DOI: 10.3969/j.issn.2097-583X.2026.04.002　　文章编号：2097-583X(2026)04-0525-08

考虑动态故障概率的输电线路台风故障场景构建方法

樊子豪[1]，产雪振[2]，杨　楠[1*]，辛　琨[3]，王　灿[1]，关钦月[4]，李斯吾[4]

（1.三峡大学 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室，湖北 宜昌 443002；
2. 国网安徽省电力有限公司安庆供电公司，安徽 安庆 246003；
3. 国网山东省电力公司济宁供电公司，山东 济宁 272000；
4. 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院，湖北 武汉 430000）

摘　要：针对现有故障场景建模难以同时反映台风轨迹随机性和故障风险动态变化的问题，提出一种考虑动态故障概率的输电线路台风故障场景构建方法。首先，采用Batts风场模型描述台风风速的空间分布特征，并结合核密度估计与Copula函数建立台风偏移角和移动速度的联合概率模型，实现台风路径的随机生成；其次，构建考虑风速时序演化特性的输电线路动态故障概率模型，利用累积故障概率表征台风持续作用下线路故障风险的演变过程；最后，结合状态抽样与Monte Carlo模拟生成具有时序关联特征的多阶故障场景集。以某实际118节点系统为算例进行验证，仿真结果表明，所提方法能够有效反映输电线路故障概率随台风演化的变化规律，并生成符合台风灾害影响特征的故障场景，可为极端天气条件下电网风险评估与韧性分析提供场景支撑。

关键词：台风灾害；输电线路故障；联合概率分布；故障场景集；时空演化

中图分类号：TM74　　**文献标志码：**A　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID)：**

Transmission line typhoon fault scenario construction method considering dynamic failure probability

Fan Zihao[1], Chan Xuezhen[2], Yang Nan[1*], Xin Kun[3], Wang Can[1], Guan Qinyue[4], Li Siwu[4]

(1. Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascade Hydropower Station, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. State Grid Anhui Electric Power Company Anqing Power Supply Company, Anqing 246003, China;
3. State Grid Shandong Electric Power Company Jining Power Supply Company, Jining 272000, China;
4. Economic and Technological Research Institute of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: To address the difficulty of existing fault scenario construction methods in simultaneously reflecting the stochasticity of typhoon trajectories and the dynamic variation of failure risk, a transmission line typhoon fault scenario construction method considering dynamic failure probability was proposed. The spatial distribution characteristics of typhoon wind speed were described using the Batts wind field model, and a joint probability model of typhoon deviation angle and moving speed was established through kernel density estimation and Copula functions, by which stochastic typhoon trajectories were generated. A dynamic failure probability model for transmission lines was then developed by considering the temporal evolution of wind speed, and cumulative failure probability was used to characterize the evolution of transmission line failure risk under the continuous influence of typhoons. Furthermore, the multi-order fault scenarios with temporal correlation characteristics were generated through state sampling and Monte Carlo simulation. The proposed method was validated on a practical 118-bus

收稿日期：2026-06-15；**修回日期：**2026-07-09；*.**通信联系人，**E-mail：ynyyayy@ctgu.edu.cn

基金项目：智能电网国家科技重大专项（2026ZD0809200）

作者简介：樊子豪(2003—)，男，四川广安人，硕士研究生，主要从事电力系统的机组组合研究；杨　楠(1987—)，男，湖北襄阳人，教授，博士，主要从事电力系统运行与控制、电力系统规划、电力系统的机组组合、主动配电网等研究。

引用格式：樊子豪，产雪振，杨楠，等.考虑动态故障概率的输电线路台风故障场景构建方法[J].信阳师范大学学报(自然科学版)，2026，39(4)：525-532.

Fan Zihao, Chan Xuezhen, Yang Nan, et al. Transmission line typhoon fault scenario construction method considering dynamic failure probability[J].Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2026, 39(4):525-532.

system. The results showed that the proposed method could effectively capture the variation of transmission line failure probabilities during typhoon evolution and generate fault scenarios consistent with the impact characteristics of typhoon disasters, thereby providing scenario support for power system risk assessment and resilience analysis under extreme weather conditions.

