

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241570

## 荷载波动与风速概率分布关联的配电线路断线概率计算

魏瑞增<sup>1</sup>, 王磊<sup>1</sup>, 何浣<sup>1</sup>, 张志伟<sup>2</sup>, 刘超<sup>2</sup>, 侯慧<sup>2</sup>

(1. 广东省电力装备可靠性重点实验室(广东电网有限责任公司电力科学研究院), 广东 广州 510080;

2. 武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 配电线路因设计标准偏低, 易受台风侵袭发生倒杆断线等故障。以往基于应力强度干涉(stress-strength interference, SSI)理论的传统可靠性模型研究近似认为线路荷载随机变量与风速服从相同分布, 忽略了荷载随机性与风速概率分布间的关联性。为提升模型精度, 首先利用 SSI 理论分析导线和电杆参数对断线概率的影响。再将考虑风速概率分布的断线概率模型与传统可靠性模型进行比较, 认为传统可靠性模型无法准确捕捉荷载剖面强迫响应。最后利用荷载-风速二次函数关系式提出考虑风速概率分布的断线概率改进模型。相比只考虑荷载随机性的断线概率模型, 考虑风速概率分布的改进模型能更准确地捕捉荷载剖面强迫响应, 且计算效率提升至秒级, 为快速准确地辅助台风灾害下配电线路损毁预警与应急抢修等提供基础。

**关键词:** 台风灾害; 配电线路; 应力强度干涉理论; 断线概率; 极值 I 型分布

### Calculation of distribution line breakage probability based on the correlation between load fluctuations and wind speed probability distribution

WEI Ruizeng<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, HE Huan<sup>1</sup>, ZHANG Zhiwei<sup>2</sup>, LIU Chao<sup>2</sup>, HOU Hui<sup>2</sup>

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Electric Power Equipment Reliability (Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd.), Guangzhou 510080, China; 2. School of Automation,

Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Due to relatively low design standards, distribution lines are vulnerable to typhoons damage, often resulting in pole collapse and line breakage. Traditional reliability models based on the stress-strength interference (SSI) theory typically approximate that the random variable of line load and wind speed follow the same distribution, thereby neglecting the correlation between load randomness and wind speed probability distribution. To improve model accuracy, the SSI theory is used to analyze the impact of line and pole parameters on line-breaking probability. Then the proposed breakage probability model considering wind speed probability distribution is compared with traditional reliability models, showing that conventional approaches fail to accurately capture the forced response of the load profile. Finally, a breakage probability improvement model considering wind speed probability distribution is proposed using a quadratic functional relationship between load and wind speed. Compared with the models that only consider load randomness, the improved model can more accurately capture the forced response of the load profile, while also achieving second-level computational efficiency. This provides a basis for fast and accurate damage warning and emergency repair for distribution lines under typhoon disasters.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U22B20106).

**Key words:** typhoon disaster; distribution line; stress-strength interference theory; breakage probability; extreme value type I distribution

## 0 引言

台风是沿海地区破坏力较强的中小时空尺度极端天气事件<sup>[1-2]</sup>, 全球变暖将导致未来台风强度增

加<sup>[3-4]</sup>, 台风灾害下供电可靠性及抗灾韧性受到严峻挑战<sup>[5]</sup>。特别对于配电线路导线和电杆等元件, 其设计标准不及主网, 但分布广且数量大, 在台风灾害时可能会发生大面积倒杆断线等故障。因此, 建立快速精确的配电线路断线概率模型, 预测线路受损区段, 可为灾后应急抢修调度提供辅助决策指导<sup>[6-7]</sup>。

针对配电线路断线概率问题, 已有研究多基于

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(U22B20106); 中国南方电网有限责任公司科技项目资助(GDKJXM20198441)

应力强度干涉理论<sup>[8]</sup>, 比较线路元件荷载与设计强度, 考虑荷载随机性及强度分散性, 应用传统可靠性模型和考虑荷载随机性的断线概率模型计算断线概率。在传统可靠性模型应用中, 文献[9]比较电杆荷载与抗弯强度, 应用威布尔分布建立考虑电杆寿命的修正断线概率模型, 但并未计算导线荷载。文献[10]建立元件关于风速的时变故障率函数, 根据系统信息熵生成故障场景, 验证新能源接入对配网韧性提升的有效性。文献[11]分别计算导线、杆塔自身和绝缘子三元件电杆荷载, 应用最高风速下的元件故障率进行配电网可靠性评估, 但并未考虑荷载随机性。针对此局限, 部分学者提出考虑荷载随机性的断线概率模型。文献[12]认为元件荷载随风速而变, 应视为随机变量, 配电线路故障发生在强度和荷载密度函数的干涉区, 但未显式给出荷载分布函数。文献[13]采用极值 I 型分布拟合实际风荷载概率分布, 建立台风登陆前 24 h 和 48 h 损毁预警系统。文献[14]纳入电网、气象和地理信息, 采用随机森林算法修正考虑荷载随机性的断线概率模型。但文献[13-14]都近似认为荷载随机变量与风速服从同样分布, 配电线路断线概率模型仍需改进。

综上所述, 传统考虑荷载随机性的断线概率模型假设偏于理想。荷载随机性根源是风速服从概率分布, 应基于风速极值分布推导荷载分布以改进模型。因此, 本文主要创新点如下: 1) 提出荷载波动与风速概率分布关联分析的断线概率改进模型, 并分析模型性能; 2) 建立了台风灾害下荷载效应与风速间的二次函数关系式; 3) 精细化分析了线路走向、导线型号、电杆强度等级及线路档距对断线概率的影响。

### 1 Miller 风场模型

Miller 风场模型是用于生成环流风速的经验模型<sup>[15]</sup>, 对云墙外围风速衰减添加一个变化指数, 能更好地描述不同特征的台风。Miller 台风风场如图 1 所示。图中:  $R_{max}$  为最大风速半径;  $V_r$  为距风眼  $r$  处仿真地点的风速;  $V_T$  为台风移行速度。

