

山地塔-线体系下输电线路风振影响因素分析

赵珊鹏^{1,2†}, 陈智涛¹, 张友鹏¹, 王思华¹, 赵斌¹, 姚晓通¹

(1. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070;
2. 兰州交通大学 甘肃省轨道交通电气自动化工程实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为揭示山地区域复杂风场作用下输电线路风致振动的影响因素, 基于宁夏 110 kV 连南线实际线路参数建立“二塔三线”有限元精细化模型, 采用重力自平衡法对线路找形计算。利用谐波叠加法模拟线路所处的随机风场, 并对塔-线体系模型施加风荷载, 分析山地输电线路风振的影响因素。结果表明, 山地风场加速效应显著, 当风仰角达 45° 且风向角达 90° 时, 加速可比达 1.3~1.4, 易引发线路剧烈风振; 相较于无塔输电线模型, 塔-线体系模型的线路风振响应幅值更大, 且更切合实际; 导线初始张力从 16 kN 增大至 26 kN 时, 其水平和垂向振幅分别降低 31.1% 和 23.4%; 线路阻尼比从 0.02 增至 0.15 时, 导线的水平和垂向振幅分别降低 36.4% 和 44.2%。增大线路初始张力、阻尼比能有效抑制线路风致振动。本研究揭示了山地风场加速效应与塔-线动力耦合的协同作用机制, 定量评估了关键参数对线路风振的影响规律, 提出的初始张力优化方案和阻尼比增强措施可为山地输电线路抗风设计提供重要的技术支撑。

关键词: 输电线路; 山地风场; 塔-线体系; 风致振动; 有限元分析

中图分类号: TM752 **文献标志码:** A

Analysis on Wind Vibration Influencing Factors of Transmission Lines under Mountain Tower-line System

ZHAO Shanpeng^{1,2†}, CHEN Zhitao¹, ZHANG Youpeng¹, WANG Sihua¹, ZHAO Bin¹, YAO Xiaotong¹

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. Rail Transit Electrical Automation Engineering Laboratory of Gansu Province, Lanzhou Jiaotng University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To reveal the factors influencing wind-induced vibration of transmission lines under complex mountain wind fields, a refined finite element model of “two towers and three lines” is established based on the actual line parameters of the 110 kV Lian’nan transmission line in Ningxia. The gravity self-balancing method was used for the shape-finding calculation of the transmission line. The harmonic superposition method is used to simulate the stochastic wind field where the line is located, and wind loads are applied to the tower-line system model to analyze the influencing factors of wind-induced vibration of mountain transmission lines. Results show that

* 收稿日期:2024-01-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51867013, 52467017), National Natural Science Foundation of China(51867013, 52467017); 甘肃省科技计划资助(25JRRA174, 25JRRA1075, 23JRRA868), Gansu Province Science and Technology Plan Funding (25JRRA174, 25JRRA1075, 23JRRA868)

作者简介:赵珊鹏(1983—), 男, 吉林敦化人, 兰州交通大学副教授, 博士

† 通信联系人, E-mail: zsp@lzjtu.edu.cn

the acceleration effect of mountain wind fields is significant, with acceleration ratios reaching 1.3 to 1.4 when the wind incidence angle is 45° and the wind direction angle is 90° , which can easily induce severe line wind-induced vibrations. Compared to models without towers, the tower-line system model shows larger and more realistic wind vibration response amplitudes; when the initial tension of the conductor increases from 16 to 26 kN, its horizontal and vertical amplitudes are decreased by 31.1% and 23.4%, respectively. When the line damping ratio increases from 0.02 to 0.15, the conductor's horizontal and vertical amplitudes are decreased by 36.4% and 44.2%, respectively. Increasing the initial tension and damping ratio effectively suppresses wind-induced vibrations of the lines. This study reveals the collaborative mechanism of mountain wind field acceleration effects and tower-line dynamic coupling, quantitatively evaluating the impact of key parameters on line wind-induced vibration. The proposed initial tension optimization and damping ratio enhancement measures provide important technical support for the wind-resistant design of transmission lines in mountainous regions.

Key words: transmission lines; mountains wind field; tower-line system; wind-induced vibration; finite element analysis

电能是推动经济发展的关键因素.确保电能的安全、稳定传输，并满足用户的用电需求，是电网发展和运行的核心前提.受强风影响，我国西北地区的输电线路容易出现舞动现象，常导致线间放电、跳闸、金具磨损以及断线等故障，严重影响电力系统在远距离输电过程中的安全性和稳定性^[1].舞动的产生与气象条件、线路覆冰情况、地形特征、塔-线类型以及线路的跨距和走向等因素密切相关.位于贺兰山区的宁夏 110 kV 连南输电线，部分线路穿越山脊之巅，风向与线路的水平夹角较大.同时，风在经过山地时加速显著，这导致即使在无覆冰的情况下，线路也会发生剧烈的舞动.该段线路 I 回#184~#200、II 回#124~#140 段发生周期性舞动时，频率为 0.1~1.0 Hz，振幅较大，整体舞动幅值介于导线直径的 20~300 倍之间.线路舞动导致的线间放电使 II 回#133~#134 塔间 A、B 相短路，重合闸失败^[2].线路舞动严重威胁连南线的安全稳定运行，迫切需要明确山地区域连南输电线路舞动的影响因素，并采取有效的防舞动措施.

国内外学者对输电线路舞动进行了广泛而深入的研究，最具代表性的是 Den Hartog 垂直舞动机理^[3]、Nigol 扭转舞动机理^[4]及 P.Yu 惯性耦合机理^[5]，他们理论探讨了在风荷载作用下，覆冰导线产生舞动的机制，指出只有覆冰导线才会发生舞动.自 20 世纪 90 年代以来，众多学者将研究重点转向了非线性理论，并深入探讨了舞动问题. Luongo 等^[6]采用曲

梁单元模拟覆冰导线，开展导线舞动研究.国内学者张孜航等^[7]建立三平动和一转动自由度覆冰分裂导线模型，分析说明了气动力对结构频率的影响问题.汪大海等^[8]通过气弹模型风洞试验和数值模拟，深入分析了塔-线耦联体系的风振响应特性，揭示了塔-线耦合作用对输电塔动力特性及最不利风向角的显著影响，并探讨了机械阻尼和气动阻尼.刘春城等^[9-10]利用 CFD 数值模拟山脉地形对输电线路风速及风偏响应的影响，结果表明山脉入口风速最大，山脉中部风速最小，说明山脉地形特征对线路舞动具有一定影响.

然而，在没有覆冰或仅有薄覆冰的情况下，导线仍然会出现舞动现象.代表性案例有：大风区沿线兰新高铁附加导线在强风环境下发生的剧烈无覆冰舞动现象^[11-12]；英国塞文河和怀伊河交汇处，275 kV 输电导线发生的无覆冰舞动^[13].导线无覆冰舞动逐渐引起业界广泛关注.刘亮等^[14]为探讨架空线路在无覆冰条件下单导线舞动的成因，将风荷载等效为轴向周期位移激励的方法，以此对单导线进行舞动分析.然而，此方法尚未考虑输电塔对线路舞动的耦合作用.

