

DOI:10.11918/202204005

# 山区输电线路跳线风偏状态方程及临界风速研究

陈科技<sup>1</sup>, 卞荣<sup>1</sup>, 鲍旭明<sup>2</sup>, 顾逸<sup>2</sup>, 楼文娟<sup>2</sup>, 徐海巍<sup>2</sup>, 张琳琳<sup>1</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司经济技术研究院, 杭州 310008; 2. 浙江大学 结构工程研究所, 杭州 310058)

**摘要:** 为研究山区微地形中的竖向风速对跳线风偏的影响, 基于刚性直棒法对导线、跳线及绝缘子串增加竖向风荷载分析, 确定跳线处最大风偏位移值作为风偏指标, 建立风荷载作用前后跳线静力平衡平面的几何变换关系, 提出了考虑竖向风速影响的跳线风偏状态方程。建立半径 5 km 的地形模型, 包含跳线风偏事故地点与微气象站点, 采用数值模拟方法将微气象站点风速推演到事故地点风速, 获得了考虑微地形影响的跳线风偏闪络事故风速。将事故线路参数及竖向风速代入跳线风偏状态方程, 得到跳线风偏临界水平风速, 通过与事故风速进行比较验证了跳线风偏状态方程的可靠性。最后根据风偏状态方程分析竖向风速的变化对跳线风偏临界水平风速的影响。结果表明: 随着竖向风速的增大, 跳线风偏临界水平风速线性减小, 当风攻角为 20° 时临界水平风速可降低 16%。考虑竖向风速影响的跳线风偏临界水平风速取值较为安全, 建议在山区输电线路跳线设计过程中加以考虑。

**关键词:** 跳线风偏; 状态方程; 临界风速; 竖向风速; 数值模拟; 微地形

中图分类号: TM726

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2024)03-0164-07

## Study on wind-induced swing state equation and critical wind speed of jump lines in mountainous areas

CHEN Keji<sup>1</sup>, BIAN Rong<sup>1</sup>, BAO Xuming<sup>2</sup>, GU Yi<sup>2</sup>, LOU Wenjuan<sup>2</sup>, XU Haiwei<sup>2</sup>, ZHANG Linlin<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Economic Technology, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310008, China;

2. Institute of Structural Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** To study the influence of vertical wind speed on the wind-induced swing of jump lines in mountainous micro-topography, the vertical wind load on the conductors, jump lines, and insulator strings was analyzed based on the rigid bar method. The maximum displacement of wind-induced swing at the jump lines was determined as the index of wind-induced swing. The geometric transform relation of the static balance plane of jump lines was established before and after the wind load. Then the wind-induced swing state equation was proposed considering the influence of vertical wind speed. A terrain model with a radius of 5 km was established, including the accident site of the wind-induced swing of jump lines and the micrometeorological station. The wind speed of the accident site was deduced from the wind speed of the micrometeorological station by using the numerical simulation method to obtain the accident wind speed of wind-induced swing considering the influence of the micro-topography. The parameters of the accident line and the vertical wind speed were substituted into the wind-induced swing state equation to obtain the critical horizontal wind speed of the wind-induced swing. Then the reliability of the wind-induced swing state equation was verified by comparing the accident wind speed and the critical horizontal wind speed. Finally, the influence of variable vertical wind speed on the critical horizontal wind speed of wind-induced swing was analyzed according to the wind-induced swing state equation. The results showed that with the increase in vertical wind speed, the critical horizontal wind speed of wind-induced swing decreased linearly. When the wind attack angle was 20°, the critical horizontal wind speed could be reduced by 16%. Therefore, the critical horizontal wind speed of the wind-induced swing was much safer considering the influence of vertical wind speed which should be considered in the design of jump lines for mountainous areas.