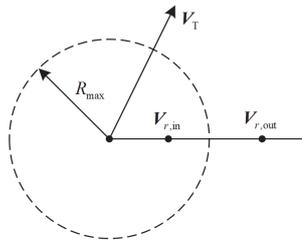


图 1 Miller 台风风场示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Miller typhoon wind field

风场中  $V_r$  按式(1)计算。

$$V_r = \begin{cases} V_{R_{max}} r/R_{max} & r \leq R_{max} \\ V_{R_{max}} (R_{max}/r)^\chi & r > R_{max} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $V_{R_{max}}$  为  $r = R_{max}$  处的风速;  $\chi$  为衰减指数,  $\chi \in [0.5, 0.7]$ 。风向取逆时针切线方向。

风场中各层移行风速分量  $V_{Tr}$  由 Miyazaki 模型<sup>[16]</sup>给出, 如式(2)所示。

$$V_{Tr} = V_T \exp[-\pi r/R_G] \quad (2)$$

式中:  $R_G$  为环境尺度, 一般取  $R_G \approx 10R_{max}$ 。

合成风速矢量  $v$  为移行风速矢量  $V_{Tr}$  和环流风速矢量  $V_r$  的矢量和。

### 2 传统可靠性模型下的断线概率

传统可靠性模型通过比较确定荷载与分散强度计算断线概率。根据风场模型确定各电杆处风速和风向, 假设每档距线路风速近似为靠近上游变电站一侧电杆风速, 利用元件经验参数计算荷载。荷载指强风吹拂导线引起的导线截面应力和杆根弯矩。强度指导线抗拉强度和电杆抗弯强度。

#### 2.1 导线荷载计算

导线荷载如图 2(a)所示。为简化计算, 忽略导线自重荷载, 仅台风吹拂牵拉导线致其承受的荷载由水平方向风速分量提供<sup>[17]</sup>, 按式(3)计算。

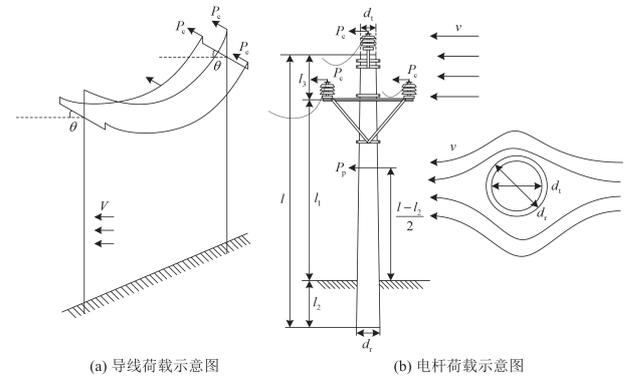


图 2 导线和电杆荷载示意图

Fig. 2 Schematic diagram of load on conductors and poles

$$P_c = \frac{v^2 \sin^2 \theta}{1600} \alpha \mu_z \mu_{sc} d l_D \times 10^{-3} \quad (3)$$

式中:  $P_c$  为导线荷载, kN;  $v$  为合成风速, m/s;  $\theta$  为风向与线路夹角;  $\alpha$  为风压不均匀系数;  $\mu_z$  为风压高度变化系数;  $\mu_{sc}$  为导线体型系数;  $d$  为导线外径, mm;  $l_D$  为导线档距, m。

导线截面上的应力按式(4)计算。

$$\sigma = P_c/S_c \quad (4)$$

式中:  $\sigma$  为导线截面应力, MPa;  $S_c$  为导线截面积,  $\text{mm}^2$ 。

## 2.2 电杆荷载计算

电杆荷载如图 2(b)所示。图中:  $l$  为杆长, m;  $l_1$  为横担离地高度, m;  $l_2$  为埋深, m;  $l_3$  为梢端至横担距离, m;  $d_r$ 、 $d_l$  分别为电杆根径与梢径, mm。混凝土电杆承受导线牵拉荷载和杆身荷载。假设电杆两侧档距均相等, 则电杆承受的每根导线牵拉荷载为  $P_c$ 。杆身荷载与风向在同一平面, 将电杆受风侧投影看作等腰梯形, 按式(5)计算<sup>[17]</sup>。

$$P_p = \frac{v^2}{1600} \mu_z \mu_{scp} \frac{l-l_2}{2} (d_r + d_l) \times 10^{-3} \quad (5)$$

式中:  $P_p$  为杆身荷载, kN;  $\mu_{scp}$  为电杆体型系数。

杆身荷载的力作用点在电杆半身处, 引起的杆根弯矩按式(6)计算<sup>[17]</sup>。

$$M_1 = P_p \frac{l-l_2}{2} \quad (6)$$

式中:  $M_1$  为杆身荷载引起的杆根弯矩,  $\text{kN} \cdot \text{m}$ 。

导线牵拉荷载引起的杆根弯矩按式(7)计算<sup>[17]</sup>。

$$M_2 = 2P_c l_1 + P_c (l-l_2) \quad (7)$$

式中:  $M_2$  为导线牵拉荷载引起的杆根弯矩,  $\text{kN} \cdot \text{m}$ 。

杆根弯矩矢量  $M$  为杆身荷载引起的杆根弯矩矢量  $M_1$  与导线牵拉荷载引起的杆根弯矩矢量  $M_2$  的矢量和, 由余弦定理其模值按式(8)计算。

$$M = \sqrt{M_1^2 + M_2^2 - 2M_1 M_2 \cos(90^\circ + \theta)} \quad (8)$$

式中:  $M$  为电杆杆根合成弯矩模值,  $\text{kN} \cdot \text{m}$ 。

## 2.3 导线和电杆强度随机变量

IEC60826 标准<sup>[18]</sup>认为, 韧性材料抗拉强度服从正态分布, 单根导线的抗拉强度密度函数  $f_{sc}$  为

$$f_{sc}(\sigma_c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\delta} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\sigma_c - \sigma_\mu}{\sigma_\delta}\right)^2\right] \quad (9)$$

式中:  $\sigma_c$  为抗拉强度变量;  $\sigma_\mu$  为抗拉强度均值, MPa;  $\sigma_\delta$  为抗拉强度标准差, MPa,  $\sigma_\delta = \varepsilon\sigma_\mu$ ,  $\varepsilon$  为导线变异系数。

