

山脉地形迎风面输电线路风偏响应特性

刘春城, 孙红运

(东北电力大学建筑工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 基于计算流体动力学(CFD)方法,得到了山脉迎风面输电线路横向和竖向平均风速,研究了线路架设位置、杆塔呼称高、山脉坡度三种因素对输电线路风速的影响。建立了跨越山脉的四档输电线路有限元模型,分别利用山地风速和平地风速计算线路风偏响应,得到风偏角增大百分比。同时利用响应面方法建立了三种因素和风偏角增大百分比的二次回归方程。研究表明:当线路越靠近山脊,杆塔呼称高越高,线路风偏越严重。对于架设在山脉总高度 3/4 以下的线路,设计时可以适当减小设计风速,既保证线路风偏安全性又可提高经济性;架设在山脉总高度 3/4 以上的线路,应适当增大设计风速,以提高输电线路风偏安全性。

关键词: 风致振动; 输电线路; 山地风场; 风偏响应; 响应面方法

中图分类号: TU312⁺.1; TM752⁺.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2022)04-1020-09

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.04.026

引言

中国的地理位置和地形特点导致很多输电线路架设在山区环境中。受山体的影响,山地风场与大气边界层风场存在很大差异。在山脉迎风面,由于山体的阻挡,会导致来流风的横向风速显著减小,使线路风偏减小,对线路风偏有利。但是由于爬坡加速效应,又会产生很大的上升气流,竖向风速显著增大,会对输电线路风偏产生不利影响。在横向风和竖向风的共同作用下,迎风面处输电线路风偏特性及计算方法与平地有很大差别。影响这种差别的主要因素包括线路架设位置、杆塔呼称高、山脉坡度。

目前国内外学者大多数关于输电线路风偏响应的研究都基于平坦地貌边界层风场^[1-4]。De Bray 利用风洞试验的方法对单山坡地形下的越山风效应进行了研究,针对陡坡和缓坡两种情况研究了坡度对风场特性的影响^[5]。Bowen 等、Lubitz 等、Neff 等研究了山体坡度、风向角、山体粗糙度等因素对加速效应的影响,但山体模型都是比较简单的山丘,并未考虑山体长度^[6-8]。张宏杰等则针对由两个轴对称山丘组成的峡谷地貌进行了一系列风洞试验,给出了山脊和峡谷中轴线上风剖面的分布规律,并给出了典型位置处的计算公式^[9]。李正良等提出了复杂山地风场平均及脉动风速均方根计算修正模型^[10]。文献[11-15]较系统地研究并分析了峡谷长度、山顶间

距、山脉坡度 3 种地貌因素对平均风加速效应的影响。目前对于山地线路风偏的研究大多只考虑了横向风速,并未考虑竖向风速的影响。因此考虑竖向风速,准确计算线路的风偏响应,对于架设在山脉中输电线路防风偏设计具有重要的借鉴和指导意义。

影响输电线路竖向风速的主要因素包括:线路架设位置、杆塔呼称高、山脉坡度。因此本文建立了不同山脉坡度的山地风场,得到线路各点的平均横向风速和竖向风速随线路架设位置、杆塔呼称高、山脉坡度的变化规律。计算了线路在山地风和平地风下的风偏响应,通过风偏角增大百分比来量化三种因素对线路风偏的影响。最后,用响应面方法得到位置、呼称高、坡度三种因素和风偏角增大百分比的二次回归方程,分析了三种因素对风偏角的影响规律。

1 山脉风场的数值模拟

1.1 山脉地形模型

本文山体横断面选用余弦型山体。山脉三维模型及线路位置如图 1 所示。其中: H 表示山体高度(本文中山体高度统一取 100 m), L 表示山脉长度(统一取 600 m), D 表示山脉底部直径,则山脉的坡度可表示为 $2H/D$ 。线路沿山脊布置为纵向跨越山脉,垂直山脊方向为横向,风向为横向吹向山脉。

收稿日期: 2021-01-25; 修订日期: 2021-03-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278091, 50978049)。

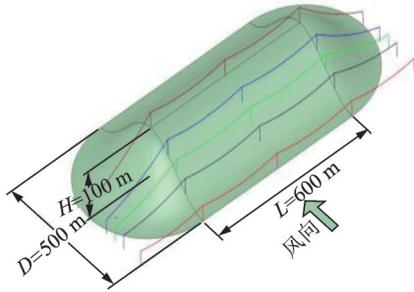


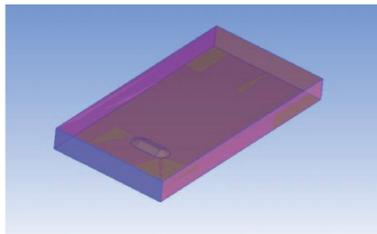
图1 山脉模型及线路位置

Fig. 1 Mountain model and transmission line location

1.2 CFD数值模拟

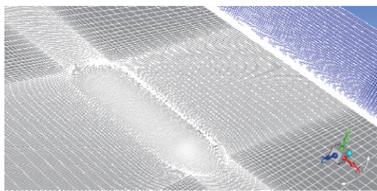
1.2.1 计算域及网格划分

利用ANSYS软件中的SPACECLAIM建立山脉模型,并用ICEM划分网格。其中计算域高度为6倍模型高度,计算域长度:山前取3倍模型长度,山后取9倍模型长度,宽度为3倍模型迎风宽度^[16-17]。计算域采用结构化六面体网格,山体表面最大网格尺寸为10m,增长率为1.1,竖向网格首层高度取为1m,增长率为1.05。计算域模型及网格划分如图2所示。



