

角度风作用下输电塔塔腿子结构风荷载风洞试验

胡晓依, 张德凯, 宋雪祺, 邓洪洲

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 完成了不同风速下 2 个典型特高压直流(UHVDC)输电塔角钢及钢管塔腿模型的高频测力天平(HFFB)风洞试验,研究了塔腿在斜风作用下气动系数、角度风系数以及风荷载分配系数的分布规律,并与各国规范计算值进行了对比分析。分别构造了角度风系数以及考虑横向升力影响的夹角 α 的非线性函数形式,并通过试验值拟合分析确定了相关的拟合参数。结果表明:阻力系数、合力系数以及角度风系数均呈 M 型分布。角钢塔腿气动系数均大于对应风向角下钢管塔腿的气动系数,而两者角度风系数总体比较接近。各国规范计算值整体上低估了塔腿的角度风系数。角钢塔腿中风荷载分配系数的计算应利用考虑横向升力的夹角 α 对角度风系数进行三角变换。提出的拟合公式可为工程设计提供参考。

关键词: 输电塔;风荷载;风洞实验;塔腿;角度风系数;荷载分配系数

中图分类号: TU312.1

文献标志码: A

Wind Tunnel Test for Wind Loads of Transmission Tower Leg in Skew Wind

HU Xiaoyi, ZHANG Dekai, SONG Xueqi, DENG Hongzhou

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Wind tunnel tests with a high frequency force balance (HFFB) for the steel tubular and angle-steel tower leg models of two typical ultra-high voltage direct-current (UHVDC) transmission towers were completed at different wind velocities. The characteristics of the aerodynamic coefficients, the skewed wind load factors, and the wind load distribution factors were studied and compared with the calculation values from different standards. The nonlinear function of the skewed wind load factor and the angle α considering the transversal lift force

were constructed and the fitting parameters were also determined via the fitting analysis of the experimental values, respectively. The results show that the drag coefficient, the resultant coefficient, and the skewed wind load factor are all M-shaped distribution in skew wind. The aerodynamic coefficients of the angle-steel tower leg model are always larger than those of the steel tubular tower leg model, while the skewed wind load factors of both are generally close. Compared with the calculation values from different codes, the skewed wind load factors are underestimated at almost yaw angles. In the calculation of the wind load distribution factors in the angle-steel tower leg, the skewed wind load factor should be triangulated by using the angle α rather than the yaw angle θ . The fitting formulas proposed in this paper can be used to provide references for engineering designs.

Key words: transmission tower; wind load; wind tunnel test; tower leg; skewed wind load factor; wind load distribution factor

特高压直流输电线路由于其传输距离远、使用年限长而多用于全国各地的电力输送工程中。对于输电塔这一典型的高耸结构而言,风荷载一直是主要控制性荷载。近些年由于大风活动导致的输电塔破坏倒塌事件时有发生,甚至导致电力系统面临区域性瘫痪的风险^[1]。为确保输电线路的安全可靠,进行精细化风荷载研究具有重要意义。

输电塔节段按结构型式通常可分为塔身和横担这 2 类基本节段。目前对于输电塔横担节段风荷载特性的研究可通过间接测力试验^[2]或直接测力试验^[3]进行。而关于塔身节段的研究也有学者进行了研究,但目前针对如最不利风向角等的研究结论仍

收稿日期: 2021-06-09

基金项目: 国家自然科学基金(51578421)

第一作者: 胡晓依(1970—),女,讲师,工学博士,主要研究方向为高耸结构抗风及土木工程施工技术。

E-mail: 91118@tongji.edu.cn

通信作者: 张德凯(1996—),男,博士生,主要研究方向为高耸结构抗风及钢结构设计。

E-mail: 1810721@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

存在一定争议。楼文娟等^[4]通过大比例角钢塔身刚性模型的同步测压风洞试验归纳了体型系数随风向角的变化规律,认为中国规范对于角钢格构式塔架体型系数取值偏小不利于输电塔抗风设计,同时结果也表明塔身节段最不利风向角为 15° 和 75° 。Zhou等^[5]通过多天平同步测力试验获得了2段钢管输电塔塔身的气动力特性,发现塔身节段最不利风向角为 30° 和 60° ,并且规范计算值低估了约10%的风荷载,这会对输电塔设计产生较大威胁。杨振宇等^[6]采用薄壁钢管刚性塔身模型在均匀流场中进行了风洞试验,结果表明塔身最不利风向角为 15° 和 75° ,且中国规范高估了 45° 风向角下的风荷载。Zhang等^[7]细分了塔身节段的组成并开展了风洞试验以及CFD(Computational Fluid Dynamics)数值模拟,获得了不同形状钢管塔身模型的阻力系数、升力系数以及角度风系数,结果表明X型和V型塔身的最不利风向角为 30° 和 60° ,而K型塔身最不利风向角为 40° 和 50° ,同时发现不同角度风下阻力系数被明显低估。尽管各国规范均规定了基于挡风系数的阻力系数计算方法,但这些规定均是基于规则布置的方形单斜材桁架试验结果,对于输电塔中杆件数量多、分布相对复杂的节段如塔腿和塔头节段的适用性有待研究。同时,在目前塔身节段研究中选取的均是形状规则、质量分布均匀的中上部塔身节段,而对于复杂造型的塔腿节段未进行过风荷载研究。由于塔腿节段内构件分布的稀疏性从而导致塔腿挡风系数明显低于塔身节段的挡风系数,因此若仍利用塔身的计算公式对塔腿进行风荷载计算显然较为粗糙。

