文章编号:1674-2974(2021)11-0044-10

DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2021.11.005

钢管-角钢组合输电塔杆件体型系数及 背风面风荷载折减系数的风洞试验研究

牛华伟1*,刘淦彬1,杨风利2,张宏杰2

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100055)

摘要:对钢管-角钢组合输电塔一类的风敏感结构,其各杆件的体型系数及折减系数是 该结构抗风设计中重要的风荷载参数.以500 kV 和110 kV 输电塔为工程背景,首先设计缩尺 比分别为1:8.5 的塔身和1:2.5 横担刚性节段模型,然后在3个不同均匀来流风速及不同风 向角下进行同步测压风洞试验,得到角钢及钢管杆件的体型系数与背风面风荷载折减系数的 变化规律.并以此归纳了塔身和横担各杆件的体型系数分布及不同风向角下节段模型整体体 型系数,最后将试验确定的结果与国内外相关规范值进行比较.结果表明:来流风速对塔身和 横担中的角钢体型系数几乎无影响.在0°风向角下,塔身角钢体型系数沿塔身节段呈上小下 大的变化趋势.塔身杆件中的角钢折减系数与日本规范较吻合.在不同雷诺数下的塔身(3.10x 104~4.34×104)或横担(5.57×104~8.00×104)节段模型折减系数的差值很小.塔身和横担节段模型 阻力系数与日本规范较吻合,中国规范取值分别偏小7.2%和4.5%.

关键词:风洞试验;输电塔;塔身;横担;角钢;钢管;体型系数;遮挡效应 中图分类号:TM753;TU347 **文献标志码**:A

Wind Tunnel Tests on Shape Coefficient and Shielding Factor of Members for Tubular–angle Steel Transmission Tower

NIU Huawei^{1†}, LIU Ganbin¹, YANG Fengli², ZHANG Hongjie²

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100055, China)

Abstract: The shape coefficient and shielding factor of each member are important in the wind resistant design of the structure for wind sensitive structures such as tubular-angle steel transmission towers. Taking 500 kV and 110 kV transmission towers as the engineering background, the rigid section model of tower body with a scale ratio of 1 : 8.5 and cross-arm with a scale ratio of 1 : 2.5 are designed firstly. Then, through the wind tunnel tests on synchronous pressure measurement of the model under three different wind speeds and different wind incidence angles, the variation rules of shape coefficient and shielding factor of angle and steel pipe members are obtained. On this basis, the shape coefficient distribution of members in the tower body and cross-arm, and the shape coefficients of the section models under different wind incidence angles are summarized. Finally, the results determined by the test are compared with the relevant normative values at home and abroad. The results show that the incoming wind speed has

* 收稿日期:2020-10-11
 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478181), National Natural Science Foundation of China(51478181)
 作者简介:牛华伟(1978—), 男, 河南驻马店人, 湖南大学教授级高级工程师, 博士
 * 通信联系人, E-mail: niuhw@hnu.edu.cn

[†] 通信联系人,E-mail:niuhw@hnu.edu.cn

little effect on the shape coefficients of angles in tower body and cross-arm. The shape coefficients of angles in the tower body tend to be small at the top but large at the bottom along the section of tower body under 0° incidence angle. The shielding factors of angles in tower body are consistent with that in the Japanese code JEC. In the test, the difference of the shielding factors of tower body $(3.10 \times 10^4 \sim 4.34 \times 10^4)$ and cross-arm $(5.57 \times 10^4 \sim 8.00 \times 10^4)$ under different Reynolds number of main materials is very small. The drag coefficients of tower body and cross-arm are consistent with that in Japanese standard, whereas the values of Chinese standard are 7.2% and 4.5% lower, respectively.

Key words:wind tunnel test; lattice towers; tower body; cross-arm; angle members; steel pipe; shape coefficient; shielding effect

输电塔由于自身独特的结构,对风荷载极其敏 感,因此对于不同结构形式的输电塔风荷载计算和 参数运用是必不可少的.体型系数和背风面风荷载 折减系数是输电塔风荷载中的关键参数.近年来,钢 管-角钢组合输电塔的运用越来越广泛,而对钢管-角钢组合输电塔的风荷载研究却很少.