Key words: typhoon disasters; transmission line failures; joint probability distribution; fault scenarios; spatiotemporal evolution

0　引言

近年来,远距离、大容量输电系统快速发展,推动了电力系统规模的持续扩张和结构复杂度的不断提高[1-2]。与此同时,随着系统规模的持续扩大,大量输电线路及杆塔长期运行于复杂自然环境之中。受极端天气等外部因素影响,系统运行与调度面临的不确定性问题日益突出[3-4]。作为典型的高强度极端天气过程,台风具有突发性强、持续时间长及影响范围广等特点,已在全球范围内造成多起大规模停电事件[5-6]。在此背景下,构建能够同时反映台风扰动特征与设备脆弱性的故障场景,对于支撑台风灾害下电力系统运行决策[7]、提升调度决策水平以及增强电网抵御极端天气扰动的能力具有重要意义。

在台风影响分析中,众多学者已针对不同应用场景提出了多种台风风场模型。文献[8]基于经验公式建立了Batts风场模型,在考虑台风登陆后风速衰减特性的基础上描述了台风风速的空间分布。文献[9]通过求解大气动力学方程构建了Shapiro风场模型,强化了对风速演变物理机制的描述。文献[10]依据扰动平衡理论提出了解析风场模型,在保证模拟精度的同时提高了计算效率。文献[11]提出了Holland风场模型,通过引入气压梯度、最大风速半径及形状参数等变量描述不同强度台风的风速结构。针对强台风风速分布特征,文献[12]进一步改进了Holland模型,并引入多个结构参数以提高拟合精度。此外,文献[13]在海上风电场群协同紧急防御研究中,充分考虑了台风时空特性,进一步说明了准确描述台风时空演化过程对于灾害分析的重要性。

上述研究为台风风场内的风速分布计算提供了重要基础。然而,对于电力系统故障场景构建而言,风速场的获取只是前提条件,更需要明确风速变化与设备故障风险之间的作用规律[14]。现有研究大多基于静态风速场或特定时刻的风速信息开展分析,虽然已有研究结合天气信息开展了输电线路故障原因辨识[15],但对风速时序变化引起的设备故障概率演变过程考虑不足。因此,有必要建立能够反映风速演化与设备故障风险动态关联关系的故障场景建模方法。

围绕风速与电力设备故障风险之间的关系,已有学者开展了相关研究。文献[16-17]利用模糊聚类方法建立风速与输电线路故障率之间的映射关系,用于表征设备脆弱性特征;文献[18-19]分析了风速变化对停电概率的影响,为故障概率评估提供依据。然而,上述研究多基于静态风速信息,难以反映风速持续变化对设备状态的影响。

为提高故障风险描述能力,部分研究进一步引入脆弱性曲线方法,以函数形式建立风速水平与设备故障概率之间的对应关系。文献[20-22]分别构建了不同风速条件下的故障概率函数,用于反映设备抗风性能的差异。文献[23-24]进一步从设备脆弱性的角度分析了风速与故障风险之间的关系。总体来看,现有研究已经揭示了风速对输电设备故障概率的影响机制,并在设备脆弱性建模及风险评估方面取得了一定进展,但仍存在以下两方面不足:

1) 当前多数风场建模方法基于简化台风轨迹假设,通常设定台风沿匀速直线移动,难以反映实际台风传播过程中轨迹变化及路径偏移的不确定性。由于台风路径变化会直接影响风场空间分布及输电线路所受风荷载水平,固定轨迹设定难以准确刻画风致风险在空间上的分布特征,进而导致故障风险评估存在偏差。若能够综合考虑历史台风轨迹特征及气象统计规律,并借鉴多元随机变量建模思想[25],对台风路径进行随机模拟,将有助于增强风场空间结构的刻画能力,提高故障场景对台风灾害影响特征的表征精度。