目前规范中关于斜风荷载的计算方法并不统一。中国规范^[8]和日本规范^[9]在计算斜风荷载时给出了风荷载分配系数的概念,并分别给定一些特殊风向角下风荷载分配因子的推荐值。ASCE规范^[10]给出了可直接计算风荷载分配系数的计算公式。与此相对,IEC规范^[11]、欧洲规范^[12]和澳大利亚规范^[13]则以角度风系数形式进行斜风荷载计算。角度风系数与风荷载分配系数是针对不同的坐标系而言的,两者可利用夹角 α 进行三角分解换算。尽管除日本规范^[9]外其余规范均忽视了横向升力的影响从而规定夹角 α 可以被风向角 θ 近似代替,但该结论是否适用于钢管塔腿以及角钢塔腿仍需要进一步研究。

本文以典型特高压直流输电塔为工程背景,分别选取制作了角钢及钢管输电塔塔腿刚性缩尺模型。在不同入射风风速及不同风向角的工况下进行了多组风洞试验,获得了角钢及钢管塔腿的气动力

系数,给出了最不利风向角信息。通过角度风系数试验值与规范计算值的比较分析进一步给出更准确的角度风系数非线性拟合公式与拟合参数建议值。分析了规范中风荷载分配系数求解方法对于角钢及钢管塔腿的适用性,并提出夹角 α 的拟合公式以完善风荷载分配系数的计算。

1 风洞试验设计

1.1 测试模型

风洞试验是研究格构式结构风荷载特性的有力研究方法^[4-7]。分别以 $\pm 1100\text{kV}$ 特高压直流角钢输电塔和 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流钢管输电塔为原型设计制作了缩尺的角钢及钢管塔腿模型,几何尺寸分别如图1a和1b。由于钢管及角钢构件本身的尺寸差异以及为避免由于模型的投影面积和重量大幅增加可能导致的高频测力天平过载问题,在设计模型缩尺比时将钢管塔腿模型的缩尺比设计得较小是比较合理的。角钢塔腿模型的缩尺比为1:30,最大杆件尺寸为 $L18\text{mm} \times 1.8\text{mm}$,最小杆件尺寸为 $L4\text{mm} \times 0.3\text{mm}$;钢管塔腿模型的缩尺比为1:45,最大杆件尺寸为 $\Phi 25\text{mm} \times 0.8\text{mm}$,最小杆件尺寸为 $\Phi 9\text{mm} \times 0.2\text{mm}$ 。塔腿模型的试验图如图2。

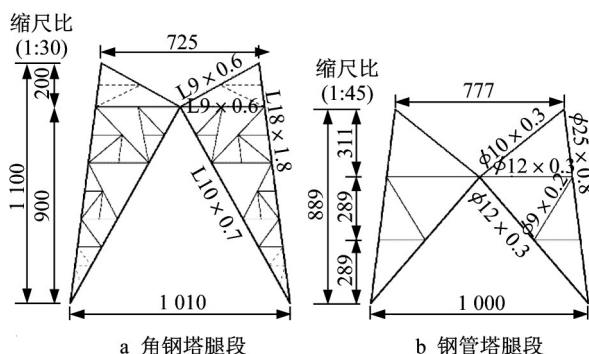


图1 塔腿模型尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Dimensions of tower leg models (unit:mm)