(a) 计算域模型

(a) Computational domain model



(b) 网格划分

(b) Meshing

图2 计算域模型及网格划分

Fig. 2 Computational domain model and meshing

1.2.2 入口边界条件

入口边界条件的设定对于模拟的结果准确与否有显著的影响,入口剖面包括平均风剖面 and 湍流风剖面,参照GB 50009—2012 建筑结构荷载规范^[18]中使用的指数率模型,平均风剖面的计算公式为:

$$U_{(z)} = U_r \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中 $U_{(z)}$ 为离地高度 z 处的平均风速, U_r 为参考高度 z_r 处的平均风速, α 为地面粗糙度指数。

湍流风剖面计算包括湍动能和耗散率两个参数,为实现入口剖面的自保持性,对湍动能 $k_{(z)}$ 和耗散率 ϵ 分别采用下公式来计算:

$$k_{(z)} = 0.3 \left(I_{(z)} \times U_{(z)} \right)^2 \quad (2)$$

$$\epsilon_{(z)} = \frac{4.5 C_\mu^{\frac{3}{4}} k_{(z)}^{\frac{3}{2}}}{K L_u} \quad (3)$$

式中 $K = 0.42$, $C_\mu = 0.09$, $I_{(z)}$ 为 z 高度处湍流度, L_u 为湍流积分尺度。

这两个参数均采用日本规范^[19]中的公式:(z_g 为梯度风高度, B类地貌下 $z_b = 5$ m):

$$I_{(z)} = \begin{cases} 0.1 \left(\frac{z}{z_g} \right)^{-a-0.05}, & 5 < z < z_g \\ 0.1 \left(\frac{z_b}{z_g} \right)^{-a-0.05}, & z < z_b \end{cases} \quad (4)$$

$$L_u = \begin{cases} 100 \left(\frac{z}{30} \right)^{0.5}, & 30 \text{ m} < z < z_g \\ 100, & z < 30 \text{ m} \end{cases} \quad (5)$$

1.2.3 其余参数

湍流模型采用 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型,选用非平衡壁面函数,计算域入口为速度入口,出口为自由出口,两侧和顶部为对称边界,平地 and 山体表面为固定壁面。根据 Franke 等^[20]的研究,fluent 软件中粗糙度高度 (roughness height) k_s 与空气动力学中粗糙度长度 Z_0 的换算关系为 $k_s = 20Z_0$, B类风场中对地貌粗糙度 Z_0 的规定地表为 0.025, 山体表面为 0.05, 这里取山体和平地的粗糙高度分别为 1 和 0.5 m。

为验证入口边界条件合理性,本文建立一个 $H=100$ m, $D=200$ m, $L=300$ m 的孤立山脉模型,利用上述所示的计算域和入口边界条件计算公式进行计算。并随机选取山体前一点处绘制风速剖面图,如图3所示。从图中可以看出,山前风剖面 and 入口风剖面两点的的风剖面几乎一致,说明边界条件设置合理。

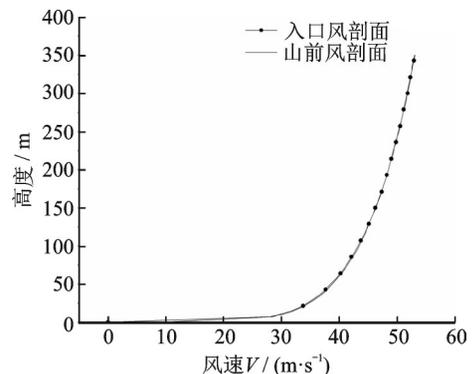


图3 自保持性验证(山前及入口处风剖面)

Fig. 3 Self-preservation verification (wind profile at the piedmont and inlet)

2 输电线路参数和计算工况

2.1 输电线路参数

线路走向如图1中所示,采用“耐张塔-直线塔-直线塔-直线塔-耐张塔”组成4档输电线路,跨内无转角。线路电压等级为500 kV, B类地区,基本风速 $V_0=30$ m/s,导线型号4×LGJ-400/35,绝缘子型号XWP2-160。为便于比较不同地形导线各点风速,每档导线均划分45个单元,整条线路节点个数为181。

2.2 导线风荷载及风偏响应模拟

在有限元软件中模拟导线风偏时,将四分裂导线等效为一根导线,并将截面积、风荷载等参数做等效化处理。将导线离散成多段索单元,计算每个单元所承受的风荷载,作为静力施加到节点上。每个单元所受风荷载计算公式:

$$F_x = \frac{1}{1600} V_h^2 \mu_{sc} \beta_c dl \quad (6)$$

式中 F_x 为单元所受风荷载, V_h 为单元所在高度 h 处的风速, μ_{sc} 为导线体型系数,取1.1, β_c 为风荷载系数,计算风偏时取1, d 为导线直径, l 为单元长度。

2.3 计算工况

为定量分析由于山体的存在会对绝缘子串风偏角产生的影响,本文设置两种计算工况:

工况一:风速 V_h 取值按照《110kV-750kV 架空输电线路设计规范》^[21] 中平地地形计算方法。即

$$V_h = V_0 \left(\frac{h}{10} \right)^{0.16}$$

工况二:风速 V_h 按方向分别取山脉中横向风速 V_x 和竖向风速 V_y ,同时作用在导线上。

基于不同工况下直线塔绝缘子串风偏角,定义风偏角增大百分比为:

$$\eta = (\theta_2 - \theta_1) / \theta_1 \quad (7)$$

式中 θ_1, θ_2 , 分别为工况1,2的山脉中间直线塔绝缘子风偏角计算结果。

3 山脉不同位置输电线路风偏特性

3.1 模型工况

山脉迎风面上不同位置的风场特性不同,因此输电线路所承受的横向风速和竖向风速也有所变化。

本节通过改变线路架设高度来改变线路在山脉中的位置。所有涉及到的数值模拟地形工况如表1所示。

表1 线路及山脉模型参数

Tab.1 Transmission lines and mountains model parameters

工况序号	山脉底面直径 D/m	线路架设高度 H_j/m	杆塔呼称高 h/m	备注
1	500	0	33	
2	500	25	33	考虑不同线路位置
3	500	50	33	
4	500	75	33	
5	500	100	33	

3.2 线路架设位置对风速的影响

根据数值模拟结果可以得到山脉中各个位置线路上的风速(山地风),为了研究由于山体的存在会对线路上风速产生怎样的影响,将各个位置的线路放在常规大气边界层中,即可得到线路的平地风。迎风面上不同位置处输电线路所受山地横向风速,及平地风速如图4所示。由图可知,相比于同等高度下的平地风,线路所受横向风速显著减小,并且随着架设高度的增加,风速逐渐增大。只有架设在山脊上的线路风速超过了平地风速。山坡上的风速小于平地风主要是由于山体的遮挡导致,并且有一部分能量分散到了竖向风。因此山坡迎面风会抑制线路的风偏响应,有利线路安全运行。山脊处形成了明显的越山风,对风的加速效应显著,不利于线路安全运行。山坡上各个位置风速变化较大,对于实际山地中输电线路设计,应考虑具体的架设位置来确定设计风速。

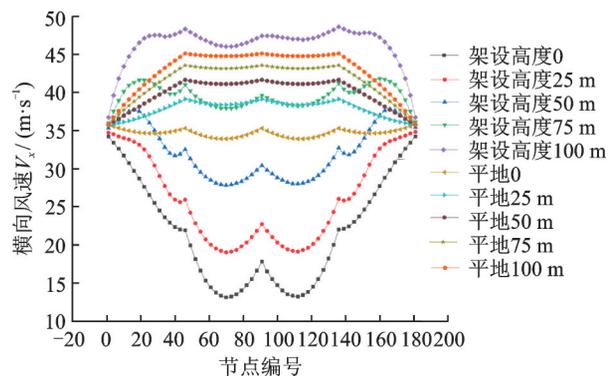


图4 不同位置横向风速

Fig.4 Cross wind speeds of different positions

不同位置输电线路所受山地竖向风速和平地竖向风速如图5所示。由图可知,平地中线路并不考虑竖向风速,而山坡上竖向风速随着架

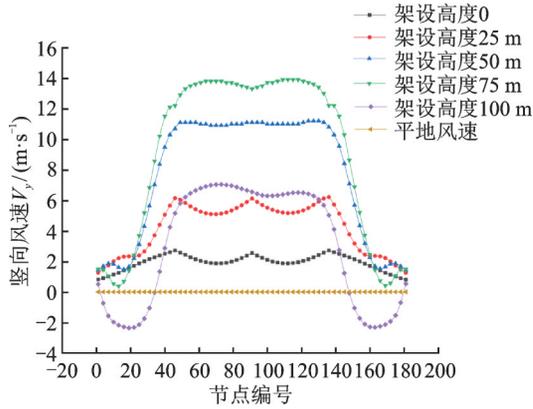


图 5 不同位置竖向风速

Fig. 5 Vertical wind speeds of different positions

设高度的增加先变大后减小,在 75 m 高度处达到最大,最大风速甚至达到了来流风速的 50%。这是由于地形的影响,导致来流风在爬坡的过程中,竖向风速越来越大,此时,竖向风对于线路风偏的影响不容忽视。因此,对于山坡上的输电线路设计,应考虑横向风和竖向风共同作用的影响。

3.3 线路架设位置对风偏的影响

由上节可知,横向风和竖向风都会对线路风偏产生影响,因此本节通过 2.3 节中的方法来求出不同位置处线路的风偏角增大百分比。如图 6 所示,随着架设高度的增加,山体对于线路风偏的影响会越来越不利。在架设高度 75 m 以下时,风偏角增大百分比为负,说明位于迎风面山坡,高度在山脉总高度 3/4 以下的线路风偏会小于同等高度下的平地线路风偏。对于此处的输电线路抗风偏设计时可以适当减小设计风速,以节约材料,提高经济性。而在总高度 3/4 以上的线路,特别是在山脊处,要注意越山风对于线路的影响,适当增大设计风速,提高安全性。

