

峡谷、垭口地貌下导线流固耦合 风偏振动分析*

张 瑾, 祝 贺

(东北电力大学 建筑工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 基于双向流固耦合理论计算输电导线在峡谷、垭口地貌下的风偏振动响应,既考虑了山风作用在导线上的荷载,也考虑了导线振动引起表面风压改变及其对流场的影响。首先,与现有文献结果进行对比,验证该方法的可靠性。然后,建立跨越峡谷及垭口输电导线数值风洞模型,分析了峡谷和垭口地貌的平均风速特征以及相应地貌下导线风压分布特征。重点分析了气动力系数和竖向位移在不同地貌下的分布规律。数值计算结果表明:瞬态风场下,垭口的加速效应比峡谷显著,对导线跨中节点的加速比影响更大;导线受不同地貌风场的影响其周围风压分布也并不一致。峡谷地貌下,导线周围所受风压随时间变化分布较稳定;垭口地貌下,导线周围所受风压随时间变化波动剧烈。山体山脚间距越小,导线的升、阻力系数时程曲线的变化幅度会越大,与风压变化有相似特征;垭口地貌下上升气流使导线获得较大上托力和竖向风偏位移。

关键词: 峡谷地形; 垭口地形; 上升气流; 加速效应; 流固耦合

中图分类号: TM751

文献标志码: A

DOI: 10.21656/1000-0887.400241

引 言

输电线路经常要跨越各种复杂山地地形,复杂的地形会显著改变风场的特性,形成“峡谷风”“垭口风”等与平坦地形明显不同的山地风场效应^[1-2]。文献[3-5]统计了2011—2014年某省输电线路风振故障,指出550 kV以上线路风振故障主要发生山脊、峡谷等风加速效应明显的区域,且在风速30 m/s的峡谷区域曾监测到最大振幅超过5 m的风偏振动,这些故障的发生与传统风振计算中忽略流固耦合效应不无关系。

目前,针对山地风场输电导线风偏振动特性的研究主要集中在山地风场本身,仅将山风以风荷载函数形式施加到导线上,未考虑风与导线运动之间的相互耦合作用^[6-7]。这导致以往的研究计算中,对山区输电线路的风荷载取值与实际存在较大误差,往往会低估线路所承受的风荷载,不利于线路安全运行。

国内外学者主要采用实测、风洞试验、CFD数值模拟进行平地地形导线风偏振动的研

* 收稿日期: 2019-08-20; 修订日期: 2020-05-13

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20180201016SF)

作者简介: 张瑾(1992—),女,硕士(通讯作者。E-mail: 932041589@qq.com);

祝贺(1978—),男,教授,博士,硕士生导师(E-mail: zhuhe1215@163.com)。

引用格式: 张瑾, 祝贺. 峡谷、垭口地貌下导线流固耦合风偏振动分析[J]. 应用数学和力学, 2020, 41(7): 747-759.

究^[8-9],对于山地地形下导线流固耦合风偏振动鲜有涉及.Momomura 等^[10]和 Okamura 等^[11]对山区输电线路在台风到来时的响应进行了实测,认为导线的气动阻尼在风致输电线路振动过程中发挥着重要作用.Paluch 等对某山地一大跨越输电塔线体系的导线进行观测研究,建立数值模型并与实测结果进行对比,认为评价导线在风荷载下的振动响应时需要建立起一个完整的三维导线模型及山地风场模型^[12].文献[13-15]采用 CFD 数值模拟研究了三维山地风场对输电线路各相导线风偏的影响,指出山地地形下导线的风偏程度明显高于平坦地貌,但未考虑风压变化对导线的影响.

为研究峡谷、垭口风场特性对输电导线流固耦合风偏振动的影响,利用导线的弧垂公式进行计算并建立跨峡谷、垭口地貌输电导线模型,采用 ANSYS 双向流固耦合数值模拟方法对不同工况峡谷、垭口地貌输电导线进行数值模拟,计算输电导线动态风偏响应.重点分析了气动系数和竖向位移在不同地貌下的分布规律.

1 流固耦合控制方程

1.1 流体控制方程

守恒定律可通过控制方程进行描述,其中质量守恒方程为

$$\partial \rho_f / \partial t + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{v}) = 0, \quad (1)$$

动量守恒方程为

$$\partial \rho_f \mathbf{v} / \partial t + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{v} - \boldsymbol{\tau}_f) = \mathbf{f}_f, \quad (2)$$

式中,下标 f 表示气体; t 表示时间; \mathbf{f}_f 表示体积力矢量; ρ_f 表示流体密度; \mathbf{v} 表示流体速度矢量; $\boldsymbol{\tau}_f$ 表示剪切力张量,可表示为

$$\boldsymbol{\tau}_f = (-p + \mu \nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{I} + 2\mu \mathbf{e}, \quad (3)$$

其中, p 表示流体压力, μ 表示动力黏度, \mathbf{e} 表示速度应力张量,可按照式(4)计算:

$$\mathbf{e} = 0.5(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T). \quad (4)$$

1.2 固体控制方程

固体守恒方程可利用 Newton 第二定律得出

$$\rho_s \ddot{\mathbf{d}}_s = \nabla \boldsymbol{\sigma}_s + \mathbf{f}_s, \quad (5)$$

式中,下标 s 表示固体, ρ_s 为固体密度, $\ddot{\mathbf{d}}_s$ 为固体域当地加速度矢量, $\boldsymbol{\sigma}_s$ 为 Cauchy 应力张量, \mathbf{f}_s 为体积矢量.

