

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.10.020

500 kV 输电线路耐张塔跳线风偏旋转特性研究

赵 国^{1,2}, 祝和平^{1,2}, 李树林^{1,2}, 宋昊然^{1,2}

(1. 湖北工业大学电气与电子工程学院, 武汉 430068; 2. 湖北工业大学太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室, 武汉 430068)

摘要: 强风环境下, 输电线路耐张塔跳线结构会发生旋转, 使得跳线与杆塔之间的间隙小于安全值, 造成风偏闪络事故。为了探究耐张塔跳线风偏旋转特性, 阐明其对输电线路风偏跳闸风险的影响, 文中搭建了某地区 500 kV 耐张塔绝缘子串—跳线—笼式跳线骨架耦合有限元模型, 对跳线悬垂绝缘子串数、笼式跳线骨架长度以及风向角对跳线风偏旋转角度的影响进行了讨论, 并结合平均风速为 35 m/s 的脉动风况对该跳线模型进行了脉动风偏响应分析。最后对实际耐张塔跳线最小绝缘间隙进行计算, 得出结论: 考虑跳线风偏旋转角度会使绝缘间隙减小, 且在大风工况下, 跳线最小绝缘间隙会小于规程值, 使得输电线路存在较大的风偏跳闸风险。

关键词: 500 kV 输电线路; 耐张塔; 跳线; 风偏旋转特性; 有限元分析; 最小电气间隙

Research on Windage Yaw Rotation Characteristics of Tension Tower Jumper of 500 kV Transmission Line

ZHAO Guo^{1,2}, ZHU Heping^{1,2}, LI Shulin^{1,2}, SONG Haoran^{1,2}

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. Key Laboratory of Solar Energy Efficient Utilization and Energy Storage Operation Control, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: Under strong wind conditions, the jumper structure of the tension tower in transmission lines may undergo rotation, causing the clearance between the jumper and the tower to fall below the safety threshold, thereby resulting in windage yaw flashover accidents. For exploring the windage yaw rotation characteristics of strain tower jumper and clarifying its influence on the risk of windage yaw tripping of transmission lines, a coupled finite element model of insulator string-jumper-cage jumper frame for 500 kV strain tower in a certain area is established. The influence of the number of suspension insulator strings of the jumper, the length of cage jumper frame, and the wind direction angle on the windage yaw rotation angle of jumper are discussed. In addition, a fluctuating wind response analysis of the jumper model is carried out under a fluctuating wind condition with an average wind speed of 35 m/s. Finally, the minimum insulation clearance of the actual strain tower jumper is calculated. It is concluded that consideration of the windage yaw rotation angle of the jumper leads to a reduction in the insulation clearance. Moreover, under high wind operating conditions, the minimum insulation clearance of the jumper may fall below the value specified in the regulations, posing a significant risk of windage yaw trip-out for the transmission line.

Key words: 500 kV transmission line; tension tower; jumper; wind yaw rotation characteristics; finite element analysis; minimum electrical clearance

0 引言

输电线路受大风作用会使得输电导线及绝缘子串结构发生摆动, 导致输电线与杆塔之间的电气间隙过小, 输电导线就可能会对塔身放电, 发生风

偏跳闸^[1-8]。输电导线风偏跳闸后的重合闸成功率较低, 严重影响线路供电可靠性, 是电网安全稳定运行的重大隐患^[9-14]。

对于输电导线与杆塔之间的电气间隙, 工程中通常先计算线路中绝缘子的风偏角, 然后采用间隙

圆法或几何算法来计算电气间隙,因此对于输电线路风偏的研究主要是对输电线路绝缘子风偏角的计算^[15-19]。目前中国规程中常采用刚体直棒法计算绝缘子风偏角,虽然该方法计算简便,但忽略了塔—绝缘子串—线之间相互耦合的作用,因此存在一定的误差^[20-22]。关于输电线路风偏的研究,国内外许多学者在对风荷载的模拟和风偏模型的选取上都做了大量的工作。文[23]利用自行开发的软件进行仿真计算,研究了在稳态风和脉动风作用下,三相导线出现不同相位风偏引起的摆动情况,并得出了相应的最小相间距离、不平衡张力和悬挂点张力等数据。文[24]以绝缘子的风偏位移和端点部位对杆塔的空间支座反力响应为对象,对多跨输电线路—绝缘子体系的风振响应规律进行了研究。文[25]利用 Ansys 仿真软件构建了 500 kV 直线塔—串—线耦合有限元模型,分析了两种绝缘子串在稳态风作用下风偏角的变化趋势及影响因素;文[26]采用 Ansys 有限元仿真软件对 500 kV 输电线路跳线进行了平均风速为 33.6 m/s 的脉动风偏仿真,并搭建了风洞试验与之对比。

由此可见,国内外学者研究输电线路风偏特性仅限于导线或绝缘子串受风荷载的摆动情况。但经研究表明,针对 500 kV 以上的耐张塔跳线,笼式跳线装置的笼式跳线骨架在不规则强风环境下还会发生旋转,进一步增加了线路风偏跳闸的风险。因此,文中以某 500 kV 笼式跳线为研究对象,利用有限元模型分析其在 3 种静风力以及平均风速为 35 m/s 的脉动风作用下的风偏旋转特性,研究结果对强风地区输电线路跳线防风偏改造具有指导意义。

