

# 中美两国现行输电线路设计规范风荷载 计算参数对比分析

冯勇<sup>1</sup>, 隋亮<sup>2</sup>, 刘畅<sup>1</sup>, 李彦民<sup>3</sup>, 鄢秀庆<sup>1</sup>, 刘强<sup>1</sup>

(1. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610051; 2. 南方电网能源发展研究院有限责任公司, 广东 广州 510010; 3. 中国电力工程顾问集团, 北京 100120)

**摘要:** 中国输电线路设计规范与美国存在一定的差异, 为较好地适应国外电网工程设计, 选取美国 ASCE 74—2009《输电线路结构荷载导则》与中国 GB 50545—2010《110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范》, 针对两者风荷载计算公式中的风压高度变化系数、体型系数、风荷载调整系数及地形影响因子等参数进行了对比分析。结果表明: ASCE 74—2009 中的风压高度变化系数小于 GB 50545—2010 设计值; GB 50545—2010 的导、地线体型系数比 ASCE 导则值大 10%~20%; ASCE 74—2009 的阵风响应因子与 GB 50545—2010 中的塔身风荷载调整系数大致相同; 当设计风速超过 27 m/s 时, 两者的线条风荷调整系数差距较小; 对特殊地形, ASCE 74—2009 考虑了地形影响因子, 但在实际工程中的应用范围较小; GB 50545—2010 与 ASCE 74—2009 中对杆塔构件和导、地线覆冰时的风荷载计算存在较大差异, ASCE 74—2009 通常不考虑覆冰引起的结构挡风面积增加的影响。

**关键词:** ASCE 导则; 风荷载; 荷载规范; 参数对比; 输电线路

中图分类号: TM 753 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2024)04-0104-07

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240416

## Comparative Analysis of Wind Load Calculation Parameters in Current Transmission Line Design Specifications between China and the United States

FENG Yong<sup>1</sup>, SUI Liang<sup>2</sup>, LIU Chang<sup>1</sup>, LI Yanmin<sup>3</sup>, YAN Xiuqing<sup>1</sup>, LIU Qiang<sup>1</sup>

(1. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of CPECC, Chengdu 610051, Sichuan, China; 2. China Southern Power Grid Energy Development Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010, Guangdong, China; 3. China Power Engineering Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100120, China)

**Abstract:** There are certain differences between design specifications of transmission lines in China and the United States. In order to better adapt to the design of foreign power grid engineering, ASCE 74—2009 "Guidelines for Structural Load of Transmission Lines" in the United States and GB 50545—2010 "Design Specification for 110 kV~750 kV Overhead Transmission Lines" in China are selected to compare and analyze the parameters such as wind pressure height variation coefficient, shape coefficient, wind load adjustment coefficient and terrain influence factor in wind load calculation formulas. The results show that the coefficient of wind pressure height variation in ASCE 74—2009 is smaller than that of GB 50545—2010. The shape coefficient of conductor and ground wire in GB 50545—2010 is 10% to 20% higher than ASCE guideline value. The gust response factor of ASCE 74—2009 is roughly the same as the tower body wind load adjustment factor in GB 50545—2010. When the design wind speed exceeds 27 m/s, the difference in line wind load adjustment coefficients between these two is small. For special terrains, ASCE 74—2009 considers terrain influence factors, but its application scope in practical engineering is relatively small. There are significant differences in the calculation of wind loads on tower components and conductors and ground wires when they are covered with ice between GB 50545—2010 and ASCE 74—2009, ASCE 74—2009 typically does not consider the impact of increased structural windbreak area caused by icing.

**Key words:** ASCE guidelines; wind load; load specification; parameter comparison; transmission line

## 0 引言

输电杆塔作为一种典型的风荷载敏感结构,具有自重轻、柔度大、阻尼小、体型高耸等特点<sup>[1]</sup>。因此,输电杆塔的抗风计算是结构设计中尤为重要的一环。但世界各国的自然环境不同,在制定输电杆塔风荷载规范时的基本计算公式和相关参数的选择都存在较大差异<sup>[2]</sup>。

