

风冰荷载作用下输电塔-线体系参数敏感性分析

张亮¹,牛凯¹,罗贤超²,张思遥²,裴浩威¹,唐亚可¹,田利^{2*}

(1.国网河南省电力公司经济技术研究院,河南 郑州 450007; 2.山东大学土建与水利学院,山东 济南 250061)

摘要:建立风速与覆冰厚度的联合概率分布模型,计算考虑不同重现期的灾害作用组合值和组合系数。基于角钢构件现象学滞回模型,开展覆冰输电塔-线体系的风致倒塌破坏研究,并考虑结构参数不确定性开展敏感性分析。结果表明,风速范围在5~10 m/s、覆冰厚度在10~20 mm时,覆冰期年极值风速和年最大覆冰厚度均符合广义极值分布(generalized extreme value, GEV)。在风、冰荷载的共同影响下,输电塔-线体系的杆件破坏集中在塔腿处,主材失效是结构倒塌的主要原因,且覆冰输电塔-线体系在敏感性分析中的屈服强度和弹性模量对结构临界倒塌风速影响最大,风攻角0°和30°的敏感性程度要大于45°和90°。

关键词:输电塔-线体系;风冰荷载;现象学滞回模型;倒塌破坏;敏感性分析

中图分类号:TM752 **文献标志码:**A

引用格式:张亮,牛凯,罗贤超,等.风冰荷载作用下输电塔-线体系参数敏感性分析[J].山东大学学报(工学版),2024,54(3):132-140.

ZHANG Liang, NIU Kai, LUO Xianchao, et al. Sensitivity analysis of transmission tower-line system parameters under wind and ice loads [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(3):132-140.

Sensitivity analysis of transmission tower-line system parameters under wind and ice loads

ZHANG Liang¹, NIU Kai¹, LUO Xianchao², ZHANG Siyao², PEI Haowei¹, TANG Yake¹, TIAN Li^{2*}

(1. Economic Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450007, Henan, China; 2. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: Based on the phenomenological hysteresis model for angular steel members, a study on wind-induced collapse damage of ice-covered transmission tower-line system was carried out, and sensitivity analysis was carried out considering the uncertainty of structural parameters. A joint probability distribution model of wind speed and ice thickness was developed, and the combination of hazard effects and combination coefficients were calculated considering different recurrence periods. The results showed that the annual extreme wind speed and the annual maximum ice thickness during the ice-covered period were consistent with the generalised extreme value (GEV) distribution for wind speeds in the range of 5-10 m/s and ice thicknesses in the range of 10-20 mm. Under the combined influence of wind and ice loads, the damage of the transmission tower-line system was concentrated at the tower legs, and the failure of the main material was the main reason for the collapse of the structure. In the sensitivity analysis, the yield strength and modulus of elasticity of the ice-covered transmission tower-line system had the greatest influence on the critical collapse wind speed of the structure, and the sensitivity level was greater at 0° and 30° wind attack angles than the sensitivity level at 45° and 90°.

Keywords: Transmission tower-line system; wind-ice loading; phenomenological hysteresis model; collapse damage; sensitivity analysis

0 引言

在重度覆冰荷载和风荷载共同作用下,输电

塔-线体系易发生舞动、断线和覆冰闪络等事故,极端荷载下引起输电塔的连续性倒塌,严重威胁电网系统安全。近年来我国华中和华东部分地区因雨雪天气造成多处输电杆塔倒塌,引起大规模

的断电事故发生^[1]。此外,我国地形地势多变、气候复杂,风速和覆冰厚度的概率分布特征存在地区差异性。因此,基于历史实测数据,构建风速和覆冰厚度的概率分布模型,开展风冰共同作用下输电塔-线体系的倒塌破坏研究具有重要意义。

为减小冰荷载和风荷载对输电塔-线体系产生的负面影响,国内外学者进行了一系列研究^[2-7]。Makkonen^[8]以导线半径和气候条件作为特征,结合热力学原理建立了线路覆冰预测模型。邹红波等^[9]基于粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法,模拟四分裂导线的动态响应,在此基础上建立舞动预警模型,并和其他几种算法对比验证精确度。Zhou 等^[10]由试验获取了导线覆冰后的气动力系数,并用自定义 UEL 模拟覆冰导线的受力特性,对比试验结果和模拟情况,验证了该模型的有效性。覆冰与风荷载耦合作用下输电塔响应与安全评估逐渐成为研究热点^[11-13]。

近年来,学者们对输电线路不确定性问题进行了分析研究^[13-17]。Fu 等^[18]建立了一种专门针对地震激励下输电塔线系统的不确定性分析方法,验证了该方法的有效性。严波等^[19]模拟研究了输电塔在不同覆冰厚度和风攻角下的承载性能,发

现塔身主材对整塔在风、冰荷载下的失稳产生巨大影响。但现有研究主要对多集中于输电塔-线体系在单个灾害作用下的承载性能和不确定性分析,对于风冰共同作用下的敏感性分析尚未深入开展。

本研究依托河南某 220 kV 输电线路实际工程,基于历史实测数据,建立风速与覆冰厚度的联合概率分布模型,并计算荷载组合系数;基于角钢现象学滞回模型,开展覆冰输电塔-线体系风致倒塌破坏研究,并考虑结构参数不确定性开展敏感性分析。研究结果可为重冰区输电线路的抗风设计和运维作出指导。

1 输电塔-线体系有限元建模及构件滞回模型

1.1 输电塔有限元建模及滞回模型

本研究以河南某 220 kV 输电塔为原型,图 1 为该输电塔的详细尺寸信息、杆件分布位置和节间划分。塔体钢材弹性模量 206 GPa,密度为 7 850 kg/m³,泊松比为 0.3,塔身主材采用 Q420 钢和 Q355 钢,其他材料采用 Q235 钢,采用 B31 梁单元模拟杆件。