2) 当前大多数研究基于单时刻风速建立设备故障概率模型,其结果反映的是设备在特定时刻的失效风险。然而,在实际台风过程中,输电设备长期暴露于持续变化的风场环境,不同时段风致作用的叠加会导致故障风险逐步累积。现有故障

概率模型主要反映特定时刻设备的失效风险，尽管已有研究关注灾害全过程模拟[26]，但对于风速持续作用下故障风险的累积过程考虑不足，仍难以描述故障概率随台风过程演变的动态变化特征。因此，在故障场景建模中引入风速时间序列，并通过累积故障概率描述风速持续作用下故障风险的累积特征，有助于提升故障场景生成的时效性与完整性。

针对现有台风故障场景建模难以同时反映轨迹随机性和故障风险动态变化的问题，提出一种考虑动态故障概率的输电线路台风故障场景构建方法。通过建立台风轨迹不确定性的故障场景模型和输电线路故障概率评估模型，结合状态抽样与Monte Carlo模拟生成多阶故障场景，实现台风灾害下线路故障风险时空演化过程的场景化表征，为后续风险评估与韧性分析提供故障场景基础。

1　台风灾害下故障场景建模

本文提出的考虑动态故障概率的输电线路台风故障场景构建方法，以历史台风数据为基础，通过台风风场建模获得风速时空分布，结合台风轨迹随机演化模拟输电线路在台风过境过程中的受灾情况，在此基础上建立输电线路动态故障概率模型，并采用状态抽样生成故障场景集。整体构建流程如图1所示。

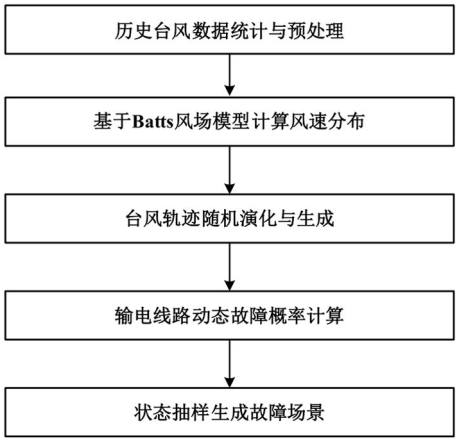


图1　输电线路台风故障场景构建流程

Fig. 1　Framework of transmission line typhoon fault scenario construction method

首先，对历史台风数据进行统计与预处理，为台风风场建模和轨迹随机演化提供基础数据；随后，利用Batts风场模型计算台风过境过程中的风速分布，并结合Copula模型生成随机台风轨迹；继而，在此基础上，建立输电线路动态故障概率模型，计算线路故障概率；最后，采用状态抽样方法生成输电线路故障场景集，为后续电力系统故障分析提供场景支撑。

1.1　台风风场模型

采用Batts风场模型描述台风风速的空间分布特征，并通过中心气压差变化表征台风强度演变规律。随着台风在陆地上的持续移动，中心气压差逐渐减小，其在时刻t的表达式为：

$$\Delta H(t)=\Delta H_0-0.02[1+\sin(\varphi-\theta)]t, \quad (1)$$

式中：$\Delta H(t)$表示时刻t的台风中心气压差；ΔH_0表示登陆前的中心气压差初始值；θ和φ分别表示台风移动方向与正北方向的夹角和海岸线方向与正北方向的夹角，定义顺时针方向为正。