文献[3]将中国规范与国际规范、欧盟规范以及美国规范的风荷载计算公式进行了分析比较,结果表明风荷载重现期、平均时距、体型系数等参数存在较大差别。另有学者的研究结论表明:输电杆塔风荷载设计值受杆塔计算高度的影响较大,计算高度较低时,各国规范的计算结果相近;计算高度较高时,中国规范的计算结果更为保守<sup>[4-7]</sup>。文献[8]对中美规范中的导、地线风荷载、冰荷载的计算公式进行了对比,结果表明中美规范在基准高度的选择、概率模型的使用、标准地貌和空气密度常数的确定上都大致相同。

了解和掌握国外技术标准的风荷载计算及其与中国规范的差异性,对中国未来发展涉外输电线路设计具有重要意义。以往多数研究仅对各国的荷载计算公式进行整体分析,对个别参数的对比、选取原则等研究较少。考虑到目前世界上大多数欠发达国家输电线路设计都以美国 ASCE 74—2009《输电线路结构荷载导则》<sup>[9]</sup>(以下简称 ASCE 导则)为依据,所以下面将 ASCE 导则与中国 GB 50545—2010《110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范》<sup>[10]</sup>(以下简称 GB 50545—2010)的风荷载计算基本公式和各计算参数进行对比分析。

## 1 风荷载基本公式对比

ASCE 导则对于风荷载的计算整体上与 GB 50545—2010 相似,两者均采用考虑各种影响因素的系数乘以平均风荷载的方法,但在具体计算公式和参数取值上有不同的依据。

### 1.1 塔身风荷载计算公式

GB 50545—2010 中的输电杆塔塔身风荷载设计值的计算公式为

$$W_s = W_0 \cdot \mu_z \cdot \mu_s \cdot \beta_z \cdot B \cdot A_s \quad (1)$$

式中:  $W_s$  为风向与杆塔面垂直时杆塔风荷载标准值, kN;  $W_0$  为基本风压标准值, kN/m<sup>2</sup>;  $\mu_z$  为风压高度变化系数;  $\mu_s$  为构件的体型系数;  $\beta_z$  为杆塔风荷载调整系数;  $B$  为覆冰时风荷载增大系数;  $A_s$  为构件承受风压的投影面积计算值, m<sup>2</sup>。

ASCE 导则中输电杆塔塔身风荷载设计值的计算公式为

$$F = \gamma_w \cdot Q \cdot K_z \cdot K_{zt} \cdot V_{50}^2 \cdot G \cdot C_f \cdot A \quad (2)$$

式中:  $\gamma_w$  为风荷载重现期的调整因子;  $Q$  为空气密度常数;  $K_z$  为风压高度变化系数;  $K_{zt}$  为地形地貌影响因子;  $V_{50}$  为 50 年重现期下 3 s 阵风风速;  $G$  为杆塔身阵风响应因子;  $C_f$  为风力系数;  $A$  为杆塔迎风向的投影面积。

另外,在实际重现期的风速已知,且重现期不等于 50 年的情况下,可用式(3)进行风荷载计算。

$$F = Q \cdot K_z \cdot K_{zt} \cdot V_{RP}^2 \cdot G \cdot C_f \cdot A \quad (3)$$

式中,  $V_{RP}$  为参考年重现期条件下的 3 s 阵风风速。

### 1.2 线条风荷载计算公式

GB 50545—2010 中的输电线路线条风荷载的计算公式为

$$W_x = \alpha \cdot W_0 \cdot \mu_z \cdot \mu_{sc} \cdot \beta_c \cdot d \cdot L_p \cdot B \cdot \sin^2 \theta \quad (4)$$

式中:  $\alpha$  为风压的不均匀系数;  $\beta_c$  为输电线路线条所受风荷载的调整系数;  $\mu_{sc}$  为输电线路线条的体型系数;  $d$  为输电线路线条的外径或者是其在覆冰时的计算半径;  $\theta$  为线条方向与风载方向间的夹角;  $L_p$  为杆塔的水平档距。

ASCE 导则中输电线路线条设计风荷载计算公式为

$$F = \gamma_w \cdot Q \cdot K_z \cdot K_{zt} \cdot V_{50} \cdot G_w \cdot \cos 2\varphi \cdot C_f \cdot A \quad (5)$$