**Keywords:** wind-induced swing of jump lines; state equation; critical wind speed; vertical wind speed; numerical simulation; micro-topography

现行规范考虑不利地形条件下水平风速的加速效应对输电线路设计的影响, 但没有考虑竖向风速

对输电线路设计的不利作用。竖向风速在山区地貌的流场中普遍存在, 竖向风速的抬升作用将促进跳

收稿日期: 2022-04-02; 录用日期: 2022-07-29; 网络首发日期: 2024-03-18

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240315.1834.014>

基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目(5211JY20001T)

作者简介: 陈科技(1987—), 男, 硕士, 高级工程师

通信作者: 鲍旭明, [baoxmzjdx@163.com](mailto:baoxmzjdx@163.com)



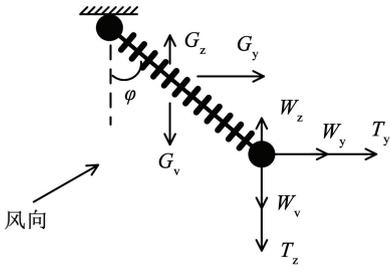


图 2 刚性直棒受力分析示意图

Fig.2 Schematic diagram of force analysis of rigid bar

附加力影响表现如下:当跳线绝缘子串两侧的跳线不平行时,跳线张力会合成横向张力;当跳线绝缘子串挂点和耐张绝缘子串挂点之间存在高差,跳线对两处挂点的作用力不相等。此时应考虑:

$$T_y = 2T_l \cos \omega \quad (4)$$

$$T_z = 2T_l \frac{h_l}{l_v} \quad (5)$$

式中: $T_l$  为有风状态下的跳线张力; $\omega$  为跳线与横担中线间的水平夹角; $h_l$  为跳线绝缘子串挂点与耐张绝缘子串挂点的高差; $l_v$  为跳线档距。

基于准定常假设,规范给出了跳线及绝缘子串的风荷载计算公式:

$$F_w = \alpha \beta_c C_D \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 \sin^2 \theta \cdot d \cdot l_H \quad (6)$$

$$F_G = \beta_s \mu_s \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot A \quad (7)$$

式中: $F_w$  和  $F_G$  分别为跳线和绝缘子串风荷载; $\alpha$  为风压不均匀系数,取 1.0; $\beta_c$  为风荷载调整系数,取 1.4; $C_D$  为跳线阻力系数,当跳线直径大于 17 mm 时,取 1.0,反之取 1.1; $\rho$  为空气密度; $V$  为风速; $\theta$  为风向与跳线方向间的夹角; $d$  为跳线计算外径; $l_H$  为跳线水平档距; $\mu_s$  为绝缘子串阻力系数; $A$  为跳线绝缘子串迎风面积。

将风荷载转换到笛卡尔坐标系有

$$\begin{bmatrix} W_y & W_z \\ G_y & G_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_w \\ F_G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \quad (8)$$

耐张绝缘子串风偏角同样按刚性直棒法计算,得到耐张绝缘子串挂点与跳线绝缘子串挂点分别相对横担最外侧的方向矢量:

$$\mathbf{R}_n = [L_n \cos \gamma_n \cos \left( \frac{\psi}{2} + \varphi_n \right) + L_{x0},$$

$$L_n \cos \gamma_n \sin \left( \frac{\psi}{2} + \varphi_n \right) + L_{y0}, -L_n \sin \gamma_n] \quad (9)$$

$$\mathbf{R}_l = [0, L_s \sin \varphi, -L_s \cos \varphi] \quad (10)$$

式中: $L_n$  为耐张绝缘子串长度; $\gamma_n$  为耐张绝缘子串与横担水平面间的竖向夹角; $\psi$  为线路转角度数; $\varphi_n$  为耐张绝缘子串风偏角; $L_{x0}$  和  $L_{y0}$  分别为耐张绝缘子串上端与横担最外侧  $x$  和  $y$  向距离分量,分别取