目前,国内外针对输电塔等格构式结构的风荷 载研究主要为测力[1和测压[2风洞试验. 孙远等[3通过 高频天平测力试验得到了不同湍流度下格构式塔架 的静力风和脉动风荷载. 楼文娟等14对角钢塔身节段 模型进行某一风速下的测压试验,获得了角钢杆件 和节段模型的体型系数,改进了 JEC 总计法的参数. 杨风利鸣通过测力试验分析,得到3个风速下两个角 钢横担节段模型阻力系数,发现风速对角钢横担的 阻力系数影响很小. Mara 和 Ho¹⁰采用横担与塔身组 合模型的测力试验,认为横担的气动特征较塔身复 杂,美国规范得到垂直于线路方向的风荷载较小.卞 荣等四通过不同的密实度、高宽比、湍流度的钢管塔 身节段模型和单片桁架模型的测力试验,得到了节 段模型体型系数和背风面风荷载折减系数.李正等[8] 对某一典型钢管-角钢组合塔身进行两个风速下 0°~ 90°风向角的测力试验,识别了不同风向角的阻力系 数. 杨风利等啊筛选出有代表性的角钢和双拼角钢并 对其进行不同间距比杆件遮挡测力试验,获得输电 塔角钢杆件在空风场下的阻力系数和背风面风荷载 折减系数,但是试验结果忽略了杆件及塔架整体的 三维扰流影响.

国外规范^[10-15]中除日本规范单独给出了横担结构的体型系数计算公式外,其他国家对于横担和塔身体型系数计算公式是相同的.中国规范^{[10}的体型系数计算公式主要通过背风面风荷载折减系数来体现,但是规范并未对角钢和钢管的折减系数进行区

分.杨风利等¹⁷⁷在塔身单片桁架测力试验中,发现角 钢和钢管-角钢组合塔身的折减系数试验值较规范 值低,钢管塔身的折减系数试验值与规范值较为接 近.钢管和角钢的体型系数区别较大,背风面风荷载 折减系数也有一定区别.国内外通过天平测力试验 研究输电塔的体型系数,只能测得整体结构的气动 力,无法获得杆件风荷载分布.对于高耸输电塔的杆 件,不同位置风荷载不同,断面较小时,安全富余度 不大,需准确计算风荷载.横担做测力试验时,需测 得塔身和横担总力,再扣除塔身所承担的力,两次试 验累计了更多误差.通过风洞测压试验研究塔身及 横担的单根杆件体型系数和背风面风荷载折减系数 时,杆件受到空间桁架节段中其他杆件的三维扰流 影响,试验结果更有参考意义和运用价值.

本研究以 500 kV 和 110 kV 钢管-角钢组合输 电塔为原型,考虑到钢管体型系数受雷诺数的影响, 分别取一段塔身和横担进行 3 个风速下的风洞测压 试验,获得 3 个风速下不同风向角的杆件体型系数 及其风荷载分布,计算得到杆件和节段模型的背风 面风荷载折减系数、单片桁架和节段模型的体型系 数,并与各国技术标准进行比较分析.试验结果可为 基于单根杆件到整体输电铁塔及其他高耸桁架结构 的风荷载精细化计算提供参考.

1 风洞试验

1.1 工程背景

塔身和横担原型分别取自某 500 kV 和 110 kV 高压钢管-角钢组合输电塔,其所处的区域均在海岸 线附近,风环境复杂,大风天数多.因此根据横担和 塔身的杆件特征,选取图 1 框中塔身和横担为试验 模型.