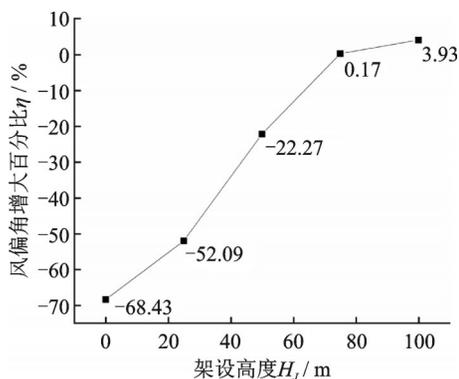


图 6 不同位置的风偏角增大百分比 η

Fig. 6 The percentage increase of the wind-induced swing angle η of different positions

4 山脉中杆塔不同呼称高输电线路风偏特性

4.1 模型工况

山脉中对于同一位置的输电线路,杆塔呼称高不同也会影响线路所受横向风速和竖向风速。由上文可知线路架设在 75 m 高度处竖向风速最大,竖向风速影响最显著。如图 7 所示,为架设在 75 m 高度处线路中间直线塔所在位置,竖向风速的风剖面,其中纵坐标为距离平地高度。山坡上方一定高度内都会产生竖向风速,并且随着高度的增大,竖向风速逐渐减小。对于输电线路,呼称高一般在 20~60 m 范围内,对应图中 95~135 m,此处正是竖向风速最大的范围。所以,竖向风速对于线路风偏的影响不宜忽略。本章研究杆塔呼称高变化时,线路上横向风速和竖向风速及风偏的变化规律。所有涉及到的数值模拟地形工况如表 2 所示。

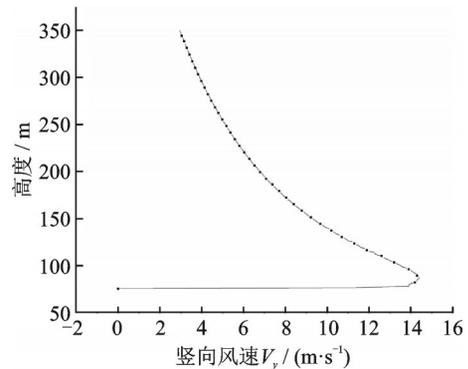


图 7 竖向风速风剖面

Fig. 7 Vertical wind speed wind profile

表 2 线路及山脉模型参数

Tab. 2 Transmission lines and mountain model parameters

工况序号	山脉底面直径 D/m	线路架设高度 H_t/m	杆塔呼称高 h/m	备注
1	500	75	21	
2	500	75	27	考虑不同呼称高
3	500	75	33	
4	500	75	39	
5	500	75	45	

4.2 杆塔呼称高对风速的影响

不同呼称高输电线路所受山地横向风速和平地风速如图 8 所示。由图可知,山坡上输电线路横向风速随着高度的增加而增大。而且不论呼称高多

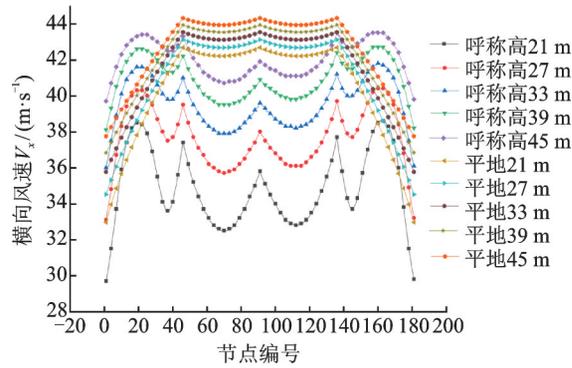


图8 不同呼称高横向风速

Fig. 8 Cross wind speeds of different nominal height

少,山地风速都小于同等高度下平地风速。主要原因同样是由于山体的遮挡。但是随着高度的增加,山地风和平地风之间的差距逐渐减小,说明高度越高,山体的遮挡作用越小。

不同位置输电线路所受山地竖向风速及平地竖向风速如图9所示。由图可知,线路上竖向风速随着高度的增加而减小。竖向风速是由气流爬坡产生的,越靠近地面,竖向风速越大,高度越高,受爬坡效应的影响越小。山体的遮挡效应与爬坡效应相同,都是高度越高,影响越小。

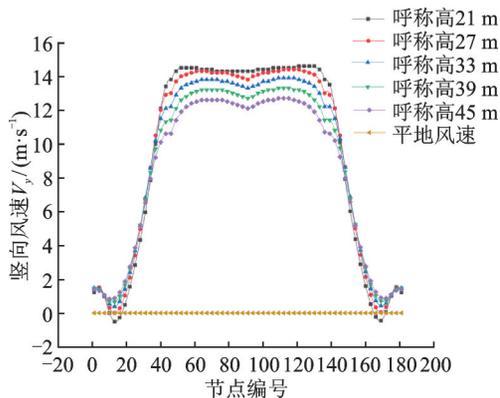
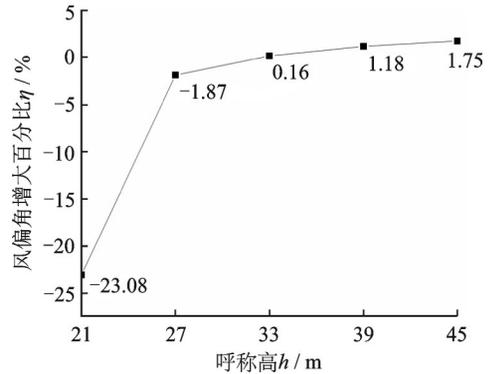


