

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.12.021

西藏地区“酒杯型”输电塔—线体系风致振动及风振系数设计研究

安有斌¹, 盛 铭², 张宇卓², 嘎玛平措¹, 洛桑赤列¹, 孙 清², 薛晓敏²

(1. 国网西藏电力有限公司经济技术研究院, 拉萨 850000; 2. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 西安 710049)

摘要: 西藏地区地处高海拔、大风环境, 近年来该地区输电线路频发风偏闪络等事故, 且常见以体型不均匀的“酒杯型”输电塔相关线路较为频发。鉴于此, 文中开展西藏输电线路工程的“酒杯型”塔—线体系风致振动及风振系数设计研究, 旨在为相关输电线路合理抗风设计提供必要理论基础。研究过程和方法为: 以西藏实际发生故障的“酒杯型”输电塔线路段为研究对象, 采用输电铁塔及塔线体系的风致振动仿真分析方法, 即利用 Davenport 风功率谱和 AR 法模型方法模拟脉动风荷载并施加于输电塔线体系有限元模型, 结合随机振动理论计算输电铁塔的动态响应和风振系数; 利用该方法对该输电线路进行仿真分析, 探讨其塔线体系在强风环境下、不同风向角下的振动响应特征和风振系数影响规律; 再将仿真结果对比现行设计规范, 验证现行规范存在抗风设计不合理现象, 亟需改进; 基于此, 文中提出输电塔—线体系的风振系数设计修正公式, 整体误差 10% 以内, 能准确反应西藏地区“酒杯型”输电塔相关线路的实际风振效应。文中研究为大风环境地区(西藏等)“酒杯型”输电塔合理抗风设计提供重要解决思路, 具有较好的应用前景。

关键词: 酒杯型; 输电铁塔; 塔线体系; 风致振动; 风振系数; 设计公式

Research on Wind-induced Vibration Analysis and Its Vibration Coefficient Design of Cup-type Transmission Towers Line System in Xizang

AN Youbin¹, SHENG Ming², ZHANG Yuzhuo², GAMA Pingcuo¹, LUOSANG Chilie²,
SUN Qing², XUE Xiaomin²

(1. Economic and Technological Research Institute of State Grid Xizang Electric Power Co., Ltd., Lhasa 850000, China;

2. School of Human Settlements and Architectural Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Recently, the transmission lines frequently experienced such accidents as wind deviation flashover in Xizang due to its high-altitude and windy environment, with transmission lines with ‘cup-type’ steel tower with an extraordinary characteristic of uneven body shape in particular. In view of this, the research on the design of wind induced vibration and vibration coefficient of ‘cup-type’ tower-line system of transmission line project in Xizang is performed in this paper in order to provide necessary theoretical basis for the reasonable wind resistance design of related transmission line. The research process and method is the ‘cup-type’ transmission tower-line section with actual fault in Xizang is taken as the research object. The wind induced vibration simulation and analysis method of the transmission tower and line system, namely Davenport wind power spectrum and AR model, is used to simulate the fluctuating wind load and apply to the finite element model of the transmission tower-line system to calculate the dynamic response and wind induced coefficient of the transmission tower in combination with random vibration theory. The method is used for simulation and analysis of the transmission line to discuss the vibration response characteristics and the wind induced coefficient influence of the tower-line system under strong wind environment and different wind angels. Then, the simulation result is compared with the existing design specification to verify the unreasonable phenomena existed in the wind resistance design of the existing specification and to be improved. On this basis,

收稿日期: 2024-07-15; 修回日期: 2024-09-17

基金项目: 国网西藏电力有限公司经济技术研究院科技项目(SGTYHT/21-JS-226); 国家自然科学基金项目(51978570)。

Project Supported by Science and Technology Project of Economic and Technological Research Institute of State Grid Xizang Electric Power Co., Ltd.(SGTYHT/21-JS-226), the National Natural Science Foundation of China(51978570).

the design correction formula of wind vibration coefficient of the transmission tower-line system is proposed in this paper, which has the overall error within 10% and accurately reflect the actual wind vibration effect of the related line of the ‘cup-type’ transmission tower in Xizang. The research in this paper provides an important solution for rational wind resistance design of ‘cup-type’ transmission towers in windy environment areas (such as Xizang) and has a good application prospect.

Key words: cup-type; transmission tower; tower-line system; wind-induced vibration; wind vibration coefficient; design formula

0 引言

随着“点亮世界屋脊”工程的逐步竣工,西藏长期缺电问题得到了彻底解决,其电力发展也揭开了崭新的篇章。但由于西藏地区所处的环境偏远且气候恶劣,输电线路需要穿越高海拔、大高差、低气温、大风速的永久性冻土区域和无人区,在这种“生命禁区”一旦出现倒塔和断电事故将很难修复^[1-4]。近年来,西藏多地区由于强风天气导致的风偏闪络、倒杆断线等事故频发,如2023年2月西藏多地出现8~9级大风,若干区域风速甚至达到了10级,极端恶劣大风天气导致西藏电力有限公司系统122条输电线路正常运行受到影响。究其原因,现行规范对输电线路抗风设计未充分考虑受风速、风向角、及结构特征复杂性关键影响因素,设计成果存在不合理现象。这就导致以恶劣极端大风环境的西藏地区输电线路风致振动事故频发的重要原因。因此,开展西藏地区输电线路塔—线体系风致振动及风振系数设计研究势在必行。

输电铁塔为柔性高耸结构,对风荷载较敏感^[5],即使低风速下也可产生较大位移响应^[6-8],在大风速下风振响应则更为剧烈,甚至造成结构破坏现象^[9-10]。因此,输电铁塔抗风设计尤为重要^[11-13]。输电铁塔抗风设计,常采用风振系数来考虑结构风振效应影响。现行《110~750 kV 架空输电线路设计规范》^[14]规定杆塔高度低于60 m时,风振系数根据高度采用定值系数,不考虑风振系数随高度变化而变化的情况;当杆塔高度高于60 m时,可采用《建筑结构荷载规范》^[15]和《高耸结构设计标准》^[16],其风振系数是基于结构外形或质量为沿高度不变或均匀变化情况,采用沿高度逐段增大的风振系数取值。

近年来,越来越多研究表明输电塔及其塔线体系的风振系数应受风速、风向角、及结构特征的复杂影响,并非为单一或均匀沿高度变化的数值。张骞^[17]等研究发现,长悬臂输电塔一阶振型为扭转振型,其横担风振响应随着横担宽度的增大而增大; Zhang^[18]等研究发现,风速和风向角对塔线体系风振

响应影响明显;黄风华^[19]等通过风致响应数值分析发现特高压输电铁塔沿高度的刚度不均匀现象尤为显著,其风振系数沿高度变化并非呈线性均匀分布;朱云祥^[20]等对台风天气下海岛大跨越输电塔线体系的风振响应及风振系数进行了相关分析,发现输电塔横担处的风振系数要远超设计规范值;邓洪洲等^[21-22]开展了紊流场中多种风速及风向角下塔线体系气弹模型风洞试验,发现极端天气风场的高湍流特性对输电塔的风振系数具有放大作用。