1.2 节段模型设计

为保证模型能牢固安装,满足阻塞比 5%等要求,设计塔身模型缩尺比为 1:8.5,横担模型缩尺比 为 1:2.5.由于测压孔直径的限制,角钢杆件的肢厚 很难按照比例缩尺,因此塔身和横担的角钢肢厚均 设为 4 mm.塔身缩尺后的钢管直径为 45 mm,角钢 肢宽为 24 mm,横担缩尺后的钢管直径为 80 mm,角 钢肢宽 18 mm.模型钢管和角钢分别用有机玻璃和 ABS 板制作而成.塔身和横担节段模型密实度分别 为 0.300 和 0.493,其钢管迎风投影面积占比分别为 56.8%和 87.0%.为消除风洞底部边界层的影响,模 型下部连接一个 20 cm 高的底座.整个模型装置安 装在风洞转盘上,转动转盘获取不同的风向角.节段 模型安装试验如图 2 所示.

由于塔身和横担都为双轴对称图形,测压点布 置在模型迎风面和背风面的各一半,侧面角钢不布 置测压点.角钢尺寸较小,考虑测压孔布置可行性, 每个角钢测压层截面布置 12 个测压孔.钢管测压层 截面一周均匀布置 20 个测压孔.当风向角为 0°时, 同一高度迎背风面的测压层是顺线向平行对应.横 担和塔身节段模型的测压层布置位置及测压层截面 测孔布置情况如图 3 所示,其中 GA、GB 和 JA~JH 为测压层,具体含义见表 1(相对应的迎背风面杆件 代号和编号一致).塔身共布置 352 个测压点.横担 共布置 376 个测压点.模型底部连接底板,测压管设 置在角钢和钢管内部,顺杆件传至底板下方,防止测 压管对杆件风荷载的影响.



(a)塔身



(b)横担 图 2 风洞试验照片 Fig.2 The photos of wind tunnel tests

表 1 输电塔角钢和钢管杆件编号 Tab.1 No. of steel pipe and angle members

杠件	塔身		横担		
1717 -	代号	测压层编号	代号 JHD1 JHD2 JHD3 JHD4 上主材	测压层编号	
角钢	JTS1	JA1 JA2	JHD1	JE1	
	JTS2	JB1 JB2	JHD2	JF1 JF2	
	JTS3	JC1 JC2	JHD3	JG1 JG2 JG3	
	JTS4	JD1 JD2	JHD4	JH1 JH2 JH3	
钢管	YTS1	GA1,GA2	上主材	GB1\GB2\GB3	
	YTS2	GA3 GA4	下主材	GB4	





Fig.3 Layout of pressure measuring points of section model

试验在中南大学风洞试验室高速试验段中进行,风洞宽3m,高3m,长15m.测试风场为均匀流场,湍流度不超过0.2%.测压仪器为PSI扫描阀,用澳大利亚TFI公司的三维眼镜蛇探针测来流风速.风向角正对模型TD1、TD4面时,阻塞比均小于5%.塔身节段模型试验风速为10.0m/s、12.5m/s、15.0m/s,横担节段模型试验风速为10.1m/s、12.6m/s、14.5m/s,两者的主材雷诺数都处于亚临界区间.试验风向角为0°~90°,每隔5°转一个风向角.

1.3 数据处理

每个测压点的风压系数:

$$C_{\rm p}(i) = \frac{p(i) - p_{\rm r}}{0.5 m_{\star}^2} \tag{1}$$

式中:i 为测压点编号; $C_{p}(i)$ 为第i 个测压点的风压 系数;p(i)为i 点处的风压; p_{r} 为参考点风压; ρ 为来 流空气密度; v_{r} 参考点风速.

角钢和圆管每个测压层可以采用表面积分法得 到风轴下体型系数,计算公式为:

$$C_{\rm D} = \frac{\sum_{i} d_i C_{\rm p}(i) \cos \alpha_i \cos \beta_i}{d}$$
(2)

$$C_{\rm L} = \frac{\sum_{i}^{n} d_i C_{\rm p}(i) \cos \alpha_i \cos \beta_i}{d}$$
(3)

式中: $C_{\rm D}$ 为测压层风轴下的阻力系数; $C_{\rm L}$ 为测压层 风轴下的升力系数. d_i 为测点i所占的计算长度;d为测压层一周的计算长度;n为测压层的测压点数; $C_{\rm p}(i)$ 为测压层第i个测压点的风压系数; α_i 为测压 点所在杆件面的法线的水平投影与来流反向的夹 角; β_i 为测压点所在杆件面的法线与水平面的夹角.