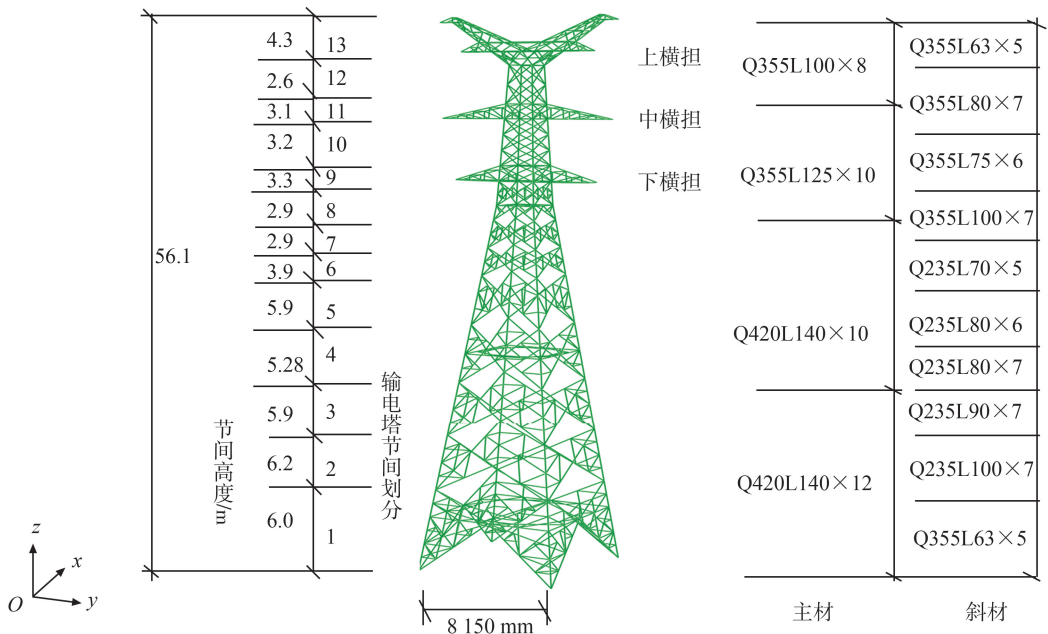


图 1 输电塔有限元模型
Fig.1 Transmission tower finite element model

在模拟倒塌过程中,由于脉动风荷载相关特性,且循环荷载下角钢构件呈现出复杂的非线性滞回行为,为更准确地模拟杆件的实际受力情况,

采用角钢构件现象学滞回模型^[20]对角钢损伤过程进行模拟,考虑不同参数对角钢构件滞回特性的影响规律,并以该模型在有限元模拟中主材杆件

损伤破坏作为输电塔倒塌的评判标准。

1.2 输电塔-线体系有限元模型

使用有限元软件 ABAQUS 建立塔-线体系模型,如图 2 所示。该体系含有三基直线塔和四跨导线,输电塔档距为 300 m,最外侧输电线端部铰接。输电线分为 4 层,表 1 中给出了导线具体信息,

最上层为两根 JLB20A-150 型铝包钢绞线,下 3 层均为两根双分裂 LGJ-630/45 钢芯铝绞线。输电线看作理想柔线,可以传递轴力但不传递弯矩。绝缘子作为连接构件,在与横担连接处可以发生转动,为铰接状态,不传递弯矩。因此采用 T3D2 杆单元对导线与绝缘子进行模拟。

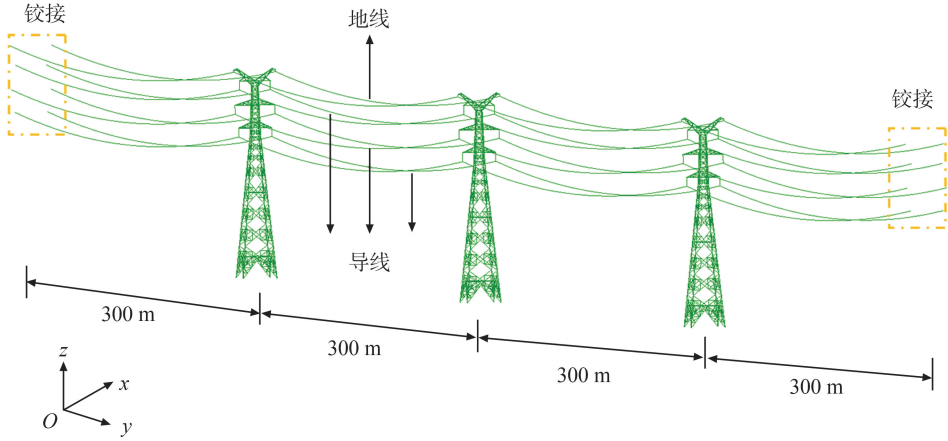


图 2 输电塔-线体系有限元模型

Fig.2 Finite element model of transmission tower-line system

表 1 导线和地线参数信息

Table 1 Parameter information for conductors and grounds

类型	弹性模量/GPa	截面积/mm ²	外径/mm	膨胀系数/℃ ⁻¹
导线 2×LGJ630/45	55.0	666.55	33.60	2.3×10 ⁻⁷
地线 JLB20A-150	147.2	148.07	15.75	1.3×10 ⁻⁷