1.3 流固耦合方程

流固耦合必须遵循最基本的守恒原则,所以在流固耦合交界面处,应满足流体与固体应力($\boldsymbol{\tau}$)、位移(\mathbf{d})、热流量(q)、温度(T)等变量的守恒,即满足以下方程:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\tau}_f \mathbf{n}_f = \boldsymbol{\tau}_s \mathbf{n}_s, \\ \mathbf{d}_f = \mathbf{d}_s, \\ q_f = q_s, \\ T_f = T_s. \end{cases} \quad (6)$$

1.4 流固耦合计算步骤

本文采用分区迭代方法求解流固耦合问题,并运用 UDF 编制了相应的数值计算程序,详细的计算步骤如下:

1) 流场计算,通过编制 UDF 程序控制流场的速度,首先在 ANSYS-Fluent 中完成状态初始化,计算获得 $t_{(0)}$ 时刻流场压力和流体作用于结构上的流体力.

2) 结构场计算,将流体力 (C_D, C_L) 施加到结构,以 Newmark- β 时间积分方法求解结构固

体控制方程(5),得到 $t_{(n+1)}$ 时刻结构的动力响应。

3) 网格更新,采用 local remeshing method 和 smoothing method 相结合的方法完成动网格更新,获得网格节点位移及网格速度,该方法能保证网格在发生大幅度位移时不产生畸变。

4) 流域模型更新后返回第 1) 步,计算得到 $t_{(n+1)}$ 时刻流场压力和结构所受流体力,循环计算得到后续时刻结构动力响应,直至系统达到稳定为止。

1.5 算例验证

为了验证本文所用数值方法的准确性,选取文献[16]在均匀来流作用下,单根导线风致振动问题进行验证。计算域尺寸为 $30D \times 16D \times 5D$,如图 1 所示。边界条件设置如下:入口风速设为指数风,出口采用压力出口,上下边界均为无滑移边界,圆柱表面设为流固耦合交界面,不考虑结构阻尼的影响。由图 2 可知,在均匀来流作用下,本文所计算的单导线结构振动位移时程结果与文献[16]中的结果吻合较好,本文数值方法的可靠性与适用性得到了验证。

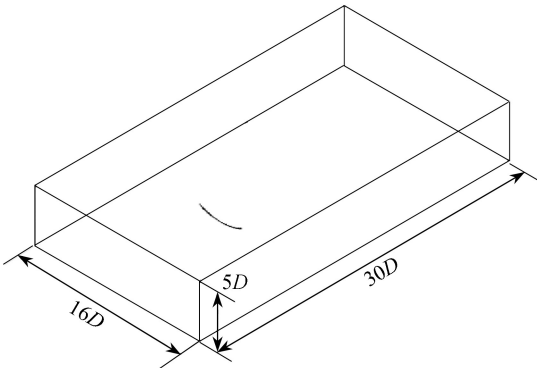


图 1 算例验证模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the verification model for the calculation example

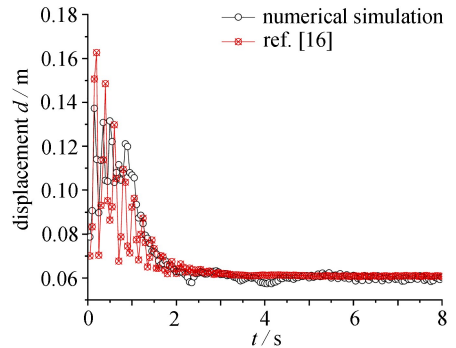


图 2 位移时程曲线对比图

Fig. 2 Comparison of displacement time history curves

2 峡谷、垭口导线模型数值模拟

2.1 峡谷、垭口模型及计算工况

由于地形的限制,输电线路常常不可避免地跨越峡谷和垭口。经过此类地貌的线路往往处于加速效应明显的风场环境中,对线路风偏的影响极大^[17]。因此,本文针对峡谷和垭口两类地形,共布置了 5 种工况进行仿真分析。图 3 所示为跨峡谷线路模型,风垂直于导线时规定风攻角为 0° 。

取三维余弦型山体作为峡谷、垭口轮廓,高度 H 取 100 m,其轮廓形状表达式如下:

$$\begin{cases} H\cos^2(\pi r/(4L)), & |r| < 2L, \\ 0, & \text{others,} \end{cases} \quad (7)$$

式中, r 为高度方向,在三维山体中等于 $\sqrt{x^2 + y^2}$, x, y 为水平方向, H 是山顶到地面的竖直高度, L 是山顶到山坡上 $H/2$ 高度处的水平距离,即山体的半坡长度。

本文对双山形成的峡谷和垭口地形定义如下:余弦形双山左右排列形成峡谷地形,左右山体重叠形成垭口地形。本文计算的峡谷、垭口地形风场,山体高度 $H = 100$ m,底部直径 $D = 150$ m。定义 d 为山脚间距,对于峡谷地形计算 3 组工况 $d = 0, 75, 150$ m;垭口地形计算 2 组工况 $d = -25, -50$ m。选取谷底渐缩处布置导线,以便于分析峡谷风、垭口风效应对导线风偏振动的影响。

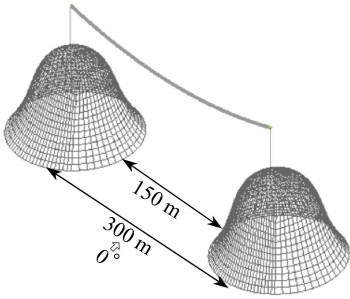
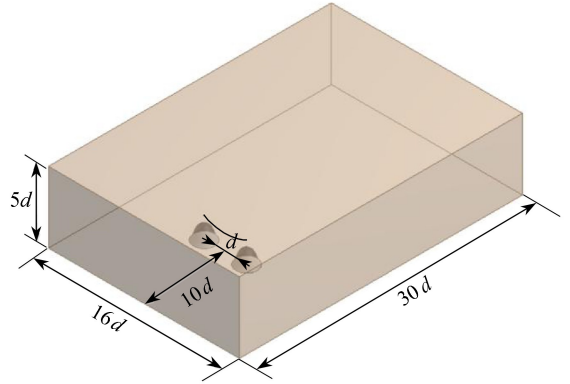
导线的弧垂长度根据张力弧垂计算公式计算,导线两端设置为固定端,设置黏性系数为