值得一提的是,相较于其他类型输电铁塔,“酒杯型”输电铁塔沿高度非均匀分布,其横担塔头较重、迎风面积较大存在质量突变的现象,然而,如前所述的现行规范均未考虑这一点,抗风设计并不合理,外加西藏地区极端天气频发,架空输电线路长期处于大风速的环境下,极易引发“酒杯型”输电铁塔风振响应过大,继而导致线路风偏等事故甚至倒塌现象。基于此,急需对西藏地区“酒杯型”输电塔的风振响应进行分析并对现行规范中风振系数计算公式进行改进,从而最大程度减少西藏地区倒塔事故的发生,提高西藏地区“酒杯型”输电塔抗风设计的合理性。

文中以西藏地区输电线路为工程背景,建立“三塔四线”耦合体系有限元仿真模型,基于随机振动理论^[23]对脉动风作用下该模型进行风振响应分析;通过大量仿真算例,探讨各风向角下“酒杯型”输电铁塔位移时程响应及风振系数的影响规律;基于此,文中提出“酒杯型”输电塔的沿高度和横担宽度的风振系数计算推荐公式,该方法可充分考虑“酒杯型”输电铁塔风振效应沿高度变化及铁塔横担处突变等复杂因素;最后通过与现行规范进行对比,验证文中所提的修正公式获得的风振系数能准确反应“酒杯型”输电塔复杂的实际风振响应,具有较好的精确性和有效性,应用前景良好。

1 仿真建模及模态分析

1.1 工程概况

2022年7月8日在西藏自治区雅中朗县—加查

牵引站 220 kV 输电线路段,突发线路跳闸,经过严密的故障排查,发现是大风致使线路振动响应过大,继而边导线与附近建筑物净空距离过小(不满足规程^[10])而导致故障的发生。

该事故发生在项目 P_{71} – P_{73} 档段,涉及 ZBC₂₁₁ 和 ZBC₂₁₃ “酒杯型”角钢铁塔,2×JL/G1A-240/30 导线和 JLB20A-100 地线,参见图 1。输电线路几何信息见表 1,输电单塔结构几何信息见表 2。

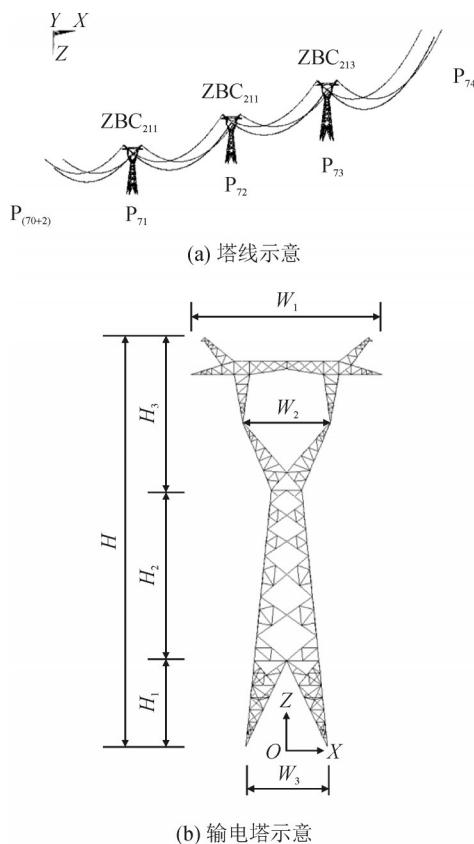


图 1 输电线路信息

Fig. 1 Schematic diagram of transmission lines and towers

表 1 输电线路几何信息

档段	档距	导线线长	导线高差
$P_{(70+2)}-P_{71}$	277	280	33.87
$P_{71}-P_{72}$	349	354	53.30
$P_{72}-P_{73}$	338	342	54.70
$P_{73}-P_{74}$	379	388	74.60

1.2 有限元建模与模态分析

以 P_{71} – P_{73} 档段线路工程为研究对象,利用 Ansys 软件对输电铁塔线体系进行有限元建模和模态分析,旨在分析其在强风下的动态响应。定义 Y 轴为顺导线向,为 0° 风向角; X 轴为垂直导线向,为 90° 风向角; Z 轴为输电塔高度方向,见图 2。

本项目输电塔为空间钢架体系,根据实际受力特性,文中采用桁梁混合模型对输电铁塔进行建

表 2 输电铁塔结构几何信息

Table 2 Geometric information of transmission towers m

参数	ZBC ₂₁₁	ZBC ₂₁₃
塔总高 H	42.90	52.30
塔腿高 H_1	9.00	12.00
塔身高 H_2	17.90	23.70
塔头高 H_3	16.00	16.60
横担宽 W_1	20.10	22.64
曲臂宽 W_2	9.20	9.30
跟开 W_3	8.58	10.73
塔底深度 B_1	8.58	10.73
塔顶深度 B_2	1.20	1.30

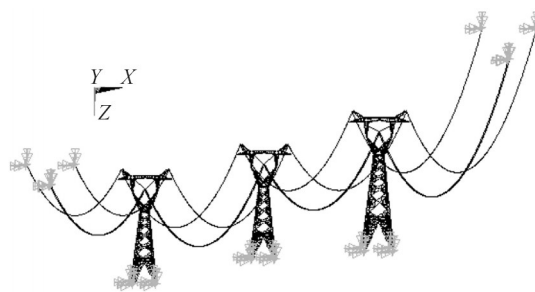


图 2 塔线体系模型约束

Fig. 2 Constraints of tower-line model

模,采用 BEAM189 梁单元模拟承受轴向力、剪力和弯矩的主材和横材,采用 LINK8 杆单元模拟承受轴向力的辅(斜)材,并采用 LINK10 索单元模拟有预应力非线性直线单元的导线和地线。塔线体系的材料特性和几何特性根据设计参数进行选取。基于此,建立“三塔四线”模型用以模拟整个线路,重点关注中间酒杯塔的动力特性和动态响应,其中各单塔塔脚和导线端部均采用全约束,见图 2。

1.2.1 单塔模型的模态分析

以输电铁塔自身为研究对象,不考虑输电线耦合作用,首先对单体塔进行基础模态分析。仿真结果显示输电塔 ZBC₂₁₁ 和 ZBC₂₁₃ 振型类似,横向一阶以绕 Y 轴弯曲变形为主、纵向一阶以绕 X 轴弯曲变形为主,扭转一阶以绕 Z 轴扭转变形为主,见图 3。两种塔型的各方向一阶模态结果见表 3。

1.2.2 塔—线体系模型的模态分析

塔线体系的典型振型和模态分别见图 4 和表 4。由图 4 和表 4 可发现,塔线体系模型的低阶振型模态密集,且均以导线振动变形为主。直到第 540 阶时,导线的竖向振动激起输电塔自纵向弯曲振型的弯曲变形响应;到 556 阶时,导线更高频的振动激起输电塔自身横向弯曲振型的弯曲变形响应;到 775 阶时,较高频次的导线振动激起输竖向扭转风振响应。根据以上模态分析,该塔线结构的动力特性以