1 有限元模型建立

1.1 跳线模型

某地区 500 kV 输电线路采用 JL/LB20A-720/50 八分裂钢芯铝绞线作为笼式跳线,长 17 m,弧垂为 5 m,跨度为 14 m。跳线采用 LINK10 索单元进行建模,截面采用单导线模型等效实际八分裂导线,单元长度为 1 m;跳线两端与耐张塔相连,中间的笼式跳线骨架采用钢管、角钢、槽钢等型材作为骨架主材,长 6 m,承受拉力,采用 LINK8 杆单元进行建模。为确定跳线的初始状态,文中采用迭代找形法,在标准地球重力环境下求解得到跳线的初始形状^[27]。文中参考的跳线相关参数见表 1。

1.2 绝缘子模型

500 kV 输电线路笼式跳线悬垂绝缘子常选用

表 1 跳线结构参数

Table 1 Jumper structure parameters

跳线型号	弹性模量/MPa	泊松比	单位长度质量/(kg·m ⁻¹)	外直径/mm	横截面积/mm ²	平均运行拉力/kN
JL/LB20A-720/50	65 000	0.3	2.337	36.10	775.4	176.2

复合绝缘子,复合绝缘子质量较轻,在强风作用下可能会弯曲变形^[28-30]。因此文中对其设置为 Beam188 梁单元,并划分为多个梁单元确保仿真结果真实可靠^[31]。文中所选跳线悬垂绝缘子型号为 FXBW-500/160,具体相关材料参数见表 2。

表 2 绝缘子结构参数

Table 2 Insulator structure parameters

绝缘子型号	弹性模量/MPa	泊松比	单位体积质量/(kg·m ⁻³)	高度/mm	直径/mm
FXBW-500/160	40 000	0.3	25 000	5 000	18

1.3 耦合方式与边界条件

对于文中所构建的绝缘子串—跳线体系模型设置以下具体耦合方式与边界条件:跳线两端与耐张塔连接,因此跳线两端设置为固定约束;跳线中间的笼式跳线骨架与跳线直接连接,因此笼式跳线骨架两端与跳线也设置为固定约束;跳线悬垂绝缘子两端分别与杆塔横担、笼式跳线骨架铰接,因此绝缘子两端耦合方式设置为球形铰接。文中所构建的绝缘子串—跳线—笼式跳线骨架体系模型见图 1。

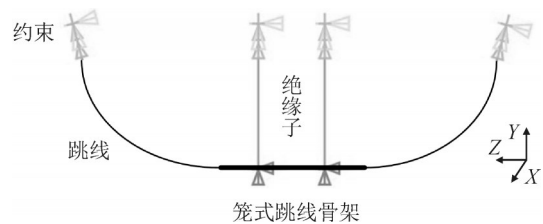


图 1 绝缘子串—跳线—笼式跳线骨架体系有限元模型

Fig. 1 Finite element model of insulator string-jumper-cage jumper skeleton system

2 风荷载的模拟

2.1 谐波叠加法

工程中常用谐波合成法和线性滤波法模拟脉动风。线性滤波法运算量少、速度快,但算法结构复杂,精度比谐波合成法差。谐波叠加法理论简单,物理含义明确,加上 FFT 技术的引入,运算速度得到提高。文中采用谐波叠加法对某地区 500 kV 输电线路的脉动风进行了数值模拟,并做出简单介绍。

自然中的脉动风速时程 $\{v_1(t), v_2(t), \dots, v_n(t)\}$ 谱密度矩阵可表示为

$$S(\omega) = \begin{bmatrix} S_{11}(\omega) & S_{12}(\omega) & \cdots & S_{1n}(\omega) \\ S_{21}(\omega) & S_{22}(\omega) & \cdots & S_{2n}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1}(\omega) & S_{n2}(\omega) & \cdots & S_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中, $S_{jk}(\omega)$ ($j=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, n$) 为功率谱密度函数。将 $S(\omega)$ 进行平方根法分解, 可得

$$S(\omega) = H(\omega)H^*(\omega)^T \quad (2)$$

式(2)中

$$\begin{cases} H(\omega) = H(\omega)H^*(\omega)^T \\ H(\omega) = \begin{bmatrix} H_{11}(\omega) & 0 & \cdots & 0 \\ H_{21}(\omega) & H_{22}(\omega) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1}(\omega) & H_{n2}(\omega) & \cdots & H_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

式(2)、(3)中, $H(\omega)$ 为下三角矩阵。

脉动风速时程 $\{v_1(t), v_2(t), \dots, v_n(t)\}$ 可由式(4)模拟, 即

$$v_j(y_j, z_j, t) = \sqrt{2(\Delta\omega)} \sum_{m=1}^j \sum_{l=1}^N |H_{jm}(\omega_{ml})| \times \cos[\omega_{ml}t - \theta_{jm}(\omega_{ml}) + \Phi_{ml}] \quad j=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$B_{jm}(l\Delta\omega) = \begin{cases} \sqrt{2(\Delta\omega)} h_{jm} \left(l\Delta\omega + \frac{m\Delta\omega}{n} \right) \exp(i\varphi_{ml}) & 0 \leq l \leq N \\ 0 & N \leq l \leq 2N \end{cases} \quad (10)$$

2.2 风荷载的数值模拟

文中利用 MATLAB 计算软件采用谐波叠加法进行了平均风速为 35 m/s 的脉动风场模拟, 风速谱采用工程实际应用较多的 Davenport 谱, 仿真参数选取如下: 粗糙度系数按 B 类地貌取 0.003, 时间间隔为 0.1 s, 模拟时间为 600 s^[32-34]。模拟生成的 600 s 脉动风速曲线和对比功率谱曲线见图 2。