1.831 kg/(m·s)的不可压缩流场,环境温度取为 25 ℃,平均风速取 30 m/s,详细参数设置如表 1 所示。

表 1 导线参数

Table 1 Wire parameters

wire type	LGJ-240/30
outside diameter D_w /mm	21.6
modulus of elasticity E_w /GPa	63
density R_w /(kg/m ³)	3 172
fixed tension T /N	34 633

图 3 跨峡谷线路模型 ($d = 150$ m)Fig. 3 The across-2-hill canyon line model
($d = 150$ m)图 4 计算域模型及尺寸 ($d = 150$ m)Fig. 4 The calculation domain model and sizes
($d = 150$ m)

2.2 计算域建模与网格划分

设置不同山脚间距峡谷、垭口输电线路,合理划分计算域并根据不同工况做出适当调整,控制阻塞率在 3% 以下.为了准确模拟峡谷、垭口地形下游远场湍流的发展情况,计算域设置为长 $30d$ 、宽 $16d$ 、高 $5d$ 、导线距计算域前端 $10d$,不同工况根据山体间距调整计算域宽度.图 4 所示为 $d = 150$ m 的计算域。

为提高计算的准确性与效率,全部模型均采用 ICEM 进行结构化网格划分,考虑分块合理性与计算效率,导线和山体均采用外 O 型网格剖分技术,流场内所有区域均为六面体结构化网格.图 5 所示为峡谷 ($d = 150$ m) 网格划分图,为了满足峡谷、垭口地形仿真的精确性,在狭管区域对网格进行局部加密,图 6 所示为导线网格局部放大图.各工况网格在 86 万个~103 万个,其中导线网格为 6.7 万个~10.3 万个;山体、导线计算域均采用合理的网格渐变策略以提高计算效率及精度。

计算地貌取 B 类,在模拟峡谷风场时,来流按风廓线分布,即不同高度的来流速度呈指数分布:

$$u = U_{10}(z/10)^\alpha, \quad (8)$$

式中, U_{10} 为基本风速,为 30 m/s。

入口设置为 inlet,指定风速为导入的指数风;出口为 outlet,并指定 pressure 为 0 Pa;流场侧面和顶面采用对称边界 (symmetry);导线表面设为流固耦合面 (fluid-solid interface),用来传递风压以及表现结构的变形;其余边界采用无滑移壁面条件 (wall).入口处的平均风速、湍流动能和湍流耗散率通过 UDF 外部编程接口输入.山体的地面粗糙高度根据相关研究设为 1 m,动网格更新采用光顺法和网格重分的方法.流场计算分析类型为瞬态,迭代步数为 960,时间步

长为 0.05 s。在固体域和系统耦合器做同样的设置,时间步长为 0.05 s,即每 0.05 s 进行一次数据交换并完成耦合。

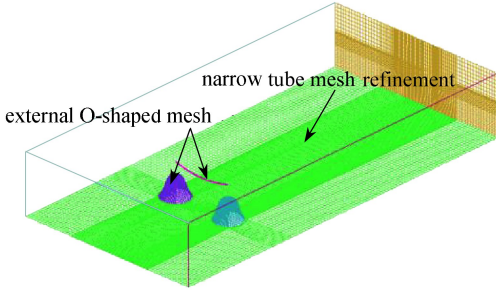


图 5 网格总体示意图
Fig. 5 Overall layout of the grid

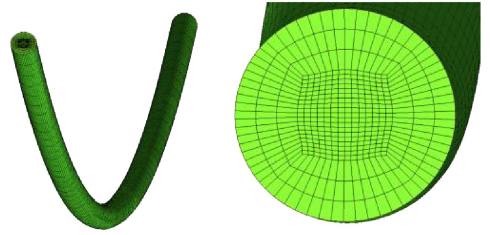


图 6 网格局部放大图
Fig. 6 An enlarged view of the local grid

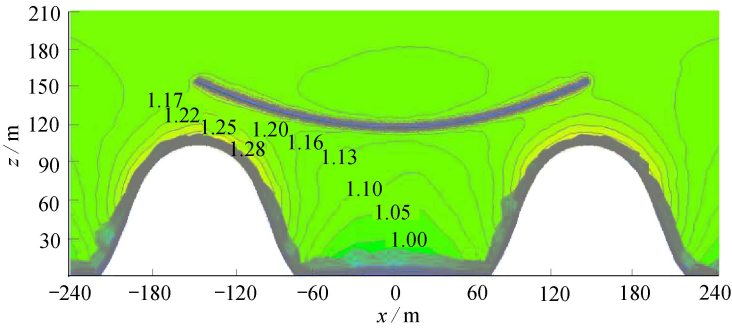
3 跨峡谷、垭口导线风场特征

3.1 峡谷、垭口地貌平均风速特征

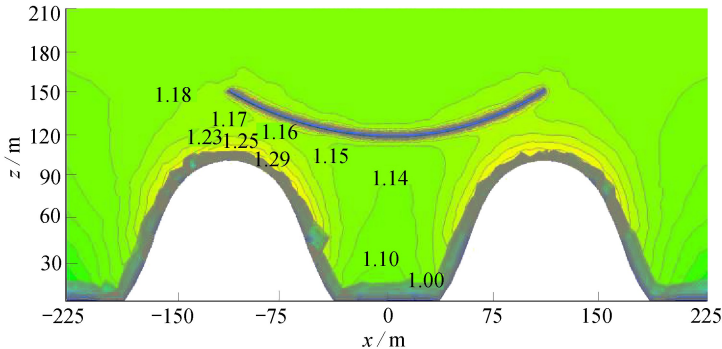
由于山体地势抬高、山脚间距不断减小,导致山风在山顶及山脚内侧处有明显的加速效应^[18]。为了研究峡谷、垭口地貌对风场的影响,常引入加速比 S 这一无量纲参数来衡量加速效应^[19-20]:

$$S = U_M(z)/U(z), \tag{9}$$

式中, $U(z)$ 为 B 类风场下离地高度 z 处的纵向风速, $U_M(z)$ 为山地地形下离地高度 z 处的纵向风速。



(a) $d = 150 \text{ m}$



(b) $d = 75 \text{ m}$

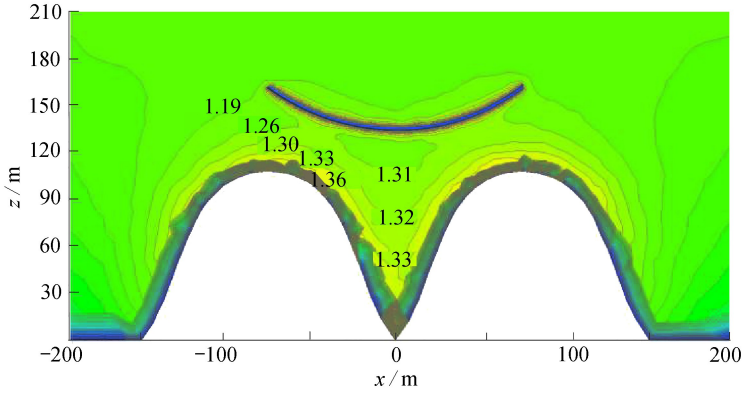
(c) $d = 0$ m

图 7 跨峡谷线路流场加速比等值线分布图

Fig. 7 Acceleration ratio contour maps of the flow field across 2 hills

考虑到输电线所处位置的横向风速较小,所以仅研究各工况纵向风速,并与规范中 B 类地貌下纵向平均风速对比.图 7 和图 8 为过山轴线切片图,展示了不同山脚间距山体在纵向风速作用下加速比的分布情况.

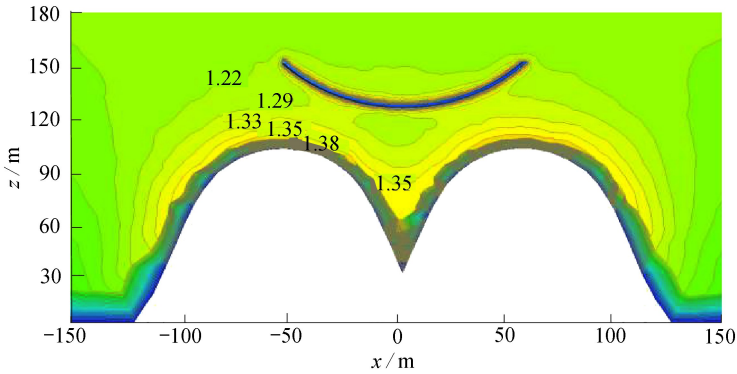
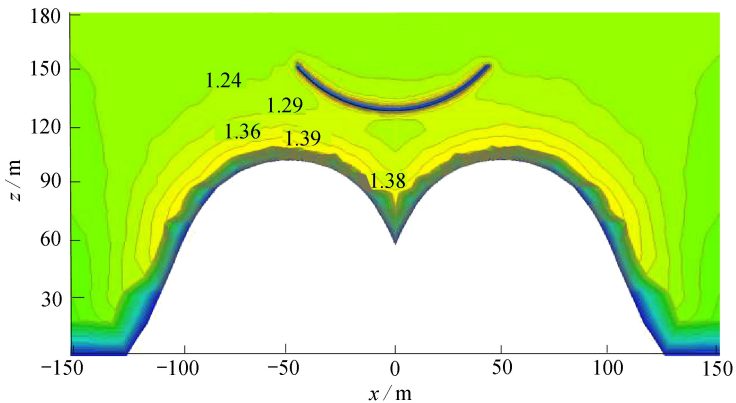
(a) $d = -25$ m(b) $d = -50$ m

图 8 垭口线路流场加速比等值线分布图

Fig. 8 Acceleration ratio contour maps of the flow field across 2 adjacent hills

由图 7 和图 8 可知:1) 受气流爬坡效应的影响,在山体迎风坡会产生较大的风速,风速增大范围主要在半坡以上,且在山顶达到最大.最大加速比出现在山顶上方,峡谷地貌各工况比值分别为 1.28,1.29,1.36,垭口地貌各工况比值分别为 1.38,1.39.2) 随着山脚间距 d 减小,山脚内侧加速比逐渐增大,垭口各工况山脚内侧加速比较峡谷各工况有所增大,且垭口处存在加速效应,随着山脚间距 d 减小,加速比越大,当山体越来越接近时,垭口处的加速效应越来越趋近于山顶的加速效应.

为了分析各个工况下导线周围的加速比分布情况,首先,考虑各工况导线长度的差异,拾取导线周围各点风速,保持各点风速与竖向坐标值一一对应,然后将导线水平档距归一化为 120 m,绘制导线周围各点平均风速如图 9 所示.