在塔-线体系模型方面，谢献忠等^[15]设计非接触式电磁激励试验系统，考虑到塔-线之间、相-相之间存在的耦合，研究得出系统共振是引发输电线路大幅舞动的主要原因，输电线路发生大幅舞动的激励频率均趋近于系统的各阶固有频率.王辉等^[16]对不同类风场雨滴冲击荷载下的塔-线体系进行动

力响应分析,研究表明风雨荷载也是塔-线体系结构稳定性的重要影响因素.

上述学者采用理论研究与数值模拟相结合的方法,构建了多种类型的输电线路有限元模型,以探究塔-线体系中多分裂导线的舞动响应.而在山地环境下构建塔-线体系模型,分析单导线在无覆冰条件下的舞动响应及其影响因素,有助于深入理解山地环境、塔-线体系与无覆冰单导线之间的相互作用机制.尽管如此,目前这一方向尚处于初步探索阶段,亟须进一步的深入研究.

本文在常规塔-线体系模型的基础上,根据连南线 110 kV 实际线路参数建立“二塔三线”有限元精细化模型,对输电塔-线体系线路模型节点施加风荷载,分析山地环境下无覆冰线路的风振响应,进而研究线路跨距、悬挂点高差、初始张力、阻尼比等因素对线路风振的影响.本文塔-线体系模型更切合线路实际工况,研究结果可为多山地区输电线路风

振防治设计及线路安全评估提供重要参考.

1 塔-线体系有限元模型

结合宁夏 110 kV 连南线实际线路参数建立塔-线体系有限元精细化模型,选用铁塔型号为 110ZGu2 鼓形直线塔,塔总高 31 m,呼称高度为 21 m,塔基根开尺寸为 4.6 m×4.6 m,塔头宽度 3.2 m.铁塔主材为角钢,材料为 Q235 钢和 Q345 钢两种,弹性模量为 200 GPa,泊松比为 0.3.铁塔模型采用 Beam188 三维薄壁梁单元,梁单元具有在任意截面处都抗拉压、弯曲和扭转的能力.根据设计图提取节点信息,设置关键点的位置坐标,并建立杆件体系,定义杆件单元属性^[17].输电塔为双回线路,其中自上而下悬挂排布为地线、三相导线.110 kV 单导线型号为 LGJ-300/40,地线型号为 JLB1A-95/25,导(地)线参数如表 1 所示.

表 1 导(地)线参数
Tab.1 Conductor (ground) line parameters

导线类型	截面积/mm ²	质量/(kg·km ⁻¹)	弹性模量/GPa	直径/mm	计算拉断力/N
导线 LGJ-300/40	338.99	1 133.0	73.0	23.94	92 220
架空地线 JLB1A-95/25	95.14	633.2	147.2	12.48	101 040

导(地)线具有刚度小、非线性强、只受拉力不受压力的特点,故模型采用 Link10 单元模拟.导线悬挂在悬垂绝缘子下方.悬垂绝缘子铰接于输电塔与导线间,绝缘子刚度高于导线,会受到风偏影响,故采用受拉力和压力影响的 Link8 杆单元模拟.

输电塔的塔脚和塔-线体系输电线路两端悬挂点均采用固定约束,导(地)线和绝缘子利用节点耦合形成铰接,模型中三跨对应不同的跨距和高差.利用重力自平衡法对导(地)线施加重力加速度,形成重力载荷,导线和地线初始张力分别为 16.8 kN 和 20.16 kN.对线路按 1 m 间距划分单元网格,计算导线在自重荷载下达到平衡状态时的位移和应力分布,得到找形计算后的连续档塔-线体系有限元模型如图 1 所示.

2 随机风荷载生成与加载

输电塔线所处风场为随机风场,视为平均风和脉动风共同作用的结果.平均风在一定时间内的风速大小及方向处于稳定状态,随机风的风速和大小随时间和空间均不断变化,模拟过程近似为随机高

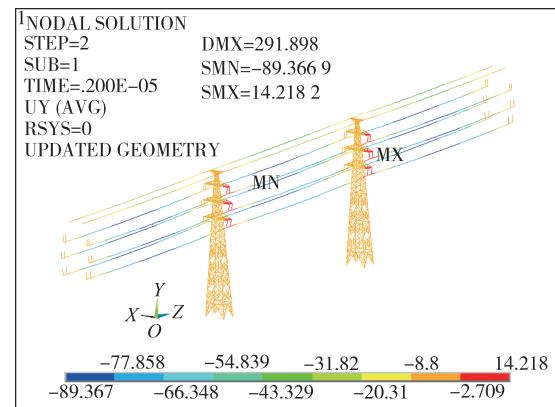


图 1 塔-线体系有限元模型
Fig.1 Finite element model of tower-line system

斯过程.基于 Davenport 风速谱,利用谐波叠加法,形成随机风的形式来模拟输电塔线处风速场.平均风速沿着高度变化的指数律模型见式(1)^[18]:

$$\bar{v}(z) = \left(\frac{z}{z_c} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中: z 代表结构任一高度,单位为 m; $\bar{v}(z)$ 是任一高度处平均风速,单位为 m/s; z_c 是标准参考高度,单位为 m,本文取 10 m; \bar{v}_c 是标准参考高度处平均风速,单位为 m/s; α 是地面粗糙度系数,根据建筑结构荷

载规范,连南线所处地貌为B类地貌^[2],取0.15。

输电塔线处的风速目标谱表达式见式(2):

$$\begin{cases} \frac{nS_v(n)}{v_{10}^{-2}} = \frac{4Kx^2}{(1+x^2)^{\frac{3}{4}}} \\ x = 1200 \frac{n}{\bar{v}_{10}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $S_v(n)$ 是脉动风速功率谱; n 为脉动风频率,单位为Hz; K 是地貌粗糙度系数,取0.005。

式(3)给出了输电线处风速与风荷载的关系:

$$F(t) = \mu_{sc} d V(t)^2 / 1.6 \quad (3)$$

式中: $F(t)$ 是输电线各节点风荷载时程; μ_{sc} 为输电线体型系数; d 为输电线直径,单位为mm。

图2为输电线在水平方向平均风速为15 m/s时的脉动风速时程及自功率谱,风速呈现随机脉动特征,自功率谱与目标谱在主要频率区间基本重合。

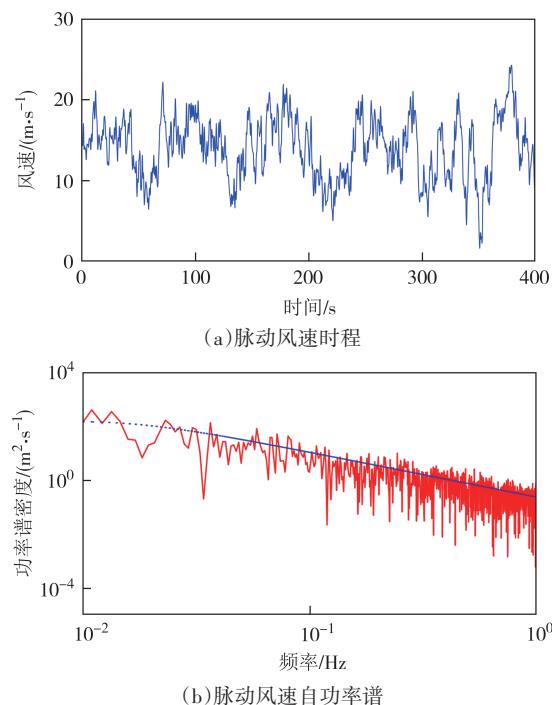


图2 输电线处脉动风速时程及自功率谱

Fig.2 Time history and self power spectrum of pulsating wind at transmission lines