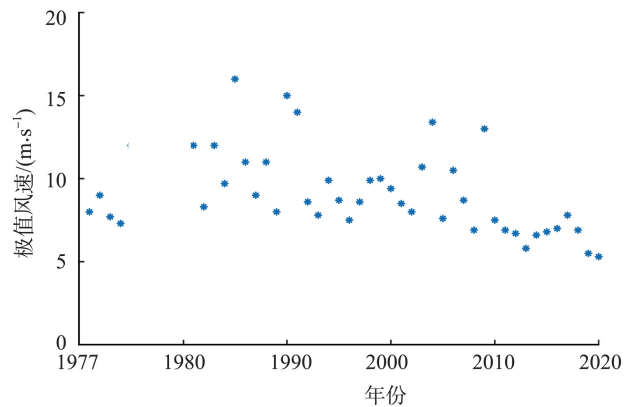
2 风与覆冰灾害组合影响下输电塔承载性能分析

2.1 风速与覆冰厚度的联合概率分布

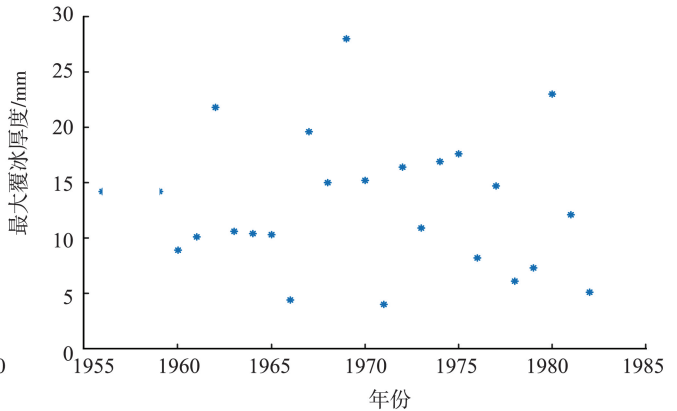
基于某地气象站的风速和覆冰厚度数据^[21],建

立了风速与覆冰厚度的联合概率分布模型。其中,风速取该气象站 1977—2020 年间的日极值风速观测数据,为准确得出输电塔线体系覆冰时的伴随风速,选取一年内覆冰期风速进行比较,得到年覆冰期最大风速。覆冰厚度取该气象站 1957—1983 年最大覆冰厚度观测数据,如图 3 所示。

根据风速和覆冰数据分别建立对应的边缘分布。覆冰厚度与风速的分布规律相似,极值分布拟合概率曲线具备可靠性,因此采用广义极值分布 (generalized extreme value, GEV) 和极值 I 型分布 (Gumbel) 对风速、覆冰厚度数据进行统计分析^[22-23]。



(a) 年覆冰期极值风速



(b) 年最大覆冰厚度

图 3 年覆冰期极值风速和覆冰厚度

Fig.3 Extreme wind speed and ice thickness during annual ice cover

广义极值分布累积分布函数和概率密度分布函数为:

$$\begin{cases} F_1(x) = \exp\left[-\left(1+\varepsilon\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\varepsilon}}\right], \\ f_1(x) = \frac{1}{\sigma}\exp\left[-\left(1+\varepsilon\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{-1/\varepsilon}\right] \cdot \left(1+\varepsilon\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{-1-\frac{1}{\varepsilon}}, \end{cases}$$

式中: ε 为形状; μ 为位置参数; σ 为尺度, $\sigma>0$; x 为变量。

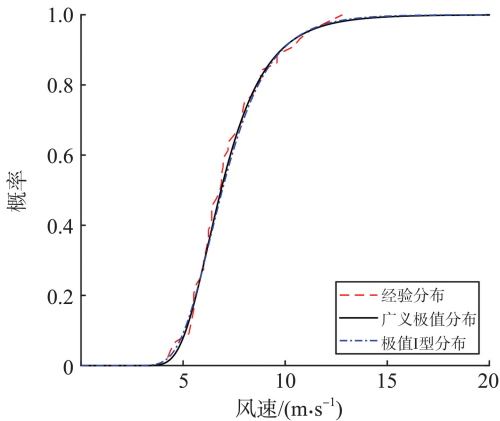
极值 I 型分布累积分布函数和概率密度分布函数为

$$\begin{cases} F_2(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right] \\ f_2(x) = \frac{1}{\sigma}\exp\left[-\frac{x-\mu}{\sigma}-\exp\left(-\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right] \end{cases} \quad (2)$$

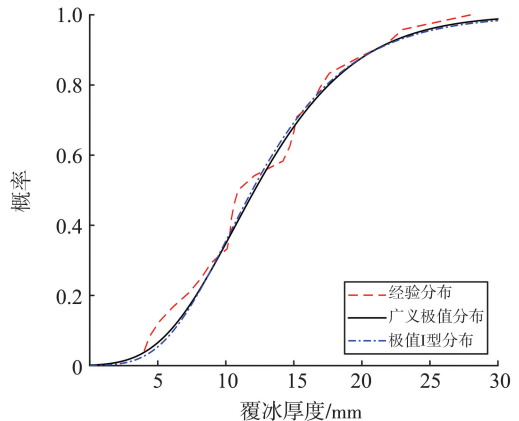
根据所得风速、覆冰数据分别对概率分布采用极大似然法进行参数估计。为了评价模型对

于实测值的拟合优度,使用拟合决定系数 R^2 和均方根误差 K_{mse} 检验拟合效果,广义极值分布下的风速拟合决定系数、均方根分别为 0.991 8、0.028 1,极值 I 型分布的风速决定系数、均方根分别为 0.987 6、0.034 4,广义极值分布下的覆冰厚度决定系数、均方根分别为 0.983 3、0.037 3,极值 I 型分布的覆冰厚度决定系数、均方根分别为 0.981 6、0.039 1。

广义极值分布在风速和覆冰厚度概率函数拟合中,总体表现均优于极值 I 型分布,因此使用广义极值分布分别建立风速和覆冰厚度的边缘分布函数。同时,绘制风速和覆冰厚度的理论累积分布函数曲线,并与各自经验分布曲线的拟合度进行对比,均表现出较好的拟合优度,验证了概率模型的有效性,如图 4 所示。