混凝土电杆抗弯强度也服从正态分布, 密度函数  $f_{sp}$ <sup>[19]</sup>为

$$f_{sp}(M_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}M_\delta} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{M_p - M_\mu}{M_\delta}\right)^2\right] \quad (10)$$

式中:  $M_p$  为抗弯强度变量;  $M_\mu$  为混凝土电杆抗弯强度均值,  $\text{kN} \cdot \text{m}$ ,  $M_\mu = \beta M_{\text{exam}}$ ,  $\beta$  为经验系数,  $M_{\text{exam}}$  为混凝土电杆承载能力校验弯矩,  $\text{kN} \cdot \text{m}$ ;

$M_\delta$  为混凝土电杆抗弯强度标准差,  $\text{kN} \cdot \text{m}$ ,  $M_\delta = \nu M_\mu$ ,  $\nu$  为电杆变异系数。

## 2.4 架空配电线路断线概率模型

工程结构可靠性理论<sup>[20]</sup>分别用  $S$  和  $W$  表示元件强度与荷载, 元件状态功能函数为  $Z=S-W$ , 按正负将元件划分为可靠和故障状态。当元件处于可靠状态时, 其功能函数  $Z > 0$ , 元件可靠度按(11)计算。

$$R = P\{Z > 0\} = P\{S - W > 0\} = P\{S > W\} \quad (11)$$

式中:  $R$  为元件可靠度;  $P\{\}$  为事件概率。

暂不考虑风速概率分布, 认为元件荷载确定。

设元件强度  $S$  的正态分布密度函数为  $f_s(s)$ , 强度大于荷载的元件可靠度按式(12)计算。

$$R = P\{S > W\} = \int_W^{+\infty} f_s(s) ds = 1 - F_s(W) \quad (12)$$

式中:  $F_s(W)$  为元件强度  $S$  的累积分布函数  $F_s(s)$  在  $s=W$  处的函数值。

式(12)中的元件荷载  $W$  用具体的导线截面应力  $\sigma$  和杆根弯矩  $M$  替换, 则导线与电杆的可靠度  $R_c$  和  $R_p$  按式(13)计算。

$$\begin{cases} R_c = 1 - F_{sc}(\sigma) \\ R_p = 1 - F_{sp}(M) \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $F_{sc}$  和  $F_{sp}$  分别为导线抗拉强度累积分布函数和电杆抗弯强度累积分布函数。

根据串联可靠性模型<sup>[21]</sup>, 将以单根电杆为中心的档距为  $l_0$  的导线段视作一个模块, 线路正常运行的条件是全部串联模块均正常工作。整条配电线路断线概率  $P_f$  按式(14)计算。

$$P_f = 1 - \prod_{i=1}^{N_c} R_{ci} \prod_{j=1}^{N_c+1} R_{pj} \quad (14)$$

式中:  $R_{ci}$  为第  $i$  段导线可靠度;  $R_{pj}$  为第  $j$  根电杆可靠度;  $N_c$  为导线段数, 电杆根数比导线段数多 1。

## 3 考虑荷载波动与风速概率分布关联分析的断线概率模型

在台风极端天气下, 风速可能会在短时间内急剧变化, 使得杆塔和线路经历瞬时的、极强的风压和荷载。风速服从概率分布使得对杆塔和线路的应力分析更加复杂, 需要考虑风速变化对荷载的影响。风速的突变会以更剧烈的荷载变化作用于杆塔和线路上, 给配电线路带来极大的断线隐患。

### 3.1 风速极值分布

台风出现频率服从泊松分布, 决定了其出现具有重现期的特征<sup>[22]</sup>。不同年份风速分布规律不同,

考虑风速的概率属性，风速应视为随机变量。配电线路的断线概率分析常用于防风加固或未来投资建设参考。一般为留有一定裕度，用最大风速参与计算。因此，台风最大风速服从极值 I 型分布<sup>[23]</sup>。

### 3.2 参数估计方法

已知极值风速序列  $v_1 \leq v_2 \leq \dots \leq v_n$ ，耿贝尔法用于对极值 I 型分布参数  $u$  和  $s$  进行参数估计<sup>[24]</sup>。原理是用风速序列样本次序构造经验分布函数，取两次负对数构造经验序列  $y_1 \leq y_2 \leq \dots \leq y_n$ 。  $s$  和  $u$  的估计值  $\hat{s}$  和  $\hat{u}$  为

$$\begin{cases} \hat{s} = \frac{\sigma(v)}{\sigma(y)} \\ \hat{u} = E(v) - \frac{\sigma(v)E(y)}{\sigma(y)} \end{cases} \quad (15)$$

式中： $E(v)$  与  $\sigma(v)$  分别为风速序列均值和标准差； $E(y)$  与  $\sigma(y)$  分别为构造序列均值和标准差。

估计准确性采用剩余方差  $S_f^2$ 、拟合相对偏差  $R_f$  和 Kolmogorov 拟合优度指标  $K_f$  进行评价<sup>[25]</sup>，指标越小说明拟合效果越好。

### 3.3 考虑荷载随机性的断线概率模型

荷载分布直接沿用风速极值 I 型分布<sup>[12-14]</sup>，则荷载变量下元件可靠度为

$$R(w) = \int_w^{+\infty} f_s(s) ds = 1 - F_S(w) \quad (16)$$

式中： $w$  为荷载变量； $F_S(w)$  为元件强度  $S$  的累积分布函数  $F_S(s)$  在  $s = w$  处的函数值。

元件综合可靠度  $R_0$  应为不同荷载下可靠度的概率加权和，设荷载概率密度函数为  $f_w(w)$ ，用积分形式表示并进行变换，如式(17)所示。

$$R_0 = \int_0^s R(w) f_w(w) dw = \int_w^{+\infty} f_s(s) F_w(s) ds \quad (17)$$

式中： $F_w(s)$  为荷载累积分布函数  $F_w(w)$  在  $w = s$  处的函数值。位置参数与尺度参数直接沿用风速极值分布参数。

由此可得元件综合断线概率为  $P = 1 - R_0$ 。

### 3.4 考虑风速概率分布的断线概率改进模型

为更好地拟合配电线路的真实荷载状况，有必要考虑风速概率分布，改进传统荷载随机性断线概率模型。式(3)一式(8)表明荷载效应均是风速的二次函数，而风速服从极值分布，从数理统计的角度可求取元件荷载效应复合分布。据此提出考虑风速概率分布的断线概率改进模型如图 3 所示。