随机风生成之后,利用有限元仿真软件中array数值型数组读取不同位置处的脉动风速时程文本,进行线性插值计算,利用式(3)将输电线处随机风速转化为风荷载作用于模型的节点上。采用Newmark法迭代计算求解,得到收敛稳定的输电线动态风振响应,模拟时程总长400 s,风荷载加载时间为0.2 s,截止频率为1 Hz,频率范围等分数为2 048。

图3为单跨输电线受重力和风荷载示意图。导

线垂度按式(4)计算:

$$l_0 = \frac{mgL^2}{8H_0} \quad (4)$$

式中: l_0 为初始形态下的导线垂度; L 为跨长; H_0 为初始张力; m 为导线质量; g 为重力加速度。

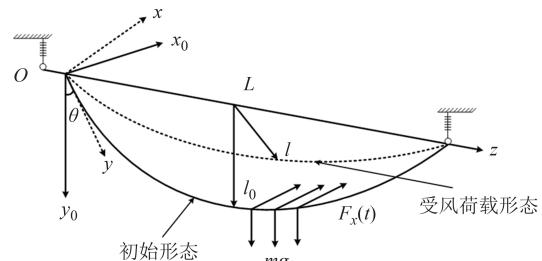


图3 线路受重力及风荷载示意图

Fig.3 Schematic diagram of gravity and wind load on the line

3 塔-线体系对比分析

3.1 模态分析

输电线具有高柔性的特性,其自振频率相较于输电塔来说要低得多,并且振型更为密集。在进行模态分析时,若将输电线与输电塔耦合,形成塔-线体系模型,自振频率将会发生变化。

模态分析是研究结构动态特性的关键方法,文中采用求解速度快且精度高的Block Lanczos法进行模态提取,导线振动力学的基本方程^[1]为:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = \{F(t)\} \quad (5)$$

式中: \ddot{u} 、 \dot{u} 和 u 分别为单元节点加速度、速度和位移矢量; M 、 K 和 C 分别是单元质量、刚度和阻尼矩阵; $\{F(t)\}$ 是单元荷载向量,模态分析时设定 $\{F(t)\}$ 为零,一般将矩阵 C 忽略;谐响应分析时假设 $\{F(t)\}$ 和 u 为谐函数。瞬态动力学分析时式(5)保持不变。

自由振动时忽略阻尼^[18]:

$$M\ddot{u} + Ku = 0 \quad (6)$$

谐运动:

$$(K - \omega^2 M)u = 0 \quad (7)$$

模态分析时假定结构是线性的,如 M 和 K 可保持为常数;式(7)解为 ω_i^2 ,该特征值对应向量为 u_i 。简谐运动方程为 $u = u_0 \cos(\omega t)$, ω 为自振圆周频率(rad/s);特征值平方根为 ω_i ,是结构的自然圆周频率(rad/s),求得自振频率为 $f_i = \omega_i / 2\pi$,特征向量 u_i 表示振型。

导线风振过程中,结构和内部材料会发生摩擦,进而消耗导线内部能量,形成阻尼。导线在进行

力学特性分析情况下,一般采用瑞利(Rayleigh)阻尼表示。瑞利阻尼分为两部分来进行计算,各自与刚度矩阵、质量矩阵成比例,即:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (8)$$

式中: α 和 β 分别是质量和刚度阻尼系数。根据式(9)、式(10)确定:

$$\alpha = \frac{2\omega_n \omega_m (\xi_n \omega_m - \xi_m \omega_n)}{\omega_m^2 - \omega_n^2} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{2(\xi_m \omega_m - \xi_n \omega_n)}{\omega_m^2 - \omega_n^2} \quad (10)$$

式中: ξ_n 和 ξ_m 分别对应 n 阶和 m 阶振型阻尼比; ω_n 和 ω_m 分别对应 n 阶和 m 阶振型自振频率。在塔-线体系当中,输电塔阻尼比一般取0.01,输电线阻尼比取近似值0.02^[19]。当阻尼比增大时,线路的自振频率降低,使系统的阻尼力增大,进而导致输电线的振荡减弱,阻尼比的增大在一定程度上会起到抑制风振的作用。

图4为塔-线体系模态振型图,呈现出较为明显的2阶和9阶振型。单输电塔和塔-线体系前10阶自振频率如表2所示,塔-线体系的自振频率基本处于低频、密集状态,大部分振型变化以输电线的变化为主。

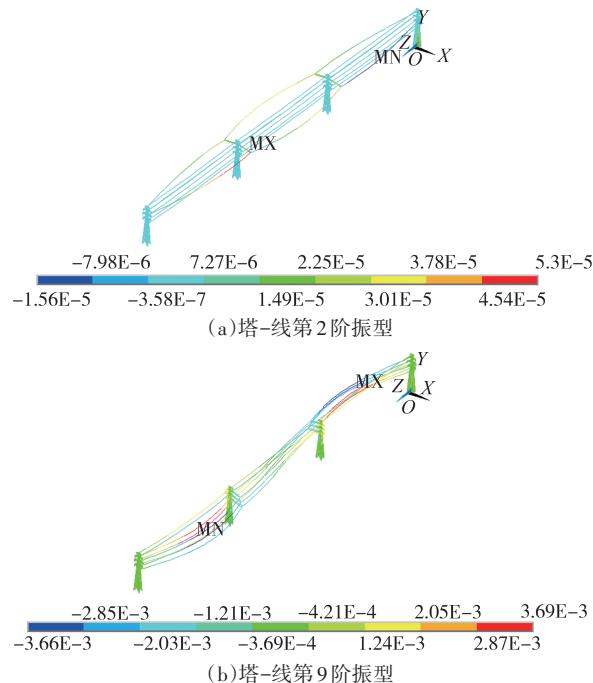


图4 塔-线体系模态振型图
Fig.4 Modal mode shape of tower-line system

3.2 风振响应对比

在输电塔模型中添加输电线之后,输电线会对输电塔产生拉扯力,两者的耦合作用随之增大。本

表2 单输电塔和塔-线体系前10阶自振频率

Tab.2 The first 10 natural frequencies of the models for single transmission tower and tower-line system

模态阶数	单输电塔频率/Hz	塔-线频率/Hz
1	2.472 9	0.420 2
2	3.629 8	0.423 8
3	5.621 3	0.551 5
4	5.880 8	0.556 8
5	7.267 2	0.670 5
6	7.356 5	0.671 1
7	7.614 0	0.709 4
8	7.870 8	0.718 9
9	8.525 0	0.885 3
10	9.205 9	0.887 9

文分别建立了无塔输电线有限元模型、塔-线体系有限元模型,加载风荷载后对比两模型输电线跨中节点处的风振响应,结果如图5~图6所示。由于输电塔本体的影响,相较于无塔输电线模型,塔-线体系模型的导线刚度有所降低,导致塔-线体系模型的导线自振频率低于无塔输电线模型。塔-线体系模型导线跨中垂向位移振幅和加速度要明显大于无塔输电线模型。说明在塔-线体系模型下,线路受自然风激励的影响更为显著,在分析线路振动时更切合实际。