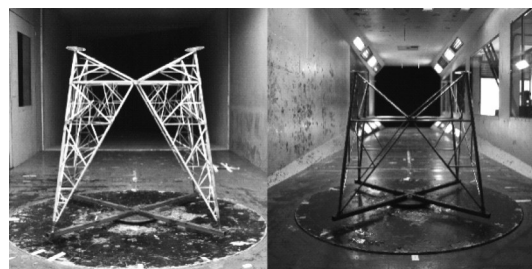


图2 塔腿模型实拍

Fig. 2 Photographs of tower leg models in wind tunnel

1.2 测试环境及工况

高频测力天平(HFFB)试验在同济大学TJ-2风洞进行,试验段全长15m,横截面宽3.0m,高2.5m。模型转盘的中心点位于风洞的对称轴上,直径为1.85m,距来流入口处11.5m。整个试验过程中,固定风入射方向不变,通过转盘与模型的同步旋转模拟各风向角作用下塔腿模型所受风荷载的工况。本次所有试验均在均匀流风场下进行,均匀流场的速度不均匀性小于1%。风向角分别为0°、5°、10°、15°、20°、30°、40°、45°、50°、60°、70°、75°、80°、85°、90°,各模型的风速信息汇总于表1,采样频率设置为300Hz。

表1 试验工况

Tab. 1 Experimental cases

塔腿类型	风速(m·s ⁻¹)
角钢塔腿	10
	13
	10
钢管塔腿	15
	15
	20

2 坐标系及相关参数定义

2.1 坐标系定义

风轴坐标系与体轴坐标系的定义在图3中给出。其中, OXY坐标系是用来描述试验模型方向的体轴坐标系,整个坐标系与模型保持相同的转动,坐标原点固定在模型底部中心处。X轴和Y轴的正向分别代表了风向角为0°和90°时入射风方向。与此相应, ODL坐标系是用来描述入射风方向的风轴坐标系,在整个试验过程中恒定不变,坐标原点与OXY坐标系的坐标原点重合。D轴正向表示顺风向,而L轴正向表示横风向。风向角 θ 定义为X轴与D轴之间的夹角($\theta \leq 90^\circ$),该定义与中国规范规定相同。角度 α 为气动力 F_D 与合力 F_R 的夹角。

2.2 气动力系数定义

根据图3所示的坐标系定义方式,阻力 F_D 及升力 F_L 可由HFFB直接测得的气动力 F_X 及 F_Y 通过三角变换获得:

$$\begin{cases} F_{D\theta} = F_{X\theta} \cos \theta - F_{Y\theta} \sin \theta \\ F_{L\theta} = F_{X\theta} \sin \theta + F_{Y\theta} \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ 为风向角,即模型与入射风的夹角。进而可推导合力 F_R 的计算式为:

$$F_{R\theta} = \sqrt{F_{X\theta}^2 + F_{Y\theta}^2} = \sqrt{F_{D\theta}^2 + F_{L\theta}^2} \quad (2)$$

上述各气动力的量纲一化量,即气动力系数,可按照式(3)计算:

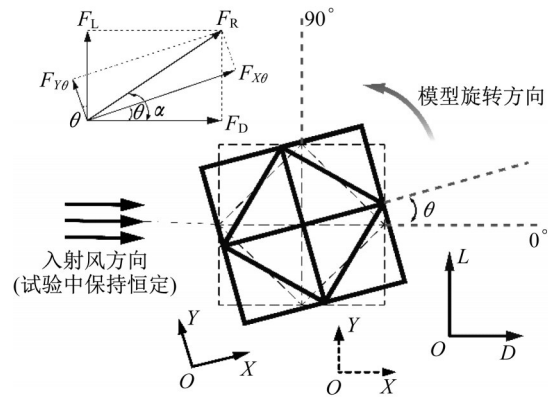


图3 坐标系示意

Fig. 3 Diagram of coordinate systems

$$C_i(\theta) = F_{i\theta} / (0.5 \rho A U^2) \quad (3)$$

式中: $F_{i\theta}$ ($i=X, Y, D, L, R$)为风向角为 θ 时的气动力; ρ 为空气密度,取值为 $1.225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; U 为入射风的风速,单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; A 为风向角为0°时的塔腿投影面积。

2.3 角度风系数与风荷载分配系数定义

以往的研究均证实,角度风对于输电线路的影响需要特别重视^[4-7]。本文采用量纲一化的角度风系数 K_θ 以定量研究角度风对输电塔塔腿气动力的影响情况。 K_θ 定义为输电塔塔腿模型在风向角为 θ 时的合力系数 $C_R(\theta)$ 与模型在风向角为0°时的合力系数 $C_R(0^\circ)$ 的比值:

$$K_\theta = \frac{C_R(\theta)}{C_R(0^\circ)} \quad (4)$$

部分规范给出了荷载分配系数的概念,从而可以直接获得角度风对于体轴气动力的影响。纵向(横向)荷载分配系数 n_X 、 n_Y 分别定义为输电塔塔腿模型在风向角 θ 时的纵向、横向气动力系数 $C_X(\theta)$ 、 $C_Y(\theta)$ 与模型在风向角为0°时的合力系数 $C_R(0^\circ)$ 的比值,或者根据夹角 α 进行三角变换同样可以得到:

$$\begin{cases} n_X = C_X(\theta) / C_R(0^\circ) = K_\theta \sin \alpha \\ n_Y = C_Y(\theta) / C_R(0^\circ) = K_\theta \cos \alpha \end{cases} \quad (5)$$