由式(3)和式(4)，定义导线截面应力-风速二次系数  $\gamma_\sigma$  如式(18)所示。

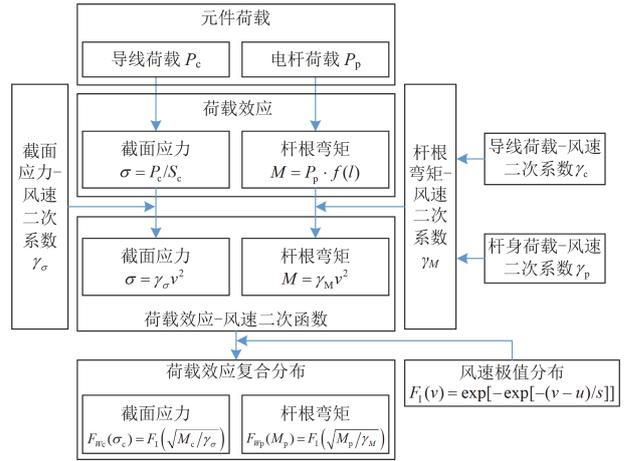


图 3 考虑风速概率分布的断线概率改进模型

Fig. 3 Improved breakage probability model considering wind speed probability distribution

$$\gamma_\sigma = \frac{\alpha \mu_z \mu_{sc} \beta_c d_l d_D \sin^2 \theta}{1600 S_c} \quad (18)$$

式中： $\beta_c$  为导线几何修正系数。

由式(3)定义电杆承受的导线荷载-风速二次系数  $\gamma_c$  为

$$\gamma_c = \frac{\alpha \mu_z \mu_{sc} \beta_c d_l d_D \sin^2 \theta \times 10^{-3}}{1600} \quad (19)$$

由式(5)定义电杆承受的杆身荷载-风速二次系数  $\gamma_p$  为

$$\gamma_p = \frac{\mu_z \mu_{scp} \beta_z (l - l_2)(d_r + d_1) \times 10^{-3}}{1600 \times 2} \quad (20)$$

式中： $\beta_z$  为电杆几何修正系数。

由式(6)一式(8)并结合式(19)和式(20)可推导杆根弯矩-风速二次系数  $\gamma_M$  为

$$\gamma_M = \sqrt{\frac{(l - l_2)^2 \gamma_p^2}{4} + (2l_1^2 + l - l_2)^2 \gamma_c^2 + (l - l_2)(2l_1 + l - l_2) \gamma_p \gamma_c \sin \theta} \quad (21)$$

用式(18)和式(21)分别简化式(4)和式(8)可得

$$\begin{cases} \sigma = \gamma_\sigma v^2 \\ M = \gamma_M v^2 \end{cases} \quad (22)$$

以导线为例，其截面应力复合分布定义为

$$F_{wc}(\sigma_c) = P\{\gamma_\sigma v^2 \leq \sigma_c\} = F_1\left(\sqrt{\sigma_c / \gamma_\sigma}\right) \quad (23)$$

式中： $F_1(\cdot)$  为极值 I 型累积分布函数。

同理可得电杆杆根弯矩复合分布为

$$F_{wp}(M_p) = F_1\left(\sqrt{M_p / \gamma_M}\right) \quad (24)$$

参照式(17)，导线与电杆修正可靠度  $R_{mc}$  和  $R_{mp}$  按式(25)计算。

$$\begin{cases} R_{mc} = \int_{\sigma}^{+\infty} f_{Sc}(\sigma_c) F_{Wc}(\sigma_c) d\sigma_c \\ R_{mp} = \int_M^{+\infty} f_{Sp}(M_p) F_{Wp}(M_p) dM_p \end{cases} \quad (25)$$

线路修正断线概率  $P_{fm}$  按式(26)计算。

$$P_{fm} = 1 - \prod_{i=1}^{N_c} R_{mci} \prod_{j=1}^{N_c+1} R_{mpj} \quad (26)$$

式中:  $R_{mci}$  为第  $i$  段导线修正可靠度;  $R_{mpj}$  为第  $j$  根电杆修正可靠度。

#### 4 算例分析

在城市配电网中, 10 kV 配电线路是城市配电网的主要线路, 承载着较大负载, 服务于住宅、商业和工业区等。然而, 由于防风能力较弱, 10 kV 配电线路在台风等极端天气中常是受损最严重的线路<sup>[6,17]</sup>。本文研究主要针对 10 kV 线路和杆塔, 选取常见的混凝土电杆直线杆塔作为建模对象。

仿真配电线路如图 4 所示, 以线路出线端为原点建立直角坐标系。每条线路长 6 km, 平均档距  $l_D = 60$  m, 线路 L1、L2、L3 与  $x$  轴的夹角分别为  $60^\circ, 0^\circ, -45^\circ$ 。从气象部门获取台风中心初始坐标  $(-100 \text{ km}, -75 \text{ km})$ , 最大风速半径  $R_{max} = 52.93 \text{ km}$ 、移行风速  $V_T = 20 \text{ km/h}$ 、移行方向沿  $x$  轴正方向、最大环流风速  $V_{Rmax} = 39.54 \text{ m/s}$ , 衰减指数  $\chi = 0.6$ , 仿真台风过境期间 ( $t = 0 \sim 10 \text{ h}$ ) 的风场。导线型号默认为 LGJ-240/30, 外径  $d = 21.6 \text{ mm}$ , 截面积  $S_c = 276 \text{ mm}^2$ , 抗拉强度均值  $\sigma_\mu = 187.47 \text{ MPa}$ 。电杆默认为强度 G 级的混凝土电杆, 承载能力校验弯矩  $M_{exam} = 48.76 \text{ kN} \cdot \text{m}$ <sup>[26]</sup>。导线与电杆结构参数取值如表 1 所示<sup>[12,17,26]</sup>。