1.2 m 和 2 m。

在风荷载作用下,跳线将偏离竖直平面并在新的平面内达到静力平衡,图 3 给出了跳线在风偏前后的静力平衡平面示意图。新静力平衡平面应平行于风荷载和重力荷载的合力方向。风荷载和重力荷载合力的单位方向矢量为

$$\mathbf{r} = [r_x, r_y, r_z] = \frac{[0, W_y, W_z - W_v]}{\sqrt{W_y^2 + (W_z - W_v)^2}} \quad (11)$$

式中: $r_x, r_y$  和  $r_z$  分别为风荷载和重力荷载合力方向矢量对  $x$  轴, $y$  轴和  $z$  轴的投影。

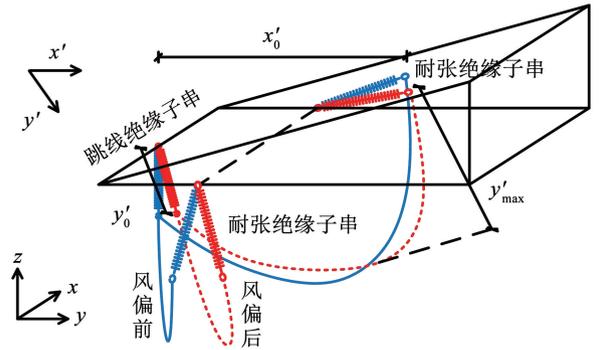


图 3 跳线静力平衡平面

Fig.3 Static equilibrium plane of jump line

在跳线静力平衡平面内建立如图 3 所示局部坐标系  $x'O'y'$ ,按抛物线计算静力平衡构型

$$y' = a x'^2 + b x' + c \quad (12)$$

由于跳线张力极小,有风状态下跳线长度变化可以忽略。耐张绝缘子串的悬挂点位置会随两侧导线的运动而变化,计算可得两端挂点坐标<sup>[11]</sup>。式(12)中的系数可按式计算:

$$a = -\frac{S}{x_0'^2 \sqrt{\frac{3(S^2 - x_0'^2 - y_0'^2)}{S^2 + y_0'^2}}} \quad (13)$$

$$b = a x_0' + \frac{y_0'}{x_0'} \quad (14)$$

$$c = y_0' \quad (15)$$

式中: $S$  为跳线长度, $x_0'$  和  $y_0'$  分别为抛物线对  $x'$  和  $y'$  轴的截距。

由风荷载和重力荷载合力矢量与挂点坐标可计算两截距:

$$y_0' = \frac{(\mathbf{R}_n - \mathbf{R}_l) \cdot \mathbf{r}^T}{\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}^T} \quad (16)$$

$$x_0' = \|\mathbf{r} y_0' + (\mathbf{R}_n - \mathbf{R}_l)\| \quad (17)$$

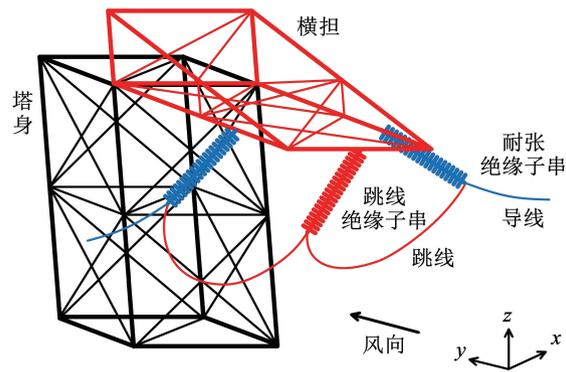
跳线与跳线绝缘子串挂点的最大水平距离为

$$L_1 = r_y \cdot (y_{\max}' - y_0') = -\frac{b^2}{4a} r_y \quad (18)$$

## 2 跳线风偏事故工程背景

### 2.1 事故现场状况

于2019年8月10日1:00时,事故塔绕引跳线发生风偏,位于东经121°8'14.23",北纬28°26'32.72",现场情况如图4所示。图4(a)为事故跳线示意图,展示事故跳线正常工作时的空间形态,正常情况下跳线将与塔身始终保持安全的绝缘间隙;图4(b)为事故地点现场情况,绕引跳线悬挂于塔身脚钉上,跳线有断股,绝缘子串无损伤,说明当时事故风速大于风偏临界值。