在进行模型计算时, 需要将模拟得到的风速值转化为风荷载并施加到线路模型中。文中采用《架空输电线路荷载规范》(DL/T 5551—2018) 中的风荷载计算公式, 将风速转换为风荷载。为避免突加风荷载引起的瞬态效应, 荷载施加过程分为两步: 先施加平均风荷载至输电线路平衡位置, 再施加脉动风荷载。

3 跳线风偏旋转特性分析

3.1 串数对风偏旋转角度的影响

耐张塔跳线绝缘子串受风力摆动过程中, 由于风力的不均匀性, 笼式跳线骨架会发生旋转, 导致电气间隙进一步减小。为了分析其最大旋转特性, 本研究取基准风速 v 从 0 到 35 m/s 变化, 对笼式跳线骨架一端风力取正值, 另一端取负值, 间隔为 5 m/s, 跳线长度为 17 m, 弧垂为 5 m, 笼式跳线骨架长度为 6 m, 跨度为 14 m, 悬挂绝缘子串数为 1、2、3 串。求解后, 得到不同

式(4)中: N 为趋近无穷大的正整数; ω_{ml} 为截止频率; $\Delta\omega = (\omega_2 - \omega_1)/N$, 为频域间隔; Φ_{ml} 为 $[0, 2\pi]$ 内的随机相位角; $\theta_{jm}(\omega)$ 为结构上任意两点之间的相位角, 是 $H_{jm}(\omega)$ 的复角, 其中:

$$\theta_{jm}(\omega) = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[H_{jm}(\omega)]}{\text{Re}[H_{jm}(\omega)]} \right\} \quad (5)$$

$$\omega_{ml} = (l-1)\Delta\omega + \frac{m}{N}\Delta\omega \quad (6)$$

式(6)中, l 为正整数。根据采样定理, 可确定

$$\Delta t \leq \pi/\omega_{ml} \quad (7)$$

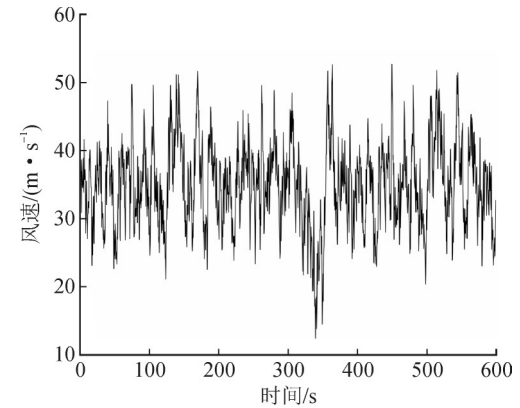
上述矩阵计算量大, 且求解速度低, 因此引入 FFT 技术来提高运算速度, 即

$$v_j(p\Delta t) = \text{Re} \left\{ \sum_{m=1}^j h_{jm}(q\Delta t) \exp[i(m\Delta\omega p\Delta t/n)] \right\} \quad p=0, 1, \dots, 2n-1; \quad j=1, 2, \dots, n \quad (8)$$

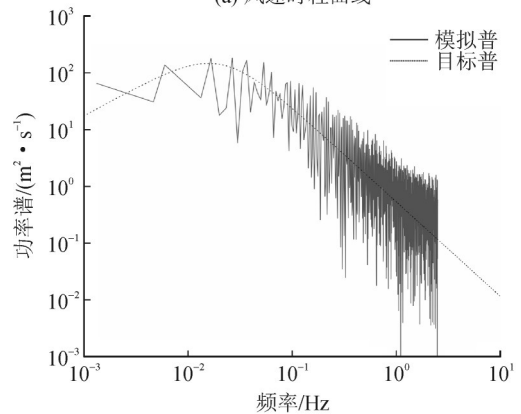
式(8)中, q 是 $p/2N$ 的余数, $q=0, 1, 2, \dots, n-1$ 。

$$h_{jm}(q\Delta t) = \sum_{l=1}^{2N-1} B_{jm}(l\Delta\omega) \exp \left(i \frac{\pi l q}{N} \right) \quad (9)$$

串数下笼式跳线骨架旋转角的变化趋势, 见图 3。



(a) 风速时程曲线



(b) 风速功率谱对比

图2 脉动风时程模拟结果

Fig. 2 Simulation results of fluctuating wind time history

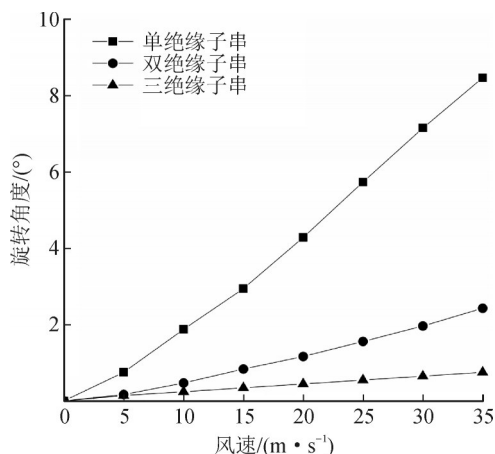


图3 不同串数下笼式跳线骨架旋转角变化趋势

Fig. 3 Variation trend of rotation angle of cage jumper skeleton under different string numbers