弯曲变形响应为主。

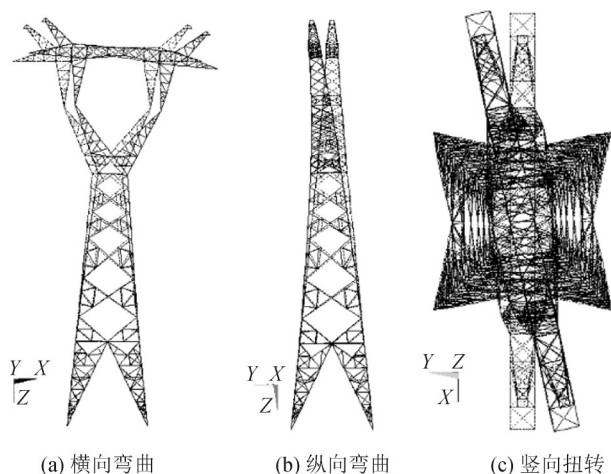


图3 单塔 ZBC₂₁₁ 模型的各方向 1 阶振型

Fig. 3 First-order modes of single ZBC₂₁₁ model

表3 单塔 ZBC₂₁₁ 和 ZBC₂₁₃ 模型的各方向 1 阶模态

Table 3 First-order modality in all directions of ZBC₂₁₁ and ZBC₂₁₃ models

各方向 1 阶振型	振型描述	频率/Hz	
		ZBC ₂₁₁	ZBC ₂₁₃
横向弯曲	绕 Y 轴弯曲	1.917 4	1.813 0
纵向弯曲	绕 X 轴弯曲	2.006 9	1.825 9
竖向扭转	绕 Z 轴扭转	3.301 0	2.653 4

1.3 模型验证

1) 单塔模型验证。根据《高耸结构设计标准》^[16], 结构第 1 阶振动主频 f_1 合理取值范围应符合式(1), 且对于钢结构取值应为该范围中的较大值为

$$f_1 = [(0.007 \sim 0.013)H]^{-1} \quad (1)$$

式(1)中, H 为结构高度。

酒杯型输电塔 ZBC₂₁₁ 和 ZBC₂₁₃ 塔高分别为 42.9、52.3 m, 其 1 阶主频应分别在 1.79~3.33、1.47~2.73 Hz 范围内, 文中输电塔模型的仿真计算结果显示, 1 阶主频则分别为 1.917 4、1.813 0 Hz, 符合规范建议取值要求。

2) 导线模型验证。影响导线张力的因素有自重、风荷载、温度变化、覆冰等^[24-26]。本研究涉及前两种因素, 即导线重力和风荷载水平气动力共同作用导线产生张力。基于此, 构建单位长度导线的状态方程, 可用于估算导线张力 T , 其表达式为

$$T = \sqrt{W^2 + H_a^2} \quad (2)$$

式(2)中: T 为导线的张力; W 为导线重力; H_a 为水平气动 ($H_a = 0.5 \cdot C_d \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$ ^[23]), 其中 C_d 为阻力系数, 取决于导线的形状和表面状况, ρ 为空气密度, A 为导线的横截面积, v 为风速。

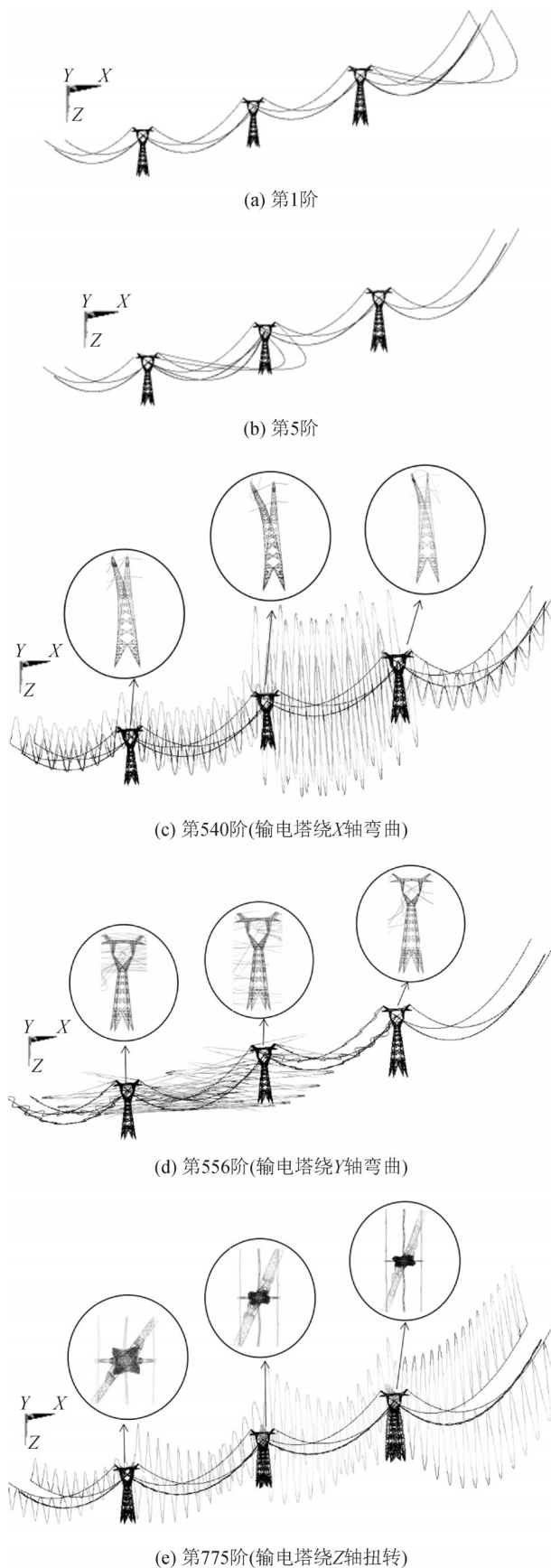


图4 塔—线体系模型的典型振型

Fig. 4 Typical modes of the tower-line model

表4 塔—线体系模型的典型模态

阶数	振型描述	频率/Hz
第1阶	导线振动	0.091 3
第2阶	导线振动	0.108 6
第9阶	导线振动	0.115 6
...	导线振动	...
第540阶	绕X轴弯曲	1.849 1
第556阶	绕Y轴弯曲	1.950 2
第775阶	绕Z轴扭转	2.677 1

仿真方法对体系施加重力荷载进行非线性分析获得相应轴力分布,见图5,继而提取4档导线弧垂最低处水平张力,与状态方程式(2)的计算张力进行对比,见表5,与状态方程相差3%范围以内,一致性较好。

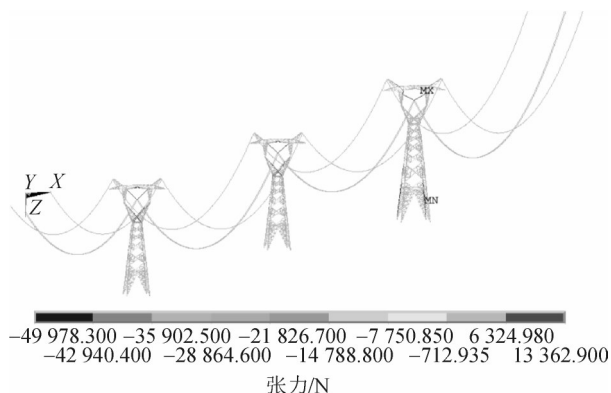


图5 自重作用下塔—线体系轴力云图

Fig. 5 Axial force cloud diagram of tower-line system under self-weight

表5 输电线弧垂最低点水平张力

Table 5 Horizontal tension at the lowest point of the arc sag of the transmission line