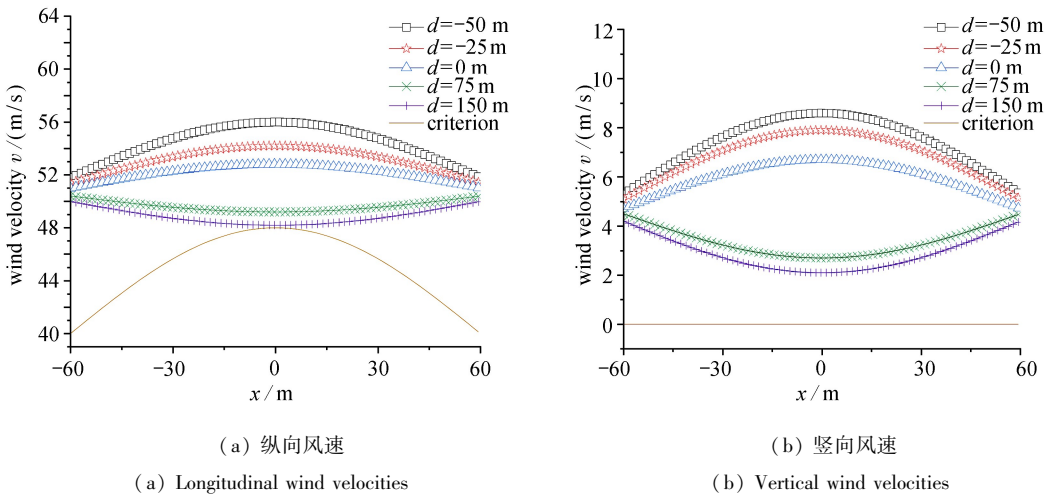


图 9 输电导线位置平均风速

Fig. 9 Mean wind velocities along transmission lines

由图 9 可知:由于加速效应的影响,峡谷、垭口地形风场的纵向平均风速值均大于规范计算值^[21].峡谷地形风场在两山山顶附近加速效应最为明显,导致跨峡谷输电线两端的加速比较大,各工况导线两端附近的加速比 S 增大至 1.31~1.35,输电导线各点加速比 S 在 1.03~1.35 之间;垭口地形风场在垭口处加速效应显著,导致跨垭口输电线跨中的加速比较大,各工况导线跨中附近的加速比 S 增大至 1.34~1.36,输电导线各点加速比 S 在 1.13~1.36 之间.峡谷、垭口地形下的竖向风速具有一定大小,且分布与纵向风速类似.在内侧山脚间距减小的过程中,气流会沿山体不断爬升致使竖向风速不断增大.

由上述可知:峡谷、垭口地貌在纵向风速的作用下对来流具有明显的加速效应,且竖向风速不可忽略.随着山脚间距减小,山脚内侧的风速明显增大,致使输电导线周围的风速受上升气流的影响由“凹”变为“凸”,使线路风偏程度增大.

3.2 峡谷、垭口地貌下导线风压分布特征

为研究地貌的改变对导线周围风压分布规律的影响,对各个工况导线周围所受风压随时间变化的时程曲线进行分析,如图 10 所示.规定沿导线圆周的路径起点为导线跨中圆截面左端点,方向为逆时针方向,图 10 中第一个和第二个波峰分别对应导线迎风面和背风面处的端点局部区域,第一个波谷和第二个波谷分别对应导线下部和上部端点局部区域,如图 11 所示.

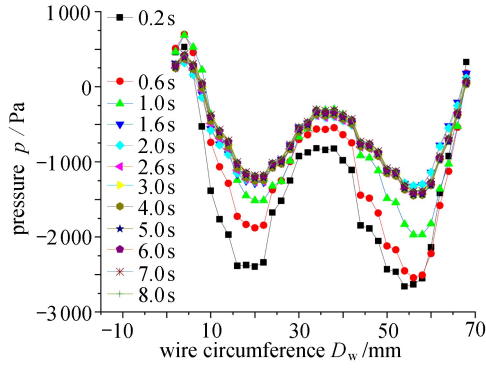
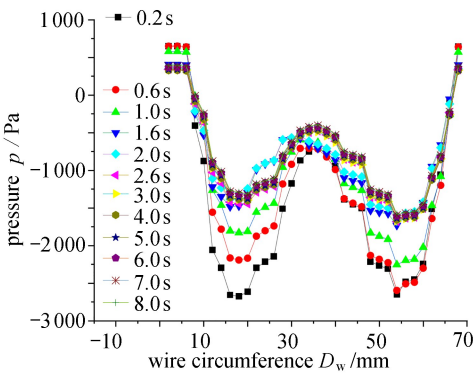
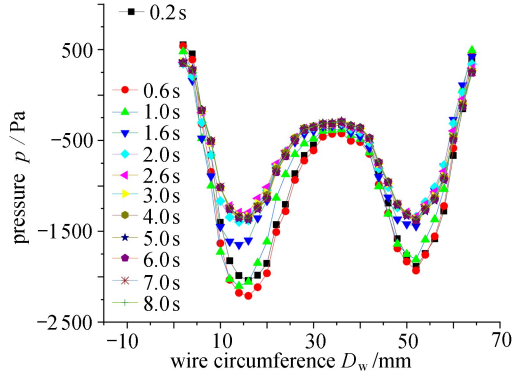
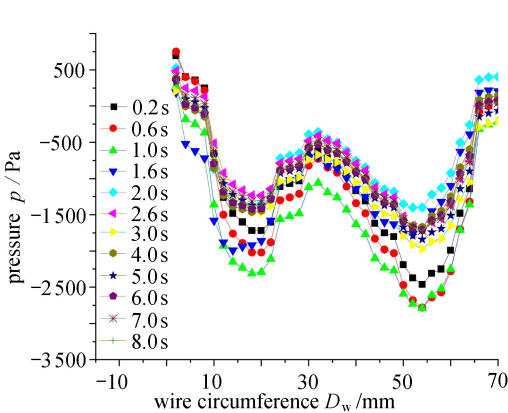
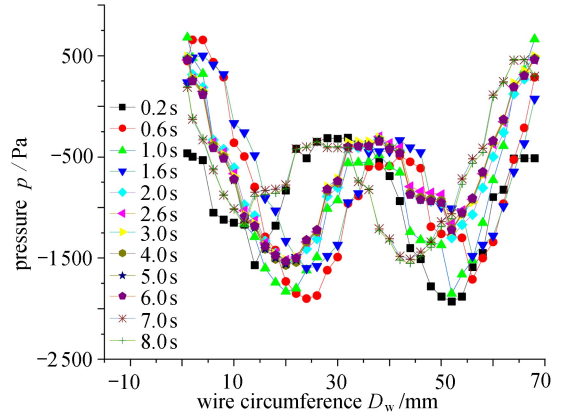
(a) $d = 150$ m(b) $d = 75$ m(c) $d = 0$ m(d) $d = -25$ m(e) $d = -50$ m