式中:  $G_w$  为输电线路线条的阵风响应因子;  $\varphi$  为风载方向与线条法线的夹角。

## 2 塔身风荷载参数对比

### 2.1 塔身风压高度变化系数

GB 50545—2010 和 ASCE 导则均在考虑地形和结构高度的影响后,将地面粗糙度划分为了 A、B、C、D 4 类。GB 50545—2010 中一般采用 B 类地貌进行输电线路设计,而 ASCE 导则中的 C 类地貌与

GB 50545—2010 的 B 类地貌大致相同。

GB 50545—2010 和 ASCE 导则中的风压高度变化系数分别为:

$$\mu_z = \left(\frac{z}{10}\right)^{0.32} \quad (6)$$

$$K_z = 2.01 \left(\frac{z_h}{z_g}\right)^{\frac{2}{\alpha}} \quad (7)$$

式中:  $z$  为杆塔各节段的中心高度;  $z_h$  为输电杆塔的有效高度;  $z_g$  和  $\alpha$  分别为与地面粗糙度相关的梯度高度和相关系数。

根据式(6)、式(7),以 GB 50545—2010 中的 B 类地貌和 ASCE 导则中的 C 类地貌为例,对输电杆塔有效高度从 10 m 增至 100 m 时的风压高度变化系数以及两者之比的变化情况进行对比分析,如图 1 所示。当输电杆塔的有效高度为 10 m 时,两者的风压高度变化系数相同;随着有效高度的增加,两者的计算结果都在增加,但增长幅度越来越小。并且,ASCE 导则与 GB 50545—2010 的风压高度变化系数的比值也随高度的增大而减小,说明两者差值也在逐步增加。

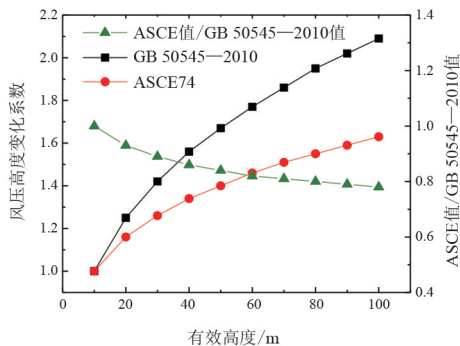


图 1 塔身风压高度变化系数随高度变化曲线

## 2.2 塔身风荷载体型系数

ASCE 导则中体型系数体现在风力系数  $C_f$  中,  $C_f$  也称为阻力系数、压力系数和形状因子。在 ASCE 导则中,对于具有平周边杆件的结构通常采用三角形和正方形截面形状的网格桁架结构的风力系数作为输电杆塔塔身风荷载的风力系数  $C_f$ ,具体取值见表 1。但当输电杆塔的杆件以圆截面为主时,其风力系数的取值按表 2 选取。表中填充率  $\Phi = A_m/A_0$ ,  $A_m$  为输电杆塔迎风面上的所有杆件面积,  $A_0$  为杆塔迎风面的轮廓线面积。

根据表 1、表 2 和 ASCE 导则分别计算出角钢塔和钢管塔塔身风荷载系数在不同填充率下的变化规律,如图 2、图 3 所示。当塔身分别为角钢塔和钢管

塔时,GB 50545—2010 和 ASCE 导则以及两者比值的变化趋势都大致相同,GB 50545—2010 的塔身风荷载系数在填充率从 0.1 增至 0.6 时迅速降低,在填充率从 0.6 增至 0.8 时保持不变。ASCE 导则的塔身风荷载在填充率从 0 增至 0.5 的变化过程中迅速降低,在填充率从 0.5 增至 1.0 的过程中缓慢上升。中、美规范的塔身风荷载比值随着填充率的增加,先减小后增大,在 0.3~0.5 附近达到较小的差值,最小比值为 1.04。

表 1 具有平周边杆件结构的风力系数  $C_f$

填充率 $\Phi$	风力系数 $C_f$	
	三角形截面	正方形截面
<0.025	3.6	4.0
0.025~0.440	$(3.7\sim 4.5)\Phi$	$(4.1\sim 5.2)\Phi$
0.450~0.690	1.7	1.8
0.700~1.000	$1.0+\Phi$	$1.3+0.7\Phi$