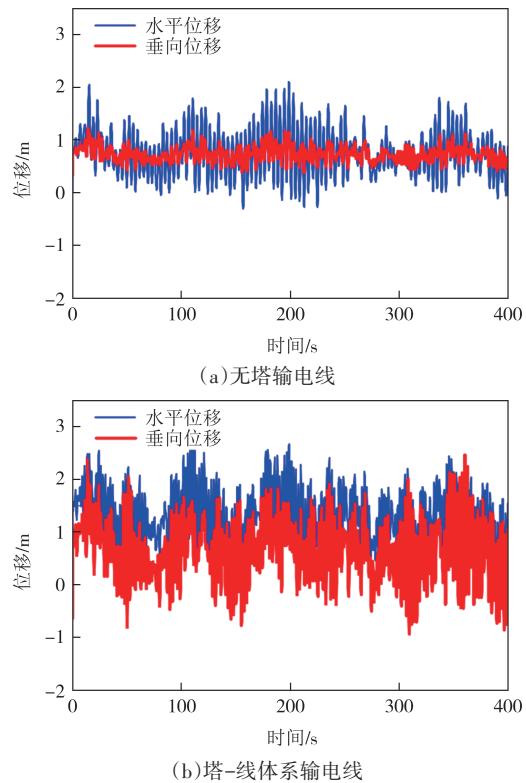


图5 两模型输电线位移对比效果

Fig.5 Comparison effect of displacement between two models of transmission lines

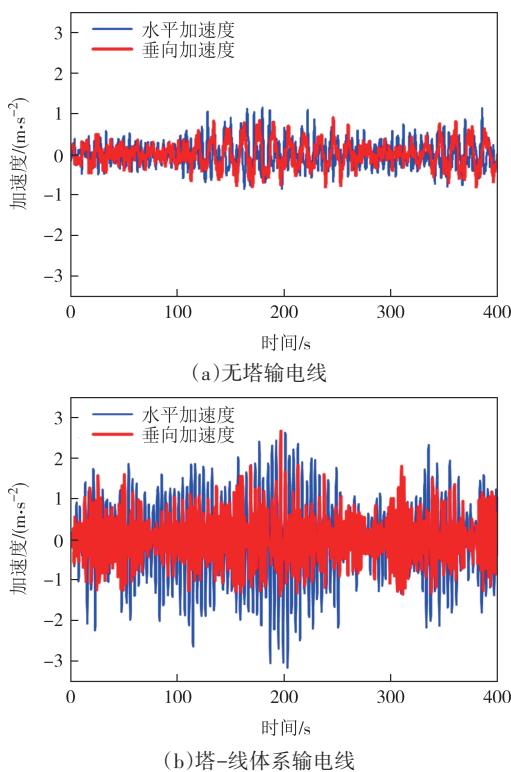


图6 两模型输电线加速度对比效果

Fig.6 Comparison effect of acceleration between two models of transmission lines

为了验证本文模型的准确性,将本文的塔-线体系模型配置为与文献[20]中的模型相同的工况条件,选定跨距为400 m,施加风速为15 m/s的脉动风荷载,并将计算结果进行比较.两模型输电线路跨中的水平位移对比如图7所示.两者振幅相差约5%,一定程度上验证了本文仿真环境与方法的合理性.

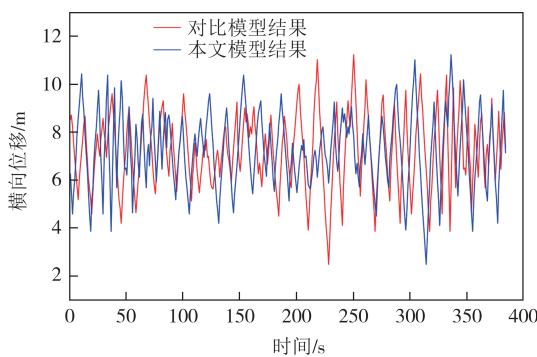


图7 山地风场下导线跨中水平位移时程

Fig.7 Time history of horizontal displacement at mid-span of conductor under mountainous wind field

4 输电线风振影响因素分析

经现场测量,连南输电线风振区段的风向与线

路水平夹角(风向角)呈45°~90°;同时受地形影响,气流易形成0°~45°风仰角^[2].图8为连南线特殊风向对导线影响趋势图.

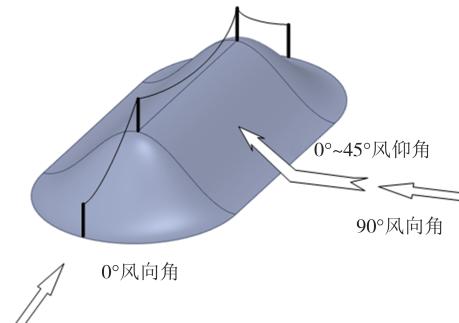
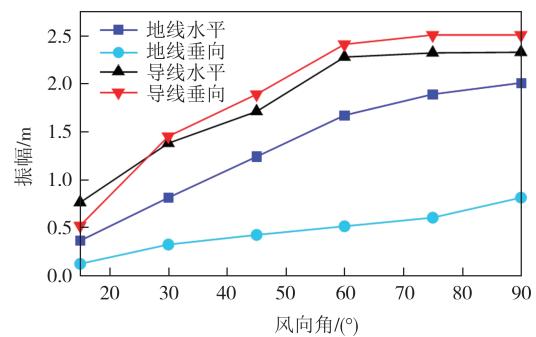


图8 连南线特殊风向对导线影响趋势图

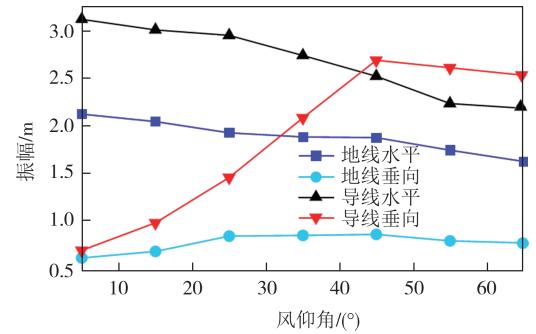
Fig.8 Trend chart of the impact of special wind directions on the conductors of the Lian'nan transmission line

4.1 风向角及风仰角

在风振响应分析中,对导线施加的风荷载,风向角为0°~90°,风仰角为0°~65°.分析导线风致振动的影响因素,以风振较为剧烈的15 m/s的入口风速作为例证.在保证计算结果稳定性和收敛性的情况下,仿真时间定为400 s,以该地区较常见200 m跨距进行模拟分析.图9为不同风向角和风仰角作用下导(地)线振幅变化图.



(a) 风向角作用下振幅



(b) 风仰角作用下振幅

图9 不同风向角及风仰角作用下导(地)线的振幅

Fig.9 Amplitude of conductor (ground) line under different wind direction angles and elevation angles

图 9(a)为不同风向角下的线路振幅变化趋势图,随着风向角增大,线路受风面积不断增大,线路的非线性振动加剧,线路振幅随风向角增大呈增长的趋势.当风向角处达到60°时,导线和地线的水平振幅分别达到2.28 m和1.67 m,垂向振幅分别达到了2.41 m和0.51 m.随着风向角的增大,线路振幅增大.当风向角超过60°时,导线振幅随趋于稳定,地线水平振幅和垂向振幅增长.在不同风仰角的作用下,线路振幅变化如图9(b)所示,在风仰角只有5°的情况下,导线和地线的水平振幅分别为3.12 m和2.12 m,垂向振幅仅有0.69 m和0.6 m.随着风仰角不断增大,线路受到垂向风荷载变大,抵消了部分线路自身重力,导致线路失稳,进而引发线路风致振动.在风仰角为45°时,导线和地线的水平振幅分别减小到2.52 m和1.87 m,垂向振幅分别增大到2.69 m和0.85 m.