图 10 导线圆周压力分布图

Fig. 10 Wire circumferential pressure distributions

由图 10 可知:1) 导线周围压力分布正压区在导线迎风面处,在导线上下端点(波谷二、波谷一)周围出现负压峰值,导线背风面右端点(波峰二)处风压有所回升。2) 导线与风的剧烈作用在 0~2 s 之间,该时段内由于流场的冲击作用波峰和波谷处各自的风压差值在短时间内变化较大,波动剧烈,其中 1.0 s 和 1.6 s 的风压差值最大,约为 500 Pa;2 s 后,风压差值随时间变化减小。3) 两个波谷之间的风压差值一定程度反映导线所受升力大小及方向,差值为正时,升

力方向向上,单位时间差值越大,表明升力变化越剧烈。 $d = -50\text{ m}$ 时,沿导线圆周分布的风压值紊乱度很高,风压差值短时间内变化很大,且风压的波峰和波谷对应位置有明显偏移; $d = -25\text{ m}$ 时,紊乱度有所降低,前2 s内波谷处风压差值时正时负,差值较大,2 s后差值大小趋于稳定。随着山脚间距的增大,导线周围风压分布趋于稳定,波谷风压差值逐渐减小,在前2 s内风压差值仍存在时正时负现象,但差值很小,表明导线升力方向的受力变化相对稳定。

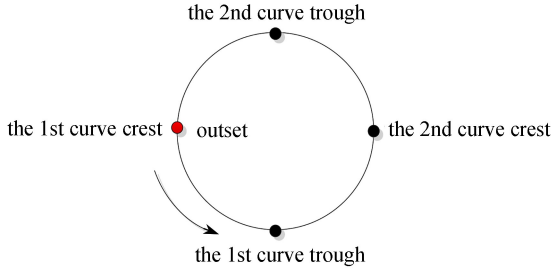


图 11 导线风压提取点示意图

Fig. 11 Wire wind pressure measure points

由上述分析可知,山地地貌的改变会对导线周围的风压分布造成影响,且不同地貌造成的差异也不一致。风压差值变化幅度会随时间减弱并趋于稳定,山脚间距越小风压分布越不稳定,会对升力产生较大的影响。

4 输电导线风偏振动分析

4.1 气动力系数分析

输电导线经过风加速效应明显的峡谷、垭口区域,极大地增加了纵向平均风荷载,且山脚内侧区域的气流将对导线产生较大上托力,对线路风偏产生不利影响^[22]。因此有必要对导线风偏时所受的升力和阻力系数时程进行分析,如图 12 和图 13 所示。

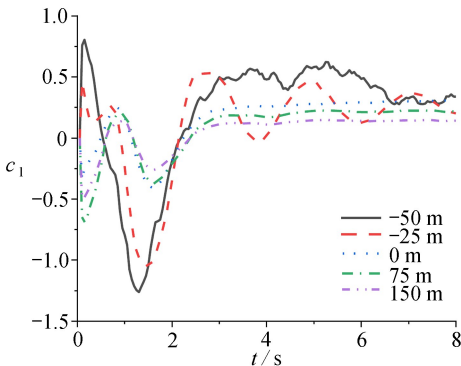


图 12 升力系数时程

Fig. 12 Lift coefficient time histories

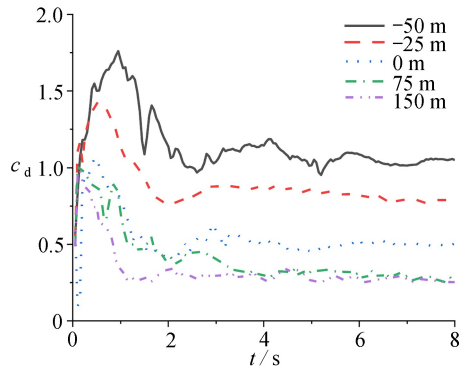


图 13 阻力系数时程

Fig. 13 Drag coefficient time histories

图 12 和图 13 分别为 5 种工况下跨中节段气动系数时程曲线,对比分析可知:5 种工况的阻力系数随山脚间距 d 减小而增大,波动幅度在 2 s 后趋于稳定。升力系数波动范围较大,在 0 ~ 2 s 内由于流场的冲击作用会出现负峰值,这是由于导线在振动过程中从流场吸取了能量而造成短时间内的风振失稳。2 s 后风与导线作用呈稳定状态,峡谷工况下升力系数波动幅值趋于稳定,并且随山脚间距 d 减小,导线升力系数也稳步增大,其范围在 0~0.5 之间,这进一步说

明在峡谷条件下,风压值较稳定;垭口工况下,升力系数波动范围较大,其中 $d = -25$ m 时,升力系数波动范围在 0~0.5 之间,升力系数随时间线性衰减, $d = -50$ m 时,升力系数波动范围在 0.25~0.75 之间,升力系数波动紊乱,与风压差值分布规律相似。