##### 4.1 传统可靠性模型下的断线概率

传统可靠性模型下 3 条线路断线概率如图 5 所示, 风速和风向与线路走向夹角如图 6 所示。在同一时刻, 线路走向差异导致风速和风向差异, 断线

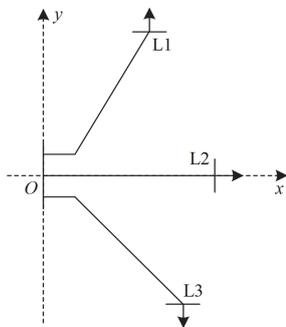


图 4 配电线路示意图

Fig. 4 Schematic diagram of distribution lines

表 1 导线和电杆计算参数

Table 1 Calculation parameters of conductors and poles							
参数	$\varepsilon$	$\beta$	$\nu$	$\alpha$	$\mu_z$	$\mu_{sc}$	$\mu_{scp}$
数值	0.16	1.2	0.25	0.7	1.436	1.2	1.2
参数	$l/m$	$l_1/m$	$l_2/m$	$l_3/m$	$d_1/m$	$d_2/m$	—
数值	12	9.75	2	0.25	350	190	—

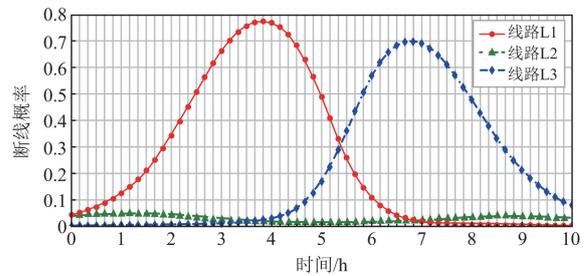


图 5 传统可靠性模型下的断线概率

Fig. 5 Breakage probability under traditional reliability model

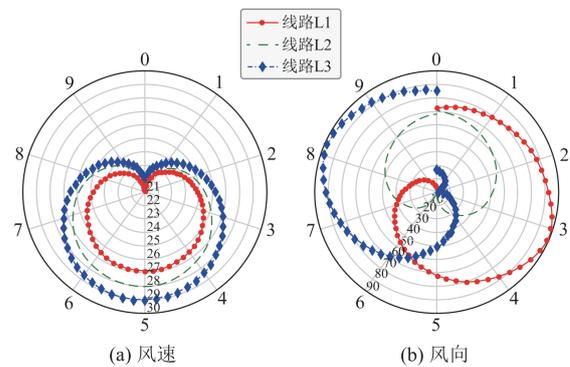


图 6 时变极值风速和风向

Fig. 6 Time-varying extreme wind speed and direction

概率最大时刻也各有差异。线路 L1、L2、L3 断线概率最大的时刻分别为  $t_1 = 3.83 \text{ h}$ 、 $t_2 = 1.33 \text{ h}$ 、 $t_3 = 6.83 \text{ h}$ 。风速分别为  $26.39 \text{ m/s}$ 、 $23.63 \text{ m/s}$ 、 $27.60 \text{ m/s}$ 。风向与线路走向夹角分别为  $80.53^\circ$ 、 $51.81^\circ$ 、 $72.81^\circ$ 。断线概率分别为  $77.55\%$ 、 $4.82\%$ 、 $69.87\%$ 。

通过故障状态分析, 可获得各条线路运行状态与持续时间。当断线概率低于  $10\%$  时, 线路处于可靠状态; 当断线概率高于  $10\%$  但低于  $50\%$  时, 线路处于告警状态; 当断线概率高于  $50\%$  但低于  $90\%$  时, 线路处于紧急状态; 当断线概率高于  $90\%$  时线路处于极端紧急状态, 极有可能发生故障。处于紧急和极端紧急状态的线路须在台风灾害前对电杆采取防风拉线或其他加固措施。

##### 4.2 导线型号对断线概率的影响

当  $t_1 = 3.83 \text{ h}$  时, 线路 L1 选用 6 种型号导线, 其参数与最大断线概率如表 2 所示<sup>[27]</sup>。

表 2 导线参数与最大断线概率

Table 2 Conductor parameters and maximum breakage probability

导线型号	$d/mm$	$S_c/mm^2$	$\sigma_\mu/MPa$	$P_n/\%$	$P_{ci}$	$P_{pi}/\%$
LGJ-70/10	11.40	79.3	193.50	21.18	$5.45 \times 10^{-10}$	0.30
LGJ-95/15	13.61	110	217.61	32.91	$4.34 \times 10^{-10}$	0.51
LGJ-120/20	15.07	134	214.87	42.85	$4.10 \times 10^{-10}$	0.72
LGJ-150/20	16.67	164	192.22	54.69	$4.13 \times 10^{-10}$	1.02
LGJ-185/25	18.90	211	189.52	59.48	$3.64 \times 10^{-10}$	1.16
LGJ-240/30	21.60	276	187.47	77.55	$3.40 \times 10^{-10}$	1.92

注:  $P_n$  为最大断线概率;  $P_{ci}$  为单档距最大断线概率;  $P_{pi}$  为单杆最大倾倒率。

线路 L1 选取不同型号导线的断线概率如图 7 所示。随着外径增大,在相同风速下,导线荷载增加,线路断线概率增大。外径由 11.40 mm 增加至 21.60 mm,线路 L1 的断线概率由 21.18% 增至 77.55%,但单档距断线概率却在减小,远小于单杆倾倒概率,且后者变化方向与线路断线概率一致。说明外径变化对断线概率影响不明显,断线概率的显著变化由电杆荷载引起的杆根弯矩决定。