由图3可知,笼式跳线骨架旋转角度随风速增大而增大,且单绝缘子串工况受风力影响较大。跳线悬垂绝缘子串数增多可以抑制旋转趋势,但也会增加杆塔横担和跳线的负荷,缩短使用寿命并增加运行风险。因此,需要进一步研究分析如何选择跳线绝缘子串数。

3.2 笼式跳线骨架长度对风偏旋转角度的影响

为分析跳线悬垂绝缘子与笼式跳线骨架长度对跳线风偏旋转角度的影响,本研究取基准风速 v 由0~35 m/s变化,间隔为5 m/s,输电线路的跳线长度为17 m,弧垂为5 m,悬挂跳线的跨度为14 m,绝缘子串数 n 分别取1、2、3串。求解后,得到不同笼式跳线骨架长度下耐张塔跳线风偏旋转角度变化趋势见图4。

由图4可知,在跳线绝缘子串数为1、2串时,跳线受风荷载时的旋转角度随笼式跳线骨架长度的增加而增大,当跳线绝缘子串数为3串时,旋转角度则随笼式跳线骨架长度的增加而减小。出现这种现象是因为笼式跳线骨架长度的增加使得受风面积加大,从而导致跳线所受风荷载增加,当串数为1、2串时,跳线所受风荷载的增加量大于笼式跳线骨架长度增加时自重的增加量,因此旋转角度随笼式跳线骨架长度的增加而增大;当串数为3串时,跳线所受风荷载的增加量小于笼式跳线骨架长度增加时自重的增加量,因此旋转角度随笼式跳线骨架长度的增加而减小。

3.3 风向角对跳线风偏旋转角度的影响

工程中一般以风向垂直跳线为最恶劣情形,但实际环境中,风不可能一直垂直作用于跳线,有时风向角会与跳线存在一定的夹角。风向角示意图见图5。

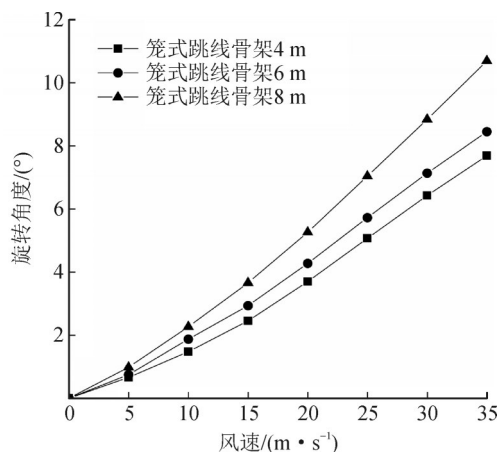
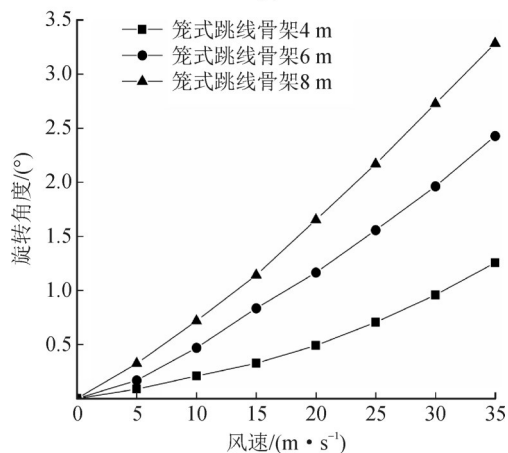
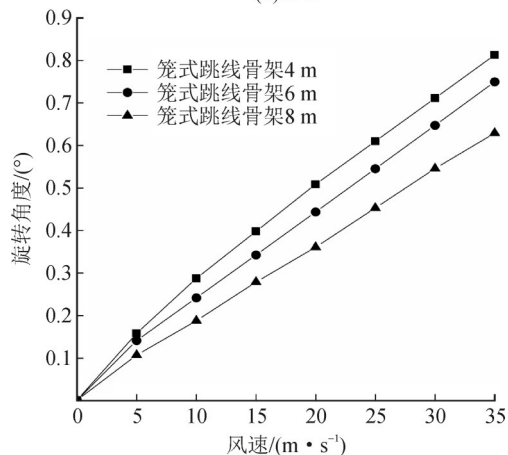
(a) $n=1$ (b) $n=2$ (c) $n=3$

图4 不同笼式跳线骨架长度下耐张塔跳线风偏旋转角变化趋势

Fig. 4 Change trend of wind deflection rotation angle of tension tower jumper under different cage jumper skeleton lengths

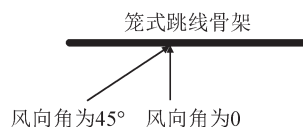


图5 风向角示意图

Fig. 5 Wind direction diagram

为分析风向角对跳线风偏旋转角度的影响,本研究取稳定风速为 15、20、35 m/s,风向角以垂直跳线时为 0° ,取 $0^\circ \sim 45^\circ$ 变化,输电线路的跳线长度为 17 m,弧垂为 5 m,悬挂跳线的跨度为 14 m,笼式跳线骨架长度为 6 m,绝缘子串数取 2 串。求解后得到不同风向角下耐张塔跳线旋转角度变化趋势见图 6。