图9 不同呼称高竖向风速

Fig. 9 Vertical wind speeds of different nominal height

4.3 杆塔呼称高对风偏的影响

同3.3节计算出不同呼称高时线路的风偏角增大百分比。如图10所示,在呼称高21 m时,风偏角增大百分为负,并且较小。结合图8和9来看,主要是由于山地横向风速相对于平地横向风速过小,虽然有竖向风速的存在,但不足以弥补横向风速的减小。因此对于山地输电线路的设计,当呼称高小于27 m时,应适当减小设计风速。随着呼称高的增加,风偏角增大百分比逐渐增加,并且趋近平稳。主要因为随着呼称高的增加,山体的遮挡效应和爬坡效应都逐渐减弱。理论上当高度足够高时,风偏角增大百分比应趋近于0。但是呼称高为45 m时,风偏角

图10 不同呼称高的风偏角增大百分比 η Fig. 10 The percentage increase of the wind-induced swing angle η of different nominal height

增大百分比为1.75。结合图6来看,在这个高度,竖向风速很大,虽然横向风速小于平地风速,但由于竖向风速的影响,导致风偏角增大百分比为正。随着高度继续增加,竖向风速会迅速减小,横向风速也会趋近于平地风速,风偏角增大百分比也会趋近于0。

5 不同山脉坡度输电线路风偏特性

5.1 模型工况

山脉坡度不同,山脉中输电线路的横向风速和竖向风速也会改变。本节通过改变山脉底面直径来改变山脉坡度。所有涉及到的数值模拟地形工况如表3所示。

表3 线路及山脉模型参数

Tab. 3 Transmission lines and mountain model parameters

工况序号	山脉底面直径 D/m	山脉坡度($2H/D$) D	线路架设高度 H_j/m	杆塔呼称高 h/m	备注
1	200	1	75	33	
2	400	0.5	75	33	考虑不同山脉坡度
3	500	0.4	75	33	
4	600	0.33	75	33	
5	800	0.25	75	33	

5.2 山脉坡度对风速的影响

不同山脉坡度输电线路所受山地横向风速和平地风速如图11所示。由图可知,随着山脉坡度的减小,中间两跨风速逐渐增大,边跨风速减小。因为坡度越小,山体底面直径越大,山体蔓延的范围越大。在来流风吹向山体时,有足够的距离作为缓冲,可以沿着平缓的山坡顺畅地越过山体,不会遇到较大阻挡导致风速骤降。因此山坡对于线路中跨风速的影响

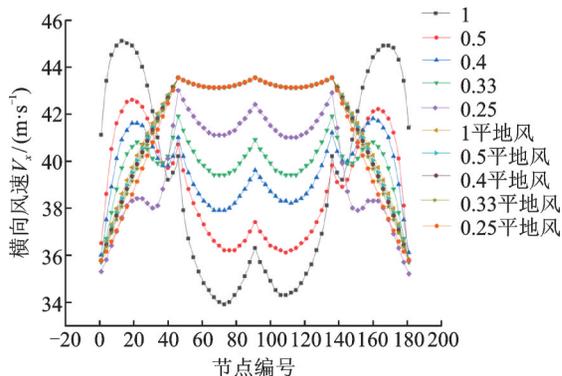


图11 不同山脉坡度横向风速

Fig. 11 Cross wind speeds of different mountain slopes

主要来源于遮挡效应,坡度越大遮挡效应越明显,风速越小。对于边跨,线路所处位置为山体轮廓线处,与山坡有较大不同。此处风速主要取决于地势,坡度越小,地势越平缓,加速效应越不明显,风速越小。

不同山脉坡度输电线路所受竖向风速及平地风速如图12所示。由图可知,坡度越大,竖向风速越大。因为陡峭的地形会产生更大的上升气流,更多来流风能量分散到了竖向风速,导致横向风速变小,竖向风速变大。尤其在坡度为1时,竖向风速达到了来流风的2/3。

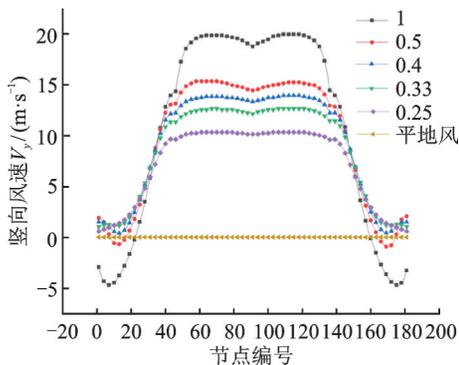


图12 不同山脉坡度竖向风速

Fig. 12 Vertical wind speeds of different mountain slopes

5.3 山脉坡度对风偏的影响

同3.3节计算出不同山脉坡度时线路的风偏角增大百分比。如图13所示,坡度为1时,虽然横向风速相比平地小,但是竖向风速增大了20 m/s,最终导致风偏角大于平地风偏角。因此在坡度较大时,对于竖向风速的考虑至关重要。坡度为0.5时,风偏角增大百分比突降为负数,从图12来看,主要因为竖向风速减小过大,导致竖向荷载不能弥补横向荷载的减小。坡度在0.5以下时,风偏角增大百分比逐渐增大并趋于平稳。因为随着坡度减小,竖向风速越来越小,对线路风偏影响越来越小,横向风速起到了主要作用。但是随着坡度不断减小,横向风速不会一直增大,只能趋近于平地风速,因此风偏角增大百分比会趋于平稳。