(a) 年覆冰期极值风速的累积概率分布



(b) 年最大覆冰厚度的累积概率分布

图 4 风速和覆冰厚度的边缘概率分布曲线

Fig.4 Marginal probability distribution curves for wind speed and ice cover thickness

由于年覆冰期极值风速和年最大覆冰厚度之间相关性较低,因此在建立联合分布时可以认为两个变量是独立的。由乘法定理可得,风速和覆冰厚度的联合概率分布函数为

$$P(U, V) = UV, \quad (3)$$

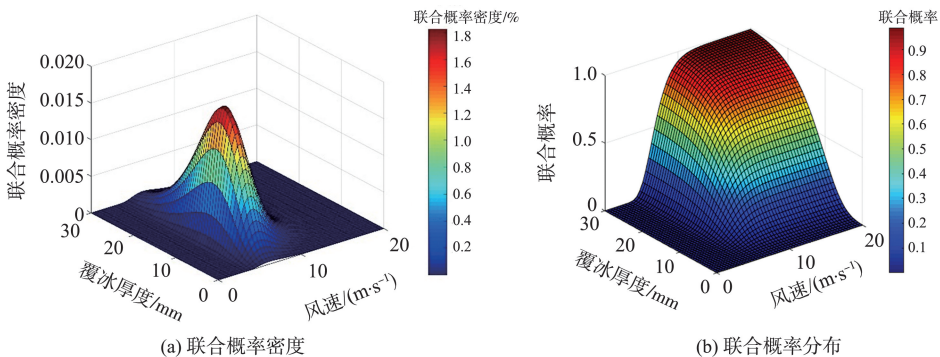
式中, U 、 V 为风速和覆冰厚度的边缘概率分布。

联合概率密度函数

$$p(u, v) = uv, \quad (4)$$

式中, u 、 v 为风速和覆冰厚度的边缘概率密度分布。

风速和覆冰厚度的联合概率密度分布和联合概率累积分布如图 5 所示。从图 5 中可以看出,风速主要集中在 5 ~ 10 m/s,此时覆冰厚度为 10 ~ 20 mm,最大联合概率密度 0.015。



(a) 联合概率密度

(b) 联合概率分布

图 5 风速和覆冰厚度的联合概率分布

Fig.5 Joint probability distribution of wind speed and ice cover thickness

2.2 风与覆冰荷载的组合系数分析

如果只考虑一种危险,则失效概率将被大大低估;但是如果考虑多种荷载同时取极限值,将会偏离实际情况,过分放大灾害危险性,不利于工程的经济性。因此,在进行输电塔线体系在风和覆冰灾害影响下的结构性能研究和总体设计时,基于概率理论,有必要对各种荷载进行合理组合。利用基于一致危险性的灾害组合分析方法推求灾害作用组合值和组合系数,在灾害联合概率密度函数取最大值的条件下,取联合概率分布函数的设防概率水准等值线上最可能发生的灾害作用组合值,即

$$\begin{cases} 1-P_i-U_i+P(U_i, V_i)=\frac{1}{T_i}, \\ p(u, v)=\max[p(u_i, v_i)] \end{cases} \quad (5)$$

式中, T_i 为第 i 级设防水准下的灾害作用同现重现期, U_i 和 V_i 为第 i 级设防水准下灾害作用边缘概率分布, u_i 和 v_i 第 i 级设防水准下灾害作用的边缘概率密度分布。

在已得各个设防水准下灾害组合作用值的条件下,可根据当地灾害作用标准值进一步得到某灾害在第 i 级设防水准下的组合系数

$$\alpha_i = a_i/a, \quad (6)$$

式中, a_i 是第 i 级设防水准, a 表示该灾害作用标准值。

本研究基于 2.1 节得出的风速与覆冰厚度联合概率分布研究风与覆冰灾害组合系数。参考文献 [24], 选用 50 a 重现期的年覆冰期极值风速和年最大覆冰厚度作为研究标准, 考虑 50、100、500、1 000 a 同现重现期分析风与覆冰灾害作用组合值和组合系数, 定义重现期为 50 a 的风速和组合系数为 0.85 和 0.60, 重现期为 100 a 的风速和组合系数为 0.90 和 0.60, 重现期为 500 a 的风速和组合系数为 1.05 和 0.65, 重现期为 1 000 a 的风速和组合系数为 1.10 和 0.70。

在不同的重现期条件下, 风荷载和覆冰荷载的最可能组合值相对于标准值多数有不同程度的折减, 只有当同现重现期为 1 000 a 时, 风速的组合系数大于 1。相对于基于一致危险性的组合系数, 设计时可选择保守建议的组合系数以增加安全性。依据所得的组合系数, 可以在风与覆冰组合灾害场景中用于结构性能的分析与评价。

3 输电塔-线体系参数敏感性分析

3.1 不确定性参数的选取

风荷载对于输电塔-线体系的敏感性分析包括多种不确定性, 在选取不确定性参数时, 需要考虑

荷载、材料和结构的多种特性, 本研究选取对结构的承载性能影响较大的几种参数作为不确定参数进行研究, 通过敏感性分析对输电塔-线体系在覆冰时的风致倒塌破坏进行研究。

输电塔材料方面的不确定性参数对输电塔的整体动力特性和风荷载下的承载性能都具有较大的影响, 这里刚度和质量均作为结构不确定性参数。本研究主要考虑输电塔杆件的弹性模量 E_s 、泊松比 ν 和不同钢材屈服强度 f_{y235} 、 f_{y355} 、 f_{y420} 这 3 种参数的敏感性。本文依据相关规范选取了在进行敏感性分析和不确定性分析时所选取的钢材材料不确定性参数的概率分布及参数取值^[13-14]。