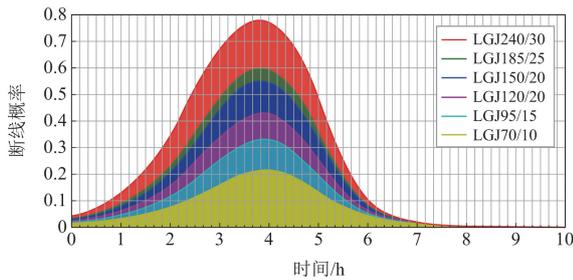


图 7 线路 L1 在 6 种型号导线下的断线概率

Fig. 7 Breakage probability of L1 under six conductor types

### 4.3 电杆强度等级对断线概率的影响

当  $t = 3.83$  h 时,线路 L1 选用 4 种强度电杆,其参数与最大断线概率如表 3 所示<sup>[26]</sup>。

表 3 电杆参数与最大断线概率

Table 3 Pole parameters and maximum breakage probability

电杆强度等级	$M_{exam}/(kN \cdot m)$	$P_n/\%$	$P_{ci}$	$P_{pi}/\%$
G 级	48.76	77.55	$3.40 \times 10^{-10}$	1.92
I 级	58.50	36.33	$3.40 \times 10^{-10}$	0.58
J 级	68.26	15.86	$3.40 \times 10^{-10}$	0.22
K 级	78.00	7.62	$3.40 \times 10^{-10}$	0.10

线路 L1 选取不同强度等级电杆的断线概率如图 8 所示。随着电杆强度等级提高,电杆抗弯强度增加,线路断线概率降低。电杆强度等级由 G 级提高至 K 级,线路 L1 的断线概率由 77.55% 降至 7.62%。因此采用高强度等级电杆可有效降低线路断线概率,提高线路防风能力。

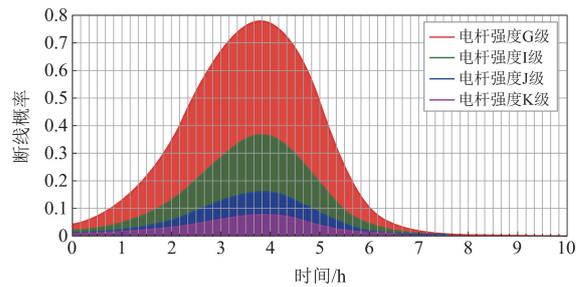


图 8 线路 L1 在 4 种强度等级电杆下的断线概率

Fig. 8 Breakage probability of L1 under four strength levels of poles

### 4.4 线路档距对断线概率的影响

在各自断线概率最大时刻,档距从 20 m 到 100 m 间隔 10 m 递增时,3 条线路断线概率如图 9 所示,3 条线路断线概率均随档距增加而增加。线路 L1 和 L3 变化陡峭,在档距超过 70 m 后断线概率接近 1,而线路 L2 由于本身受台风影响较小,断线概率变化平缓,但仍呈增加趋势。说明应选择合适档距,保证线路运行安全性与电杆投资数量经济性平衡。

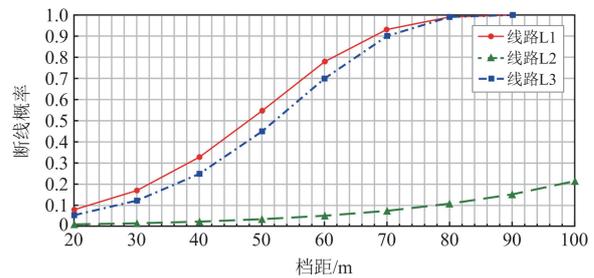


图 9 3 条线路断线概率与档距的关系

Fig. 9 Relationship between the breakage probability of three lines and span

### 4.5 考虑荷载随机性的断线概率模型结果

选取台风“山竹”期间广东省统计得到的位于 22.5°N ~ 23°N 纬度带之间的所有配电网杆塔最大阵风风速值为样本,采用耿贝尔法求解风速极值 I 型分布参数得  $u = 18.525$ ,  $s = 2.656$ 。评价指标为  $S_f^2 = 0.47$ ,  $R_f = 0.02$ ,  $K_f = 0.65$ ,这 3 个指标均很小,并且  $K_f < 1.35$ ,说明拟合所得分布函数符合最大风速分布规律。

考虑荷载随机性模型下 3 条线路断线概率如图 10 所示。3 条线路在全部时段的断线概率均高于 0.1,处于告警状态,线路 L1 和 L3 的断线概率与传统可靠性模型下结果并无太大差异,线路 L2 的断线概率基本不随时间变化。

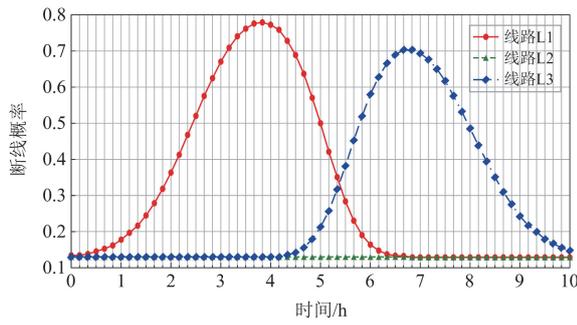


图 10 考虑荷载随机性的断线概率模型结果

Fig. 10 Result of breakage probability model considering load randomness

3 条线路末端时变应力和合成弯矩如图 11 所示。线路 L2 的荷载尤其是合成弯矩相较于其他两条线路变化幅度较小, 而合成弯矩对断线概率起主要影响, 故线路 L2 断线概率变化不明显。但在  $t = 3.67$  h 前和  $t = 7$  h 后, 线路 L2 的荷载分别高出 L1 和 L3 足够多, 线路 L2 在这两个时段的断线概率应显著高于 L1 和 L3。无论是传统可靠性模型还是考虑荷载随机性的模型, 在台风前锋到达和离开时断线概率均未准确捕捉线路所受荷载时变状态。