由上述分析可知,随着山体山脚间距变化,导线的升、阻力系数时程呈不同变化趋势且山脚间距越小,受风压影响越大,升、阻力系数也越大。

4.2 位移时程分析

为充分研究峡谷和垭口地貌下风场特性变化对输电导线风偏产生的影响,对其位移时程进行分析。图 14 和图 15 分别为导线跨中节点水平位移和竖向位移时程曲线。

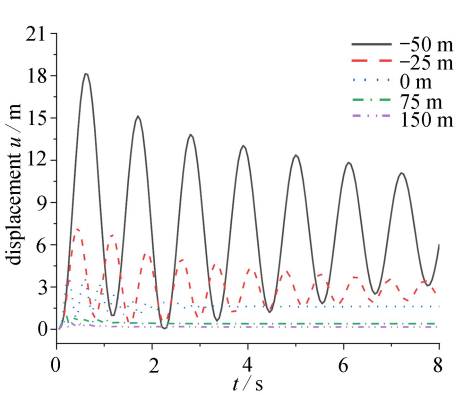


图 14 水平位移

Fig. 14 Horizontal displacements

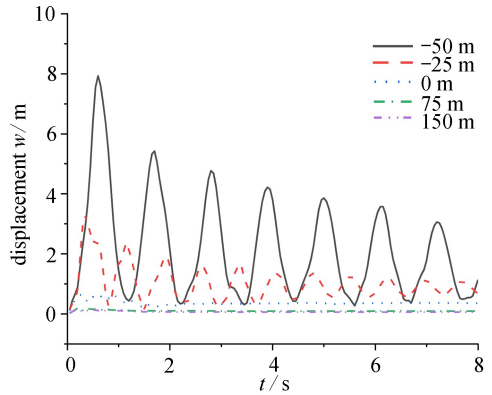


图 15 竖向位移

Fig. 15 Vertical displacements

由图 14 和图 15 可知:导线受纵向平均风作用会发生风偏振动,其中水平位移变化较大且竖向位移不可忽略,随着山脚间距 d 的减小,竖向位移逐渐增大。在均匀风场作用下空气对导线的气弹阻尼效应较为明显,其中垭口工况的竖向位移值响应较大且随时间衰减水平较快, $d = -25$ m 时波动范围在 0~4 m,均方根为 1.17 m; $d = -50$ m 时波动范围在 0~8 m,均方根为 2.74 m,各工况增幅在 30% 左右。表明在垭口条件下,内侧山脚区域空间减小,气流沿山体不断爬升,使得导线受到的风压和上托力均维持在较大水平从而出现较大竖向位移;峡谷条件下竖向位移值基本维持在 0~1 m 左右,均方根分别为 0.37, 0.10, 0.07 m,这是由于该地形下山脚间距较大上升气流较小,导线受到的上托力也较小。

由上述分析可知:随着山体山脚间距减小,在竖向风速的作用下气流会沿山体不断爬升,导线会受到更大的上托力,各节点的竖向位移值也将逐渐增大,将对线路风偏产生更为不利的影响。

5 结 论

本文通过 ANSYS 流固耦合数值模拟法获得了不同山脚间距跨峡谷、垭口线路流场分布特点以及导线风偏特征。从平均风加速效应、风压变化以及气动力变化三方面研究了峡谷、垭口风场特性变化对输电线路导线风偏振动的影响并给出相关建议。主要结论如下:

1) 峡谷和垭口对流经其山脚内侧和山顶区域的流体有明显的加速效应,随着山体山脚间距减小,风加速效应显著增加。在峡谷地貌下,山顶附近的风加速效应大于狭管处的风加速效应,致使导线两端的加速比较大,数值在 1.31~1.35 间;在垭口地貌条件下,随着山脚间距的减小,垭口处的风加速效应与山顶接近,其导线跨中节点的加速比最大,数值在 1.34~1.36 间。

2) 流经峡谷、垭口地形的风吹向导线时,在导线迎风面形成正压区,背风面为负压区,同时在导线上下端点周围分别形成负压峰值差异明显的负压区,显著影响着导线的气动力特性。峡谷地貌下,导线圆周风压分布随时间变化相对平稳,在经过短暂的流场冲击作用之后风压差值较小;垭口地貌下,导线圆周风压分布随时间变化较为剧烈,在 $d = -50$ m 时风压差值变化最剧烈。表明随着山脚间距减小,导线周围风场变化复杂且风压差值逐渐增大,导线振动失稳的可能性越高。

3) 随着山体山脚间距减小,风场加速效应显著,导线周围压力分布变化复杂,升、阻力系数随时间波动越来越剧烈。峡谷地貌下,升力系数曲线的轮廓相似,随着山脚间距减小升力系数逐渐增大;垭口地貌下,升力系数曲线的轮廓有较大差别,随山脚间距减小升力系数增大且波动频率增大,同时垭口地貌升力系数大于峡谷地貌的升力系数。垭口地貌下,气流沿山体爬升显著,致使导线各节点的竖向位移值逐渐增大。各工况增幅在 30% 左右,说明该地貌下的上升气流对导线风偏具有不可忽视的动力放大作用,选址时应尽量避免山间距狭窄的地带。

4) 在输电线路设计规范风偏计算中默认输电线路架设在平地,且关于风荷载的计算未考虑风速的方向以及风压的不均匀分布。但实际情况中,输电线路大多架设在山地,且局部山地属于风口地带,纵向风速和竖向风速分布规律复杂。本文数值计算表明:峡谷、垭口地貌纵向风速和竖向风速的改变对导线风偏影响较大,建议规范进一步完善对山地地貌纵向风速的修正,并适当考虑对线路风偏不利的气动力的影响。

参考文献(References):