表 2 圆截面的网格桁架结构上垂直风的  $C_f$

填充率 $\Phi$	风力系数 $C_f$
<0.30	0.67
0.30~0.79	$0.67\Phi+0.47$
0.80~1.00	1.00

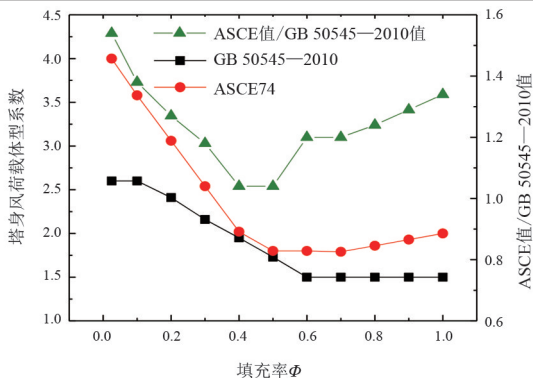


图 2 角钢塔塔身风荷载体型系数

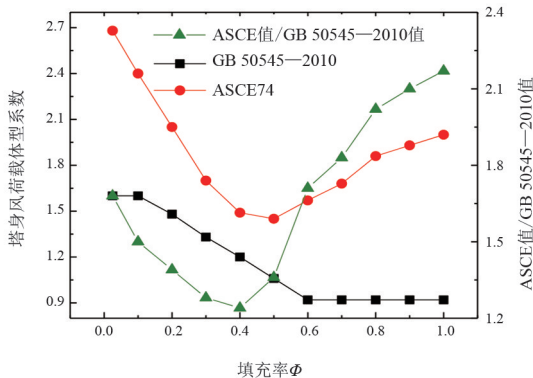


图 3 钢管塔塔身风荷载体型系数

## 2.3 塔身风荷载调整系数

ASCE 导则中输电结构的阵风响应因子  $G_f$  是结

构或电线上的最大荷载效应与设计风速相应的平均荷载效应的比值,是极端最大阵风荷载效应的平均风速荷载的乘数。ASCE 导则中对塔身阵风响应因子的计算公式规定为:

$$G_t = \frac{1 + 2.7E\sqrt{B_1}}{K_v^2} \quad (8)$$

$$E = 4.9\sqrt{K} \left(\frac{33}{Z_h}\right)^{\alpha_{FM}} \quad (9)$$

$$B_1 = \frac{1}{1 + \frac{0.56Z_h}{L_s}} \quad (10)$$

式中: $E$  为阻力影响系数; $B_1$  为湍流积分影响系数; $\alpha_{FM}$  为持续风的幂指数; $K$  为结构表面阻力系数; $L_s$  为湍流积分尺度; $K_v$  为 10 m 高处 3 s 阵风风速与 10 min 平均风速比值,取 1.43。

通过式(8)一式(10)可对 ASCE 导则在不同铁塔有效高度条件下的塔身阵风响应因子进行对比分析,计算结果如图 4 所示。由图 4 可知,铁塔的有效高度越高,阵风响应因子越低。3 s 阵风风速条件下的阵风响应因子变化范围为 0.732~0.814,而在 10 min 平均风速条件下其计算结果大致在 1.50~1.66。此外,根据 GB 50545—2010 中的规定,计算出在不同铁塔高度条件下的风荷载调整系数,如图 5 所示。从整体的取值范围来看,ASCE 导则中的  $G_t$  与中国

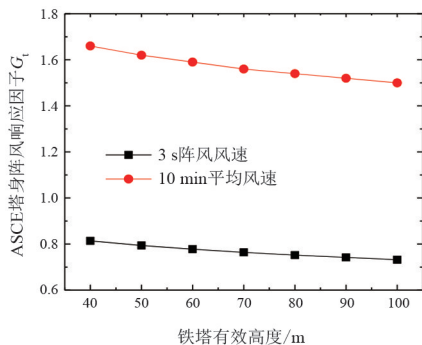


图 4 塔身阵风响应因子随高度变化曲线

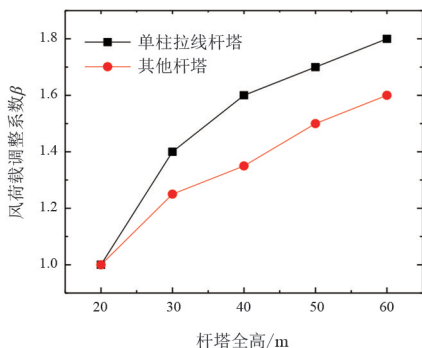


图 5 塔身风荷载调整系数随高度变化曲线

规范中  $\beta_z$  的取值计算规定大致相当。但 ASCE 导则的  $G_t$  取值是随高度增加而降低,并且与塔型无关;而 GB 50545—2010 中塔身风荷载调整系数  $\beta_z$  随着杆塔全高的增加而增大,单柱拉线塔和一般铁塔的取值也不同。