图10为线路舞动位移时程,此时线路风向角为90°,风仰角为45°.从图10可以看出,导线水平、垂向振幅规律类似,地线由于弧垂小,垂向振幅变化不大,在水平方向产生较大位移.线路风振过程中初始阶段发生微幅摆动,随时间推进,舞动越发剧烈,整体表现为非稳定状态.

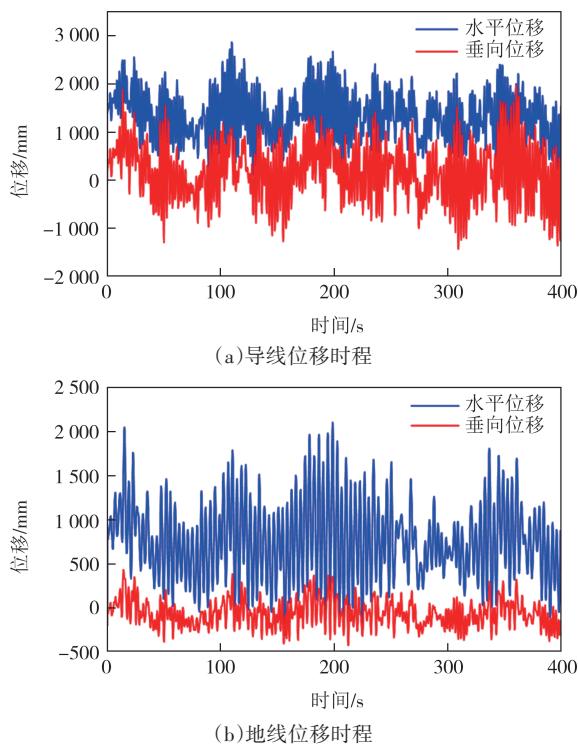


图 10 导(地)线位移时程

Fig.10 Displacement time history of conductor (ground) line

4.2 风场加速比计算及风洞试验

建立山地环境流场模型,山体外轮廓采用余弦型^[21],其外轮廓表达式为:

$$Z(x, y) = \begin{cases} H \cos^2 \left(\frac{\pi \sqrt{x^2 + y^2}}{D} \right), & x^2 + y^2 \leq D^2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中: H 为山体高度; D 为山体直径. 通过改变山体高度进而改变风仰角.

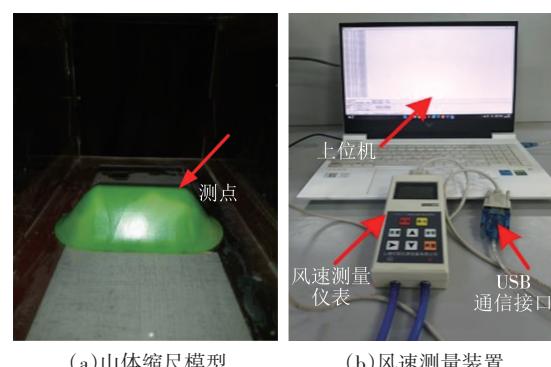
通常采用无量纲参数加速比 S 对风场的加速效应做出衡量, 定义公式为:

$$S = \frac{U(z)}{U_0(z)} \quad (12)$$

式中: $U(z)$ 为山体 z 高度处的风速; $U_0(z)$ 为 $z=0$ 高度处来流风速.

构建不同山体角度下的山体流场模型, 设定山底水平入口风速为15 m/s, 并监测山体顶部的风速, 计算风速加速比. 当输电线经过山体顶部时, 由于山体的加速效应, 山顶处水平风速超过入口风速, 垂向风速随山体风仰角变化呈增长趋势, 当山体风仰角约为45°时, 总体风速加速效应十分明显, 为入口风速的1.3~1.4倍.

风洞试验在低速风洞试验段进行, 选择缩尺几何比为1:1 000的单山模型, 选用智能风速仪测量山地模型顶部输电线处垂向风速及水平风速, 试验模型和测量装置如图11所示. 试验与仿真结果对比如图12所示, 结果相差约6%, 一定程度上验证了结果的合理性.



(a) 山体缩尺模型 (b) 风速测量装置

Fig.11 试验模型和测量装置

Fig.11 Experimental models and measuring devices

4.3 风速

风速的大小是引发线路风振现象的关键因素. 为分析线路舞动受风力的影响, 设定200 m跨距,

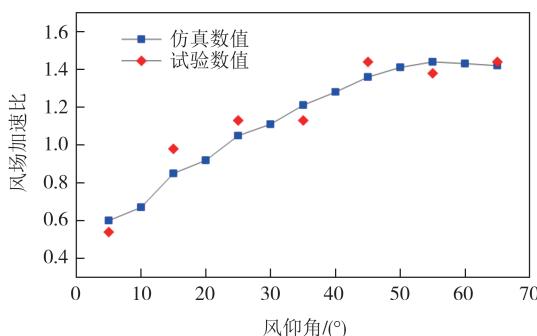


图 12 风场加速比仿真与试验结果

Fig.12 Simulation and experimental results of wind field acceleration ratio

45°风仰角以及90°风向角,在5~30 m/s风速影响下,计算线路的风振幅值变化曲线,如图13所示。随风速的增大,线路舞动振幅整体呈增长的趋势。风速为15 m/s时,导线和地线的水平振幅分别达到2.5 m和1.82 m,垂向振幅分别达到2.69 m和0.78 m。在25~30 m/s风速下,导线垂向振幅产生微幅下降趋势,降幅3.85%;地线水平振幅发生大幅上升趋势,增幅达到58.3%。贺兰山谷地区的风速常年保持在15 m/s以上,这导致了线路风振现象的频繁发生。在这种情况下,可以考虑对山地区域线路采用低风压导线以抑制风致振动^[22]。

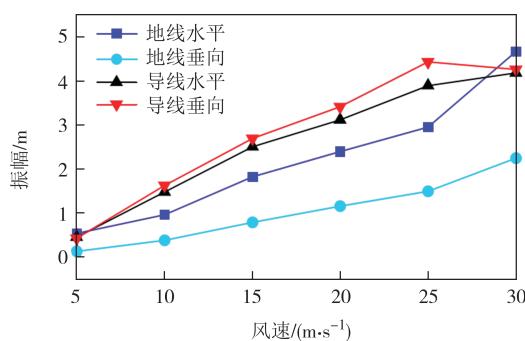


图 13 不同风速下导(地)线振幅曲线

Fig.13 Amplitude curves of conductor (ground) line under different wind speeds

4.4 跨距

线路风振类型和跨距长度存在一定相关性,同时,随着跨距的增加,线路的弧垂会相应增大,线路的风振稳定性下降。仿真实验中入口风速设为15 m/s,跨距分别设为100、200、300和400 m,计算不同跨距下线路振幅变化趋势,结果如图14所示。可见,随着跨距的增大,线路的振幅均有增长的趋势。线路在100 m跨距下仅发生微幅摆动,垂向和水平振幅基本低于0.7 m。在200~400 m跨距下,线路振动幅值明显