基于原始中心气压差，可进一步确定对应的台风最大梯度风速，其计算表达式如下：

$$v^{gr}(t)=K\sqrt{\Delta H(t)}, \quad (2)$$

式中：$v^{gr}(t)$为台风在时刻t的最大梯度风速；K为经验系数，通常设置在北纬45°的6.93与北纬23°的6.97之间。

根据台风风场的径向分布规律，风速在最大风速半径附近达到峰值，并向内外两侧逐渐衰减。对应于最大风速半径位置的风速$v^{r\max}$可表示为：

$$v^{r\max}(t)=0.865v^{gr}(t)+0.5v^{T}, \quad (3)$$

式中：v^T为台风移动速度。

结合最大风速半径处的风速及径向衰减规律，可得到台风风场中任意位置的风速分布表达式：

$$v^r(t)=\begin{cases}v^{r\max}(t)d(t)/R^{\max}(t) & ,d(t)\leqslant R^{\max}(t),\\ v^{r\max}(t)(R^{\max}(t)/d(t))^{0.6}, & d(t)>R^{\max}(t),\end{cases} \quad (4)$$

式中：$d(t)$为该点在时刻t到台风中心的距离；$R^{\max}(t)$为在时刻t对应的台风最大风速半径，可以表示为：

$$R^{\max}(t)=\exp(2.63-5.086\times10^{-5}(\Delta H(t))^2+0.0395y(t)), \quad (5)$$

式中：$y(t)$为台风中心的纬度。

由于中心气压差与风速计算模型采用的参数单位不同，因此需对中心气压差进行单位换算，得到统一单位下的中心气压差表达式：

$$\Delta H'(t)=0.75\Delta H_0-$$

$$0.508[1+\sin(\varphi-\theta)]t。\tag{6}$$

将单位换算后的中心气压差代入最大梯度风速计算模型,并进一步结合最大风速计算模型,获得台风在各时刻对应的最大风速$v^{r\max}(t)$:

$$v^{r\max}(t)=6.029(0.75\Delta H_0-0.508(1+\sin(\varphi-\theta))t)^{\frac{1}{2}}+0.5v^T。\tag{7}$$

为便于后续轨迹更新与风场计算,将经纬度坐标转换为直角坐标系,即可得到台风中心在时刻t的坐标:

$$\begin{cases}x(t)=x_0+v^Tt\cos(-\theta+\pi/2)=x_0+v^Tt\sin\theta,\\ y(t)=y_0+v^Tt\sin(-\theta+\pi/2)=y_0+v^Tt\cos\theta,\end{cases}\tag{8}$$

式中:$x(t)$和$y(t)$分别表示时刻t台风中心的直角坐标,x_0和y_0分别表示台风登陆点的直角坐标。

因此,某处与台风中心的距离可以表示为:

$$d(t)=((x_d-(x_0+v^Tt\sin\theta))^2+(y_d-(y_0+v^Tt\cos\theta))^2)^{\frac{1}{2}}。\tag{9}$$

此外,台风的持续时间T与初始中心气压差有关,可以表示为:

$$T=1.476\Delta H_0(1+\sin(\varphi-\theta))。\tag{10}$$

台风移动过程如图 2 所示,图 2 中$d(t_1)$和$d(t_2)$分别为该线段在t_1和t_2时刻距台风中心的距离,$v^r(t_1)$和$v^r(t_2)$分别为t_1和t_2时刻的风速,$R^{\max}(t_1)$和$R^{\max}(t_2)$分别为t_1和t_2时刻的最大风速半径,$v^{r\max}(t_1)$和$v^{r\max}(t_2)$分别为t_1和t_2时刻的最大风速。