- [1] 姚剑锋,沈国辉,楼文娟,等. 三维山体的风场特征及对输电塔风致响应的影响[J]. 振动与冲击, 2017, 36(18): 79-84. (YAO Jianfeng, SHEN Guohui, LOU Wenjuan, et al. Wind field characteristics of three-dimensional mountain and its influence on wind-induced response of transmission towers[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(18): 79-84. (in Chinese))
- [2] 刘先珊,熊卫红,肖正直. 山地环境中 500 kV 输电塔线体系风振响应研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(5): 668-673. (LIU Xianshan, XIONG Weihong, XIAO Zhengzhi. Wind-induced vibration response of 500 kV transmission tower line system in mountain environment [J]. *Journal of Wuhan University (Engineering Edition)*, 2016, 49(5): 668-673. (in Chinese))
- [3] 武国亮,宋述停,蔡炜,等. 输电线路风偏故障分析及应对措施[J]. 水电与新能源, 2013(6): 28-31. (WU Guoliang, SONG Shuting, CAI Wei, et al. Analysis and countermeasures of wind-age yaw accident on transmission line[J]. *Hydropower & New Energy*, 2013(6): 28-31. (in Chinese))
- [4] 厉天威,江巴彦,赵建华,等. 南方电网沿海地区输电线路风灾事故分析[J]. 高压电器, 2016, 52(6): 23-28. (LI Tianwei, JIANG Siyan, ZHAO Jianhua, et al. Wind accident analysis of southern grid coastal region transmission line[J]. *High-Voltage Appliances*, 2016, 52(6): 23-28. (in Chinese))
- [5] 王立. 微气象条件下输电线路导、地线微风振动的成因判断及对策研究[J]. 电网技术, 2014(6): 2-3. (WANG Li. Research on transmission line guide, the breeze of ground vibration causes and countermeasures under micro weather conditions[J]. *Power Grid Technology*, 2014(6): 2-3. (in Chinese))
- [6] 张春涛,李正良,范文亮,等. 遮挡山体对输电塔线体系风振疲劳的影响[J]. 振动与冲击, 2013, 32(10): 184-191. (ZHANG Chuntao, LI Zhengliang, FAN Wenliang, et al. Effect of occluding hills on wind-induced fatigue of transmission tower-line coupled system[J]. *Journal*

- of Vibration and Shock*, 2013, **32**(10): 184-191.(in Chinese))
- [7] 姚旦. 山丘地形风场特性及对输电塔的风荷载作用研究[D]. 硕士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2014.(YAO Dan. Research on characteristics of wind field on hilly terrain and its wind load effect on lattice transmission towers [D]. Master Thesis. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.(in Chinese))
- [8] 楼文娟, 杨悦, 吕中宾, 等. 考虑气动阻尼效应的输电线路风偏动态分析方法[J]. 振动与冲击, 2015, **34**(6): 24-29.(LOU Wenjuan, YANG Yue, LÜ Zhongbin, et al. Windage yaw dynamic analysis methods for transmission lines considering aerodynamic damping effect [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, **34**(6): 24-29.(in Chinese))
- [9] HU X G, YANG J B, YANG F L. Analysis on wind-induced vibration dynamic responses of transmission tower-line system[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, **327**: 284-289.
- [10] MOMOMURA Y, MARUKAWA H, OKAMURA T, et al. Full-scale measurements of wind-induced vibration of a transmission line system in a mountainous area[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, **72**(1): 241-252.
- [11] OKAMURA T, OHKUMA T, HONGO E. Wind response analysis of a transmission tower in a mountainous area[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2003, **91**(1): 53-63.(in Chinese))
- [12] PALUCH M, KWOK K C S. Dynamic characteristics and wind induced response of a steel frame tower[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1995, **55**: 133-149.
- [13] 陈伟昆. 山区地形风场特性及其致输电塔线体系风振响应研究[D]. 硕士学位论文. 长沙: 湖南大学, 2018.(CHEN Weikun. Study on the wind field characteristics of mountainous terrain and wind-induced response of transmission tower-line system[D]. Master Thesis. Changsha: Hunan University, 2018.(in Chinese))
- [14] 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): 364-372.(XU Haiwei, LOU Wenjuan, LI Tianhao, et al. Wind deviation analysis of transmission line jumpers under micro-topography [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Edition)*, 2017, **51**(2): 364-372.(in Chinese))
- [15] 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 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): 46-55.(in Chinese))
- [16] RIERA J D, OLIVEIRA T T. Wind-structure interaction in conductor bundles in transmission lines[J]. *Structure & Infrastructure Engineering*, 2010, **6**(4): 435-446.
- [17] 楼文娟, 刘萌萌, 李正昊, 等. 峡谷地形平均风速特性加速效应[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, **43**(7): 8-14.(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 Sciences Edition)*, 2016, **43**(7): 8-14.(in Chinese))
- [18] 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.
- [19] 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): 929-955.
- [20] 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): 805-812. (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 Edition)*, 2016, **50**(5): 805-812. (in Chinese))
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范: GB50545 — 2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design of 110 kV~750 kV overhead transmission line; GB50545 — 2010[S]. Beijing: China Planning Press, 2010. (in Chinese))
- [22] 李天昊. 输电导线气动力特性及风偏计算研究[D]. 硕士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2016. (LI Tianhao. Study on aerodynamic characteristics and wind-induced swing of transmission lines [D]. Master Thesis. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese))

Fluid-Structure Coupling Wind-Induced Vibration Analysis of Transmission Lines Across 2 Close Hills

ZHANG Jin, ZHU He

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

Abstract: Based on the 2D fluid-structure coupling theory, the wind-induced vibration responses of transmission lines across 2 close hills were calculated. Both the load on the wire by the mountain wind and the surface wind pressure change caused by wire vibration with its influence on the flow field were considered. Firstly, the correctness of the method was verified in comparison with the existing literature results. Then, the numerical wind tunnel model for the transmission line across 2 close hills was established. The average wind speed characteristics of the canyon and mountain pass topography as well as the distribution characteristics of the corresponding wind pressure were analyzed. The distributions of aerodynamic coefficients and vertical displacements were analyzed. The numerical results show that, in the transient wind field, the acceleration effect of the mountain pass is more significant than that of the canyon, and the acceleration ratio at the middle of the line is more important. The distribution of wind pressure around the wire is also inconsistent due to the influence of different topographic wind fields. Under the canyon topography, the distribution of wind pressure around the wire is stable with time. Under the mountain pass topography, the wind pressure around the wire fluctuates with time. The smaller the distance between the 2 hills is, the greater the variation range of the resistance coefficient time history curve will be, so is the change of wind pressure. The updraft under the mountain pass topography makes the wire subject to greater lifting force and vertical wind deviation.

Key words: canyon topography; mountain pass topography; updraft; acceleration effect; fluid-structure coupling