增大。在400 m跨距下,导线水平和垂向舞动振幅分别达到7.23 m和8.12 m。随着跨距的增加,线路的垂向和水平振幅持续扩大,这是由线路的等效静刚度降低所致,同时线路吸收的能量也随之增加。通过分析不同跨距下输电线的振幅变化趋势,线路跨距在100~200 m且风速相对较低的情况下,振幅较为稳定,说明小跨距对于线路风振具有一定的抑制作用,跨距在300~400 m,舞动振幅比较大。在此情况下,对于连南线风振较为剧烈的路段进行设计时,应尽量限制跨距以抑制线路风振。

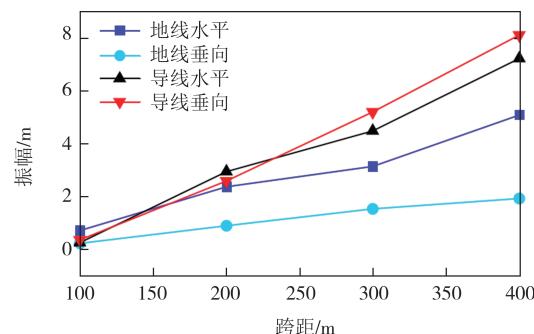


图 14 不同跨距下导(地)线振幅曲线

Fig.14 Amplitude curves of conductor (ground) line under different spans

4.5 悬挂点高差

连南线跨越山脊线路段,因此会形成线路悬挂点的高差。在塔-线体系模型中设置0~100 m的导线悬挂点高差,入口风速设为15 m/s,跨距为200 m,分析不同悬挂点高差影响下线路振幅变化,计算结果如图15所示。地线振幅受高差影响不大;而在20 m高差下,导线水平与垂向振幅有减小趋势,之后随高差的增大呈递增趋势。在100 m的高差下,导线水平振幅达到3.03 m,线路振动剧烈,严重影响线路稳定性。

悬挂点高差会导致线路产生不平衡张力,随着

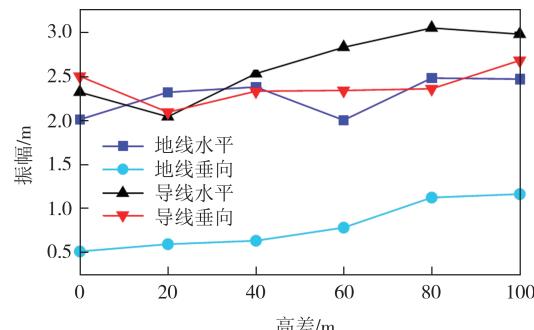


图 15 不同高差下导(地)线振幅曲线

Fig.15 Amplitude curves of conductor (ground) line under different height differences

线路悬挂点高差增大,线路不平衡张力加剧,使线路更易发生风振.在实际线路设计中,可尽量避开山区高差较大的陡坡、洼地等区域,也可通过升高或降低输电塔悬挂呼称高度来改变线路悬挂点高差.

4.6 初始张力

导线的初始张力是导线在架设完成后,在标准参考条件下的静态轴向拉力.当增大导线初始张力时,导线刚度也会随之提高.在入口风速为 15 m/s、跨距为 200 m 工况下,分别改变导(地)线的初始张力至 16、18、20、22、24 和 26 kN,并进行分析.图 16 为不同初始张力作用下,导(地)线振幅变化曲线,随着导(地)线初始张力的增大,导(地)线振幅均呈不同程度的下降趋势.初始张力从 16 kN 增大至 26 kN 时,即提升 62.5% 时,导线水平和垂向振幅分别降低了 31.1% 和 23.4%,地线水平和垂向振幅分别降低了 20.4% 和 29.6%,有效抑制了线路风振.在实际线路运维中,可以对线路安装地锚、卡线器等恒张力补偿装置,来增大导线初始张力以达到预期的防振效果.

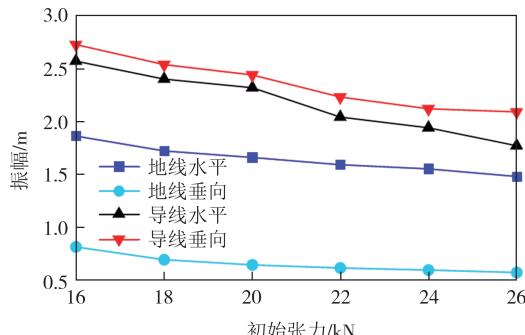


图 16 不同初始张力下导(地)线振幅曲线

Fig.16 Amplitude curves of conductor (ground) line under different initial tensions

4.7 线路阻尼比

线路阻尼比是衡量架空导线振动能量耗散能力的无量纲参数,用于描述导线振动衰减的快慢程度.在入口风速为 15 m/s,跨距为 200 m 工况下,分析不同阻尼比(0.02、0.05、0.10、0.15、0.20)线路的振幅变化趋势,结果如图 17 所示.导(地)线振幅在阻尼比达到 0.15 后,振幅变化趋势基本趋于稳定,导线水平和垂向振幅分别降低了 36.4% 和 44.2%,地线水平和垂向振幅分别降低了 44.5% 和 38.9%.增大线路阻尼比可加速线路能量吸收,削弱导线的振幅,进而抑制线路风振.在实际线路运维中,可以通过架设阻尼线、安装阻尼间隔棒来约束线路,以实现防振效果.

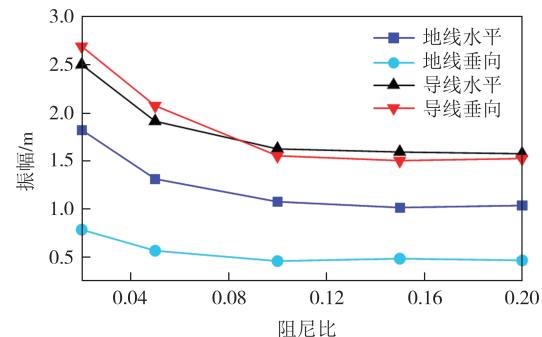


图 17 不同线路阻尼比下导(地)线振幅曲线

Fig.17 Amplitude curves of conductor (ground) line under different line damping ratios

由以上分析可知,处于山地区域的线路,较大的风向角、风仰角和高风速共同作用,能够抵消线路部分重力,进而引发线路失稳,这是发生风振的关键因素.另外,由于地形影响,线路大悬挂点高差、大跨距都会对线路振动造成不利影响.通过改变线路初始张力,增大线路阻尼比,避开大高差陡坡段,适当减小线路跨距,可在一定程度上抑制线路风振.

5 线路悬挂点处张力分析

输电线风致振动会对导线线夹、连接金具以及绝缘子产生较大的动态冲击载荷,过大的冲击载荷会直接威胁输电塔的结构安全性,甚至会导致输电塔倒塌事故.本文采用最大运行张力系数(最大运行张力与初始张力的比值)来描述线路张力的变化趋势.分别设置不同风速、跨距、悬挂点高差、初始张力以及线路阻尼比,分析线路风振时的最大运行张力系数.