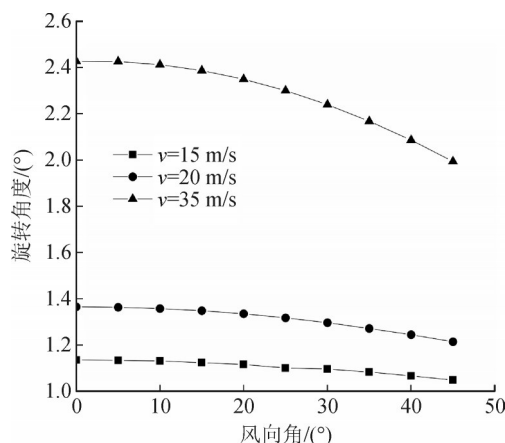


图 6 风向角对跳线风偏旋转角度的影响

Fig. 6 Effect of wind direction angle on windage yaw rotation angle of jumper

由图 6 可知,跳线风偏旋转角度随风向角的增大而减小,且风速越大,旋转角度减小的越大。造成这种现象是因为当风向角为 0° 时,即风力垂直作用于跳线,此时对笼式跳线骨架的作用力最大,当风向角增大时,原本作用于笼式跳线骨架的风荷载被分解为一部分垂直作用于跳线,另一部分水平作用于跳线,因此导致垂直于跳线部分的风荷载减小,跳线旋转角度也就随之减小。

3.4 脉动风对跳线风偏旋转角度的影响

自然实际环境中风速不是稳定不变的,为了更清晰的分析耐张塔跳线风偏旋转特性,对耐张塔跳线模型引入平均风速为 35 m/s 的脉动风,风向角取 0° ,输电线路的跳线长度为 17 m,弧垂为 5 m,悬挂跳线的跨度为 14 m,绝缘子串数取 1 串,笼式跳线骨架长度为 6 m,跳线风偏旋转角度变化见图 7。

由图 7 可知,笼式跳线骨架受脉动风影响,其风偏旋转角在模拟时程内围绕均值不停上下摆动,跳线风偏旋转角度基本在 $4^\circ \sim 12^\circ$ 变化。为清晰稳定分析跳线在脉动风速中的变化情况,取风速模拟时长为 300 s,笼式跳线骨架一端点在模拟时程 300 s 内的水平位移变化见图 8。

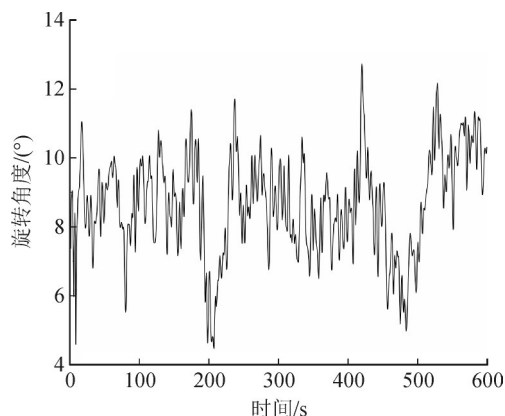


图 7 跳线旋转角度变化时程

Fig. 7 Time history of jumper rotation angle change

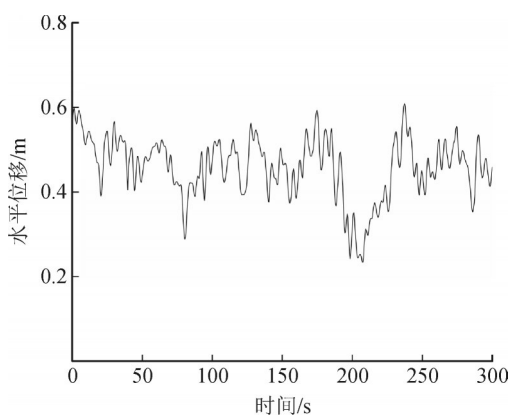


图 8 笼式跳线骨架端点水平位移变化

Fig. 8 Horizontal displacement change of cage jumper skeleton endpoint

由图 8 可知,笼式跳线骨架在脉动风中不停摆动,在平均风速为 35 m/s 的脉动风环境中,笼式跳线骨架端点在水平上移动距离最大超过了 0.6 m,极大缩短了跳线与杆塔塔身的电气间隙,这在高风速地区十分危险,因此在高风速环境地区,必须重视耐张塔跳线风偏旋转特性,需采取有效的防治措施,以免发生跳线风偏闪络现象。

4 实例分析

文中以某地区 500 kV 典型同塔双回路干字形塔头为例,分析雷电过电压工况(15 m/s)、操作过电压工况(20 m/s)、大风工况(35 m/s)下耐张塔跳线考虑风偏旋转特性的风偏性能,该线路最小电气间隙在各工况时应分别满足 3.3、2.5、1.2 m。干字形塔头最小空气间隙几何求解见图 9。

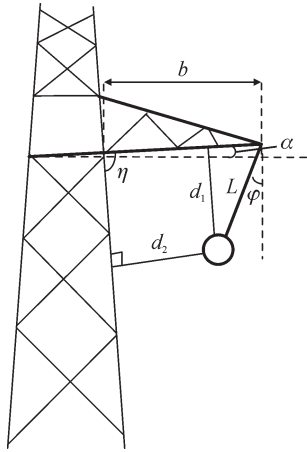


图9 最小空气间隙与风偏角的几何关系

Fig. 9 Geometric relationship between minimum air gap and wind yaw angle

输电导线风偏后到杆塔横担与塔身的最小距离分别见式(11)、(12)。最小电气间隙 d 取 d_1 、 d_2 的最小值。

$$d_1 = (L + r) \cos(\varphi + \alpha) - r \quad (11)$$

$$d_2 = b \sin \eta - (L + r) \cos(\eta - \alpha - \varphi) - r \quad (12)$$

$$d = \min\{d_1, d_2\} \quad (13)$$

式(11)-(13)中： d_1 、 d_2 分别为输电导线到杆塔横担和塔身的最小距离，m； L 为悬垂绝缘子串的长度，m； b 为杆塔横担长度，m； r 为输电导线分裂半径，m； η 为塔身与横担之间的夹角，(°)； α 为杆塔横担与水平面之间的夹角，(°)； φ 为绝缘子串风偏角，(°)。