(a) 事故跳线示意图



(b) 事故地点现场情况

图4 事故线路及现场情况

Fig. 4 Accident line and site situation

### 2.2 事故线路基本参数

事故线路为500 kV四跨四分裂输电线路,线路示意图如图5所示。故障杆塔塔型为JTS1(27)-21.0,导线跳线采用四分裂LGJ-630/45,耐张绝缘子采用FC300/195,引流线绝缘子采用FXBW-500/100,物理参数见表1、2。事故地点按规范归为B类地貌。线路转角度数 $\psi$ 取29°37'。

### 2.3 事故风速分析

事故发生时正值“利奇马”台风登陆期间,但事故地点缺乏气象资料,仅在其附近存在一处微气象站,二者相距1.9 km。因此事故发生时的实际风速需要通过微气象站数据反演得到。微气象站离地高度5 m,采集得到水平向10 min平均风速和平均风向。在事故发生前后的实测数据如图6所示,其中

部分时刻数据缺失。由图6可得,事故发生期间平均风速和平均风向的变化较为剧烈。

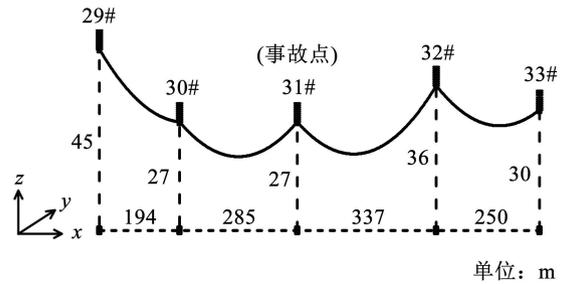


图5 输电线路示意图

Fig. 5 Schematic diagram of transmission line

表1 LGJ630/45 四分裂导线参数

Tab. 1 Parameters of four-bundled conductor LGJ630/45

导线类型	截面积 /mm <sup>2</sup>	线密度 / (kg · m <sup>-1</sup> )	计算外径 /mm	弹性模量 /GPa
单导线	666.55	2.06	33.6	63
等效导线	2 666.2	8.24	134.4	63

表2 绝缘子参数

Tab. 2 Parameters of insulator string

绝缘子串类型	长度/m	质量(加金具)/kg
FC300/195	4.68	1 030
FXBW-500/100	4.45	147

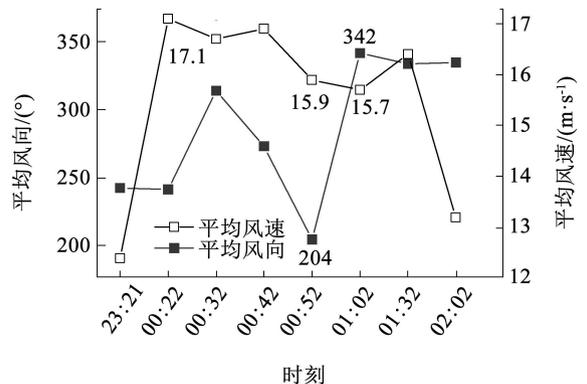


图6 微气象站实测数据

Fig. 6 The measured data of the micrometeorological station

风向与事故地点的关系如图7所示,由图中可得:342°风向下事故地点被一道山脊遮挡,而204°风向与跳线方向近乎平行,二者均较难引起跳线风偏。考虑台风期间风向变化较大,且事故发生是瞬间的,因此假设事故时风向为垂直跳线方向,即296°,平均风速取1:02时刻的数据,即15.7 m/s。