2 体型系数分析

2.1 角钢杆件体型系数与风速

限于篇幅,取塔身与横担各 2 个角钢测压层,其 体型系数随风向角的变化曲线分别如图 4 和图 5 所 示.由图 4、图 5 可知,同一角钢测压层 3 个风速下的 体型系数随风向角的变化曲线几乎重合,来流风速 变化对输电塔中角钢的阻力系数和升力系数几乎无 影响,此结论验证了杨风利等¹⁰的结论.在背风面,由 于迎风面杆件的干扰造成来流湍流度更大,此时不 同风速体型系数随风向角的变化曲线也几乎重合. 同一杆件的不同测压层的体型系数随风向角的变化 曲线基本一致.同一风向角的不同测压层体型系数 基本重合,表明体型系数沿角钢杆件的分布比较均 匀,其中塔身曲线重合度更高.



Fig.4 Variation curves of the shape coefficient with wind incidence angles under three wind speeds for the same angle of tower body with different pressure measuring sections



Fig.5 Variation curves of the shape coefficient with wind incidence angles under three wind speeds for the same angle of cross-arm with different pressure measuring sections

2.2 角钢杆件体型系数与风向角

同个角钢的不同风速下的不同测压层的体型系数变化曲线基本一致,因此把同个角钢的不同测压 层不同风速的体型系数进行平均,得到单根角钢 杆件的体型系数随风向角变化曲线,如图 6 和图 7 所示.





图 6 角钢迎风面体型系数随风向角变化曲线 Fig.6 Variation curves of the shape coefficient of windward side of angle with wind incidence angles



由图 6 和图 7 可知,无论在塔身还是横担中,角 钢 L 型朝向的不同,造成体型系数随风向角的变化 趋势不同,体型系数主要有两种变化趋势.塔身和横 担中的角钢摆放角度相似的,其体型系数随风向角 变化曲线也是相似的.塔身的角钢空间位置更加相 似,其变化趋势也更相近.当风向角在 10°左右时,塔 身和横担角钢的迎风面阻力系数和背风面升力系数 都处于较大值.

表 2 为 0°风向角的横担和塔身的角钢体型系数.迎风面的塔身角钢阻力系数均值为 1.77,横担角钢阻力系数均值为 2.05,相对于 ASCE 和 AS 规范的 2.0 规范值,分别相差-11.5%和 2.5%,与杨风利等^[9]试验提出 1.93 的推荐值,分别相差-8.3%和 6.2%.塔身角钢阻力系数较小,由于其长细较小,有末端效应^[14]. ASCE 规范提出 0.3 的升力系数规范值,试验中只有 JHD3 的升力系数为 0.3,其他角钢升力系数 均在 0.1 左右.

表 2 0°风向角下塔身和横担中的各角钢体型系数 Tab.2 Shape coefficients of angles in tower body and cross-arm under 0° incidence angle

体型 系数	杆件 _ 编号	杆件位置				
		塔身	塔身	横担	横担	
		迎风面	背风面	迎风面	背风面	
阻力 系数	1	1.91	1.20	1.90	0.70	
	2	1.83	1.19	2.11	1.40	
	3	1.73	1.23	2.24	1.68	
	4	1.62	1.04	1.98	1.13	
升力 系数	1	0.09	1.65	-0.11	-1.33	
	2	-0.05	-1.64	0.08	1.91	
	3	-0.12	-1.72	-0.31	-2.30	
	4	0.15	1.44	0.02	1.51	