为了更好地揭示不确定性参数上下限值对输电塔响应的影响程度, 本研究选取材料参数服从分布的均值作为确定性模型材料参数。

当材料强度符合正态分布时,

$$f_k = \mu_f - 1.645\sigma_f, \quad (7)$$

式中, f_k 为材料标准强度, μ_f 为材料强度均值, σ_f 为材料强度标准差。

当材料强度符合对数正态分布时,

$$f'_k = \mu_f e^{-1.645\delta_f}, \quad (8)$$

式中 δ_f 为变异系数。

3.2 风冰灾害组合下塔线体系有限元分析方法

3.2.1 风荷载模拟

输电塔风荷载

$$W_s = \mu_z \mu_s v_0^2 A_s / 1\ 600, \quad (9)$$

式中, μ_z 为风压高度变化系数, μ_s 为结构体型系数, v_0 为基准高度风速, A_s 为结构迎风面投影面积。为方便风荷载的施加, 考虑输电塔结构特点进行节间划分, 将输电塔分为 13 段, 如图 1 所示, 取中心点为该段风速模拟点, 计算每段风荷载并将其均匀施加在该段塔身主材上。

导地线无覆冰状态下的风荷载

$$L_n = \alpha W_0 D \mu_{sc} \mu_z \beta_c \sin^2 \theta, \quad (10)$$

式中: α 为风压不均匀系数; W_0 为标准基本风压; μ_{sc} 为导地线的体型系数, 覆冰状况下 $\mu_{sc} = 1.2$; μ_z 为导地线风压高度变化系数; D 为导地线外径(分裂导线取所有子导线外径总和); β_c 为导地线风荷载调整系数; θ 为风向角。

导地线有覆冰状态下的风荷载

$$L'_n = W_0 (D + 2d) \alpha \mu_{sc} \mu_z \beta_c \sin^2 \theta, \quad (11)$$

式中: d 为覆冰厚度考虑垂直导线方向时, $\theta = 90^\circ$ 。

以上为静力风荷载的模拟, 在上述计算方法的基础上, 本研究脉动风采用基于谐波叠加法的 Davenport 风速功率谱进行模拟, 即

$$\begin{cases} S(f) = 4.8KV_{10}^2 \left(\frac{H}{10}\right)^{-0.5\alpha} \frac{x_n}{f(1+x_n^2)^{7/8}}, \\ x_n = \frac{300fH^\alpha}{V_{10}}, \end{cases} \quad (12)$$

式中: K 为阻力系数, f 为脉动频率。

3.2.2 冰荷载模拟

塔身单位面积的覆冰荷载^[25]:

$$q_a = 0.6 \times 10^{-3} h \alpha_2 \gamma, \quad (13)$$

式中, h 为覆冰厚度, α_2 为覆冰高度的递增系数, γ 为覆冰重度, $\gamma = 9 \text{ kN/m}^3$ 。分别计算各个节间的冰荷载,考虑组合系数后以修改杆件密度的方式对输电塔施加冰荷载。

一般将导地线上的覆冰等效成密度为 $0.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的均匀环形覆冰,单根导地线单位冰荷载为^[25]:

$$L_i = \frac{0.9\pi g_b}{4} ((D+2d) - D^2) \times 10^{-3}, \quad (18)$$

式中: g_b 为覆冰等效质量密度, d 为导地线覆冰荷载厚度, D 为导地线的外径。

在有限元模拟时,考虑2.2节所提出的组合系数,选取重现期为500 a的组合系数。

3.3 不同风攻角下输电塔-线体系敏感性分析

在风、冰荷载下选取4个不同风攻角(0° 、 30° 、 45° 、 90°)对的敏感性进行模拟分析。如图6所示,其中 y 方向为顺塔线方向, x 方向为垂直塔线方向, α 为风攻角。 0° 为顺塔线方向(y 方向), 90° 为垂直塔线方向(x 方向),由于塔-线体系的对称性,其余3个面的风荷载相同。

基于表4给出的5种不确定性参数上下限建立对应的不确定性模型和确定性模型,开展风、冰荷载作用下的输电塔-线体系非线性时程分析。采用控制变量法,每次仅改变一个参数,使用参数服从

概率分布的上限(95%分位值)或者下限(5%分位值)来替换之前研究中的确定性模型均值,随后重复以上过程进行脉动风荷载分析,即可得到不确定性参数变化后的响应和倒塌风速,为保证结果的有效性,将最小分析步长设定为0.025。在改变单个不确定性参数时,其他的不确定性参数保持与确定性模型一致。

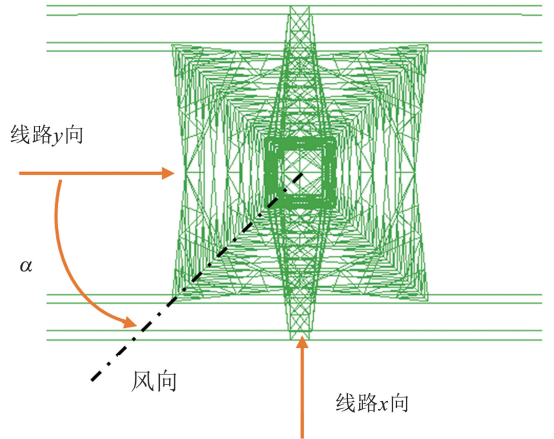


图6 风攻角示意图

Fig.6 Diagram of wind angle of attack

依次改变5种不确定性参数,每次只改变一种参数,取其上限或下限,将相应参数输入到确定性模型中,并对输电塔-线体系进行风致破坏研究。取50 a中最大覆冰厚度为27.89 mm,并考虑组合系数,通过多次模拟得到倒塌风速,直至5种不确定参数上下限全部分析完成。