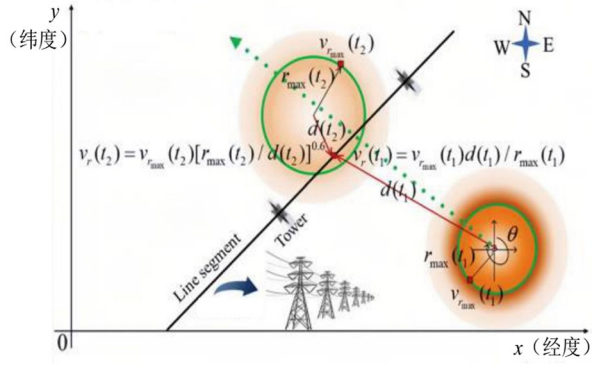


图 2　台风移动过程

Fig. 2　Typhoon movement process

1.2　台风轨迹模型

为反映台风轨迹演化的不确定性,基于历史台风数据建立偏移角与移动速度的联合概率分布模型,并采用Monte Carlo抽样方法生成虚拟台风路径。参考CnOpenData的登陆中国东南沿海某地的台风数据集,得到台风轨迹偏移角度θ'和移动速度v^T的历史数据(其中:$\theta'=\theta(t)-\theta(t-1)$),在边缘分布建模的基础上建立联合概率分布模型;随后通过随机抽样生成轨迹参数,并依据时间序列更新台风位置,最终构建虚拟台风路径。具体步骤如下:

为保证参数分布拟合的准确性,对历史台风数据进行预处理,保留登陆时风级大于12级的台风、强台风和超强台风事件,并确保参数在合理范围。在此基础上,使用非参数核密度估计法分别对台风轨迹偏移角度和移动速度进行建模。其数学表达如下:

$$\hat{f}(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\,nh}\sum_{i=1}^{n}\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_i}{h}\right)^2\right),\tag{11}$$

式中:n为样本数量,x_i表示在第i个采样点的样本数据,h为带宽。

基于已确定的边缘概率分布,利用二元Copula函数建立偏移角与移动速度的联合分布模型,其表达式如下:

$$F(x_1,x_2)=C\left(F^{x_1}(x_1),F^{x_2}(x_2)\right),\tag{12}$$

式中:$F(x_1,x_2)$为偏移角与移动速度的联合分布函数,$C(\cdot)$为连接边缘分布与联合分布的Copula函数,$F^x(x)$为各变量对应的边缘分布函数。

考虑到不同Copula函数对变量相关结构的刻画能力存在差异,采用秩相关系数法对候选Copula模型进行优选,以Kendall秩相关系数和Spearman秩相关系数为评价指标,通过比较模型计算结果与样本统计量之间的偏差评估拟合效果。偏差越小,表明模型对变量相关性的描述越准确,相应Copula函数的拟合性能越优。Kendall秩相关系数ρ^k、Spearman秩相关系数ρ^s的计算公式分别为:

$$\begin{cases}\rho^k=\dfrac{2(a-b)}{N(N-1)},\\ \rho^s=\dfrac{\sum_{i=1}^{N}(c_i-\bar{c})(d_i-\bar{d})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(c_i-\bar{c})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(d_i-\bar{d})^2}},\end{cases}\tag{13}$$

式中:a为具有一致性的样本对数,b为具有不一致性的样本对数,N为采样点的总个数,c_i和d_i分别为单一变量采样点在其样本集合中的秩,

$\bar{c}=\sum_{i=1}^{N}c_i/N,\bar{d}=\sum_{i=1}^{N}d_i/N$。

基于确定的联合概率分布模型，采用Monte Carlo随机抽样生成各时段的轨迹参数，并依据时间序列逐步更新台风中心位置，从而构建能够表征台风过境过程的虚拟台风路径。

1.3　输电线路故障模型

在台风灾害作用下，输电线路及杆塔通常是电力系统中故障最为集中的环节，其失效风险受风速时空变化的影响显著。由于变压器和电缆受到台风风场直接作用的程度相对有限，本文重点关注输电线路及杆塔的故障特性。考虑到长距离输电支路沿线风速分布并不均匀，为反映不同区段所承受的风荷载差异，将输电支路划分为若干由相邻杆塔连接的线路段，如图2所示，并采用线路—杆塔串联系统进行建模。

考虑到台风移动会引起风场分布持续变化，进而影响输电线路故障风险的时空演化过程，本文构建随台风传播动态变化的线路脆弱性模型，并以此求取台风持续时间T内的累积故障概率。