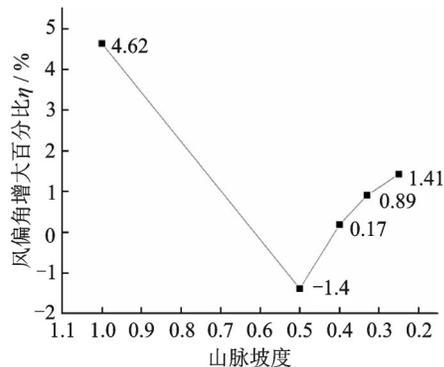


图13 不同山脉坡度的风偏角增大百分比

Fig. 13 The percentage increase of the wind-induced swing angle η of different mountain slopes

6 响应面分析模型

6.1 响应面回归方程的建立

由于现实中山地地形、线路架设位置、杆塔呼称高复杂多变,无法通过数值模拟计算出每个地形的 η 。因此本文采用Box-Behnken方法进行仿真工况设计,以风偏角增大百分比为响应值(Y),选用线路架设高度(A),杆塔呼称高(B),山脉坡度(C)为影响因素。

6.2 仿真分析因素及水平及仿真结果分析

本文研究的线路架设高度为0~100 m,杆塔呼称高为21~45 m,山脉坡度通过底面直径体现,底面直径为200~800 m,此范围为三种因素的水平上下限。仿真分析因素及水平如表4所示,响应面分析响应值结果如表5所示。

表4 仿真分析因素及水平

Tab. 4 Simulation analysis factors and levels

水平	A/m	B/m	C/m
-1	0	21	200
0	50	33	500
1	100	45	800

运用Design-Expert软件进行多项拟合回归分析,得到二次响应面回归方程为:

$$Y = -22.79 + 37.09A + 19.08B + 13.79C - 13.52AB - 13.71AC - 10.23BC - 2.76A^2 - 6.30B^2 - 6.12C^2 \quad (8)$$

响应面回归模型方差分析结果如表6所示。

由表6可知,所建立模型的概率 $P < 0.0001$,极显著;失拟项用来表示所用模型与仿真拟合的程度, $P = 0.0609 > 0.05$,无失拟因素存在;决定系数 R^2_{adj} 和 R^2 均大于0.8,说明模型拟合优度较好,因此可用该

表5 响应值结果

Tab. 5 Response value result

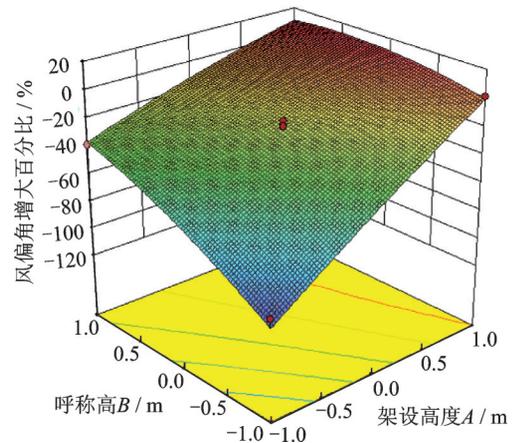
工况号	A	B	C	Y/%
1	0	-1	-1	-84.42
2	1	0	-1	9.72
3	-1	0	1	-45.63
4	0	0	0	-22.27
5	0	-1	1	-32.31
6	0	1	-1	-17.64
7	0	0	0	-18.33
8	0	0	0	-25.95
9	-1	1	0	-38.07
10	0	1	1	-6.44
11	-1	0	-1	-96.56
12	0	0	0	-26.56
13	1	1	0	4.37
14	0	0	0	-20.83
15	-1	-1	0	-95.11
16	1	0	1	5.82
17	1	-1	0	1.43

回归方程代替仿真真实点对仿真结果进行分析。调整决定系数 $R^2_{adj}=0.9671$, 表明风偏角增大系数的变化有 96.71% 来源于山脉坡度、线路架设高度、杆塔呼称高。经方差分析, 其自变量一次项 A, B 极显著 ($P<0.0001$); C, AB, AC 高度显著 ($P<0.01$); BC 显著 ($P<0.05$)。

6.3 各因素交叉相互作用分析

图 14~16 直观显示了各个因素交互作用的响应值, 图中各因素的边线越平坦则该因素对风偏角增大

百分比 η 的影响越小, 边线越陡则该因素对风偏角增大百分比的影响越大^[22]。图中显示, 各因素的陡峭程度为 $A>B>C$, 与方差分析结果一致。山脉中线路架设位置对于线路风偏响应的影响至关重要, 线路越靠近山脊, 风偏响应越大, 不利于线路安全运行。

图 14 架设高度和呼称高对 η 影响的响应面Fig. 14 Response surface of the effects of erection height and nominal height on the η