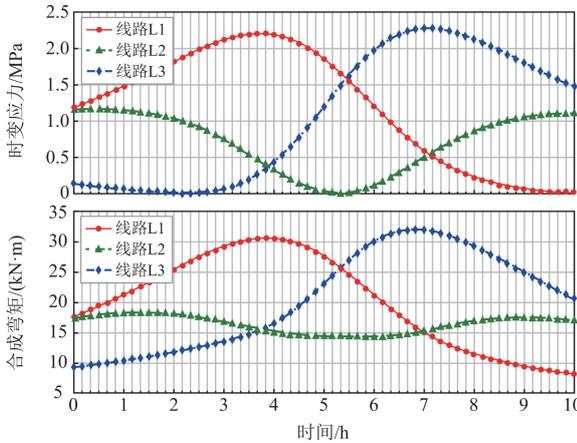


图 11 时变应力和合成弯矩

Fig. 11 Time-varying stresses and resultant bending moments

#### 4.6 考虑风速概率分布的断线概率改进模型结果

考虑风速概率分布模型下 3 条线路断线概率如图 12 所示。时间规整算法<sup>[28-29]</sup>可计算两个时间序列间的相似性, 序列间距越小, 则越相似, 时间规整距离可衡量荷载捕捉度。3 种模型计算时间及断线概率荷载捕捉度如表 4 所示。可见改进模型计算速度可提升至秒级且 3 条线路断线概率均能更好地捕捉线路荷载时变状态, 这是由于改进模型利用荷载-风速的二次关系, 直接将荷载波动与风速概率分布相关联, 从而修正了在荷载强迫响应随机性假设下

间接计算断线概率的误差。

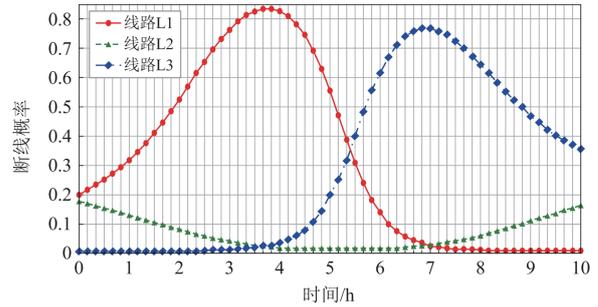


图 12 考虑风速概率分布的断线概率改进模型结果

Fig. 12 Result of breakage probability improvement model considering wind speed probability distribution

表 4 3 种模型计算时间及断线概率荷载捕捉度

Table 4 Three model calculation time and load capture degree of breakage probability

模型	运算 时间/s	L1		L2		L3	
		$\sigma$	$M$	$\sigma$	$M$	$\sigma$	$M$
传统可靠性模型	7.588	58	1223	41	1000	52	1243
考虑荷载随机性的断线概率模型	11.166	56	1220	38	997	51	1239
考虑风速概率分布的断线概率改进模型	1.305	53	1219	36	994	47	1238

## 5 结论

本文基于应力强度干涉理论改进了架空配电线路断线概率模型。采用荷载-风速二次函数关系推导荷载分布函数, 提出改进模型利用荷载-风速的二次关系, 直接将荷载波动与风速概率分布相关联, 其计算效率提升至秒级, 且能更好地捕捉荷载剖面强迫响应, 真实反映线路断线概率变化情况。相比传统可靠性模型, 能更快速准确地辅助配电网进行台风灾害损毁预警与应急抢修等。

本文主要研究配电线路的静态载荷分析。为了更全面地评估台风灾害中的断线风险, 今后的研究需要引入风荷载作用下线路的振动和舞动效应。基于动力学方程, 将线路的上下舞动及旋转舞动引入模型中, 建立适用于风荷载作用下的动态断线模型。

## 参考文献

- [1] 郭明鑫, 李少岩, 顾雪平. 计及台风灾害全过程模拟的配电网差异化加固规划韧性提升方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 62-73.

- GUO Mingxin, LI Shaoyan, GU Xueping. Differentiated reinforcement planning method for a distribution network considering simulation of the whole process of typhoon disasters[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(3): 62-73.
- [2] 卢睿, 熊小伏, 陈红州. 考虑台风时空特性的海上风电场群协同紧急防御策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(12): 13-24.
- LU Rui, XIONG Xiaofu, CHEN Hongzhou. Collaborative emergency defense strategy for offshore wind farm clusters considering the spatial-temporal characteristics of a typhoon[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(12): 13-24.
- [3] 郝增超, 陈阳. 地球系统视角下的多圈层复合极端事件研究进展与展望[J]. *中国科学: 地球科学*, 2024, 54(2): 360-393.
- HAO Zengchao, CHEN Yang. Research progresses and prospects of multi-sphere compound extremes from the earth system perspective[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2024, 54(2): 360-393.
- [4] 郭海湘, 区歌阳, 杨钰莹. 1987—2022年中国自然灾害链研究进展与趋势——基于 CiteSpace 的计量分析[J]. *安全与环境工程*, 2024, 31(6): 118-133.
- GUO Haixiang, OU Geyang, YANG Yuying. Research progress and trends of natural disaster chain in China (1987—2022)—visual analysis based on CiteSpace[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2024, 31(6): 118-133.
- [5] WU Jiaqing, GU Jie, LIU Shuqi, et al. Strategies for improving resilience of regional integrated energy systems in the prevention-resistance phase of integration[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2023, 8(1): 1-18.
- [6] 广东电网有限责任公司电力科学研究院. 台风“山竹”输电设备受损气象分析报告[R]. 广州: 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 2017.
- [7] 杨晓东, 魏瑞增, 王磊, 等. 220 kV 跳线风偏放电概率计算模型和影响因素分析[J]. *广东电力*, 2023, 36(12): 89-96.
- YANG Xiaodong, WEI Ruizeng, WANG Lei, et al. Calculation model and influencing factor analysis of windage yaw discharge probability for 220 kV jumper[J]. *Guangdong Electric Power*, 2023, 36(12): 89-96.
- [8] LI P, FU J, XIE K, et al. A defense planning model for a power system against coordinated cyber-physical attack[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2024, 9(5): 84-95.
- [9] 王永明, 殷自力, 李琳, 等. 台风灾害场景下考虑运行状态的配电网风险评估方法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2018, 30(12): 60-65.
- WANG Yongming, YIN Zili, LI Lin, et al. Risk assessment method for distribution network considering operation state in the scene of typhoon disaster[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2018, 30(12): 60-65.
- [10] 周晓敏, 葛少云, 李腾, 等. 极端天气条件下的配电网韧性分析及提升措施研究[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(2): 505-513.
- ZHOU Xiaomin, GE Shaoyun, LI Teng, et al. Assessing and boosting resilience of distribution system under extreme weather[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(2): 505-513.
- [11] 尹超雄, 唐武勤, 温灵锋, 等. 台风天气下配电网可靠性的新型评估算法[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(4): 138-143.
- YIN Chaoxiong, TANG Wuqin, WEN Lingfeng, et al. A new method for reliability evaluation of distribution network considering the influence of typhoon[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(4): 138-143.
- [12] 兰颖. 考虑台风影响的配电网可靠性评估和规划[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- LAN Ying. Distribution system reliability evaluation and design considering influence of typhoon[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [13] 黄勇, 魏瑞增, 周恩泽, 等. 台风灾害下输电线路损毁预警方法[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(23): 142-147.
- HUANG Yong, WEI Ruizeng, ZHOU Enze, et al. Early warning method of transmission line damage under typhoon disaster[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(23): 142-147.
- [14] 侯慧, 耿浩, 黄勇, 等. 基于多因素修正的台风灾害下输电线路失效预测方法[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(23): 193-201, 233.
- HOU Hui, GENG Hao, HUANG Yong, et al. Multi-factor correction based failure prediction method of transmission line with typhoon disaster[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(23): 193-201, 233.
- [15] MILLER B I. Characteristics of hurricanes: analyses and calculations made from measurements by aircraft result in a fairly complete description[J]. *Science*, 1967, 157: 1389-1399.
- [16] MIYAZAKI M, UNEO T, UNOKI S. Theoretical investigations of typhoon surges along the Japanese coast(II)[J]. *Oceanographical Magazine*, 1962, 13(2): 103-118.
- [17] 付聪, 杨韵, 钱峰, 等. 考虑灾害天气的线路安全风险评估及应用[J]. *广东电力*, 2022, 35(8): 69-75.