图 7 事故点所处地形地貌

Fig. 7 Landform of the accident site

### 2.4 基于数值模拟的事故地点风速反演

#### 2.4.1 事故地点模型建立

事故地点的地形复杂多变,采用半径 5 km 的圆形区域作为真实地形计算范围,覆盖主要地形特征、事故地点以及微气象站,考虑了计算误差与地形范围的关系<sup>[14]</sup>。为确保 CFD 数值模拟结果更加可靠,将事故地点设为原点,使测点尽量靠近地形中央。真实地形边界会出现高程的突变,采用分段函数<sup>[15]</sup>进行过渡处理,过渡段宽度设为 1 km。消除人造悬崖后的事故周边地形如图 8 所示,地形既实现了平滑过渡,又保留了原始地貌特征。

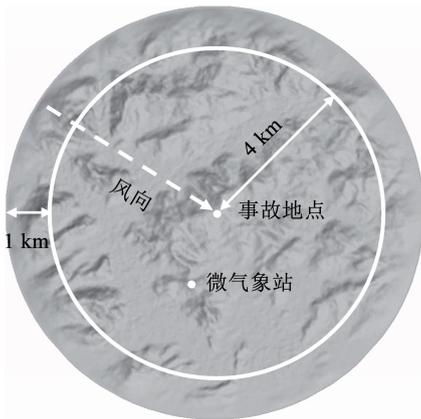


图 8 事故周边地形展示

Fig. 8 The display of the terrain around the accident

#### 2.4.2 计算域设置及网格划分

事故地点最高点为 310 m。为保证流场充分发展,上游长度取 5 km,下游长度取 15 km,两边取 3 km,计算域高度设为 3 km。模型缩尺比为 1:1 000。

设置 4 种网格尺寸进行网格无关性检验,网格方案见表 3。水平向加速比定义为离山体表面水平向平均风速与来流对应高度处的风速比值。根据不同网格方案,比较同一地点 10 m 高度的水平向加速比,结果见图 9,可得方案 1、方案 2、方案 3 与方案 4 的误差分别为 6.5%、3.2% 和 0.5%。综合考虑计

算精度与计算能力,确定方案 3 作为网格划分方法,竖向网格增长率为 1.07,水平向网格增长率为 1.1,  $Y+$  控制在 25 ~ 600 之间。

表 3 网格方案

Tab. 3 Mesh scheme

网格方案	网格数量 / $10^6$	事故地点 2 km 范围内网格大小/m	首层网格/m	竖向网格数量
1	300	30	8	60
2	544	20	5	70
3	1 042	15	2	70
4	1 256	15	2	80

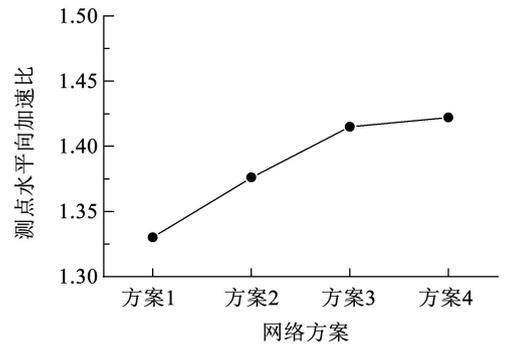


图 9 不同网格方案的测点水平向加速比

Fig. 9 Horizontal speed-up ratio of measuring points with different mesh schemes

#### 2.4.3 数值模拟参数设置

采用 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型,壁面函数选择 Scalable Wall Function。计算域入口为速度入口,出口为自由出口,两侧与顶部为对称边界。计算域地面与真实地形表面为固定壁面,粗糙高度统一设为 1 m。入口边界条件采用 UDF 进行设置<sup>[16]</sup>,选用 B 类场地的风速剖面,参考点高度为 5 m,参考点风速为 15.7 m/s。