图 18 为导(地)线悬挂点处最大运行张力系数随风速、跨距的变化趋势图,由图 18(a)可知,在 5~15 m/s 入口风速下,随着风速的增大,导线最大运行张力系数仅有小幅度增长趋势;当风速超过 15 m/s 后,导线的最大运行张力系数随着风速的增加而显著上升.地线的最大运行张力系数则随着风速的增加呈现出线性增长的趋势;在高风速下线路最大运行张力系数较大,30 m/s 风速下线路最大运行张力系数达到最大值.由图 18(b)可知,随线路跨距的增大,导线的最大运行张力系数增长明显,地线的最大运行张力系数仅呈现小幅度增长;在 200~300 m 跨距下,导线的最大运行张力系数明显增大,线路

长期处于大张力影响下,会加剧输电塔疲劳损伤.

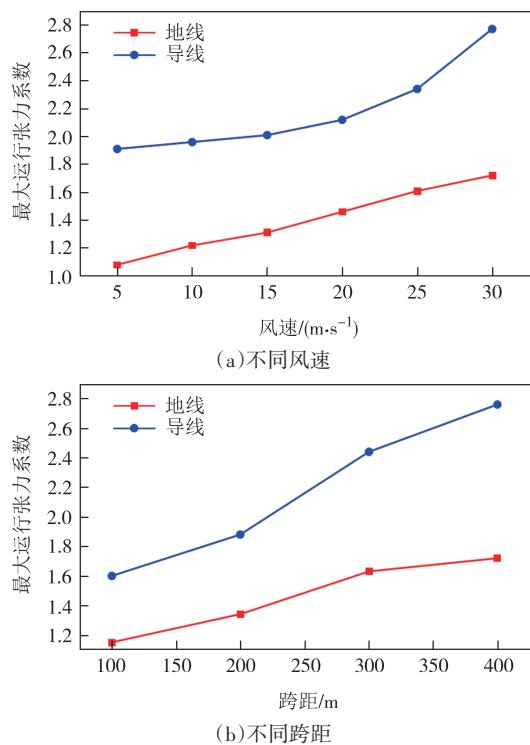


图18 导(地)线悬挂点处最大运行张力系数变化曲线

Fig.18 Variation curves of maximum tension coefficient at suspension points of conductor (ground) line

本文用输电线路两悬挂点的张力差来表示线路的不平衡张力,图19为导(地)线不平衡张力随悬挂点高差的变化趋势图.从图19可以看出,随着悬挂点高差的增加,导(地)线所承受的不平衡张力也增加,二者之间呈现正相关.当输电线路承受的不平衡张力超过线路最大使用张力的30%时,可能会引发线路的安全隐患.在陡峻山区等复杂地形条件下,不平衡张力会增大输电塔的弯矩和扭矩,当超过输电塔的承载极限时,就可能发生塔材变形,甚至发生倒塔事故,严重威胁电力系统的安全稳定运行.

改变线路初始张力与线路阻尼比可影响线路的最大运行张力,计算线路悬挂点处最大运行张力系数随初始张力、阻尼比的变化曲线如图20所示.随着线路初始张力的增大,线路最大运行张力系数也增长,初始张力达到26 kN时,线路悬挂点处最大运行张力系数出现最大值.导线的最大运行张力系数随阻尼比的增加呈现先增大后减小的趋势,地线的最大运行张力系数随阻尼比的增加而略微降低;导(地)线最大运行张力系数在阻尼比达到0.1之后基本趋于稳定.在舞动频发线路段,如果初始张力以及

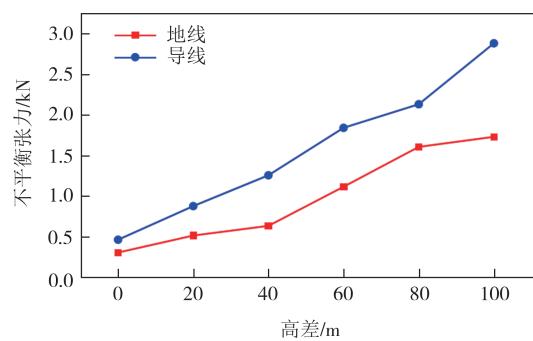


图19 导(地)线不平衡张力随悬挂点高差变化曲线

Fig.19 Variation curves of unbalanced tension of conductor (ground) line with height difference of suspension point

阻尼比太小,可能会导致风振断股、断线等影响线路稳定性的事故.

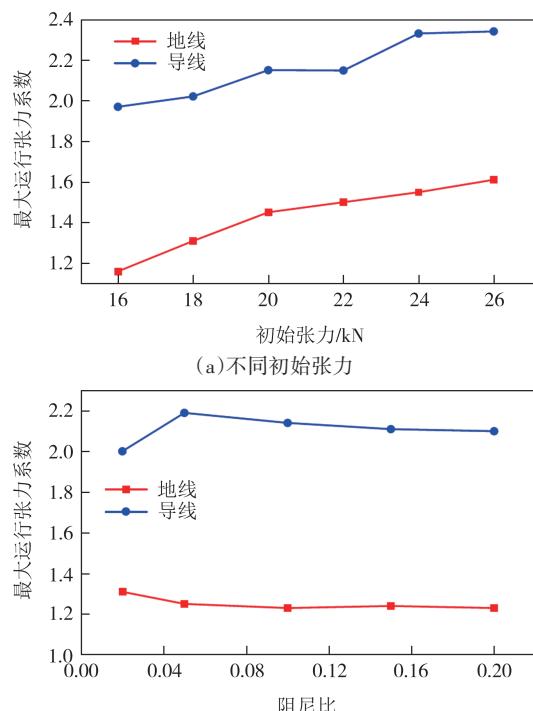


图20 导(地)线悬挂点处最大张力系数变化曲线
Fig.20 Variation curves of maximum tension coefficient at suspension points of conductor (ground) line

初始张力较小、弧垂较大的线路更容易发生风致振动.高风速下大跨距线路风振,可能导致线路因悬挂点处张力过大而引起疲劳、断线等事故^[23].线路初始张力增加,刚度也会增大,可有效抑制导线的风振效应.增大线路初始张力和阻尼比,可在一定程度上起到抑制风振效果.针对线路风振,可在线路靠近输电塔位置加装阻尼器减振耗能,从而抑制输电线路风振.