- FU Cong, YANG Yun, QIAN Feng, et al. Line safety risk assessment considering disastrous weather and its application[J]. *Guangdong Electric Power*, 2022, 35(8): 69-75.
- [18] International Electrotechnical Commission. IEC 60826: 2017 design criteria of overhead transmission lines[S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2017.
- [19] 唐亚男, 段忠东, 徐枫, 等. 强风下导线的等效随机静风荷载概率模型[J]. *工程力学*, 2024, 41(1): 124-137.  
TANG Yanan, DUAN Zhongdong, XU Feng, et al. Probabilistic model of random equivalent static wind loads on transmission line cables under strong winds[J]. *Engineering Mechanics*, 2024, 41(1): 124-137.
- [20] 蒋永生. 工程结构设计原理[M]. 南京: 东南大学出版社, 2018.
- [21] 梁振锋, 闫俊杰, 李江锋, 等. 极端暴雨灾害下城市配电网风险评估方法[J]. *电网技术*, 2023, 47(10): 4180-4190.  
LIANG Zhenfeng, YAN Junjie, LI Jiangfeng, et al. Risk assessment of urban distribution network under extreme rainstorm disasters[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(10): 4180-4190.
- [22] HONG D T B, VINH T Q. Modeling seasonal typhoon genesis in the north west pacific using probabilistic approaches[J]. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2024, 10(5): 5891-5906.
- [23] 侯慧, 于士文, 李显强, 等. 基于随机风场概率加权的台风灾害下输电线路损毁预警[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(7): 140-147.  
HOU Hui, YU Shiwen, LI Xianqiang, et al. Early warning for transmission line damage under typhoon disaster based on random wind field probability weighting[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(7): 140-147.
- [24] 李吉侗, 王洲, 达紫祺, 等. 计及恶劣天气时空相关性的弹性配电网储能电站多层规划方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(9): 128-137.  
LI Jitong, WANG Zhou, DA Ziqi, et al. Multi-level planning method of energy storage stations for resilient distribution networks considering spatio-temporal correlation of severe weather[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(9): 128-137.
- [25] 康朝杰, 杜文风, 杨雪, 等. 基于极大似然法的雪荷载计算与分析[J]. *河南大学学报(自然科学版)*, 2016, 46(2): 220-225.  
KANG Chaojie, DU Wenfeng, YANG Xue, et al. Calculation and analysis of snow loads based on the maximum likelihood method[J]. *Journal of Henan University (Natural Science)*, 2016, 46(2): 220-225.
- [26] 全国水泥制品标准化技术委员会. 环形混凝土电杆: GB/T 4623—2014[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2014.  
State Cement Products Commission of People's Republic of China. Circular concrete pole: GB/T 4623—2014[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2014.
- [27] 全国裸电线标准化技术委员会. 圆线同心绞架空导线: GB/T 1179—2017[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2017.  
State Bare Wires Commission of People's Republic of China. Round wire concentric lay overhead electrical stranded conductors: GB/T 1179—2017[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2017.
- [28] 王光华, 张纪欣, 崔良, 等. 基于双重注意力变换模型的分布式屋顶光伏变电站级日前功率预测[J]. *全球能源互联网*, 2024, 7(4): 393-405.  
WANG Guanghua, ZHANG Jixin, CUI Liang, et al. Substation-level distributed rooftop photovoltaic power day-ahead prediction based on double attention mechanism transformer model[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2024, 7(4): 393-405.
- [29] 钟声, 李晓洋, 梁胜乐, 等. 基于线圈电流信号及动态时间规整的高压断路器状态评估方法[J]. *高压电器*, 2023, 59(4): 24-31.  
ZHONG Sheng, LI Xiaoyang, LIANG Shengle, et al. Condition assessment method on high voltage circuit breaker based on coil current signal and dynamic time warping[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(4): 24-31.

收稿日期: 2024-11-25; 修回日期: 2025-03-19

作者简介:

魏瑞增(1989—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电网防灾减灾。E-mail: weiruizeng@foxmail.com

(编辑 周金梅)