2.3 钢管杆件体型系数与风速、风向角

钢管杆件阻力系数随风向角的变化曲线如图 8 所示,图例的 V₁、V₂和 V₃代表试验从小到大的 3 个 来流风速.在 0°风向角下,塔身和横担的迎风面的钢 管阻力系数分别处于 0.97~1.13 和 0.90~1.05 之间, 小于单圆柱阻力系数规范取值¹⁴⁴的 1.2.不同风速下 迎风面的塔身和横担钢管测压层阻力系数曲线较为 集中,而背风面测压层的阻力系数曲线较为分散.这 主要是由于迎风面钢管几乎只有雷诺数不同,而对 于背风面钢管,来流受迎风面杆件干扰造成其湍流 度也不同,因此不同风速的阻力系数曲线较为分散.

塔身钢管近似垂直于地面,当风向角大于 80°, 迎风面钢管被其他杆件遮挡,阻力系数不断减小.横 担钢管由于倾斜角较大,当风向角由 0°增加到 90° 时,测压层受到自身钢管和其他杆件的影响,阻力系 数越来越小.



2.4 迎背风面钢管与串列双圆柱的阻力系数对比

对于钢管--角钢组合输电塔结构,在0°风向角时,来流经过迎背风面的两根钢管,此时钢管类似串列双圆柱绕流.塔身和横担钢管与铅垂面有2°~3°夹角,因此不同高度的迎背风面钢管测压层的间距不同.将本试验结果与国内外的串列双圆柱绕流试验结果进行对比,如图9所示,其中横坐标 s 为相对应的迎背风面测压层圆心间距和直径的比值,图例的塔身或横担雷诺数指的是塔身或横担的钢管处于该雷诺数下得到的试验值.实心和空心图例分别代表上、下游圆柱.





Fig.9 Drag coefficients of windward and leeward side of steel pipe under 0° incidence angle 郭明旻^[18]和杨群等^[19]通过均匀流中的测压试验 得到参考文献数值,Alam等^[20]通过测力试验得到参 考文献值. 横担和塔身钢管上游的阻力系数处于 0.90~1.13之间,与杨群等的结果较为接近. 横担钢 管下游的阻力系数在 0.25~0.45 之间,都处于参考文 献的试验值范围内. 塔身钢管下游阻力系数处于 0.39~0.57 之间,比杨群等的试验值(0.38~0.43)稍大.

2.5 节段模型体型系数

为了解钢管-角钢组合输电塔整个塔段的风荷 载分布规律,将0°风向角下的钢管和角钢各测压层 的体型系数绘制到塔身和横担节段立面图上,取最 大风速下的杆件体型系数,如图 10 和图 11 所示.

由图 10 可看到:1)总体上,角钢(斜材)阻力系数约为钢管(主材)阻力系数的两倍;2)阻力系数在迎背风面钢管沿杆件展长的分布趋势不同,在迎风面呈上小下大分布,在背风面呈中间大两端小分布; 3)角钢的体型系数在迎背风面节段都呈上小下大的变化趋势,造成该现象的原因可能是由于输电塔塔身立面呈梯形,在下部的角钢杆件长细比比上部的角钢大;4)角钢的迎风面升力系数几乎为0,而背风面升力系数极大.背风面角钢L型内角迎风,出现局部兜风效应^[2],此时其升力和阻力系数均较大.







Fig.11 Distribution of the shape coefficients of each member in cross-arm under 0° incidence angle

由图 11 可知:1)横担迎风面钢管阻力系数分布 规律与塔身相同,都为沿杆件呈上小下大分布,但在 背风面钢管则呈上大下小分布;2)横担的钢管直径 与角钢肢宽相差较大,由于钢管对来流风的遮挡,对 邻近的角钢来流起到了一定的削弱作用,因此靠近 横担整体形心(对于一侧横担)位置的角钢体型系数 较大,而靠近钢管位置的角钢体型系数较小;3)与塔 身相似,横担背风面角钢也有局部兜风效应.