6 结论

本文针对山地区域输电线路风致振动问题,搭建了宁夏 110 kV 连南线塔-线体系有限元模型。分析了风环境参数、线路跨距、悬挂点高差、初始张力和阻尼比等因素对线路风振的影响规律,主要结论如下:

1) 当导线风仰角达 45°、风向角达 90°时,山地风场加速效应影响明显,加速比达到 1.3~1.4。入口风速为 15 m/s 时,导线和地线的水平振幅分别达到 2.5 m 和 1.82 m,垂向振幅分别达到 2.69 m 和 0.78 m。

2) 相较于无塔输电线模型,塔-线体系模型中导线的刚度与自振频率降低,线路受自然风激励的影响更为显著,在分析线路风振时更切合实际。当风速、跨距、悬挂点高差增大时,线路风振幅值均呈现增长趋势。

3) 当线路初始张力从 16 kN 增大至 26 kN,阻尼比增大至 0.15 时,线路振幅呈下降趋势。线路最大运行张力系数随风速、跨距的增大而增大。增大线路初始张力、线路阻尼比,可有效降低振幅,提高线路运行稳定性。

参考文献

- [1] 郭应龙,李国兴,尤传永. 输电线路舞动[M]. 北京:中国电力出版社,2003.
- GUO Y L, LI G X, YOU C Y. Transmission line galloping [M]. Beijing:China Electric Power Press, 2003. (in Chinese)
- [2] 王波,毛吉贵,马学荣. 110 kV 连南线导线舞动原因分析及治理[J]. 水电能源科学, 2010, 28(8):148~150.
- WANG B, MAO J G, MA X R. Cause analysis and regulation of 110 kV wire swaying in Lian'nan transmission line [J]. Water Resources and Power, 2010, 28(8):148~150. (in Chinese)
- [3] DENHARTOG J P. Transmission line vibration due to sleet[J]. Electrical Engineering, 1932, 51(6):413.
- [4] NIGOL O, BUCHAN P G. Conductor galloping part I-Den Hartog mechanism [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100(2): 699~707.
- [5] YU P, SHAH A H, POPPLEWELL N. Inertially coupled galloping of iced conductors [J]. Journal of Applied Mechanics, 1992, 59(1): 140~145.
- [6] LUONGO A, ZULLI D, PICCARDO G. Analytical and numerical approaches to nonlinear galloping of internally resonant suspended cables [J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 315 (3): 375~393.
- [7] 张孜航,韩艳,盛国刚,等. 基于曲梁理论的覆冰分裂导线舞动非线性动力分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024, 51(1):180~189.
- ZHANG Z H, HAN Y, SHENG G G, et al. Nonlinear dynamic analysis of galloping of iced bundle conductor based on curved beam theory [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2024, 51(1):180~189. (in Chinese)
- [8] 汪大海,项旭志,张志强,等.输电线路风荷载耦联机制的气弹性风洞试验研究[J].电网技术,2022,46(1):343~352.
- WANG D H, XIANG X Z, ZHANG Z Q, et al. Wind tunnel testing on coupling mechanism of wind-induced vibration of transmission tower-line system [J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 343~352. (in Chinese)
- [9] 刘春城,孙红运.山脉地形条件下输电线路风偏响应特性研究[J].应用基础与工程科学学报, 2021, 29(4):1044~1056.
- LIU C C, SUN H Y. Study on wind-induced swing response characteristics of transmission lines under mountain terrain [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(4):1044~1056. (in Chinese)
- [10] 刘春城,侯萌.下击暴流作用下输电线路导线风偏响应特性研究[J].振动与冲击, 2022, 41(22): 60~69.
- LIU C C, HOU M. Wind deflection response characteristics of transmission lines under downburst [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(22): 60~69. (in Chinese)
- [11] 赵珊鹏,张海喜,张友鹏,等.基于流固耦合的大风区接触网正馈线舞动机制分析[J].哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(10): 130~140.
- ZHAO S P, ZHANG H X, ZHANG Y P, et al. Analysis of catenary positive feeder galloping mechanism in strong wind section based on fluid-structure interaction [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(10): 130~140. (in Chinese)
- [12] 赵珊鹏,陈智涛,张友鹏,等.大风区接触网线路参数对附加导线舞动的影响[J].哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(5): 74~83.
- ZHAO S P, CHEN Z T, ZHANG Y P, et al. Influence of overhead contact system line parameters on additional conductors galloping in strong wind region [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(5): 74~83. (in Chinese)
- [13] DAVIS D A, RICHARDS D J W, SCRIVEN R A. Investigation of conductor oscillation on the 275 kV crossing over the rivers Severn and Wye [J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1963, 110(1): 205
- [14] 刘亮,郝震,崔赟,等.架空线路无覆冰导线舞动的参数共振机理[J].振动工程学报, 2018, 31(2): 308~313.
- LIU L, HAO Z, CUI Y, et al. Parametric resonance mechanism of conductor galloping without icing on overhead line [J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31(2):308~313. (in Chinese)
- [15] 谢献忠,张淳淇,林文欣,等.输电线路共振舞动机理试验研究[J].工程力学, 2023, 40(10): 71~80.
- XIE X Z, ZHANG C Q, LIN W X, et al. Experimental study on

- resonance galloping mechanism of transmission line [J]. *Engineering Mechanics*, 2023, 40(10): 71–80. (in Chinese)
- [16] 王辉, 戴根, 张鑫. 不同类风场雨滴冲刷荷载对输变电塔线体系动力响应的影响研究 [J]. *应用力学学报*, 2024, 41(2): 404–410.
- WANG H, DAI G, ZHANG X. Influence of raindrop impact load on dynamic response of transmission tower line system in different wind fields [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2024, 41(2): 404–410. (in Chinese)
- [17] 赵明曦, 贺博, 冯文韬, 等. 塔-线耦联因素对于覆冰载荷下高压输电塔+线结构体力学性能影响及分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(24): 7141–7148.
- ZHAO M X, HE B, FENG W T, et al. Influence of coupling factors on mechanical property of high voltage transmission tower-line structure under ice loading [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(24): 7141–7148. (in Chinese)
- [18] 黄本才, 汪丛军. *结构抗风分析原理及应用* [M]. 2 版. 上海: 同济大学出版社, 2008.
- HUANG B C, WANG C J. Principle and application of wind resistance analysis of structures [M]. 2nd ed. Shanghai: Tongji University Press, 2008. (in Chinese)
- [19] 黄赐荣, 楼文娟, 徐海巍, 等. 输电线路防舞阻尼器系统参数分析及设计研究 [J]. *工程力学*, 2022, 39(12): 87–97.
- HUANG C R, LOU W J, XU H W, et al. Research on parameter analysis and design of transmission line-anti-galloping damper system [J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(12): 87–97. (in Chinese)
- [20] 李正良, 王邦杰, 王涛. 考虑山地风场效应的耐张型悬索支撑输电结构风振响应分析 [J]. *工程力学*, 2025(6): 93–104.
- LI Z L, WANG B J, WANG T. Wind-induced vibration response of tension suspension-braced transmission structure in hilly terrain [J]. *Engineering Mechanics*, 2025, 42(6): 93–104. (in Chinese)
- [21] 蒋兴良, 吴建国, 邓颖, 等. 塬口微地形下档内线路不均匀覆冰研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(6): 2462–2475.
- JIANG X L, WU J G, DENG Y, et al. Research on uneven icing of lines in adjacent towers under pass micro-topography [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44 (6) : 2462–2475. (in Chinese)
- [22] 赵珊鹏, 张永丰, 张友鹏, 等. 兰新高铁大风区低风压正馈线受力特性 [J]. *西南交通大学学报*, 2023, 58(5): 1154–1161.
- ZHAO S P, ZHANG Y F, ZHANG Y P, et al. Mechanical characteristics of low-wind-pressure catenary positive feeder in gale area of Lanzhou–Urumqi high-speed railway [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2023, 58 (5) : 1154–1161. (in Chinese)
- [23] 庞宇彤. 山区大高差输电塔线体系风振响应及纵向不平衡张力研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2023.
- PANG Y T. Wind induced vibration response and longitudinal unbalanced tension of transmission tower and line systems with large height differences in mountainous areas [D]. Beijing: Northern Polytechnical University, 2023. (in Chinese)