为分析3种临界风速下耐张塔跳线的电气绝缘间隙情况，文中计算了3种工况下耐张塔跳线未考虑风偏旋转特性与考虑风偏旋转特性时的最小电气间隙，计算结果见表3。每种工况设置为：风向角0°，输电线路的跳线长度17 m，弧垂5 m，悬挂跳线的跨度14 m，笼式跳线骨架长度6 m，耐张塔横担7.1 m。

表3 3种工况下耐张塔跳线风偏最小电气间隙

Table 3 Minimum electrical clearance of tension tower jumper under three operating conditions

临界风速/ (m·s ⁻¹)	悬垂绝缘 子串数	最小电气间隙/m		
		最小允 许值	未考虑风偏 旋转	考虑风偏 旋转
15	1	3.3	3.95	3.78
	2		3.52	3.43
	3		3.21	3.19
20	1	2.5	3.16	2.94
	2		2.72	2.64
	3		2.42	2.39
35	1	1.2	1.68	1.14
	2		1.41	1.13
	3		1.12	1.06

由表3可知，500 kV耐张塔跳线在3种临界风速下未考虑风偏旋转角时，只有在悬垂绝缘子串数为1或2串时，跳线与杆塔塔身的最小电气间隙符合规程要求。增加到3串时，最小电气间隙不符合规程。尽管3串悬垂绝缘子能够抑制跳线风偏旋转，但其最小电气间隙不符合规程要求。在考虑跳线风偏旋转角时，笼式跳线骨架的旋转会导致最小电气间隙减小，需要引起注意。而在大风工况下，无论是1串还是2串悬垂绝缘子，跳线与杆塔塔身的最小电气间隙均不符合规程，存在风偏跳闸风险。因此，在实际的输电线路运行中，需要研究有效的防治措施。

5 结论

文中研究了某地区500 kV耐张塔跳线风偏旋转特性，建立了有限元模型分析了跳线悬垂绝缘子串数、笼式跳线骨架长度和风向角对跳线风偏旋转角度的影响，以及脉动风下的跳线风偏旋转特性。最后结合实例分析，计算了不同工况下耐张塔跳线的最小绝缘间隙，得出结论如下：

1)悬垂绝缘子串数越多，对跳线风偏旋转的抑制效果越好，但会加剧杆塔横担和跳线负荷，使得耐张塔及跳线寿命缩短，增加运行风险。

2)悬垂绝缘子串数为1、2串时，跳线风偏旋转角度会随笼式跳线骨架的增长而加大；悬垂绝缘子串数为3串时，跳线风偏旋转角度会随笼式跳线骨架的增长而减小。

3)跳线风偏旋转角会随风向角的增加而减小，当风向角为0°时，即风力垂直与笼式跳线骨架，跳线风偏旋转角度最大。

4)笼式跳线骨架会在脉动风下不停旋转，跳线风偏旋转角度基本在4°~12°变化，且笼式跳线骨架端点在水平上移动距离最大超过了0.6 m。

5)对实际耐张塔跳线最小绝缘间隙进行计算，需要考虑跳线风偏旋转角度对最小绝缘间隙的影响，且在大风工况下，跳线最小绝缘间隙会小于规程值，使得输电线路存在较大的风偏跳闸风险。

参考文献：

- [1] 邸悦伦,蔡泽林,李 丽,等.环渤海地区大范围输电线路舞动风场特征分析[J].电网与清洁能源,2021,37(7):121-129.
Di Yuelun, Cai Zelin, Li Li, et al. Analysis of wind characteristics of wide range transmission line galloping in bohai rim[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(7): 121-129.
- [2] Lou Wenjuan, Zhang Yuelong, Xu Haiwei, et al. Jump height of an