### 2.4 地形影响因子

ASCE 导则考虑了当风穿过地形陡变地区时风速增大的情况,位于山脉、山脊上部或者靠近陡坡边缘的输电结构可考虑地形因子  $K_{zt}$ 。

$$K_{zt} = (1 + K_1 K_2 K_3)^2 \quad (11)$$

式中: $K_1$  为地貌特征和最大增速的影响系数; $K_2$  为山顶风速的增大或减小系数; $K_3$  为局部区域高度增加而造成风速减小的影响系数。

以 C 类地貌、 $H=100\text{ m}$ 、 $L_h=200\text{ m}$  的二维山脊地形为例,根据式(11)计算山顶和半山腰处输电杆塔有效高度在 10~100 m 范围内变化的风荷载地形影响因子,如图 6 所示。

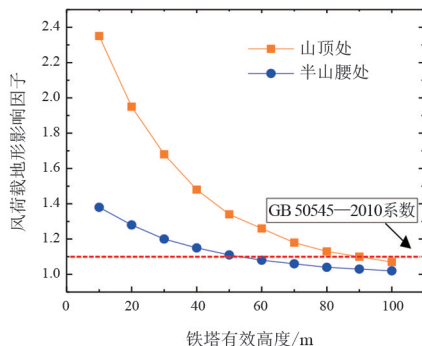


图 6 风荷载地形影响因子随高度变化曲线

由图 6 可知,ASCE 导则的风荷载地形影响因子随杆塔有效高度的增加而减小。当杆塔的有效高度为 10 m 时,山顶和半山腰处的风荷载地形影响因子差值最大,相差 0.97。杆塔的有效高度越大,山顶处与半山腰处的风荷载地形影响因子相差越小,在有效高度为 100 m 处相差仅 0.05。这与 GB 50545—2010 统一采用 1.1 的增大系数不同,两者的风荷载地形影响因子仅在杆塔有效高度较高时大致相同,当杆塔较矮时,ASCE 导则值较大。

## 3 线条风荷载参数对比

### 3.1 线条风压高度变化系数

GB 50545—2010 与 ASCE 导则的电线风压计算高度取值不同。GB 50545—2010 取线条相对地面的高度,而 ASCE 导则将所有导线、地线挂点相对地面高度的平均值作为线条风压计算高度。同样,

以 GB 50545—2010 的 B 类地貌与 ASCE 导则的 C 类地貌为例,风压高度变化系数及其比值随铁塔有效高度增大而变化的曲线如图 7 所示。由图 7 可知,ASCE 导则和 GB 50545—2010 计算出的线条风压高度变化系数都随杆塔有效高度的增加而增大。在杆塔有效高度从 40 m 增至 100 m 的变化范围内,GB 50545—2010 的线条风压高度系数始终大于 ASCE 导则计算值,并且两者的比值随杆塔有效高度的增加而减小,说明两者的差异越来越大,比值变化范围为 0.78~0.86。

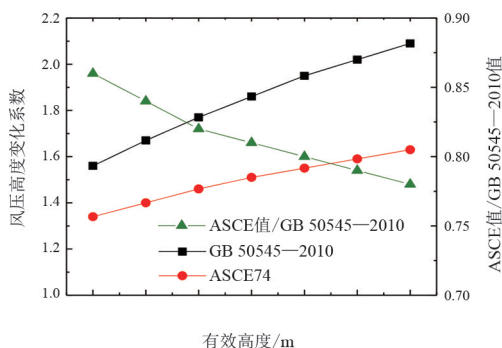


图 7 线条风压高度变化系数随高度变化曲线

### 3.2 线条风荷载体型系数

GB 50545—2010 中规定:导线或地线在线径小于 17 mm 或者线条覆冰时,线条风荷载的体型系数  $\mu_{sc}$  应取 1.2;当线径大于或等于 17 mm 时,体型系数取 1.1。与 GB 50545—2010 中线条风荷载体型系数相对应的是 ASCE 导则中的风力系数  $C_f$ 。风力系数可根据实地风力测量数据或者风洞试验数据获得,缺少测试数据时选取 1.0 作为恒定的风力系数值。由此可见,GB 50545—2010 中的线条体型系数比 ASCE 导则的风力系数大 10%~20%。