6.4 最大风偏角增大百分比

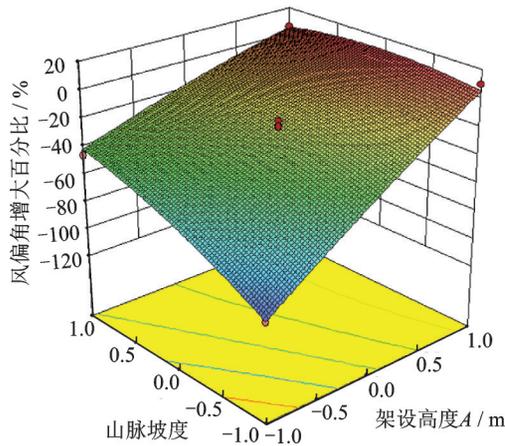
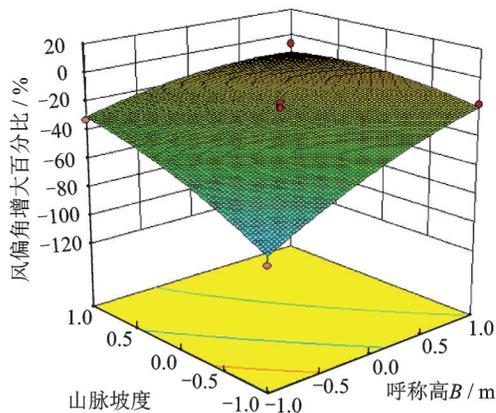
结合数值模拟和响应面分析结果, 可以发现山脉坡度对于风偏角增大百分比的影响规律会根据位置的改变而变化。线路越靠近山脊, 呼称高越高, 越不利于线路风偏。由于本文设置了呼称高上限为 45 m, 所以根据回归模型得到最不利于线路风偏的参数为: 架设高度为 100 m, 呼称高为 45 m, 山脉坡度为 0.79, 最大风偏角增大百分比为 15.006%。

表6 回归模拟的方差分析

Tab. 6 Variance analysis of regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著值
模型	17734.61	9	1970.51	53.30	< 0.0001	***
架设高度(A)	11006.62	1	11006.62	297.74	< 0.0001	***
呼称高(B)	2911.55	1	2911.55	78.76	< 0.0001	***
山脉坡度(C)	1522.05	1	1522.05	41.17	0.0004	**
AB	731.39	1	731.39	19.79	0.0030	**
AC	751.43	1	751.43	20.33	0.0028	**
BC	418.49	1	418.49	11.32	0.0120	*
A ²	31.97	1	31.97	0.86	0.3833	
B ²	167.06	1	167.06	4.52	0.0711	
C ²	157.69	1	157.69	4.27	0.0777	
残差	258.77	7	36.97			
失拟项	210.57	3	70.19	5.82	0.0609	
纯误差	48.20	4	12.05			
总回归	17993.38	16		$R^2_{adj}=0.9671$	$R^2=0.9856$	

注: “*”代表差异显著 ($P<0.05$); “**”代表差异高度显著 ($P<0.01$); “***”代表差异极显著 ($P<0.0001$)。

图15 架设高度和山脉坡度对 η 影响的响应面Fig. 15 Response surface of the effects of erection height and mountain slope on the η 图16 山脉坡度和呼称高对 η 影响的响应面Fig. 16 Response surface of the effects of mountain slope and nominal height on the η

7 结论

(1)对于余弦型山体,架设在山脉迎风面不同位置的33 m呼称高线路,高度在山脉总高度3/4时线路竖向风速最大,能达到来流风速的一半。对于高度在山脉总高度3/4以下的线路,设计时可以适当减小设计风速提高经济性。而在总高度3/4以上的线路,应适当增大设计风速,提高安全性。

(2)当线路架设在75 m高度,山脉坡度为0.4时,随着线路呼称高的增大,横向风速会变大,竖向风速会减小。当呼称高小于27 m时,应适当减小设计风速。

(3)对于75 m高度处33 m呼高的线路,随着山脉坡度减小,线路上横向风速变大,竖向风速减小。风偏角增大百分比先减小后增大,并趋于稳定,在坡度为1时应适当增大设计风速。

(4)三种因素对风偏角增大百分比影响的灵敏度从大到小依次为架设高度、呼称高和山脉坡度。其中,线路越靠近山脊,呼称高越高,越不利于线路风偏。风偏角增大百分比随坡度的变化规律取决于

线路位置。在本文研究的模型范围内,架设高度100 m,呼称高为45 m,山脉坡度为0.79时,风偏角增大百分比达到最大15.006%。

参考文献;