导线弧垂最低点	水平张力/N		误差/%
	仿真计算	状态方程	
1档	5 526.8	5 466.1	1.1
2档	5 721.7	5 590.1	2.3
3档	6 017.1	5 843.6	3.0
4档	5 271.2	5 128.9	2.8

通过单塔主频和导线张力分析对比,综合验证文中仿真建模方法的正确性,可用于后续的风荷载施加及风振响应分析。

2 输电塔—线体系风振分析

2.1 输电塔—线体系风荷载模拟

文中基于Davenport风功率谱^[27]采用AR法模型^[28],并引入空间相关函数对三维风场进行700 s时程的模拟。将模拟出的参考点的风速代替作用于该塔段

或输电线段的风速,进行输电塔线体系风荷载计算。

在模拟输电塔线体系风荷载时,将输电塔线体系简化为分段加载模型^[29],中间酒杯塔的分身分段和加载点设计见图6(a)、(b),输电线每25 m取一个加载点,其分段和加载点设置见图6(c)。

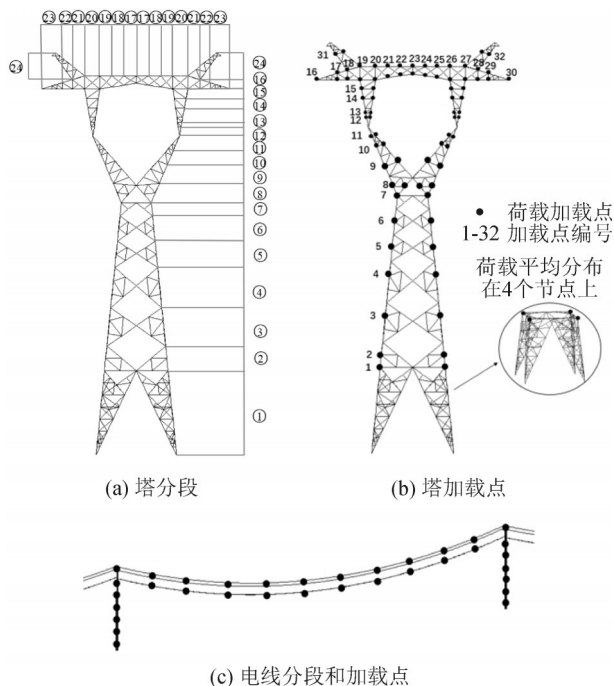


图6 塔线体系分段加载示意

Fig. 6 Schematic diagram of segmented loading of tower-line system

输电塔线体系风速模拟流程如下。

1)求解 Davenport 风功率谱 $S_v(f)$

$$S_v(f) = 4kv_{10}^2 \frac{x^2}{f(1+x^2)^{4/3}} \quad (3)$$

式(3)中: f 为脉动风频率; k 地面粗糙度系数; v_{10} 为 10 m 高度处平均风速; x 为 $1\ 200/v_{10}$ 。

2)根据脉动风三维空间相关性,求解脉动风速功率互谱密度函数 $S_{ij}(f)$

$$S_{ij}(f) = \sqrt{S_{ii}(f)S_{jj}(f)} \cdot r_{ij}(f) \quad (4)$$

式(4)中, r_{ij} 为脉动风速场空间 i, j 两点的相干函数。

3)建立并求解自回归(AR)模型^[23],获得空间节点脉动风速时程 v_f

$$v_f(X, Y, Z, t) = -\sum_{k=1}^p \varphi_k \cdot v_f(X, Y, Z, t - k\Delta t) + N(t) \quad (5)$$

式(5)中: $X = [x_1, \dots, x_M]^T$, $Y = [y_1, \dots, y_M]^T$, $Z = [z_1, \dots, z_M]^T$, (x_i, y_i, z_i) 为空间第 i 点坐标,其中, $i = 1, \dots, M$; φ_k 为第 k 阶 AR 模型自回归系 $M \times M$ 阶方阵,其为 AR 模型正则方程求解获得,其中,

$k=1,\cdots,p$, p 为 AR 模型阶数; t 和 Δt 为时间和其步长; $N(t)$ 为独立随机过程向量。

4) 采用指数模型求解平均风速 $\bar{v}_{(z)}$ 为

$$\frac{v_{(z)}}{\bar{v}_s} = \left(\frac{z}{z_s} \right)^a \quad (6)$$

式(6)中, z 、 $\bar{v}_{(z)}$ 分别为所测点的高度和该高度处的平均风速; z_s 、 $\bar{v}_s$ 分别为标准高度和该高度处的平均风速, 中国标准高度取 10 m; a 为地表粗糙度系数。

5) 叠加平均风速和脉动风速获得合成风速 $v_{(z)}$ 为

$$v_{(z)} = \bar{v}_{(z)} + v_f \quad (7)$$

编制节点风速时程模拟程序, 其中风速时程模拟主要参数见表 6。

表 6 风荷载模拟参数设计

Table 6 Parameters of wind load simulation

模型参数	数值
脉动风速谱类型	Davenport 谱
基本风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	29
地形地貌类型	B 类
AR 模型阶数	4
风速时程总长/s	700
时间步长/s	0.1
初始频率/Hz	0.001
截止频率/Hz	10

模拟得到的“三塔四线”体系中间酒杯塔 (ZBC₂₁₁) 塔顶风速时程曲线及脉动风模拟谱和目标谱校验见图 7。由图 7 可以看出, ZBC₂₁₁ 塔顶风速峰值达到 61.05 m/s, 且脉动风模拟谱与目标谱吻合较好。

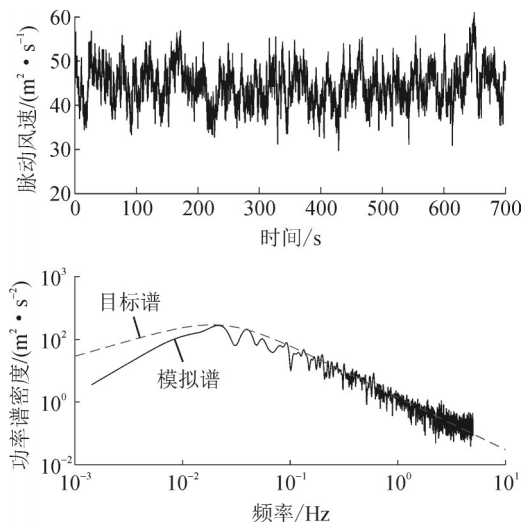


图 7 ZBC₂₁₁ 塔顶风速时程与谱校验

Fig. 7 Time history and spectral verification of wind speed at the top of ZBC₂₁₁ tower