3 试验结果分析

3.1 气动力系数

通过试验测得的阻力系数、升力系数以及合力系数分别如图4~6所示,可以看出风速对角钢及钢管塔腿气动力系数均无明显影响。造成这一现象的原因可能是:当风速处于 $10 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内时,塔腿模型各构件的雷诺数 Re 介于 6.16×10^3 至 2.76×10^4 之间,处于层流状态,气动力系数与风速无关。

10^4 之间,均处于亚临界状态($Re < 2 \times 10^5$);而角钢塔腿本身对风速不敏感,不存在雷诺数效应。

如图4所示,角度风下角钢与钢管塔腿模型的阻力系数呈M型分布并且近似关于 45° 对称,最不利风向角均为 30° 与 60° ,阻力系数最大值分别为3.40和2.23。风向角为 0° 时,角钢与钢管塔腿模型的阻力系数平均值分别为2.81和1.89。如图5所示,角度风下角钢与钢管塔腿模型的升力系数呈反对称分布,且角钢塔腿的升力系数明显大于钢管塔腿。角钢塔腿模型的升力系数在 20° 与 70° 取到最大值,分别为 -0.37 和 0.48 ;钢管塔腿模型的升力系数在 10° 与 75° 取到大值,分别为 -0.17 和 0.09 。图6所示角度风下各塔腿模型的合力系数与阻力系数基本重合,升力对合力大小的影响非常有限。

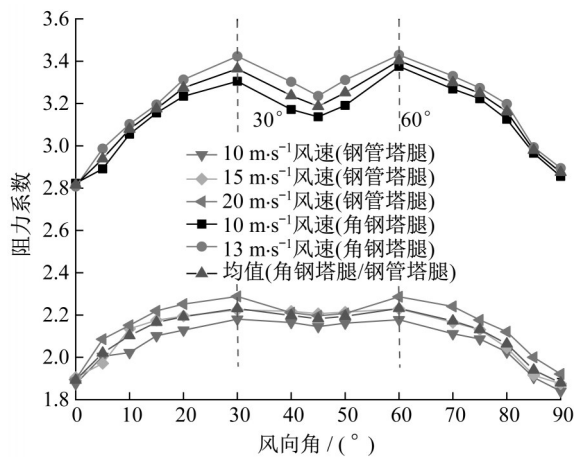


图4 塔腿模型阻力系数

Fig. 4 Drag coefficients of tower leg models

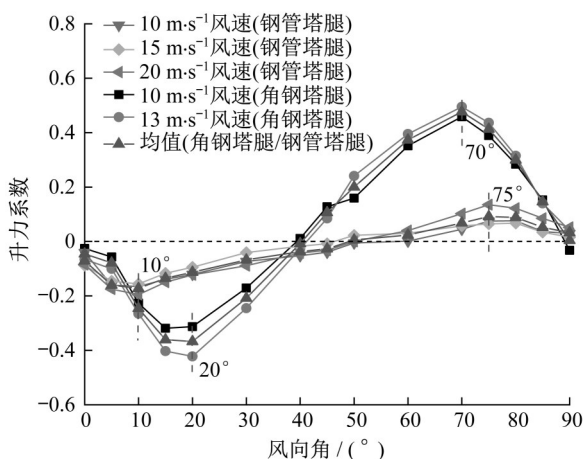


图5 塔腿模型升力系数

Fig. 5 Lift coefficients of tower leg models

3.2 角度风系数

如图7所示,钢管与角钢塔腿模型的角度风系

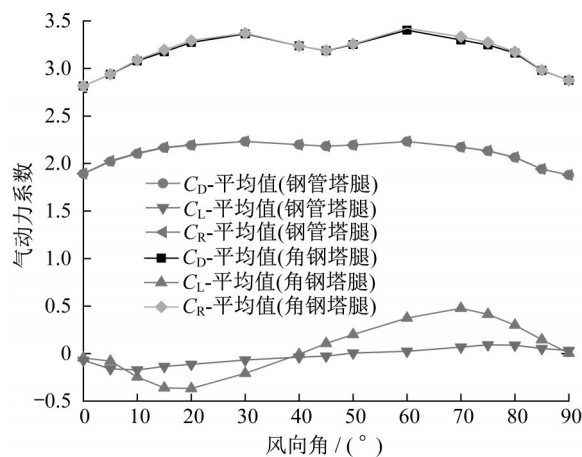


图6 塔腿模型合力系数

Fig. 6 Resultant force coefficients of tower leg models

数同样呈M型分布并且近似关于 45° 对称,分别在 30° 与 60° 取到最大值,最大角度风系数分别为1.18和1.22。在风向角为 $0^\circ \sim 50^\circ$ 时,角钢塔腿的角度风系数接近于钢管塔腿,而在 $60^\circ \sim 90^\circ$ 时,角钢塔腿的角度风系数略大于钢管塔腿,但从总体来看两者的角度风系数仍较为接近。