将各个杆件体型系数取杆件迎风面积的加权平 均值作为整体节段的体型系数.由于结构轮廓变化 较大的部位,如杆件连接处,往往很难布置测点,测 压结果忽视了该部分的风荷载信息,因此该均值相 较于真实值有误差.表3为0°风向角下节段模型在 最大风速中的阻力系数值国内外规范值的对比情况. 美国、日本规范值与塔身试验值较吻合,而且日本规 范值与横担试验值也较吻合.对于塔身规范值,除日 本和美国规范外,其他规范值在1.95~1.99之间,差 值均为-7%左右.对于横担规范值,除日本规范外, 其他规范差值均在-5%~-8%之间.除日本的其他规 范值,相对于塔身和横担的试验值都偏不安全各国 家和地区.

表 3 0°风向角下节段模型阻力系数与不同规范值对比 Tab.3 Comparison of drag coefficients of section

models under 0° incidence angle with

some standard values

取值依据	塔身	与试验差值/%	横担	与试验差值/%
试验	2.11	0.00	1.57	0.00
日本 JEC	2.08	-1.44	1.58	0.64
英国 BS	1.97	-6.64	1.44	-8.28
美国 ASCE	2.07	-2.12	1.49	-5.10
国际 IEC	1.95	-7.58	1.43	-8.92
澳洲 AS	1.99	-7.56	1.46	-7.01
欧洲 EN	1.96	-7.58	1.48	-5.84
中国 DL/T	1.95	-7.18	1.50	-4.46

3 背风面风荷载折减系数与不同规范对比

3.1 角钢杆件背风面风荷载折减系数

图 12 为本试验角钢背风面风荷载折减系数和

参考文献值的对比情况.0°风向角下单根杆件背风 面三风速的阻力系数均值与迎风面阻力系数均值的 的比值为角钢背风面风荷载折减系数.角钢遮挡距 离与迎风面杆件宽度(肢宽)的比值为s.杨风利等^[9] 和 Prud'homme 等^[21]的杆件背风面风荷载折减系数 都是通过测力试验获得.塔身角钢折减系数与参考 文献都较为吻合,其中杨的最为接近,主要原因是杨 的迎背风面角钢的 L 型朝向角度与输电塔中的相 同,而 Prud'homme 等是角钢不同 L 型朝向角度曲线 再拟合的.横担角钢折减系数比较分散,远离横担形 心(横担的一侧)的最外两根角钢(JHD1 和 JHD4)折 减系数比参考文献值偏小,比 JEC 分别偏小 16.1% 和 42.0%.



3.2 钢管杆件背风面风荷载折减系数

计算 0°风向角迎背风面输电塔钢管测压层阻力 系数的比值,获得钢管背风面风荷载折减系数,如图 13 所示,其中 *s*为对应的迎背风面测压层圆心间距 和直径的比值.由图 13 可知,试验值均在参考文献 范围内.无论在塔身还是横担中,*s*相近的钢管折减 系数差值较大,图中试验值斜率均大于参考文献值 斜率.塔身钢管折减系数比 JEC 规范值偏小,横担靠 下部的钢管折减系数与 JEC 较吻合.类似参考的 3 种雷诺数下折减系数在亚临界区间,同一*s*下,钢管 折减系数均随雷诺数的增大而减小.

3.3 节段模型背风面风荷载折减系数

表 4 为不同雷诺数下 0°风向角塔身和横担的迎 背风面单片桁架阻力系数和背风面风荷载折减系 数,并与不同规范值的对比情况.