在模拟完塔线体系风速时程后, 根据《110~750 kV 架空输电线路设计规范》^[14], 式(8)、(9)分别计算作用于输电塔和导地线上的风荷载标准值。

$$w_s = \frac{v_0^2}{1600} \mu_z \mu_s \beta_z B A_s \quad (8)$$

式(8)中: w_s 为作用在 z 高度处风荷载标准值; v_0 为基本风速(根据西藏地区工程实况, 取 29 m/s); μ_s 为高度 z 处风压高度变化系数; μ_z 为风荷载体型系数; β_z 为输电塔风荷载调整系数; B 为覆冰时风荷载增大系数; A_s 为输电塔段迎风面积。

$$w_x = \alpha \frac{v_0^2}{1600} \mu_{sc} \mu_z \beta_c d L_p B \sin^2 \theta \quad (9)$$

式(9)中: w_x 为垂直导/地线风荷载标准值; α 为风压不均匀系数; μ_{sc} 为输电线体型系数; β_c 为异地线风荷载调整系数; d 为输电线外径; L_p 为杆塔水平档距; θ 为风向与导/地线方向之间夹角。

为计算得到的 29 m/s 风速 0° 风向向下塔线体系中中间酒杯塔 ZBC₂₁₁ 塔顶处的风荷载时程见图 8。从图 8 可以看出, ZBC₂₁₁ 塔顶处的风荷载峰值为 4.13 kN。

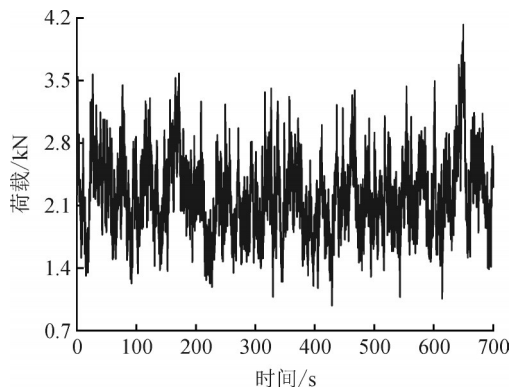


图 8 ZBC₂₁₁ 输电塔塔顶风荷载时程

Fig. 8 Time history of wind load at the top of ZBC₂₁₁ tower

2.2 输电塔风振响应分析

在 29 m/s 风速下, 计算“三塔四线”体系中间酒杯塔 ZBC₂₁₁ 在 0°、45°、60° 以及 90° 4 个风向下的风振响应, 风向角示意图 9。

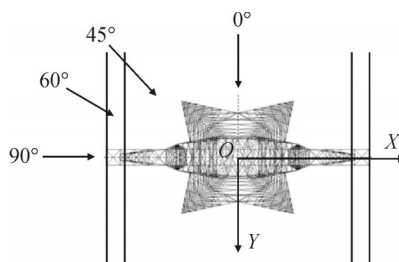


图 9 风向角示意

Fig. 9 Schematic diagram of wind direction angles

中间酒杯塔ZBC₂₁₁输电塔模型沿高度的位移均方差响应见图10,ZBC₂₁₁输电塔模型横担长度(Z坐标位置)的位移均方差响应见图11。图10、11中图例“0° Y向”表示0°风荷载作用于结构在Y向产生的位移均方差响应。

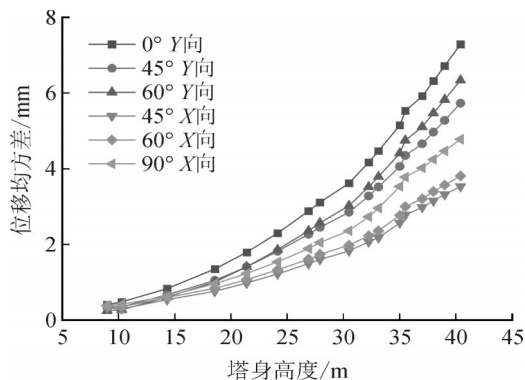


图10 ZBC₂₁₁模型沿高度位移均方差响应

Fig. 10 Displacement mean square deviation response of ZBC₂₁₁ model along its height

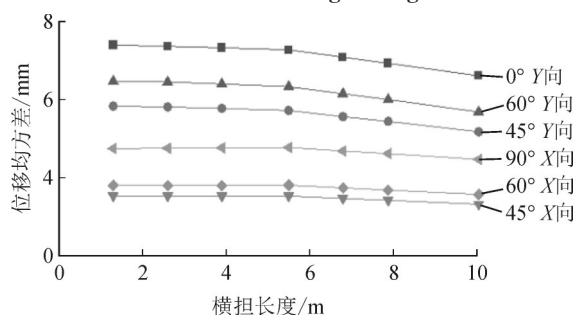


图11 ZBC₂₁₁模型横担位移均方差响应

Fig. 11 Displacement mean square deviation response of ZBC₂₁₁ model's horizontal shoulder along its width

总体来看,对于沿高度而言,不同风向下位移均方差均随着高度增加而增大;对于横担而言,不同风向下横担位移均方差沿长度变化均较小,其位移响应与横担连接的塔顶处位移基本保持一致,说明在不同风向的风荷载作用下,横担自身变形并不大,其位移响应主要是随塔身振动而整体摆动。在0°风向下,塔身和横担的位移响应均是最大的,这主要是由于0°风向下“酒杯型”输电塔的塔身和横担的迎风面积是最大的,其受到的风荷载最大,此外,0°脉动风激发了塔线体系中塔身结构的主频响应,其呈现出Y向位移响应最大。总之,塔线体系呈现塔身结构主阶振型的动态响应。

3 输电塔风振系数分析

在水平风(包括平均风和脉动风)作用下,结构可在各个方向产生振动,其中脉动风作用是随机的,引起结构风振响应。且输电塔结构属于高耸结构,风振响应显著,设计中需重点考虑。

输电塔线体系所受到的风荷载根据其成分性质的不同,分为静荷载和随机脉动荷载两部分^[29-31]。静荷载相当于作用在输电塔线体系上的恒载,可用静力方法进行计算。而随机脉动荷载则会激起输电塔线体系的振动,使得输电塔线体系的变形和受力增大,甚至造成倒塔和断电事故的发生。为充分考虑脉动风载效应,采用随机振动理论对输电塔线体系风致振动响应进行分析,并引入风振系数将输电塔所受到的随机脉动荷载转换为拟静力荷载。

3.1 现行规范中风振系数设计理论

目前,中国对于全高不超过60 m的输电杆塔最常用的风振系数计算规范如下:

1)《建筑结构荷载规范》^[15]中8.4.2条规定:对于一般竖向悬臂型结构,在其 z 高度处的风振系数 β_z 可按式(10)进行计算

$$\beta_z = 1 + 2gI_{10}B_z\sqrt{1+R^2} \quad (10)$$

式(10)中: g 为峰值因子; I_{10} 为10 m高度处湍流强度; R 脉动风荷载共振分量因子; B_z 脉动风荷载背景分量因子,该因子考虑了两种情况,其一为体型和质量沿高度均匀分布的结构,其二为体型宽度沿高度增加线性递减变化的结构。

2)《高耸结构设计标准》^[16]中4.2.9条规定:输电杆塔在 z 高度处的风振系数 β_z 可按式(11)进行确定

$$\beta_z = 1 + \xi\varepsilon_1\varepsilon_2 \quad (11)$$

式(11)中: ξ 为脉动增大系数; ε_1 为风压脉动和风压变化等的影响系数; ε_2 振型、结构外形的影响系数,该外形因素考虑与《荷载规范》类似,考虑了体型宽度随高度增加线性递减变化的结构,使用对象有一定局限性。