- [1] 楼文娟,杨悦,卢明,等.连续多跨输电线路动态风偏特征及计算模型[J].电力建设,2015,36(2):1-8.
Lou Wenjuan, Yang Yue, Lu Ming, et al. Conductor swinging dynamic characteristic and calculation model of continuous multi-span transmission line[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(2): 1-8.
- [2] Tsujimoto K, Yoshioka O, Okumura T, et al. Investigation of conductor swinging by wind and its application for design of compact transmission line[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 1982, 101(11): 4361-4369.
- [3] 杨悦.脉动风载下的输电线路风偏计算研究[D].杭州:浙江大学,2015.
Yang Yue, Study on calculation of conductor swinging under fluctuating wind loads [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [4] 张禹芳.我国500 kV输电线路风偏闪络分析[J].电网技术,2005(7):65-67.
Zhang Yufang. Analysis on flashover between tower and conducting wires in domestic 500 kV transmission lines caused by windage yaw[J]. Power System Technology, 2005(7): 65-67.
- [5] De Bray B G. Atmospheric shear flows over ramps and escarpments [J]. Industrial Aerodynamics Abstracts, 1973, 9:1-4.
- [6] Bowen A J, Lindley D. A wind-tunnel investigation of the wind speed and turbulence characteristics close to the ground over various escarpment shapes[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1977, 12(3): 259-271.
- [7] Lubitz William David, White Bruce R. Wind-tunnel and field investigation of the effect of local wind direction on speed-up over hills[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006, 95(8): 639-661.
- [8] Neff David E, Meroney Robert N. Wind-tunnel modeling of hill and vegetation influence on wind power availability [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74: 335-343.
- [9] 张宏杰,赵金飞,蔡达章,等.垭口地貌要素对风速分布规律影响的风洞试验研究[J].实验流体力学,2014,28(4):25-30.
Zhang Hongjie, Zhao Jinfei, Cai Dazhang, et al. Wind tunnel test on the influence of col features on wind speed distribution [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2014, 28(4): 25-30.
- [10] 李正良,魏奇科,孙毅.复杂山地风场幅值特性试验研究[J].工程力学,2012,29(3):184-191.
Li Zhengliang, Wei Qike, Sun Yi, Experimental research on amplitude characteristics of complex hilly terrain wind field[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(3): 184-191.
- [11] 李天昊.输电导线气动力特性及风偏计算研究[D].杭

- 州:浙江大学,2016.
- Li Tianhao, Study on aerodynamic characteristics and wind-induced swing of transmission lines [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016
- [12] 刘萌萌. 山地风场下输电线路风致响应研究[D]. 杭州:浙江大学,2017.
- Liu Mengmeng. Research of wind-induced response of transmission line under mountain wind field [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [13] 李正昊. 山脉地形下的平均风场特性研究[D]. 杭州:浙江大学,2016.
- Li Zhenghao, Study on characteristics of mean wind field of mountain range terrain [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016
- [14] 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):46-55.
- Lou Wenjian, 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):46-55.
- [15] 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):8-15.
- Lou Wenjian, 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 Sciences), 2016, 43(7):8-15.
- [16] 赵永锋, 康顺, 梁思超. 复杂地形风场CFD模拟计算域的讨论[J]. 太阳能学报, 2015, 36(2):355-361.
- Zhao Yongfeng, Kang Shun, Liang Sichao. Discussion on computational domain of CFD simulation of wind field in complex terrain [J]. Acta Energies Solaris Sinica, 2015, 36(2):355-361.
- [17] Richards P J, Younis B A. Comments on 'Prediction of wind-generated pressure distribution around buildings' by Mathews E H [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990, 34(1): 107-110.
- [18] 建筑结构荷载规范:GB 50009—2012 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
- Load code for the design of building structures: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012
- [19] Architectural Institute of Japan, AIJ recommendations for loads on buildings [S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2004.
- [20] Franke J, Hirsch C, Jensen A G, et al. Recommendations on the use of CFD in wind engineering [C]. Cost Action C. 2004, 14:C1.
- [21] 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.
- Code for design of 110 kV-750 kV overhead transmission line: GB 50545—2010 [S]. Beijing: China Planning Press, 2010.
- [22] Luo Ling, Zhou Binxing, Guo Wei, et al. Research on the extraction technology of Pu-erh Tea Polysaccharide by response surface analysis [J]. Agricultural Science & Technology, 2013, 14(3):494-497.

Wind-induced swing characteristics of transmission lines on the windward side of mountain terrain

LIU Chun-cheng, SUN Hong-yun

(School of Civil Engineering and Architecture, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: Based on the Computational Fluid Dynamics (CFD) method, the lateral and vertical average wind speeds of transmission lines on the windward side of the mountain ranges are obtained, and the effects of three factors, which are the line erection location, tower nominal height, and mountain slope, on the wind speed of transmission lines are studied. The finite element model of the four-span transmission line across the mountain range is established. The wind-induced swing response of the line is calculated using the mountain wind speed and the flat wind speed respectively, and the percentage increase of the wind-induced swing angle is therefore obtained. The quadratic regression equation of the three factors and the percentage increase of wind-induced swing angle are also built by using the response surface method (RSM). The studies show that, with the line closer to the ridge, the tower nominal height will get higher, and the line's wind-induced swing also becomes more severe. For the lines erected below 3/4 of the total height of the mountains, the wind speed can be appropriately reduced during the design process, which not only ensures the safety of the line's wind-induced swing, but also improves the economy. As for the lines erected above 3/4 of the total height of the mountains, the designed wind speed should be appropriately increased in order to improve the safety of the wind-induced swing of transmission lines.

Key words: wind-induced vibration; transmission line; mountainous terrain wind field; wind-induced swing response; response surface method (RSM)

作者简介: 刘春城(1969—),男,教授。电话:13843237495; E-mail:lccheng@neepu.edu.cn。

通讯作者: 孙红运(1996—),男,硕士研究生。电话:13578501767; E-mail:769915677@qq.com。