第m条输电支路中第k个杆塔在时刻t的故障率$\lambda_{m,k,t}$可表示为：

$$\lambda_{m,k,t}=\begin{cases}0, v_{m,k,t}<v^{\text{tower}},\\ \exp(\zeta(v_{m,k,t}-2v^{\text{tower}})), v^{\text{tower}}\leqslant v_{m,k,t}<2v^{\text{tower}},\\ 1, v_{m,k,t}\geqslant 2v^{\text{tower}},\end{cases}\tag{14}$$

式中：$v_{m,k,t}$为第m条输电支路中第k个杆塔在时刻t的风速，v^{tower}为杆塔能承受的最大风速，ζ为脆弱性曲线的参数(取0.20)。

由于不同位置的风速难以表示为时间的连续函数，基于积分理论，将台风总持续时间T划分为N个短周期。在每个时间间隔内，认为风速及对应故障率保持不变，据此可计算第m条输电支路中第k个杆塔在周期T内的累积故障概率为：

$$p_{m,k}=1-\exp\{-\int_0^T[\lambda_{m,k}/(1-\lambda_{m,k})]\mathrm{d}t\}=1-\exp\{-\sum_{i=0}^{N-1}[\lambda_{m,k,t}/(1-\lambda_{m,k,t})]\Delta t\},\tag{15}$$

式中：N为较短周期的总数；Δt为较短周期的时间间隔，取1 h为1个周期。

第m条输电支路中第l条线路在时刻t的故障率$\lambda_{m,l,t}$可表示为：

$$\lambda_{m,l,t}=\begin{cases}0, v_{m,l,t}<v^{\text{line}},\\ \exp(\beta v_{m,l,t}/v^{\text{line}})-2.1479,\\ \quad v^{\text{line}}\leqslant v_{m,l,t}<1.5v^{\text{line}},\\ 1, v_{m,l,t}\geqslant 1.5v^{\text{line}},\end{cases}\tag{16}$$

式中：$v_{m,l,t}$为第m条输电支路中第l条线路在时刻t的风速，v^{line}为线路能承受的最大风速，β为脆弱性曲线的参数(取0.76)。

因此，在台风持续时间T内，第m条输电支路中第l条线路的累积故障概率由下式给出：

$$p_{m,l}=1-\exp(-\int_0^T\lambda_{m,l}\mathrm{d}t)=1-\exp(-\sum_{i=0}^{N-1}\lambda_{m,l,t}\Delta t)。\tag{17}$$

考虑输电线路与杆塔之间的串联关系，当任一杆塔或线路发生故障时，均会导致对应支路失效。在杆塔故障与线路故障相互独立的假设下，可依据串联系统可靠性模型求取第m条输电支路的故障概率，其计算公式如下：

$$p_m=1-\prod_{k=1}^{K}(1-p_{m,k})\prod_{l=1}^{L}(1-p_{m,l}),\tag{18}$$

式中：K为第m条输电支路中杆塔的总数，L为第m条输电支路中线路的总数。

2　故障场景集的构建

根据输电线路的时序故障率，采用状态抽样和Monte Carlo随机模拟方法生成故障场景。假设系统由m条输电线路组成，X_k代表线路k的状态，则$z=(X_1,\cdots,X_k,\cdots,X_m)$。电网故障状态$z$取决于线路的状态组合，因此确定每条线路的状态即可确定电网故障状态z。在获得线路故障概率后，采用Monte Carlo随机模拟方法对线路状态进行抽样。假定线路仅具有正常运行和故障两种状态，且各线路故障事件彼此独立。对于每条线路，生成一个取值范围为[0,1]均匀随机数Y_k，并结合对应故障概率确定其状态：

$$X_k=\begin{cases}1, & 1\geqslant Y_k>p_m,\\ 0, & p_m\geqslant Y_k\geqslant 0。\end{cases}\tag{19}$$