3)《110~750 kV 架空输电线路设计规范》^[14]中10.1.20条规定:为便于设计,对一般高度的杆塔(60 m以内)在全高度内采用单一恒值系数。

为了便于描述,以上规范将分别简称为《荷载规范》、《高耸规范》和《线路规范》。以上规范给出的输电杆塔风振系数的计算公式仅适用塔段质量和刚度沿高度均匀变化或变化不大的输电杆塔,而对于“酒杯型”输电杆塔,其在曲臂及横担位置形状和质量均有明显的突变,现行规范对“酒杯型”塔的抗风设计是否合理,需要进一步验证。鉴于此,文中将采用基于随机振动理论的风振系数计算方法,用于酒杯塔线体系的风振系数精确计算,用来验证现行规范设计的可行性和合理性。

3.2 基于随机振动理论的输电塔风振系数计算

基于随机振动理论^[18]，“酒杯型”输电杆塔的风

振系数计算公式为

$$\beta_i = \frac{P_{si} + P_{fi}}{P_{si}} = 1 + \frac{gM_i\omega_1^2\sigma_i}{\mu_{si}\mu_{zi}w_0A_iB} \quad (12)$$

式(12)中: β_i 为第 i 点风振系数; P_{si} 为静风荷载; P_{fi} 为脉动风荷载; M_i 和 A_i 为 i 点质量和承风面积; ω_1 为塔线体系中输电塔 1 阶圆频率; σ_i 为塔段的位移均方差; μ_{si} 和 μ_{zi} 分别为 i 点的体型系数和风压高度变化系数; w_0 为基本风压; B 为覆冰时风荷载增大系数。

将输电塔仿真模型获得的风振响应代入式(12)计算 29 m/s 风速 0°、45°、60° 以及 90° 风向下塔线体系中间酒杯塔 ZBC₂₁₁ 沿高度和横担宽度的风振系数。对于“酒杯型”输电杆塔, 其沿高度并非均匀分布, 在横担处有明显质量和性质的突变, 因此为了探究该影响因素, 文中统计了各风向下中间酒杯塔沿高度和沿横担宽度承受风荷载位置处的风振系数, 见图 12。

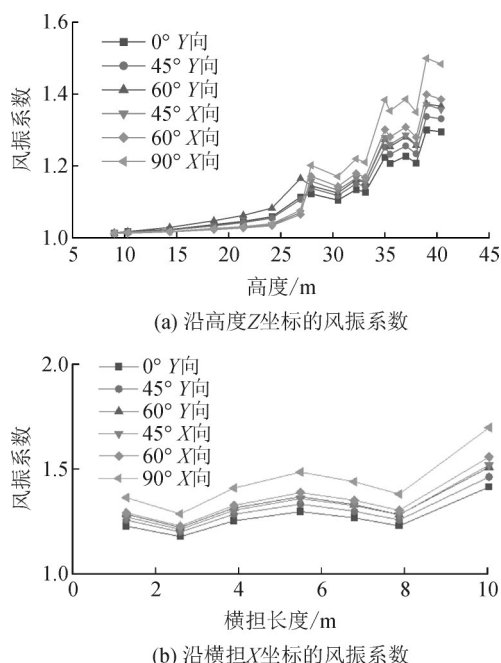


图 12 仿真计算获得的各风向下 ZBC₂₁₁ 风振系数

Fig. 12 Simulated wind vibration coefficients for ZBC₂₁₁ model under different wind directions.

由图 12(a)可看出:随着输电塔高度的加大,各风向角下风振系数均呈现整体增大的趋势,直至塔顶达到风振系数的最大值;其中,塔高度 26.9 m 以内(塔腿 H_1 和塔身 H_2)显示 60°Y 向工况下的风振系数最大,说明输电塔的塔腿和塔身部分在风荷载 60° 下的 Y 向动载效应最为显著;塔身高度 26.9 m 以上(塔头 H_3),则 90°X 向工况下的风振系数最大,说明输电塔的塔头部分在风荷载 90° 的 X 向动载效应最为显著。

由图 12(b)可看出:随着横担长度(X 坐标)的变化,各风向角下风振系数基本稳定,且横担各处均显示 90°X 工况的风振系数最大。但在横担边稍处,风振系数均发生突然加大的趋势,这是因为此处为塔—线连接处,风载下导线大幅度摆动对酒杯塔横担边稍处直接拉拽,导致其动载效应最为显著。

4 输电塔—线体系风振系数取值

4.1 现行规范中风振系数设计合理性分析

为了探究中国现有规范是否合理,文中采用现行规范《荷载规范》^[15]、《高耸规范》^[16]、《线路规范》^[14]设计方法对该输电塔风振系数进行计算,通过对比数值仿真计算结果,验证规范合理性。

采用不同计算方法获得的中间酒杯塔沿高度 Z 坐标位置的风振系数汇总见图 13(a)。其中《荷载规范》和《高耸规范》是在假设输电塔质量和体型沿高度均匀分布的结构前提下获得的结果。与仿真计算结果对比,《荷载规范》和《高耸规范》设计方法体现了输电杆塔风振系数沿高度增大而增大的规律,但总体而言其风振系数相较于仿真结果最高可达 51% 和 39% 的误差,显然过于保守;与仿真计算结果对比,《线路规范》设计方法获得的风振系数为单一恒值,无法体现输电杆塔风振系数随高度增大而增大的现象,在塔腿段 H_1 (塔高 0~9 m) 设计过于保守(最大误差 37%),在塔身段 H_2 (塔高 9~26.9 m) 随着高度加大设计趋于合理,然而,在塔头段 H_3 (塔高 26.9~42.9 m) 出现设计偏不安全现象。

将各种计算方法获得的 ZBC₂₁₁ 输电塔沿横担 X 坐标位置的风振系数归总见图 13(b)。其中《荷载规范》、《高耸规范》、《线路规范》未对输电塔横向尺寸风振系数的变化有特定规定,横担处取值仍采用对应高度处的风振系数,均为一恒值。通过对比发现《荷载规范》和《高耸规范》风振系数取值远高于仿真结果,误差分别高达 65% 和 53%,设计过于保守。而《线路规范》虽接近仿真结果,但却存在部分设计偏于不安全现象,尤其在横担边稍处设计值低于仿真 20%。

综上,西藏线路酒杯塔风振的系数设计,如采用《荷载规范》和《高耸规范》将过于保守,如采用《线路规范》则存在偏不安全现象,更为不可行。正是由于现行规范对西藏线路酒杯塔抗风设计的不合理性,导致其在运行过程中事故频发的重要原因之一。因此,针对以大风环境为主导的地区,且对于结构存在显著刚度和质量突变的“酒杯型”输电

