact wind. In addition, the difference of displacement response under different wind fields is also increasing with the increase of wind speed.

Keywords: wind tunnel experiment; wind-induced response; aeroelastic model; thunderstorm impact wind; power transmission tower