状态抽样法抽取m个随机数$Y_1,\cdots,Y_k,\cdots,Y_m$，即可确定一个故障场景$z=(X_1,\cdots,X_k,\cdots,X_m)$；通过重复执行上述状态抽样过程，可生成由$N$个故障场景构成的场景集$Z=\{z_1,z_2,\cdots,z_N\}$，用于表征台风灾害下输电线路故障的不确定性。

3　算例仿真

3.1　参数设置

以某实际118节点系统为例,对模型进行仿真验证,其网架结构如图3所示。台风场景参数依据2018年登陆我国东南沿海地区的台风“山竹”历史资料设定。其中,台风登陆位置为112.5°E、21.9°N,初始中心气压差为58 hPa,移动速度为30 km/h,移动方向为西北方向,与正北方向夹角为67.5°,仿真时间步长设置为15 min。所有仿真均在Matlab R2022平台下完成,并调用Cplex求解器进行计算。计算设备配置为2.50 GHz处理器和24 GB内存。

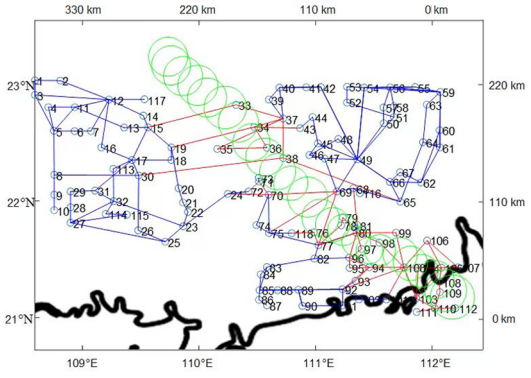


图3　某实际118节点系统网架结构

Fig. 3　Network topology of a practical 118-bus system

3.2　仿真结果

基于偏移角与移动速度的历史样本数据,利用4种二元Copula函数构建联合分布模型,并依次计算各个Copula函数的Kendall秩ρ^k、Spearman秩ρ^s,结果见表1。

表1　各Copula函数的相关系数

Tab. 1　Correlation coefficients of different Copula functions

Copula函数	Kendall秩	Spearman秩
Gaussian-Copula	0.023 657	0.035 480
Gumbel-Copula	0.000 001	0.000 002
Clayton-Copula	0.050 244	0.075 442
Frank-Copula	0.032 024	0.048 023
样本数据	0.032 276	0.046 258

根据表1的比较结果,Frank-Copula计算得到的秩相关系数与样本统计值最为接近,说明其能够较好地反映变量间的依赖结构。与此同时,Frank-Copula兼具正相关和负相关关系的刻画能力,而台风受地形作用发生路径偏移时,偏移角与移动速度之间呈较弱的正相关特征。因此,选择Frank-Copula构建联合分布模型,以提高对变量相关性的拟合效果。

使用Monte Carlo随机抽样对拟合出的联合概率密度函数抽取28组数据作为台风7 h的移动参数,最终形成一条虚拟台风轨迹,利用Batts台风风场模型获得输电线路在台风过境过程中的风速时序分布,并结合线路脆弱性模型计算对应时刻的故障概率,从而表征故障风险随台风演化的动态变化过程,其结果如图4所示。进一步考虑故障概率的累积效应,利用串联故障概率模型得到线路的累积故障概率,如图5所示。