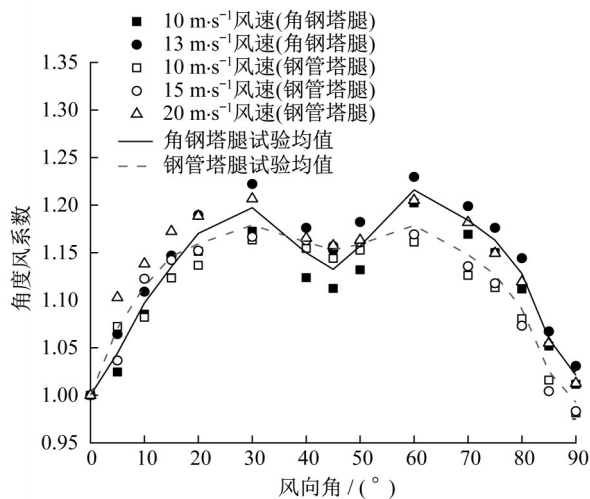


图7 塔腿模型角度风系数实测值

Fig. 7 Test values of skewed wind load factors of tower leg models

各国规范对塔身节段与塔腿节段的角度风系数计算方法相同,同时不同规范关于角度风系数的规定并不相同。其中,中国规范^[8]及日本规范^[9]分别给出了特定风向角下的取值,日本规范还进一步区分了钢管与角钢的差异。而美国规范^[10]、IEC规范^[11]、欧洲规范^[12]以及澳大利亚规范^[13]等均通过 $K_\theta = 1 + K_1 K_2 \sin^2 2\theta$ 形式给出了风向角的计算方法。其中关

于系数 K_1K_2 的取值:由于角钢和钢管塔腿挡风系数均为0.12,根据澳大利亚规范^[13]计算 K_1K_2 的取值为0.11,而其余规范取值均为与挡风系数无关的定值0.2。最终依据规范得到的角度风系数计算值如图8所示。中国规范^[8]给出的特定风向角下的角度风系数与欧洲规范^[12]规定的角度风系数相同,均在风向角为45°时取到最大值。对于角钢及钢管塔腿,试验测得的角度风系数在风向角为0°~30°及60°~90°时均大于任意规范计算值,仅在风向角为40°~50°时小于部分规范计算值。日本规范^[9]角钢塔身的角度风系数在风向角为30°与60°时取到最大值。而日本规范^[9]及澳大利亚规范^[13]给出的角度风系数计算值与试验结果差异过大。

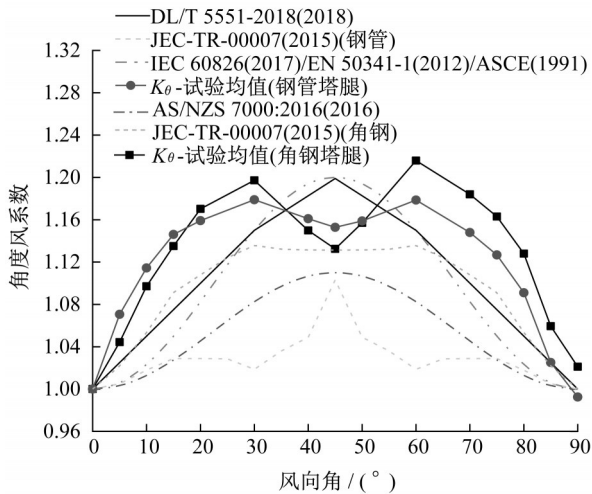


图8 塔腿模型角度风系数比较

Fig. 8 Comparison of skewed wind load factors of tower leg models

由于角钢及钢管塔腿模型的角度风系数试验值分布趋势比较接近,因此本文采用同一个拟合公式对其进行拟合。推荐采用式(6)对角钢及钢管塔腿模型角度风系数进行拟合,拟合结果如图9所示。其中拟合参数 a 和 b 值分别为0.150和0.065,拟合优度系数 R^2 达到0.95,表明拟合结果良好。

$$K_\theta = 1 + a \sin^{0.7} 2\theta + b \sin^2 4\theta \quad (6)$$

3.3 荷载分配系数

塔腿模型的荷载分配系数均值计算结果如图10、图11所示。可以看出,角钢塔腿的横向和纵向荷载分配系数分别在风向角为10°及80°时取到最大值1.062和1.091,钢管塔腿的横向和纵向荷载分配系数则分别在风向角为10°及75°时取到最大值1.101和1.088。