图7、8给出了确定性模型在不同风攻角下的失效破坏示意图和倒塌位移曲线图。从图7、8中可以看出,在风、冰荷载共同影响下,输电塔-线体系的失效破坏杆件集中在塔腿处,除第一、二节间外,自第三节间向上输电塔的位移线性递增,且主材失效是结构倒塌破坏的主要原因。

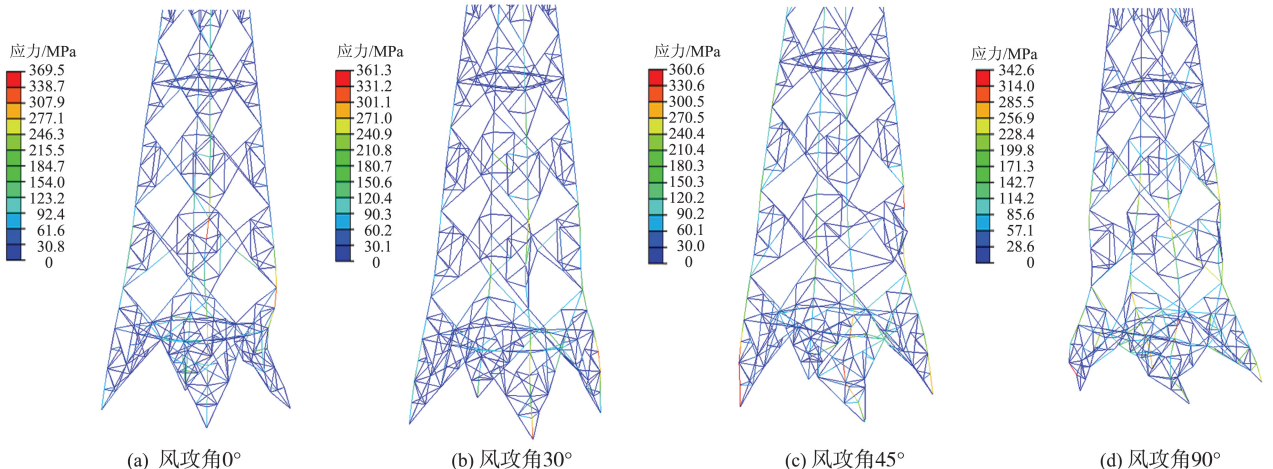


图7 不同风攻角下塔-线体系破坏应力云图

Fig.7 Damage stress clouds for tower-line system at different wind angles of attack

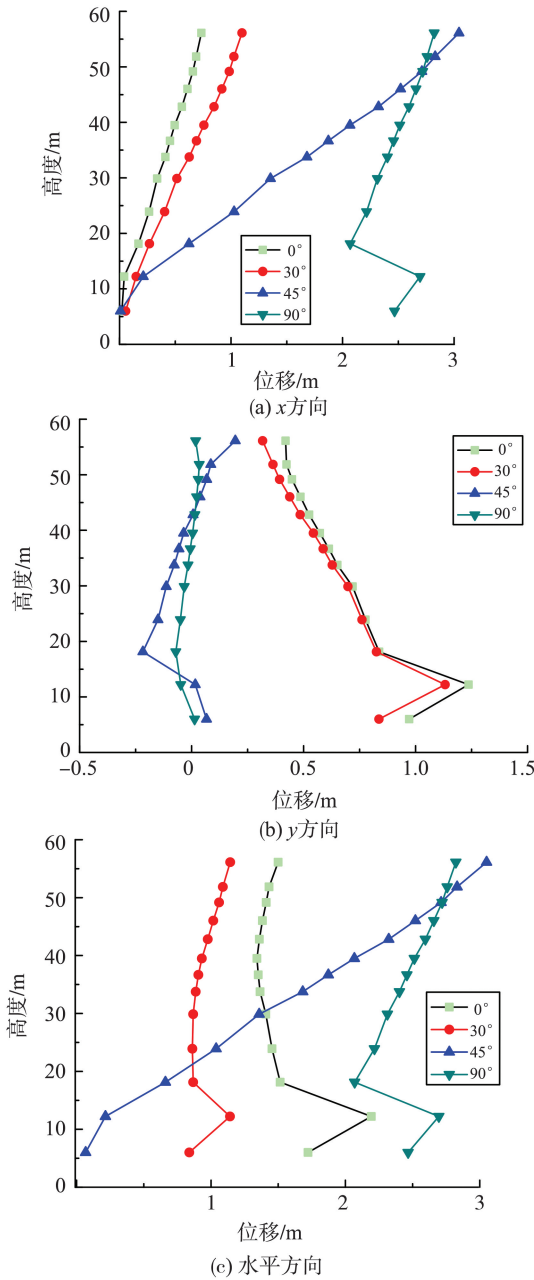


图8 输电塔-线体系倒塌位移曲线

Fig.8 Collapse displacement curve transmission tower-line system

为体现不确定参数上下限值分别对输电塔承载性能的影响,本研究基于传统的均值“龙卷风图”做出改进^[13],参数

$$\lambda = \frac{\mu_{Upper}(\mu_{Lower}) - \mu_d}{\mu_d}, \quad (19)$$

式中, μ_{Upper} 为不确定性参数取值为累积概率分布上限(95%分位值)时分析结果响应均值, μ_{Lower} 为不确定性参数取值为累积概率分布下限(5%分位值)时分析结果响应均值, μ_d 为确定性模型分析结果均值。该参数体现各不确定参数对输电塔承载性能的影响大小,如图9所示,该“龙卷风图”可以直观准确地量化各个不确定性参数变化对输电塔结构