Fig.13 The shielding factors of steel pipe members in tower body and cross-arm

表 4 0°风向角塔身和横担节段模型不同 雷诺数下背风面风荷载折减系数

Tab.4 The shielding factors of tower body and cross-arm section models with different Reynolds numbers under 0° incidence angle

取值 依据	雷诺数/ (×10⁴)	迎风面 阻力系数	背风面 阻力系数	背风面 风荷载 折减系数	阻力 系数
塔身 试验	3.10	1.36	0.79	0.58	2.15
	3.88	1.33	0.76	0.57	2.08
	4.34	1.35	0.76	0.56	2.11
DL/T	Ш.	1.15	0.80	0.69	1.95
JEC	临	1.26	0.82	0.65	2.08
BS	界	1.35	0.62	0.46	1.97
横担 试验	5.57	1.11	0.51	0.46	1.63
	6.95	1.10	0.49	0.45	1.59
	8.00	1.09	0.48	0.44	1.57
DL/T	Ш.	1.08	0.42	0.39	1.50
JEC	临	1.02	0.56	0.55	1.58
BS	界	1.18	0.26	0.22	1.44

由表4可知,不同雷诺数下(本试验中)的单片 桁架阻力系数和节段模型背风面风荷载折减系数的 差值很小,节段模型的阻力系数也相差不大.塔身和 横担的中国规范折减系数与试验值分别相差19.0% 和-13.3%.日本规范(JEC)的折减系数较试验值大, 而英国规范(BS)的折减系数较试验值小.英国规范 的塔身单片桁架迎风面阻力系数和中国规范(DL/T)的横担单片桁架迎风面阻力系数都与试验值较为吻合.

4 结 论

通过对钢管-角钢组合塔身和横担节段模型进 行风洞测压试验,获得了3个风速下塔身和横担迎 背风面不同风向角下的角钢和钢管杆件体型系数, 分析了单根杆件和节段模型的背风面风荷载折减系 数,得到如下结论:

1)均匀流场下,来流风速对塔身和横担中的角 钢体型系数几乎无影响.0°风向角下,塔身和横担中 的角钢迎风面阻力系数均值分别为1.77和2.05,与 ASCE和AS规范值的2.0,分别相差-11.5%和2.5%. 均匀流场雷诺数处于亚临界区间,风向角为0°时,塔 身和横担中的钢管迎风面阻力系数分别处于0.97~ 1.13和0.90~1.05之间.

2)在 0°风向角下,塔身角钢体型系数沿塔身节 段呈上小下大变化.

3)0°风向角下塔身和横担节段模型阻力系数与 日本规范取值吻合,本国规范取值分别偏小7.2%和 4.5%.

4) 塔身中的角钢背风面风荷载折减系数与 JEC 较吻合,远离横担(一侧)形心的角钢折减系数较 JEC 分别小 16.1%和 42.0%.

5)在不同雷诺数下,塔身(3.10×10⁴~4.34×10⁴)或 横担(5.57×10⁴~8.00×10⁴)节段模型背风面风荷载折 减系数的差值很小,阻力系数也相差不大.

参考文献

ZOU L H, LI F, LIANG S G, *et al.* Study on spatial correlation of along-wind fluctuating wind load of lattice tower[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46 (7):96–103. (In Chinese)

[2] 楼文娟,王东,沈国辉,等.角钢输电塔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)

- [3] 孙远,马人乐,邱旭. 三边形桅杆杆身风荷载特性风洞试验研究
 [J]. 湖南大学学报(自然科学版),2017,44(1):39-46.
 SUN Y,MA R L,QIU X. Wind tunnel investigation on wind load characteristics of triangular guyed mast [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2017,44(1):39-46. (In Chinese)
- [4] 楼文娟,梁洪超,卞荣.基于杆件荷载的角钢输电塔风荷载体型
 系数计算[J].浙江大学学报(工学版),2018,52(9):1631-1637.

LOU W J,LIANG H C,BIAN R. Apply member loads to calculate wind load shape coefficient of angle-made-transmission tower[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2018,52 (9):1631—1637. (In Chinese)