## 3 数值模拟与状态方程结果对比

### 3.1 数值模拟反演的事故风速

为便于反演事故发生时事故地点的实际风速,将事故地点与微气象站点作为测点,计算 296° 风向下测点的风场规律。竖向风速比定义为离山体表面竖向平均风速与来流对应高度处的风速比值。事故地点与微气象站点的水平向加速比如图 10 所示。由图 10 可得:事故地点水平向加速比均大于 1,说明存在明显的风场加速效应,最大加速比约为 1.23,出现在离地 10 m 高度;微气象站点的水平向加速比均小于 1,为水平风速减速区,原因是来流方向存在高山阻挡,二者高差约为 230 m。事故地点与微气象站点的竖向风速比如图 11 所示。由图 11 可得:

事故地点竖向风速整体为正,说明竖向风速方向向上,表现为升力;微气象站点近地面竖向风速为负;两处测点的竖向风速比绝对值均较小。综上所述:事故地点与微气象站点虽然仅相距 1.9 km,但局部风环境有明显差异,不能直接采用微气象站的数据作为事故地点的风速结果。

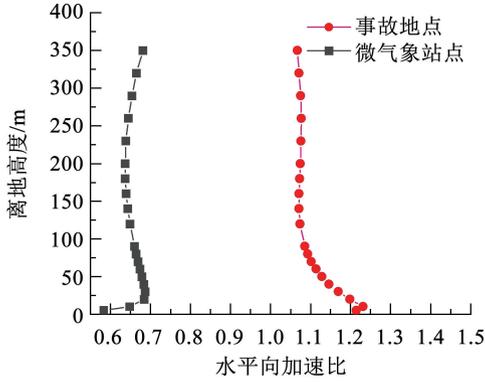


图 10 测点水平向加速比

Fig. 10 Horizontal speed-up ratio of measuring points

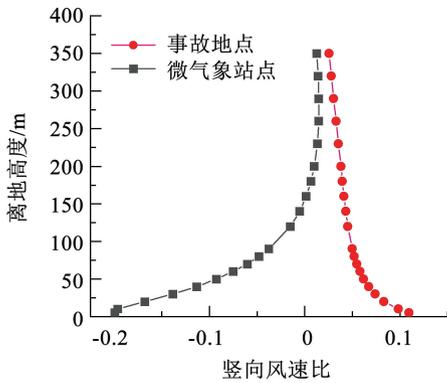


图 11 测点竖向风速比

Fig. 11 Vertical wind speed ratio of measuring points

水平向加速比与竖向风速比均为无量纲参数,可用于反映不同地点风速剖面的内在联系。风速反演过程如下:通过微气象站点 5 m 高度处实测水平平均风速 15.7 m/s 得到来流 B 类风场 5 m 高度处水平平均风速为 26.9 m/s,进一步可得 B 类风场 27 m 高度处水平平均风速为 34.6 m/s,最后获得 27 m 高度处事故点水平平均风速为 40.7 m/s,竖向平均风速为 2.6 m/s,计算得到事故点风攻角约为 3.6°。

### 3.2 由风偏状态方程计算临界风速

为使公式简洁明了,采用了全风速推导跳线风偏状态方程,而为便于比较,采用水平风速呈现结果。由式(1)可得考虑竖向风速影响的跳线风偏临界风速,风攻角按数值模拟结果的 3.6°进行取值,采用试算法进行求解。图 12 给出了来流水平风速为 25 ~ 50 m/s 的风偏状态函数值。结果表明:考虑竖向风速的风偏临界水平风速为 26.32 m/s,未考

虑竖向风速的风偏临界水平风速为 27.07 m/s,后者略大于前者,说明考虑竖向风速影响的临界风速取值较为安全;二者较为接近,说明当竖向风速较小时,其对跳线风偏临界水平风速影响较弱。同时,提取风偏状态函数值为 -1.2 时的水平风速分别为 38.0 m/s 和 40.0 m/s,说明事故风速下跳线会触碰塔身,与实际事故观测现象相匹配,证明跳线风偏状态方程合理有效。