- iced transmission conductor considering joint action of ice-shedding and wind[J]. Cold Regions Science and Technology, 2022(199):103576.
- [3] Yu Yongping, Chen Lihui, Wang Juan, et al. Dynamic characteristics analysis of ice-adhesion transmission tower-line system under effect of wind-induced ice shedding[J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2020, 125(2):647.
- [4] 梁志峰, 周皓阳, 杨明, 等. 寒潮天气下考虑风速波动差异性的风电功率概率预测方法[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(6):106-114. Liang Zhifeng, Zhou Haoyang, Yang Ming, et al. A probabilistic forecasting method of wind power considering the variability of wind speed fluctuations under cold wave weather conditions[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(6):106-114.
- [5] 林丰恺, 王建, 赵启, 等. 基于多模态残差网络融合波形与天气信息的输电线路故障原因辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(20):23-33. Lin Fengkai, Wang Jian, Zhao Qi, et al. Transmission line fault cause identification method based on multimodal residual network integrating waveform and weather information[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(20):23-33.
- [6] 杨楠, 王金鑫, 郭婷, 等. 面向台风灾害计及机组运行与潮流约束的运行场景评估[J]. 电网与清洁能源, 2026, 42(4):139-149. Yang Nan, Wang Jinxin, Guo Ting, et al. Operational scenario assessment of power systems under typhoon hazards considering unit operation and power flow constraints[J]. Power System and Clean Energy, 2026, 42(4):139-149.
- [7] 陈继开, 李平, 常旗峰, 等. 含SVG的双馈风场风速变化条件下高频谐振问题分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(5):38-50. Chen Jikai, Li Ping, Chang Qifeng, et al. Analysis of high frequency resonance problem in doubly-fed wind field systems with SVG with wind speed variation[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(5):38-50.
- [8] 朱煜昆, 贾轩, 潘霄汉, 等. 计及多区域直驱风场经VSG控制的MMC送出系统小信号稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(5):11-23. Zhu Yukun, Jia Xuan, Pan Xiaohan, et al. Small signal stability analysis of multi-region direct-drive wind farms connected via a VSG-controlled MMC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(5):11-23.
- [9] 邹旦旦, 余霜鸿, 邵戎, 等. 考虑复杂山地风加速的架空线路风偏闪络故障分析[J]. 电瓷避雷器, 2022(4):185-193. Zou Dandan, Yu Shuanghong, Shao Rong, et al. Flashover fault of overhead transmission lines caused by windage yaw considering the speed up of wind velocity under complex mountainous terrain[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(4):185-193.
- [10] 吴田, 张超, 方春华, 等. 特高压输电线路塔线体系风振响应特性及对登塔人员影响分析[J]. 高压电器, 2023, 59(3):69-77. Wu Tian, Zhang Chao, Fang Chunhua, et al. Wind-induced vibration response characteristics of UHVDC transmission tower-line system and analysis of its influence on tower-climbing lineman[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(3):69-77.
- [11] Zhao Guo, Wan Chenxi, Zuo Wanqing, et al. Research on multi-objective optimal operation strategy for wind-photovoltaic-hydro complementary power system[J]. International Journal of Photoenergy, 2022(4):5209208.
- [12] 高思航, 刘咏熙, 王锐, 等. 基于摩擦纳米发电机的输电线路微风振动自驱动传感技术[J]. 电力工程技术, 2025, 44(5):188-197. Gao Sihang, Liu Yongxi, Wang Rui, et al. Self-powered sensing technology of wind vibration for transmission lines based on triboelectric nanogenerator[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(5):188-197.
- [13] 董飞飞, 陈海焱, 刘哲, 等. 输电线路绿色发展相关问题的思考与建议[J]. 智慧电力, 2025, 53(2):81-86. Dong Feifei, Chen Haiyan, Liu Zhe, et al. Thoughts and suggestions on green development of transmission lines[J]. Smart Power, 2025, 53(2):81-86.
- [14] 高飞, 刘颖异, 贾鹏飞, 等. 基于健康指数的架空线路运行状态评价方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 2(12):167-176. Gao Fei, Liu Yingyi, Jia Pengfei, et al. Evaluation technology for the operational status of overhead lines based on a health index[J]. Power System Protection and Control, 2024, 2(12):167-176.
- [15] 徐铭涛. 输电线路台风风偏跳闸风险评估与防控措施研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020. Xu Mingtao. Study on risk assessment and prevention and control measures of typhoon windage yaw tripping of transmission lines[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [16] 耿宁, 覃智君, 黄镇. 台风灾害下含多元储能的电—气—热综合能源系统韧性提升策略[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(9):64-73. Geng Ning, Qin Zhijun, Huang Zhen. A resilience enhancement strategy for electricity-gas-heat integrated energy systems with multi-energy storage under typhoon disaster[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(9):64-73.
- [17] 刘璐洁, 李传文, 符杨, 等. 考虑台风天气影响的海上风电机组预防性维护策略[J]. 电测与仪表, 2025, 62(11):145-153. Liu Lujie, Li Chuanwen, Fu Yang, et al. Preventive maintenance strategy of offshore wind turbine considering the impact of typhoon weather[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(11):145-153.
- [18] 向真, 李勋, 裴慧坤, 等. 绝缘子串动态风偏角的分布式监测[J]. 电瓷避雷器, 2019(3):216-220. Xiang Zhen, Li Xun, Pei Huikun, et al. The distributed monitoring of the dynamic windage yaw angle of insulator string[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(3):216-220.
- [19] 张志劲, 姬雅晴, 许军, 等. 沿海台风环境复合绝缘子风偏特性及修正[J]. 电网技术, 2023, 47(7):2977-2985. Zhang Zhijin, Ji Yaqing, Xu Jun, et al. Windage yaw characteristics and correction of composite insulators in coastal typhoon environment[J]. Power System Technology, 2023, 47(7):2977-2985.
- [20] 黄雄峰, 颜城, 姜岚, 等. 特高压输电线路新型碳纤维更换绝缘子闭式卡具力学性能研究[J]. 高压电器, 2021, 57(4):172-180. Huang Xiong-feng, Yan Cheng, Jiang Lan, et al. Study on mechanical properties of new carbon fiber replacement insulator closed clamps for UHV transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(4):172-180.