目前各国规范中关于荷载分配系数取值的规定

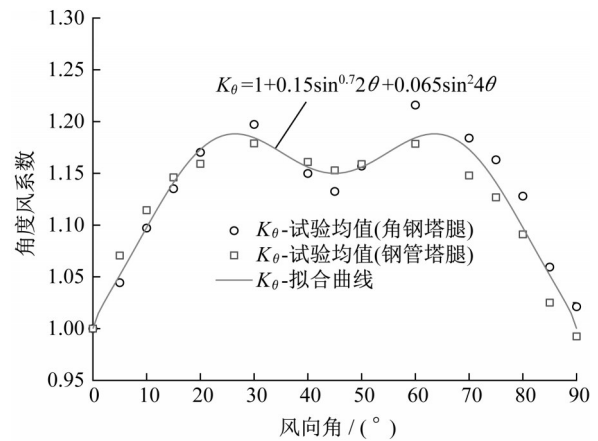


图9 塔腿模型角度风系数拟合曲线

Fig. 9 Fitting curve of skewed wind load factors of tower leg models

各不相同。中国规范^[8]及日本规范^[9]直接给出特定风向角 θ 下荷载分配系数取值。而IEC规范^[11]及欧洲规范^[12]由于忽略了风轴升力的影响,近似假定风向角 θ 和夹角 α 相等,由此荷载分配系数可根据角度风系数 K_θ 计算值按 θ 三角分解得到。此时计算公式可简化为

$$\begin{cases} n_x = K_\theta \sin \alpha \approx K_\theta \sin \theta \\ n_y = K_\theta \cos \alpha \approx K_\theta \cos \theta \end{cases} \quad (7)$$

图10、图11给出了纵向及横向塔腿荷载分配系数试验值与规范值的比较。可以发现,试验和各国规范中塔腿的纵向与横向荷载分配系数均关于风向角45°近似对称分布,因此这里仅讨论塔腿的纵向荷载分配系数。可以看出,日本规范^[9]中钢管塔腿纵向荷载分配系数取值均小于试验值,而角钢塔腿的取值在风向角为0°~45°时较试验值偏大,在风向角为50°~90°时较试验值偏小。IEC规范^[11]及欧洲规范^[12]的纵向荷载分配系数在风向角为0°~30°时略微偏小,而在30°~90°时与试验值较为接近。中国规范^[8]的纵向荷载分配系数取值在风向角为0°~60°时与欧洲规范非常接近,而在60°~90°时远小于欧洲规范。由于中国规范^[8]仅给出了0°、30°、45°、60°和90°的取值,若按线性插值计算则会与荷载分配系数的试验值之间产生较大偏差。

除此之外,为比较验证IEC规范^[11]中 $\theta = \alpha$ 假定的准确性,图10、图11中给出了 K_θ 试验值按风向角 θ 三角变换所得到的荷载分配系数。可以看出,在角钢塔腿中, $K_\theta \sin \theta$ 在0°~45°时较 n_x 偏小,在45°~90°时偏大; $K_\theta \cos \theta$ 则在0°~45°时较 n_y 偏大,在45°~90°时偏小。而在钢管塔腿中, $K_\theta \sin \theta$ 与 n_x 及 $K_\theta \cos \theta$ 与 n_y 均较为接近, n_x 仅在0°~45°时略大于 $K_\theta \sin \theta$ 。