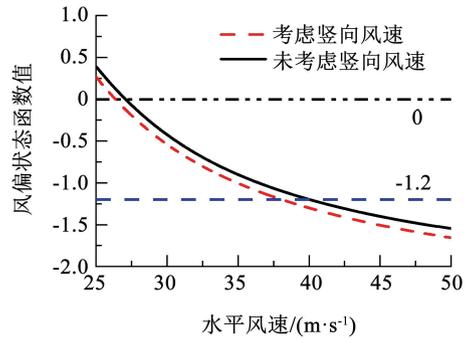


图 12 不同水平风速下的风偏状态函数值

Fig. 12 The values of wind-induced swing state function at different levels of wind speed

本次事故地点位于山顶附近,风速分量主要为水平方向,竖向风速分量较小。但山腰位置可能存在明显的竖向风速,此时风攻角较大,可能对跳线产生明显的竖向力。图 13 展示了不同风攻角下的跳线风偏临界水平风速,随着风攻角在 0 ~ 20°内增大,竖向风速逐渐增大,导致跳线风偏临界水平风速线性减小,降低可达 16%。当风攻角为 20°时,考虑竖向风速影响的跳线风偏临界水平风速为 22.85 m/s,但不考虑该影响的跳线风偏临界水平风速为 27.07 m/s,二者之比为 1.18,说明存在竖向风速影响的输电线路更易发生跳线风偏事故,忽略竖向风速的影响可能低估跳线风偏响应,使得抗风偏设计较不安全。因此设计过程中需要考虑竖向风速的作用。

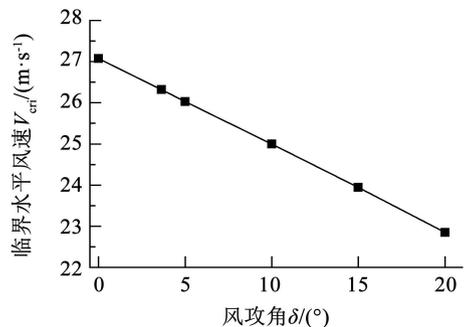


图 13 不同风攻角下的临界水平风速

Fig. 13 Critical horizontal wind speed under different wind attack angles

## 4 结 论

本文以刚性直棒法及风荷载作用前后静力平衡平面的关系确定跳线处最大风偏位移值,提出了考虑竖向风速影响的跳线风偏状态方程,根据实际绕引跳线风偏事故验证跳线风偏状态方程的可靠性,探讨竖向风速对跳线风偏临界水平风速的影响,得出如下结论:

1)通过数值模拟得到的事故风速大于跳线风偏状态方程计算得到的风偏临界风速,证明跳线风偏状态方程合理有效。

2)当风攻角在  $0 \sim 20^\circ$  内增大时,竖向风速逐渐增大,导致跳线风偏临界水平风速线性减小,降低可达 16%。

3)考虑竖向风速影响的跳线风偏计算方法可进一步完善规范中的设计要求,贴近输电塔线体系实际所处的流场状况,对于山区地貌的输电线路抗风设计具有显著的应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] JACKSON P S, HUNT J C R. Turbulent wind flow over a low hill [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1975, 101(430): 929. DOI: 10.1002/qj.49710143015
- [2] TAYLOR P A, LEE R J. Simple guidelines for estimating wind speed variations due to small scale topographic features [J]. Climatological Bulletin, 1984, 18(2): 3
- [3] 沈国辉, 姚旦, 余世策, 等. 单山和双山风场特性的风洞试验 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(5): 805  
SHEN Guohui, YAO Dan, YU Shice, et al. Wind tunnel test of wind field characteristics on isolated hill and two adjacent hills [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(5): 805. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2016.05.001
- [4] 李正良, 徐姝亚, 肖正直, 等. 山地风速地形修正系数沿山坡的详细插值分布 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(3): 23  
LI Zhengliang, XU Shuya, XIAO Zhengzhi, et al. Detailed interpolation distribution of hilly wind topographic factor along hillside [J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2016, 43(3): 23. DOI: 10.3969/j.issn.1674-2974.2016.03.004
- [5] 楼文娟, 刘萌萌, 李正昊, 等. 峡谷地形平均风速特性与加速效应 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(7): 8  
LOU Wenjuan, LIU Mengmeng, LI Zhenghao, et al. Research on mean wind speed characteristics and speed-up effect in canyon terrain [J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2016, 43(7): 8. DOI: CNKI;SUN;HNDX.0.2016-07-002
- [6] 楼文娟, 梁洪超, 李正昊, 等. 典型山地地形竖向风速分布特征 [J]. 空气动力学学报, 2018, 36(5): 791  
LOU Wenjuan, LIANG Hongchao, LI Zhenghao, et al. Vertical wind velocity distribution in typical hilly terrain [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2018, 36(5): 791. DOI: CNKI;SUN;KQDX.0.2018-05-010
- [7] 沈国辉, 翁文涛, 王轶文, 等. 某复杂山体的三维风场特征研究 [J]. 振动与冲击, 2020, 39(4): 75  
SHEN Guohui, WENG Wentao, WANG Yiwen, et al. A study on three-dimensional wind field characteristics of a complex hill [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(4): 75. DOI: CNKI;SUN;ZDCJ.0.2020-04-009
- [8] YU C, LI Y, ZHANG M, et al. Wind characteristics along a bridge catwalk in a deep-cutting gorge from field measurements [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 186: 94. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.12.022
- [9] 楼文娟, 吴登国, 刘萌萌, 等. 山地风场特性及其对输电线路风偏响应的影响 [J]. 土木工程学报, 2018, 51(10): 46  
LOU Wenjuan, WU Dengguo, LIU Mengmeng, et al. Properties of mountainous terrain wind field and their influence on wind-induced swing of transmission lines [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(10): 46. DOI: CNKI;SUN;TMGC.0.2018-10-006
- [10] 徐海巍, 楼文娟, 李天昊, 等. 微地形下输电线路跳线的风偏分析 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(2): 264  
XU Haiwei, LOU Wenjuan, LI Tianhao, et al. Wind-induced swing investigation on transmission line jumper wire under hilly terrain [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(2): 264. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2017.02.006
- [11] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册 [M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2002: 103  
ZHANG Diansheng. Electric power engineering design manual of high voltage transmission line [M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2002: 103
- [12] 楼文娟, 周为政, 张跃龙, 等. 输电线路跳线风偏响应分析及手册计算方法修正 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(10): 79  
LOU Wenjuan, ZHOU Weizheng, ZHANG Yuelong, et al. Wind-induced swing response analysis of jump line and modification of manual calculation method [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(10): 79. DOI: 10.11918/202105117
- [13] 邵天晓. 架空送电线路的电力力学计算 [M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2003: 33  
SHAO Tianxiao. Mechanics calculation of electrical wire of overhead transmission lines [M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2003: 33
- [14] 张希斌. 考虑复杂风环境影响的山地地形 CFD 数值模拟 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019  
ZHANG Xibin. CFD numerical simulation of wind field over complex terrain [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019
- [15] LIU Z, ISHIHARA T, HE X, et al. LES study on the turbulent flow fields over complex terrain covered by vegetation canopy [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 155: 60. DOI: 10.1016/j.jweia.2016.05.002
- [16] 李正昊, 楼文娟, 章李刚, 等. 地貌因素对垭口内风速影响的数值模拟 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(5): 848  
LI Zhenghao, LOU Wenjuan, ZHANG Ligang, et al. Numerical simulation of effects of topographic factors on wind speed in col [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(5): 848. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2016.05.006