承载性能的影响程度和利弊关系。

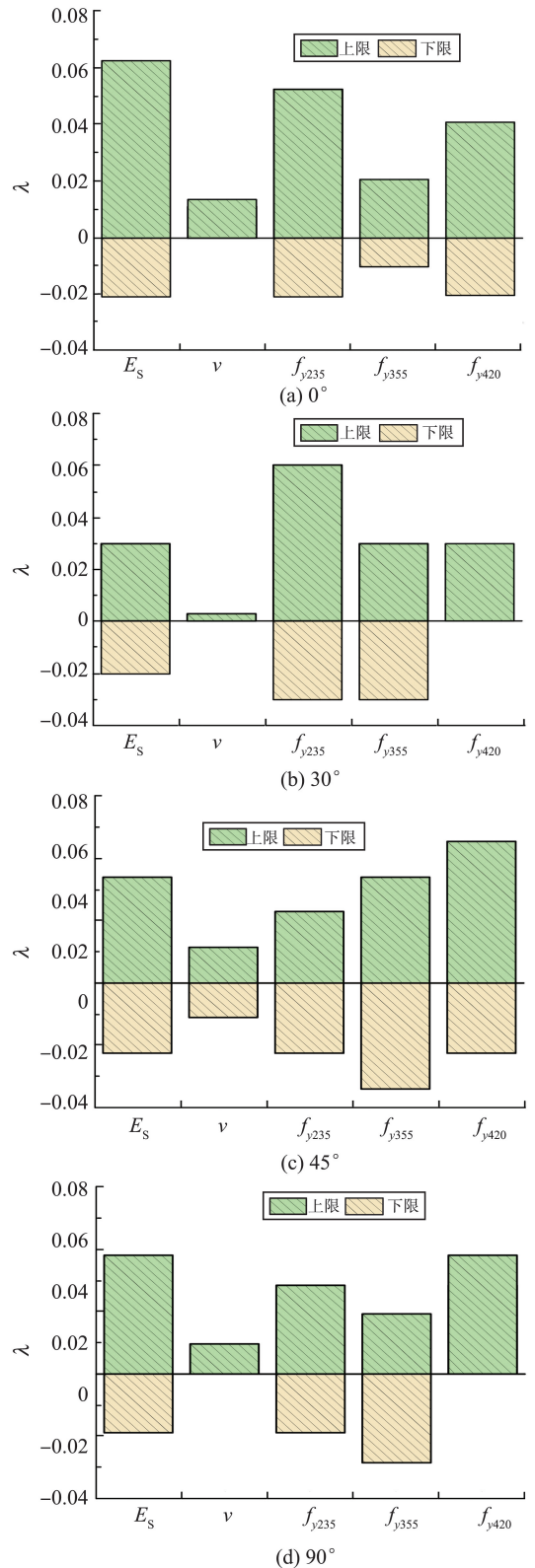


图9 输电塔-线体系不同风攻角敏感性分析龙卷风图
Fig.9 Tornado diagram for sensitivity analysis of different wind angles of attack for transmission tower-line systems

图9中,当 $\lambda > 0$ 时,输电塔倒塌风速增大,对输电塔结构抵抗极端荷载有利;当 $\lambda < 0$ 时,情况则相反。柱状图越长参数敏感程度越大,此规律也适用

于对数标准差龙卷风图。

由图9分析可知,观察5个不确定性参数的顺序,可以发现不确定性参数中的弹性模量和屈服强度对风、冰荷载作用下输电塔-线体系临界风速影响较大。相比于其他材料参数,泊松比对输电塔承载性能的影响较小。另一方面,不同钢材的屈服强度在4个风攻角下影响程度也不同,其中对Q420钢材影响最大。在风攻角分别为 0° 和 30° 时的敏感性程度要大于风攻角为 45° 和 90° 时的敏感性程度。因此有必要考虑弹性模量、屈服强度等不确定性参数,它们会对输电塔承载性能的估计产生较大偏差。

4 结论

依托输电线路实际工程,基于历史实测数据,建立了覆冰期年极值风速和年最大覆冰厚度的边缘概率分布和联合概率分布模型,计算了灾害作用组合值和组合系数。基于角钢构件现象学滞回模型,开展了覆冰输电塔-线体系的风致倒塌破坏研究,并对不同结构的参数不确定性开展了敏感性分析,得到结论如下:

(1)对某地区风冰组合作用联合概率分布的分析结果表明,覆冰期年极值风速和年最大覆冰厚度均符合GEV分布,风速范围主要集中在 $5\sim 10\text{ m/s}$,覆冰厚度范围在 $10\sim 20\text{ mm}$ 。

(2)利用联合概率分布模型和基于一致危险性的灾害组合分析方法,获得了该地区风冰组合作用下考虑不同重现期的组合值和相应的组合系数,进而为工程设计实例提供可靠的组合参数。

(3)在风、冰荷载共同影响下,输电塔-线体系的失效破坏杆件集中在塔腿处,主材失效是输电塔倒塌破坏的主要原因;除第一、二节间外,自第三节间向上输电塔的水平位移线性递增。

(4)不确定性参数中的弹性模量和屈服强度对覆冰输电塔-线体系的临界倒塌风速影响最大,不同风攻角下的影响程度存在一定差异,风攻角分别为 0° 和 30° 时的敏感性程度要大于风攻角为 45° 和 90° 时的敏感性程度。

参考文献:

[1] 李正,杨靖波,韩军科,等. 2008年输电线路冰灾倒塌原因分析[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 31-35.

LI Zheng, YANG Jingbo, HAN Junke, et al. Analysis of the causes of the ice-related tower collapse on transmission

lines in 2008[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 31-35.

[2] 刘凯铭. 大跨越输电塔-线体系脱冰和断线冲击动力响应分析[D]. 济南:山东大学, 2022.