### 3.3 线条风荷载调整系数

ASCE 导则对导、地线阵风响应因子的计算公式规定为:

$$G_w = \frac{1 + 2.7E\sqrt{B_w}}{K_v^2} \quad (12)$$

$$E = 4.9\sqrt{K} \left( \frac{33}{Z_h} \right)^{\frac{1}{\alpha_{FM}}} \quad (13)$$

$$B_w = 1 / \left( 1 + \frac{0.8Z_h}{L_g} \right) \quad (14)$$

式中: $G_w$  为线条阵风响应因子; $B_w$  为线条风湍流积分影响系数; $L_g$  为湍流积分影响尺度。

GB 50545—2010 和 ASCE 导则中的线条风荷载调整系数都考虑了在脉动风荷载作用下输电线

路线条的动力放大效应。GB 50545—2010 仅对 500 kV 及以上电压等级的输电线路考虑此系数。而 ASCE 导则中以线条的高度、档距和地貌条件等数据作为参考依据的阵风响应因子能够应用于任何电压等级的输电线路。

GB 50545—2010 中 500 kV 和 750 kV 输电线路的线条风荷载调整系数  $\beta_e$  的取值参照表 3,其余电压等级的输电线路风荷载调整系数  $\beta_e$  取 1.0。在 ASCE 导则中的 C 类地貌条件下,线条的阵风响应因子随高度和水平档距变化的影响曲线如图 8、图 9 所示。

表 3 GB 50545—2010 线条风载调整系数  $\beta_e$

风速/(m·s <sup>-1</sup> )	<20	20≤V<27	27≤V<31.5	≥31.5
$\beta_e$	1.0	1.1	1.2	1.3

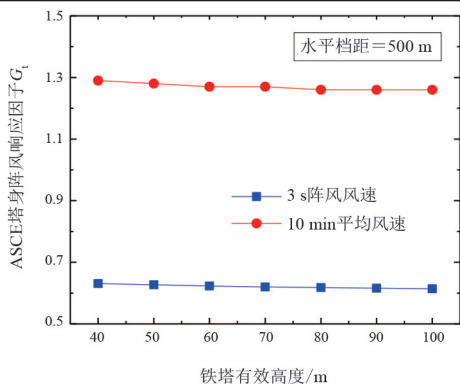


图 8 线条阵风响应因子受高度变化的影响曲线

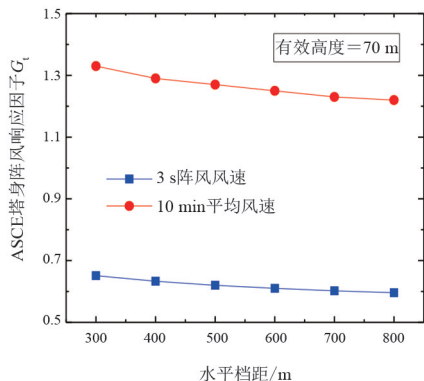


图 9 线条阵风响应因子受水平档距变化的影响曲线

由图可知,铁塔有效高度越高,线条阵风响应因子缓慢降低;铁塔档距越大,线条风荷载阵风响应因子越低,3 s 阵风风速下阵风响应因子变化范围为 0.596~0.651,10 min 平均风速下的阵风响应因子在 1.22~1.33 间变化。当设计风速大于 27 m/s 时,在 GB 50545—2010 中的风荷载调整因子与 ASCE 导则的阵风响应因子大体相等;当设计风速小于 27 m/s 时,相比于 ASCE 导则,GB 50545—2010 的风荷载调整系数较小。

## 4 其他荷载参数对比

### 4.1 覆冰风荷载增大系数

GB 50545—2010<sup>[10]</sup>、GB 50665—2011<sup>[11]</sup>、GB 50790—2013<sup>[12]</sup>中按照不同的覆冰厚度对输电线路各构件取不同的风荷载增大系数,见表4。