这表明在角钢塔腿中 $\theta = \alpha$ 的假定并不成立,风向角 θ 与夹角 α 的差距比钢管塔腿中的大。

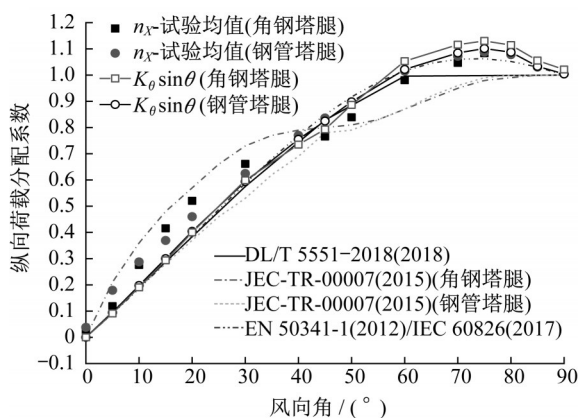


图10 塔腿模型纵向荷载分配系数

Fig. 10 Longitudinal wind load distribution factors of tower leg models

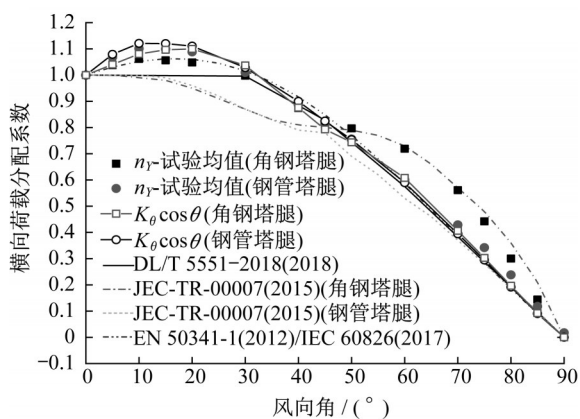


图11 塔腿模型横向荷载分配系数

Fig. 11 Transversal wind load distribution factors of tower leg models

夹角 α 是计算荷载分配系数的重要参数,而夹角 α 与风向角 θ 差值的物理意义则反映了横向升力的大小。试验中的 α 值可通过 $\alpha = \arctan(C_X/C_Y) = \arctan(n_X/n_Y)$ 计算得到。除日本规范外,其余各国规范对塔腿节段均取 $\alpha = \theta$ 。图12给出了试验及规范得到的角钢塔腿的 α 值。对于角钢塔腿,不同风向角下试验得到的 α 值与风向角 θ 有较大差异,这表明在角钢塔腿中横向升力不可忽略。日本规范中角钢塔腿的 α 值与角钢塔腿试验值相比在风向角 θ 处于 $0^\circ \sim 45^\circ$ 时较大,而在风向角 θ 处于 $50^\circ \sim 90^\circ$ 时较小,但总体变化趋势是一致的。采用式(8)对角钢塔腿的 α (单位为rad)值进行拟合,图13给出了试验及规范得到的钢管塔腿的 α 值。日本规范中钢管塔腿的 α 值与试验值相比更接近 θ 值且几乎重合。钢管

塔腿试验值 α 值相比角钢塔腿试验值更接近 θ 值。同样采用式(10)对钢管塔腿的 α 值进行拟合,拟合参数列于表2。

$$\alpha = c\theta(\theta^2 - \pi^2/4) + d\theta(\theta - \pi/2) + \theta \quad (8)$$

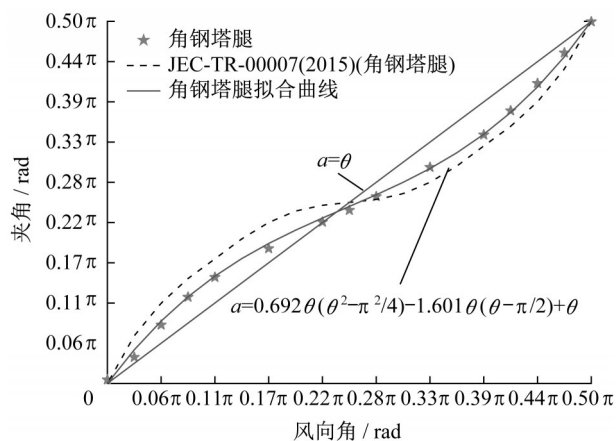


图12 角钢塔腿 α 值比较及拟合

Fig. 12 Comparison and fitting formula of α value of angle-steel tower leg

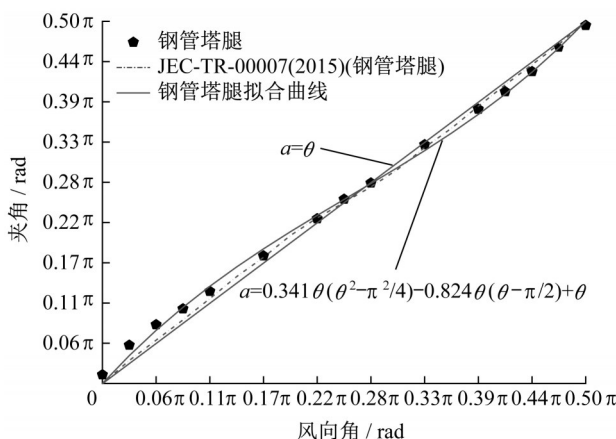


图13 钢管塔腿 α 值比较及拟合

Fig. 13 Comparison and fitting formula of α value of steel tubular tower leg

表2 α 角拟合参数

Tab. 2 Fitting parameters of α value

塔腿类型	拟合参数	
	c	d
角钢塔腿	0.692	-1.601
钢管塔腿	0.341	-0.824

4 结论

对角度风下典型特高压直流输电塔塔腿进行了高频测力天平试验,分别针对角钢及钢管塔腿的气动力系数、角度风系数、荷载分配系数(包括 α 角)进

行了试验分析与结果拟合,并与各国规范理论计算值进行了较为细致的比较,主要结论如下:

(1)风速的大小对于角度风下角钢模型以及亚临界条件下的钢管模型气动力系数的影响有限。角度风下角钢与钢管塔腿模型的阻力系数均呈M型,最不利风向角为 30° 和 60° ;升力系数均呈反对称分布,且角钢塔腿的升力系数远大于钢管塔腿的升力系数。但由于升力对合力的影响十分有限,合力系数在数值上仍可用阻力系数近似代替。

(2)角钢与钢管塔腿模型的角度风系数同样呈M型,最不利风向角为 30° 和 60° 。各国规范中塔腿角度风系数整体上均小于角钢及钢管塔腿的试验值,仅中国规范、欧洲规范和IEC规范在风向角为 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 时大于试验值。本文提出适用于角钢及钢管塔腿的角度风系数拟合公式,拟合优度较高,吻合较好。

(3)角钢及钢管塔腿模型的横向和纵向荷载分配系数关于风向角 45° 近似对称,所对应的最不利风向角分别为 10° 和 $75^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 。日本规范中钢管塔腿荷载分配系数均小于试验值。欧洲规范与IEC规范结果与试验值较接近。而若按中国规范规定利用线性插值计算则会产生较大偏差。除日本规范中角钢塔身的取值以外,其余规范均低估了风向角为 $0^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 时角钢塔身及塔腿的纵向荷载分配系数。

(4)在角钢塔腿模型中,由角度风系数按风向角 θ 分解得到的荷载分配系数与试验值相差较大,而在钢管塔腿模型中相差较小,这说明角钢塔腿中横向升力不容忽视。本文建议采用夹角 α 代替,并分别提供了角钢及钢管塔腿的 α 值拟合公式。

作者贡献声明:

胡晓依:负责论文的选题,试验方案指导,论文思路的把控和核准,定稿。

张德凯:参与试验过程的数据采集,负责数据分析,撰写论文初稿。

宋雪祺:负责试验方案设计与处理,参与试验过程的数据采集,协助完善研究内容。

邓洪洲:负责指导论文总体框架,对论文进行重要的修改。

参考文献:

- [1] YANG Qingshan, GAO Rong, BAI Fan, *et al.* Damage to buildings and structures due to recent devastating wind hazards in East Asia[J]. *Natural Hazards*, 92(3), 1321.
- [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, 140:108.

- [3] ZHOU Qi, MA Bin, ZHU Qing, *et al.* Investigation on wind loads on angle-steel cross-arms of lattice transmission towers via direct force measurement [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2019, 191:117.
- [4] 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.
- LOU Wenjuan, WANG Dong, SHEN Guohui, *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.
- [5] ZHOU Qi, ZHANG Hongjie, MA Bin, *et al.* Wind loads on transmission tower bodies under skew winds with both yaw and tilt angles [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2019, 187:48.
- [6] 杨振宇,谢强,何清清,等. 特高压多回路钢管塔体型系数风洞试验研究[J]. *工业建筑*, 2019, 49(4):1.
- YANG Zhenyu, XIE Qiang, HE Qingqing, *et al.* Wind tunnel tests on shape coefficient of a multi-circuit UHV steel tubular transmission tower[J]. *Industrial Construction*, 2019, 49(4):1.
- [7] ZHANG Dekai, SONG Xueqi, DENG Hongzhou, *et al.* Experimental and numerical study on the aerodynamic characteristics of steel tubular transmission tower bodies under skew winds [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2021, 104678.
- [8] 国家能源局. 架空输电线路荷载规范: DL/T 5551—2018[S]. 北京:中国计划出版社, 2018.
- National Energy Administration. Load code for design of overhead transmission line: DL/T 5551—2018 [S]. Beijing: China Planning Press, 2018.
- [9] Japanese Electrotechnical Committee (JEC). Design standards on structures for transmissions; JEC-TR-00007 [S]. Tokyo: Japanese Electrotechnical Committee, 2015.
- [10] American Society of Civil Engineers (ASCE). ASCE manuals and reports on engineering practice No.74: ASCE 74 [S]. New York: American Society of Civil Engineers, 1991.
- [11] International Electrotechnical Commission (IEC). Design criteria of overhead transmission lines; IEC 60826 [S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2017.
- [12] European Committee for Electrotechnical Standardization (ECES). Overhead electrical lines exceeding AC 1kV-Part1: General Requirements-Common specifications; EN 50341-1 [S]. Britain: European Committee for Electrotechnical Standardization, 2012.
- [13] Standards Australia Limited. Overhead line design-Detailed procedures: AS/NZS 7000: 2016 [S]. Sydney: SAI Global limited, 2016.