LIU Kaiming. Analysis of the dynamic response of de-icing and line breaking shocks in a large span transmission tower-line system [D]. Jinan: Shandong University, 2022.

[3] 张来仪. 考虑地形影响的台风作用下输电塔-线体系响应分析[D]. 济南:山东大学, 2022.

ZHANG Laiyi. Analysis of transmission tower-line system response under typhoon effects considering topography [D]. Jinan: Shandong University, 2022.

[4] 周梦瑶. 基于SMA阻尼器的大跨越输电塔-线体系风振控制研究[D]. 济南:山东大学, 2021.

ZHOU Mengyao. Research on wind vibration control of large span transmission tower-line system based on SMA dampers[D]. Jinan: Shandong University, 2021.

[5] 俞琪琦. 风致大跨越输电塔-线体系倒塌破坏研究[D]. 济南:山东大学, 2016.

YU Qiqi. Research on wind-induced collapse damage of large span transmission tower-line systems [D]. Jinan: Shandong University, 2016.

[6] STEWART J R. Ice as an influence on compact line phase spacing[R]. New York: Hanover Power Technologies Inc Schenectady, 1983.

[7] KEYHAN H, MCCLURE G, HABASHI W G. Dynamic analysis of an overhead transmission line subject to gusty wind loading predicted by wind-conductor interaction[J]. Computers & Structures, 2013, 122: 135-144.

[8] LASSE Makkonen. Modeling power line icing in freezing precipitation[J]. Atmospheric Research, 1998, 46(1): 131-142.

[9] 邹红波,宋家乐,刘媛,等. 基于PSO-SVM算法的输电线路覆冰舞动预测模型[J]. 振动与冲击, 2023, 42(3): 280-286.

ZOU Hongbo, SONG Jiale, LIU Yuan, et al. Prediction model for transmission line ice cover dance based on PSO-SVM algorithm [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(3): 280-286.

[10] ZHOU L, YAN B, ZHANG L, et al. Study on galloping behavior of iced eight bundle conductor transmission lines[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 362: 85-110.

[11] 徐文军,杨洪明,赵俊华,等. 冰风暴灾害下电力断线倒塌的概率计算[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(1): 13-17.

XU Wenjun, YANG Hongming, ZHAO Junhua, et al.

- Calculation of the probability of power line breakage and tower collapse in an ice storm disaster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(1): 13-17.
- [12] 杜运兴, 卢心龙. 输电塔线体系风致覆冰脱落动力响应的研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(11): 88-94.
DU Yunxing, LU Xinlong. Research on the dynamic response of wind-induced ice shedding in transmission tower systems[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2015, 42(11): 88-94.
- [13] 付朝阳. 地震下输电塔-线体系不确定性响应与倒塌分析[D]. 济南: 山东大学, 2021.
FU Zhaoyang. Uncertainty response and collapse analysis of transmission tower-line systems under earthquakes [D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [14] 张欣. 风荷载作用下大跨越输电塔-线体系的易损性分析[D]. 济南: 山东大学, 2020.
ZHANG Xin. Vulnerability analysis of large span transmission tower-line systems under wind loads [D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [15] 李宏男, 张文圣, 付兴. 基于大数据深度学习的输电塔结构抗风易损性评估[J]. 土木工程学报, 2022, 55(9): 54-64.
LI Hongnan, ZHANG Wensheng, FU Xing. Wind vulnerability assessment of power transmission tower structures based on deep learning from big data [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(9): 54-64.
- [16] 徐震, 张涛, 葛向东, 等. 风荷载作用下输电塔-线体系不确定性分析[J]. 山东大学学报(工学版), 2021, 51(4): 99-105.
XU Zhen, ZHANG Tao, GE Xiangdong, et al. Uncertainty analysis of transmission tower-line systems under wind loads [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2021, 51(4): 99-105.
- [17] FU Xing, LI Hongnan, LI Gang. Fragility analysis and estimation of collapse status for transmission tower subjected to wind and rain loads[J]. Structural Safety, 2016, 58: 1-10.
- [18] FU Zhaoyang, TIAN Li, LIU Juncai. Seismic response and collapse analysis of a transmission tower-line system considering uncertainty factors[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 189: 107094.
- [19] 严波, 盛金马, 姜克儒, 等. 猫头型输电塔在覆冰与风荷载下的动力稳定[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(26): 11166-11175.
YAN Bo, SHENG Jinma, JIANG Keru, et al. Dynamic stability of cathead Transmission Towers under ice cover and wind loads[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(26): 11166-11175.
- [20] LIU Juncai, TIAN Li, MA Ruisheng, et al. Phenomenological hysteretic model for fixed-end steel equal-leg angle: Development and application[J]. Thin-Walled Structures, 2023, 183: 110335.
- [21] 蒋兴良, 易辉. 输电线路覆冰及防护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [22] 王建城, 苏盛, 盛小勇, 等. 输电线路多年一遇极值覆冰估计方法适用性分析[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2614-2620.
WANG Jiancheng, SU Sheng, SHENG Xiaoyong, et al. Analysis of the applicability of a multi-year extreme ice estimation method for transmission lines[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2614-2620.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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.
- [24] 中华人民共和国建设部. 高耸结构设计规范: GB—J135—90[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991.
- [25] 刘春城, 胡晓炜, 曹玲. 基于 ANSYS/PDS 的覆冰荷载下高压输电塔可靠度分析[J]. 黑龙江电力, 2013, 35(2): 107-110.
LIU Chuncheng, HU Xiaowei, CAO Lin. ANSYS/PDS-based reliability analysis of high-voltage transmission towers under ice-cover loading[J]. Heilongjiang Electric Power, 2013, 35(2): 107-110.

(编辑: 陈丽萍)