- [21] 荆林国,荆仲毅,张韶晶,等. 500 kV 同塔双回输电线路绝缘子雷电冲击响应研究[J]. 电瓷避雷器,2020(6):198-203.
Jing Linguo, Jing Zhongyi, Zhang Shaojing, et al. Research on the lightning impulse response of insulators of 500 kV same-tower double-circuit transmission line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(6):198-203.
- [22] 王庭华,范文峰,黄国焕,等. 钢管杆塔柔性法兰受弯承载力试验及焊缝受力[J]. 建筑结构,2020,50(11):70-75.
Wang Tinghua, Fan Wenfeng, Huang Guohuan, et al. Flexural bearing capacity test and weld stress analysis of flexible flange joint used in steel poles[J]. Building Structure, 2020,50(11):70-75.
- [23] 周龙武,燕秀,黎诗义,等. 特高压线路脉动风风偏特性及抑制措施仿真[J]. 电瓷避雷器,2022(4):194-200.
Zhou Longwu, Yan Xiu, Li Shiyi, et al. Simulation of fluctuating wind deflection characteristics and suppression measures for UHV transmission lines[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(4):194-200.
- [24] 汪大海,韩少鸿,黄国庆,等. 输电线路龙卷风风振响应的参数分析[J]. 高电压技术,2022,48(10):3871-3881.
Wang Dahai, Han Shaohong, Huang Guoqing, et al. Parametric analysis for dynamic response of transmission lines under tornado[J]. High Voltage Engineering, 2022,48(10):3871-3881.
- [25] 张志劲,姬雅晴,许军,等. 复合绝缘子替代瓷绝缘子对500 kV 输电线路悬垂绝缘子串风偏性能影响[J]. 电网技术,2022,46(5):2017-2024.
Zhang Zhijin, Ji Yaqing, Xu Jun, et al. Influence of composite insulator replacing porcelain insulator on wind deflection performance of suspension insulator string of 500 kV transmission lines[J]. Power System Technology, 2022,46(5):2017-2024.
- [26] 周超,王阳,芮晓明. 500 kV 输电线路跳线风偏有限元分析与试验研究[J]. 工程设计学报,2020,27(6):713-719.
Zhou Chao, Wang Yang, Rui Xiaoming. Finite element analysis and experimental study on wind-induced swing of 500 kV transmission line jumper wire[J]. Journal of Engineering Design, 2020,27(6):713-719.
- [27] 徐兆国,王涛,刘宁波,等. 220 kV 复合绝缘子防风偏仿真计算研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2023,37(5):291-297.
Xu Zhaoguo, Wang Tao, Liu Ningbo, et al. Study on simulation calculation of wind deviation prevention of 220 kV composite insulators[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2023,37(5):291-297.
- [28] 赵伟,董军,陈睿,等. 喀斯特山地垭口处直流棒形悬式复合绝缘子运行性能研究[J]. 电瓷避雷器,2022(5):192-198.
Zhao Wei, Dong Jun, Chen Rui, et al. Operation performance of DC rod suspension composite insulators at karst mountain col area [J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(5):192-198.
- [29] 韦晓星,李西育,何庆文,等. 空心复合绝缘子端部结构对弯曲强度的影响[J]. 电瓷避雷器,2021(6):163-169.
Wei Xiaoxing, Li Xiyu, He Qingwen, et al. Influence of the end structure of hollow composite insulator on bending strength[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(6):163-169.
- [30] 郑武略,商犇,张富春,等. 南方电网超高压公司运行十年以上500 kV 线路复合绝缘子运行性能分析及建议[J]. 电瓷避雷器,2022(5):142-150.
Zheng Wulue, Shang Ben, Zhang Fuchun, et al. Analysis and suggestions on the operational performance of 500 kV line composite insulators operating for more than ten years in China southern power grid EHV company[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(5):142-150.
- [31] 王欣欣,赵博,何成,等. 跨高铁输电线路复合绝缘子伞裙抗风性能研究[J]. 电瓷避雷器,2021(3):194-199.
Wang Xinxin, Zhao Bo, He Cheng, et al. Wind resistance performance of composite insulator shed for transmission lines across high-speed railway[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(3):194-199.
- [32] 杨荆秋,朱全军,冉启鹏,等. 输电塔—线体系脉动风振耦合分析[J]. 力学季刊,2023,44(2):435-443.
Yang Jingqiu, Zhu Quanjin, Ran Qipeng, et al. Coupling analysis of fluctuating wind pressure response for transmission tower-line system[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2023,44(2):435-443.
- [33] 朱云祥,张若愚,曹枚根,等. 海岛大跨越输电塔线体系风振响应及风振系数[J]. 高压电器,2022,58(1):111-121.
Zhu Yunxiang, Zhang Ruoyu, Cao Meigen, et al. Wind induced vibration response and coefficient of large crossing transmission tower line system between islands[J]. High Voltage Apparatus, 2022,58(1):111-121.
- [34] 杨雄骏,黄金山,张建国,等. 基于插值与降维方法的输电塔线体系随机脉动风场有效模拟[J]. 振动与冲击,2021,40(9):77-83.
Yang Xiongjun, Huang Jinshan, Zhang Jianguo, et al. Effective simulation of stochastic fluctuating wind field of transmission tower-line system based on interpolation and dimension reduction method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021,40(9):77-83.
- 赵国(1985—),男,博士,副教授,从事新能源发电技术及微电网规划、系统辨识及其在电力系统中的应用(E-mail: zhaoguo@hbut.edu.cn)。
- 祝和平(1999—),男,硕士研究生,从事架空输电线路风偏风险评估及治理措施研究(通信作者)(E-mail: 122813378@qq.com)。