ASCE 导则认为构件覆冰虽然增大了结构的挡风面积,但对于宽截面的结构杆件,在投影面上由覆冰产生的摩擦阻力增量很小,并且在角钢杆件角尖处的冰覆层的流线效应也会减小,抵消了部分风力系数。因此,通常情况下 ASCE 导则不考虑对覆冰杆塔结构的挡风面积进行补偿。

表4 GB 50545—2010 线条覆冰风荷载增大系数

覆冰厚度/mm	铁塔构件	导线、地线、绝缘子串
5	1.1	1.1
10	1.2	1.2
15	1.6	1.3
20	1.6	1.3
20	1.8	1.5
>20	2.5	1.5~2.0

### 4.2 风压不均匀系数

GB 50545—2010 中主要借鉴了前苏联以及部分发达国家的设计经验,并结合了中国输电线路的实际运行情况,对风压不均匀系数的取值提出了要求。风压不均匀系数与风速有关,GB 50545—2010 根据不同风速给出了不同的风压不均匀系数。而 ASCE 导则不考虑风压不均匀系数,主要原因在于确定风荷载的不均匀性较为复杂,并且风荷载在预测时有较大的不确定性。但风压不均匀系数主要是考虑风的空间相关性,而 ASCE 导则中的输电杆塔线条阵风响应因子  $G_f$  随档距的增加而减小,本身就是考虑了风的空间相关性后的结果,因此在 ASCE 导则中风压不均匀系数体现在阵风响应因子。

## 5 结论

上面通过对 GB 50545—2010 与 ASCE 导则中塔身风荷载和导线、风荷载、地线风荷载计算公式中各参数的对比分析,得出了以下结论:

1) 在 GB 50545—2010 与 ASCE 导则中相似地貌的条件下,ASCE 导则中的风压高度变化系数小

于 GB 50545—2010。并且杆塔有效高度越高,ASCE 导则与 GB 50545—2010 的风压高度变化系数比值越来越小,两者的差距逐渐增大。

2) GB 50545—2010 中角钢塔和钢管塔的风荷载体型系数均小于 ASCE 导则中的设计参数。GB 50545—2010 的导、地线体型系数比 ASCE 导则值大 10%~20%。

3) GB 50545—2010 的塔身风荷载调整系数与 ASCE 导则的阵风响应因子的变化范围大致相同。但 ASCE 导则中铁塔阵风响应因子随着高度的增加而降低,并与塔形无关。而 GB 50545—2010 的塔身风荷载调整系数是随着塔高增加而递增的,并且单柱拉线塔和一般铁塔取值不同。

4) 设计风速小于 27 m/s 时,GB 50545—2010 的线条风荷载调整系数较小;设计风速大于 27 m/s 时,两者的风荷载调整系数和阵风响应因子大致相同。

5) 对于山区地形,GB 50545—2010 将附加平地风速的 1.1 倍作为设计风速。ASCE 导则考虑了不同参数的地形影响因子,但在实际工程中与之相对应的地形较少,所以应用范围也比较窄。

6) GB 50545—2010 与 ASCE 导则对杆塔构件以及线条覆冰时风荷载的计算存在差别。GB 50545—2010 根据不同的覆冰厚度考虑不同的增大系数,而 ASCE 导则通常不考虑覆冰引起的结构挡风面积增加的影响。

7) 与 ASCE 导则相比,GB 50545—2010 中的荷载系数普遍较大,说明中国实际输电线路的计算风荷载偏大,可能会引起更多的材料使用和经济支出。因此,未来可对 ASCE 导则等国外规范在中国复杂山区地形的适用性以及中国输电线路设计规范中荷载参数的优化方面展开进一步的研究。

### 参考文献

- [1] 李文斌,陈剑平,周方,等. 强风作用下输电杆塔损伤破坏特点研究[J]. 武汉理工大学学报,2019,41(12): 81-88.
- [2] 安旭文,王昊深,侯建国. 国内外输电线路设计规范风荷载取值标准的比较[J]. 武汉大学学报(工学版) 2011,44(6):740-743.
- [3] 徐彬,冯衡,曾德森. 国内外输电线路设计规范风荷载比较[J]. 华中电力,2012,25(2): 76-81.
- [4] JIANG Q,DENG H Z. Comparison on wind load prediction of transmission line between chinese new code and

other standards[J]. Procedia Engineering, 2011, 14 (C): 1799-1806.