- [5] 杨风利. 角钢输电铁塔横担角度风荷载系数取值研究 [J]. 工程 力学,2017,34(4):150—159.
 YANG F L. Study on skewed wind load factor on cross-arms of angle steel transmission towers under skewed wind [J]. Engineering Mechanics,2017,34(4):150—159. (In Chinese)
- [6] MARA T G, HO T C E. Design loads for transmission towers under skewed wind loading[C]//Structures Congress 2011. Las Vegas, NV: American Society of Civil Engineers, 2011:1246—1257.
- [7] 卞荣,楼文娟,李航,等.不同流场下钢管输电塔塔身气动力特性[J].浙江大学学报(工学版),2019,53(5):910—916.
 BIAN R,LOU W J,LI H,*et al.* Aerodynamic characteristics of steel tubular transmission tower in different flow fields [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2019,53(5):910—916. (In Chinese)
- [8] 李正,杨风利,牛华伟,等.钢管-角钢组合输电铁塔塔身风洞试验研究[J].钢结构,2018,33(5):70-75.
 LIZ,YANG FL,NIU HW, et al. Wind tunnel test on a tubular-angle steel transmission tower body [J]. Steel Construction, 2018, 33 (5):70-75. (In Chinese)
- [9] 杨风利,黄国,牛华伟,等. 输电塔角钢杆件阻力系数及背风面 遮挡效应研究[J]. 土木工程学报,2019,52(11):25—36.
 YANG F L,HUANG G,NIU H W,*et al.* Study on drag coefficients and shielding effects of angle members in lattice transmission towers
 [J]. China Civil Engineering Journal,2019,52 (11):25—36. (In Chinese)
- [10] Guidelines for electrical transmission line structural loading: ASCE NO.74 [S]. Reston: American Society of Civil Engineers, 2010: 33-36.

- [11] Design criteria of overhead transmission lines: IEC 60826 [S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2003: 30-34.
- [12] Design standards on structures for transmissions: JEC -127—1979
 [S]. Tokyo: Japanese Electrotechnical Committee, 1979: 39—50.
- [13] Structural design actions-Part: Wind actions: AS/NZS 1170.2 [S]. Sydney: Join Technical Committee BD-006, 2002; 79-81.
- [14] Eurocode 1:Actions on strucures-part-1-4:General actions-Wind actions:EN 1991-1-4:2005 [S]. Brussels:European Standard, 2005:79-84.
- [15] Lattice tower and masts-Part1: Code of practice for loading: BS-8100 [S]. London: British Standards Institution, 2005:21-29.
- [16] 架空输电线路杆塔结构设计技术规定:DL/T 5154—2012[S].北 京:中国电力出版社,2012:20—21. Technical code for the design of tower and pole structures of overhead transmission line:DL/T 5154—2012[S]. Beijing:China Electric Power Press,2012:20—21.(In Chinese)
- [17] 杨风利,张宏杰,杨靖波,等. 高压输电铁塔塔身背风面风荷载 遮挡效应研究[J]. 振动工程学报,2016,29(2):276-283.
 YANG F L,ZHANG H J,YANG J B,*et al.* Shielding effects on the leeward side of high voltage transmission tower bodies under wind load[J]. Journal of Vibration Engineering,2016,29(2):276-283. (In Chinese)
- [18] 郭明旻. 双圆柱表面压力分布的同步测量及脉动气动力特性
 [D]. 上海:复旦大学,2005:58-60.
 GUO M M. Simultaneous measurement of pressure distribution on two cylinders and characteristics of pulsating aerodynamic force
 [D]. Shanghai:Fudan University,2005:58-60. (In Chinese)
- [19] 杨群,刘庆宽,刘小兵. 串列三圆柱绕流的时均压力分布与气动 力[J]. 振动·测试与诊断, 2019, 39(5): 1011—1015. YANG Q,LIU Q K,LIU X B. Time averaged pressure distribution and aerodynamic force of flow around three circular cylinders in tandem arrangement[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(5): 1011—1015. (In Chinese)
- [20] ALAM M M,MORIVA M,TAKAI K, et al. Fluctuating fluid forces acting on two circular cylinders in a tandem arrangement at a subcritical Reynolds number[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(1/2):139-154.
- [21] PRUD'HOMME S, LEGERON F, LANEVILLE A, et al. Wind forces on single and shielded angle members in lattice structures [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 124: 20-28.