塔线路体系,其抗风设计合理性急需改进。

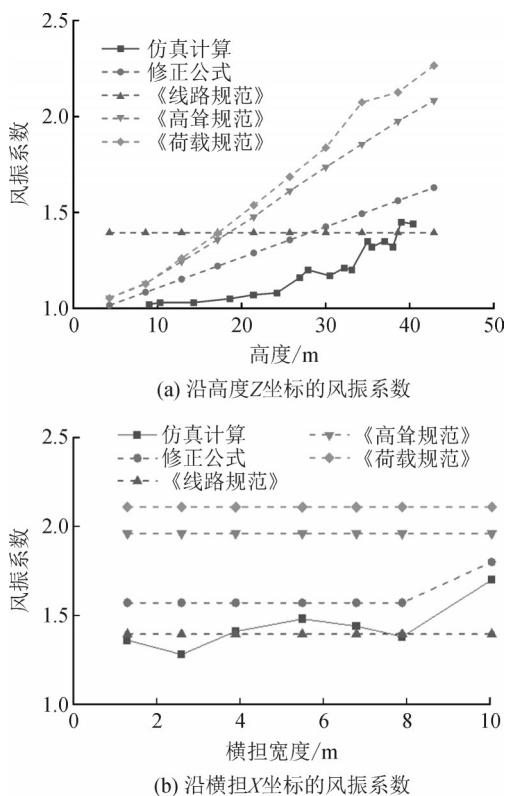


图13 各设计方法获得的ZBC₂₁₁塔风振系数

Fig. 13 Wind vibration coefficients by different design methods for ZBC₂₁₁ tower

4.2 风振系数设计建议

根据图12及相关分析,发现“酒杯型”输电塔为质量和外形沿高度非连续规律变化的高耸悬臂结构,其风振系数沿高度呈现逐渐递增现象;其风振系数沿横担长度基本恒定但在横担边稍处呈现陡增现象。基于以上仿真结果和相关分析规律,文中提出适合“酒杯型”输电塔风振系数设计方法如下。

1)沿高度风振系数设计公式。如前验证,《高耸规范》可以描述该输电杆塔风振系数沿高度增大而增大的规律,却过于保守;《线路规范》无法描述上述规律,但其对塔身顶处(高度为 H_1+H_2 时)风振系数设计趋于合理。于是,可将两者设计方法进行结合,获得适用西藏地区“酒杯型”输电塔风振系数修正公式为

$$\begin{cases} \beta_z = 1 + \gamma_v \xi_1 \varepsilon_1 \varepsilon_2 \\ \beta_z(H_1 + H_2) = \beta_s \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中: ξ_1 为脉动增大系数; ε_1 为风压脉动和风压变化等的影响系数; ε_2 结构均匀的振型影响系数; ξ_1 、 ε_1 、 ε_2 依据《高耸规范》取值; β_s 风荷载调整系数代表值,依据《线路规范》取值; γ_v 为高度方向修正系数, H_1 、 H_2 为塔腿、塔身高度(见图1)。

2)沿横担宽度风振系数设计公式。如上所述,

输电铁塔横担边稍处的风振系数需放大为

$$\beta_z = 1 + \gamma_v \gamma_h \xi_1 \varepsilon_1 \varepsilon_2 \quad (14)$$

式(14)中, γ_h 为横担边稍处修正系数。

为了验证,文中所提修正公式的有效性,将式(13)、(14)代入输电塔ZBC₂₁₁进行计算,获得结果汇入图13。可见修正公式对“酒杯型”输电塔沿高度和沿宽度均可进行合理设计,整体风振系数误差可控制在10%以内,不但改善《荷载规范》和《高耸规范》设计过于保守问题,且规避了《线路规范》设计部分偏不安全问题,可推荐用于极端大风环境或地区“酒杯型”塔线体系的抗风设计,能有效缓解西藏等地区输电线路因风致振动导致事故持续频发的状况。

在此需要说明的是,修正公式(13)、(14)涉及若干关键性参数(高度方向修正系数 γ_v 和横担边稍修正系数 γ_h)。文中对该参数数值的选取是依据输电“酒杯型”塔ZBC₂₁₁风振系数仿真结果数据拟合并识别获得的,适用于“酒杯型”输电塔一线体系的抗风设计。后续,为了增加修正公式的普适性,会开展大量输电塔工程算例(不同类型和高度的输电塔以及不同档距和高差的输电线路等)的计算和数据统计,对关键参数的设计选取进行更深入地、全面地研究。

总之,文中所提修正公式对改进现有规范用于风振系数设计的局限性提出了有效解决思路,应用前景良好。

5 结论

以西藏自治区输电线路工程为背景,通过有限元仿真塔线体系进行风振响应分析及风振系数研究,探讨各风向对“酒杯型”输电塔风致位移响应的影响,同时,将仿真计算输电塔的风振系数与《荷载规范》、《高耸规范》及《线路规范》中的风振系数规范值进行对比,得出以下结论:

1)文中通过有限元仿真西藏地区“三塔四线”塔线耦合体系,基于Davenport风功率谱采用AR法模型合成脉动风,并将其转换为风荷载施加在输电塔线体系上,提取了不同风向下中间“酒杯塔”的位移响应,并基于随机振动理论对其风振系数进行计算和分析,结果更符合实际情况。

2)基于西藏输电线路的仿真计算,获得不同风向下“酒杯型”输电塔风振系数的影响规律:风振系数随塔高度的增加整体呈现增大趋势,且塔横担边稍处存在陡增现象;塔腿、塔身处风振系数以60°Y为危险工况;塔头、横担处的风振系数以90°X为危险工况。

3)基于随机振动理论所计算出的“酒杯型”输电塔风振系数,结合现行规范的不足,提出适用于“酒杯型”输电塔风振系数修正公式,以ZBC₂₁₁输电塔进行验证,结果表明整体风振系数误差可控制在10%以内,验证文中设计方法的准确性。

文中提出的输电塔—线体系有限元计算方法及其风振系数设计方法的研究将为以大风环境地区(西藏等)“酒杯型”输电塔风振效应准确设计提供重要解决思路,具有较好应用前景。

参考文献:

- [1] TIAN L, YI S Y, QU B. Orienting ground motion inputs to achieve maximum seismic displacement demands on electricity transmission towers in near-fault regions[J]. Journal of Structural Engineering ASCE, 2018, 144(4): 1-13.
- [2] CHEN Bo, XIA Yong. Advanced technologies in disaster prevention and mitigation[J]. Advances in Structural Engineering, 2017, 20(8): 1141-1142.
- [3] 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.
- [4] 杨明浩, 安韵竹, 胡元潮, 等. 改进EGM模型对特高压输电线路的适用性与验证[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 93-100.
YANG Minghao, AN Yunzhu, HU Yuanchao, et al. Applicability and verification of an improved EGM model for UHV transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 93-100.
- [5] 苏 宁, 彭士涛, 洪宁宁. 高耸烟囱结构调谐质量惯容阻尼器(TMDI)风振控制方法及效果研究[J]. 工程力学, 2022, 39(11): 143-156.
SU Ning, PENG Shitao, HONG Ningning. The wind-induced vibration control of high-rise chimneys by a tuned mass damper inerter(TMDI)[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(11): 143-156.
- [6] 谢华平, 何敏娟. 输电塔塔线体系风振响应分析[J]. 振动与冲击, 2011, 30(7): 45-51.
XIE Huaping, HE Minjuan. Wind-induced dynamic response of a transmission tower-line system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(7): 45-51.
- [7] 耿贞伟, 苏文伟, 于凤荣, 等. 基于Ansys的高压输电塔风振特性分析[J]. 电测与仪表, 2023, 60(2): 84-90.
GENG Zhenwei, SU Wenwei, YU Fengrong, et al. Analysis of wind vibration response of high-voltage transmission tower based on Ansys[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(2): 84-90.
- [8] 叶俊辰, 牛华伟, 韩军科, 等. 变电构架钢管避雷针微风振动研究[J]. 电瓷避雷器, 2021(2): 162-168.
YE Junchen, NIU Huawei, HAN Junke, et al. Aeolian vibration analysis of steel-pole lightning rod with substation framework[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(2): 162-168.
- [9] 李 涛, 王 谦, 吴登国, 等. 台风风场下的1 000 kV输电塔风洞试验与风振响应分析[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(2): 76-82.
LI Tao, WANG Qian, WU Dengguo, et al. Wind tunnel test and wind-induced response analysis of 1 000 kV transmission line under typhoon wind fields[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(2): 76-82.
- [10] 郭向华, 邓锋华, 肖 雁, 等. 基于数值模拟与风洞试验的多分裂导线阻力系数干扰效应[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(1): 186-192.
GUO Xianghua, DENG Fenghua, XIAO Yan, et al. Study of interference effect of bundled conductors drag coefficient based on numerical simulation and wind tunnel test[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1): 186-192.
- [11] 李丰君, 姚福星, 孙 芊, 等. 架空配电线路电杆抗倾覆能力仿真建模与分析[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(2): 67-74.
LI Fengjun, YAO Fuxing, SUN Qian, et al. Simulation modeling and analysis of anti-overturning ability of overhead distribution poles[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(2): 67-74.
- [12] 李 楠, 王洪朋, 侯成革. 电容器组架结构动力分析的探讨[J]. 电力电容器与无功补偿, 2010, 31(3): 6.
LI Nan, WANG Hongpeng, HOU Chengge. Discussion on frame dynamic force analysis of power capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2010, 31(3): 6.
- [13] 弓路家, 邓志勇. 调相压水过程的气动力学求解方法及应用[J]. 大电机技术, 2023(3): 74-81.
GONG Lujia, DENG Zhiyong. A method to process of unit condensing mode operation based on aerodynamics and the usage[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2023(3): 74-81.
- [14] 110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范: GB 50545—2010[S]. 2010.
Code for design of 110 kV~750 kV overhead transmission lines: GB 50545—2010[S]. 2010.
- [15] 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 2012.
Code for load of building structure: GB 50009—2012[S]. 2012.
- [16] 高耸结构设计标准: GB 50135—2019[S]. 2019.
Design standard for high-rise structures: GB 50135—2019

- [S].2019.
- [17] 张 骞,叶 震,蔡建国,等. 特高压长悬臂输电塔与输电塔—线耦合体系的风振特性[J]. 东南大学学报(自然科学版),2019,49(1):1-8.
ZHANG Qian, YE Zhen, CAI Jianguo, et al. Wind-induced response of UHV long cantilever transmission tower and tower-line coupled system[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019, 49(1): 1-8.
- [18] ZHANG Meng, ZHAO Guifeng, WANG Lulu, et al. Wind-induced coupling vibration effects of high-voltage transmission tower-line systems[J]. Shock and Vibration, 2017(4): 1-34.
- [19] 黄凤华,张大长,李布辉,等. ± 1100 kV 特高压直流输电线路铁塔风致响应及风振系数研究[J]. 钢结构, 2017, 32(7):49-53.
HUANG Fenghua, ZHANG Dachang, LI Buhui, et al. Wind-induced dynamic response and vibration coefficient of ± 1100 kV kilovolt extra-high voltage direct current transmission line tower[J]. Steel Construction, 2017, 32(7): 49-53.
- [20] 朱祥云,张若愚,曹枚根,等. 海岛大跨越输电塔体系风振响应及风振系数[J]. 高压电器,2022,58(1): 111-121.
ZHU Xiangyun, 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.
- [21] 邓洪洲,段成荫,徐海江. 良态风场与台风风场下输电塔体系气弹模型风洞试验[J]. 振动与冲击, 2018, 37(8): 257-262.
DENG Hongzhou, DUAN Chengyin, XU Haijiang. Wind tunnel tests on an aeroelastic model of a transmission tower-line system under normal wind field and typhoon wind field [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(8): 257-262.
- [22] 肖 吉,刘国荣,刘科正. 一种风场主动支撑电网的智能自适应控制方法[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(1): 97-107.
XIAO Ji, LIU Guorong, LIU Kezheng. An intelligent adaptive control method for wind farms to actively support power grids[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(1): 97-107.
- [23] 张相庭. 结构风工程: 理论, 规范, 实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
ZHANG Xiangting. Structural wind engineering: Theory, specification, practice[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2006.
- [24] 晏致涛,李正良,汪之松. 重冰区输电塔—线体系脱冰振动的数值模拟[J]. 工程力学, 2010, 27(1): 209-214.
YAN Zhitao, LI Zhengliang, WANG Zhisong. Simulation of ice-shedding of transmission tower-line system in heavy ice regions[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(1): 209-214.
- [25] 潘 浩,黄增浩,邓展豪,等. 紧凑型线路脱冰跳闸故障数值模拟分析[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(9): 74-80.
PAN Hao, HUANG Zenghao, DENG Zhanhao, et al. Numerical simulation analysis of deicing trip faults of compact transmission lines[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(9): 74-80.
- [26] 徐青松,季洪献,王孟龙. 输电线路弧垂的实时监测[J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 211-214.
XU Qingsong, JI Hongxian, WANG Menglong. Real-time monitoring of transmission line sag[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(7): 211-214.
- [27] DAVENPORT A G. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1962, 88(376): 197-198.
- [28] IANNUZZI A, SPINELLI P. Artificial wind generation and structural response[J]. Journal of Structural Engineering, 1987, 113(12): 2382-2398.
- [29] 张 爽,孙 清,吴 彤,等. ± 1100 kV 输电塔风振响应及风振系数研究[J]. 特种结构, 2018, 35(4): 52-59.
ZHANG Shuang, SUN Qing, WU Tong, et al. Research on wind-induced response analysis and vibration coefficient of ± 1100 kV transmission tower[J]. Special Structure, 2018, 35(4): 52-59.
- [30] 余传运,张建润. 输电塔体系动力特性及风振响应分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(1): 116-124.
YU Chuanyun, ZHANG Jianrun. Analysis on dynamic characteristics and wind-induced vibration response of transmission line systems[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019, 49(1): 116-124.
- [31] 赵 勇,孙启刚,宋卓彦,等. 移动下击暴流作用下输电塔的风振响应及荷载评估方法[J]. 振动与冲击, 2021, 40(12): 179-188.
ZHAO Yong, SUN Qigang, SONG Zhuoyan, et al. A dynamic responses and evaluation method of the downburst wind loads effect on a transmission tower[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(12): 179-188.
- 安有斌(1987—),男,工程师,主要从事输电塔结构设计等研究(E-mail: 1024920234@qq.com)。
- 薛晓敏(1977—),女,博士,副教授,主要从事结构振动与控制,钢结构设计理论等研究(通信作者)(E-mail: xuexm@mail.xjtu.edu.cn)。