- [5] 廖宗高, 傅鹏程. IEC、ASCE、GB 50545 规范风荷载计算对比与分析[J]. 电力勘测设计, 2011(3): 59-63.
- [6] 张盈哲, 廖宗高, 谢强. 输电线路设计规范中风荷载计算方法的比较[J]. 电力建设, 2013, 34(7): 57-62.
- [7] 汪晶毅, 潘春平, 朱映洁. 国内外架空输电线路档中线间距设计的对比研究[J]. 中国电力, 2017, 50(11): 90-95.
- [8] 岳浩, 黄欲成, 李健. 中美设计规范导线风冰荷载比较[J]. 电力科学与工程, 2015, 31(1): 72-78.
- [9] Guidelines for electrical transmission line structural loading (third edition): ASCE 74—2009 [S].

- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范: GB 50545—2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 1000 kV 架空输电线路设计规范: GB 50665—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部.  $\pm 800$  kV 直流架空输电线路设计规范: GB 50790—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.

#### 作者简介:

冯 勇(1985), 男, 硕士, 高级工程师, 从事输电线路设计及管理工作。 (收稿日期: 2023-08-31)

(上接第 90 页)

表 1 不同状态下振动信号特征分析

类别	分布特征	幅值特征	频率特征
正常	三分段。第 1 段信号平缓且幅值最小; 第 2 段信号陡且幅值较大; 第 3 段存在多个信号混叠, 信号频率高且幅值最大	3 个测点中 VB1 较大, VB3 较小	中高频成分多
传动轴松动	三分段。第 1 段信号变陡且幅值增大; 第 2 段信号上升变缓; 第 3 段信号变缓且幅值变小	3 个测点幅值整体变小	中高频成分多
触头松动	三分段。第 1 段信号变陡且幅值增大; 第 2 段信号变缓; 第 3 段信号变缓。第 1 段和第 3 段信号存在尖峰	3 个测点中 VB1 较大, VB3 较小	高频成分增多
过渡电阻松动	三分段。第 2 段和第 3 段幅值明显减小, 信号变缓	3 个测点幅值整体变小	低频成分增多

## 4 结 论

上面介绍了 OLTC 典型结构, 以双过渡电阻组合式 OLTC 为例分析了工作原理。结合实际生产工作, 介绍了 3 起典型故障案例, 结果表明机械缺陷是导致机构卡涩、切换失败、触头烧蚀的主要原因。结合典型故障缺陷开展了机械缺陷模拟试验研究, 以双过渡电阻 M 型 OLTC 为基础, 搭建了故障模拟试验平台, 设置了传动轴松动、触头松动过渡电阻松动等典型机械缺陷, 并采用振动法对不同状态进行检测, 结果发现不同状态下振动信号分布特征、信号幅值和频率特征等差别明显, 可为后续 OLTC 故障诊断研究工作提供重要支撑。

#### 参考文献

- [1] 张德明. 变压器真空有载分接开关[M]. 北京: 中国电

力出版社, 2015.

- [2] 电力行业电力变压器标准化技术委员会. 变压器油中溶解气体分析和判断导则: DL/T 722—2014[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [3] 电力行业电力变压器标准化技术委员会. 电力变压器分接开关运行维修导则: DL/T 574—2021[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
- [4] 骆欣瑜, 廖文龙, 刘睿, 等. 一起换流变压器真空有载分接开关乙炔异常分析[J]. 四川电力技术, 2023, 46(3): 90-94.
- [5] 梁毅毅, 吴雄, 吴晓晖, 等. 一起 220 kV 主变压器有载分接开关触头烧损缺陷分析[J]. 四川电力技术, 2023, 46(1): 78-82.
- [6] 谢茜, 刘睿, 张宗喜, 等. 一起变压器 M 型有载分接开关事故的分析[J]. 四川电力技术, 2020, 43(1): 63-66.

#### 作者简介:

董青迅(1986), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电测热工技术监督;

罗 杨(1985), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化;

周 波(1984), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为技术监督;

邱 炜(1985), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为技术监督与一次检修;

胡祥胜(1986), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电测热工技术监督;

蒋闵威(1996), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电测热工技术监督;

吴 雄(1990), 男, 高级工程师, 研究方向为一次检修;

袁明哲(1985), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为二次检修。

(收稿日期: 2023-10-17)