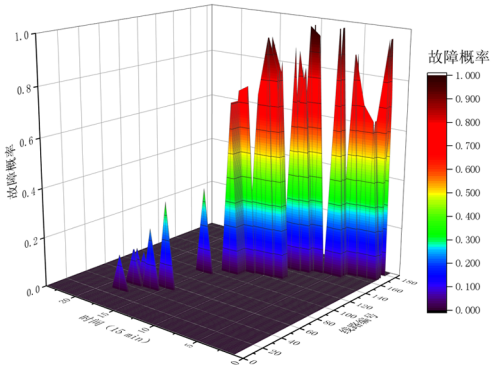


图4　各线路实时故障概率

Fig. 4　Real-time failure probabilities of transmission lines

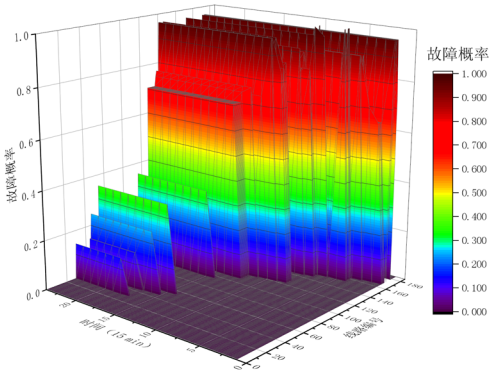


图5　各线路累积故障概率

Fig. 5　Cumulative failure probabilities of transmission lines

从图4和图5可以看出,台风登陆初期,靠近台风中心及最大风速半径区域的输电线路故障概率迅速增大;随着台风登陆后中心气压差变化和最大风速降低,线路实时故障概率逐渐下降,整体呈现单峰变化特征。与此同时,累积故障概率随风速持续作用不断增加,但增长速率逐渐减缓,表明输电线路故障风险具有明显的动态累积特征。

故障线路主要集中于台风最大风速半径附近,空间分布相对集中,易形成群发性故障并诱发高阶N-K故障场景。图6给出了基于状态抽样和Monte Carlo模拟生成的故障阶数概率分布,可以看出,在该台风灾害场景下,系统发生中高阶故障的概率较高,而更高阶故障及无故障状态的发生概率相对较低。

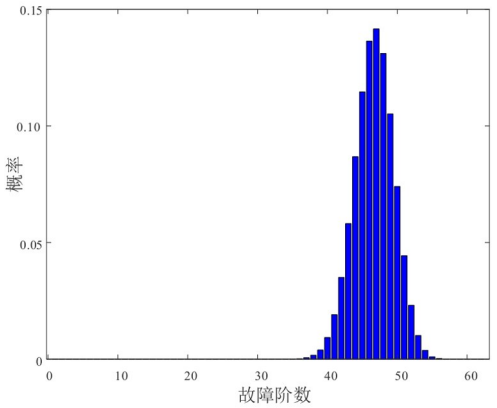


图6　故障阶数概率分布

Fig. 6　Probability distribution of fault orders

4　结束语

针对台风灾害下故障场景构建过程中难以兼顾台风轨迹随机性和故障风险动态变化的问题,提出了一种考虑动态故障概率的输电线路台风故障场景构建方法,主要结论如下:

1)基于台风轨迹偏移角与移动速度的联合概率模型,实现了台风路径的随机模拟。

2)考虑累积故障概率的输电线路动态故障概率模型,结合风速时序的变化特征,较好地描述了台风持续作用下输电线路故障风险的变化过程。

3)本文方法通过结合动态故障概率模型、状态抽样及Monte Carlo随机模拟,充分反映了台风轨迹随机变化及风速持续作用对线路故障风险的影响。相较于采用固定故障概率的场景构建方法,能够更准确地描述台风发展过程中线路故障状态的动态变化。

该方法主要是从风速作用角度对线路故障风险进行建模,后续研究将进一步考虑地形与设备脆弱性等因素对故障风险的影响。

参考文献:

[1] 吴勇军, 薛禹胜, 谢云云, 等. 台风及暴雨对电网故障率的时空影响[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(2): 20-29, 83.
[2] 雷小途, 徐明, 任福民. 全球变暖对台风活动影响的研究进展[J]. 气象学报, 2009, 67(5): 679-688.
[3] 陈佩燕, 杨玉华, 雷小途, 等. 我国台风灾害成因分析及灾情预估[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(1): 64-73.
[4] 姜涛, 唐少南, 李雪, 等. 应对台风影响的海岛微网群韧性全过程提升[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6625-6640.
[5] 张金龙, 张衡, 程浩忠, 等. 考虑台风时空演变的风电容量可信度评估方法[J]. 电力建设, 2024, 45(8): 75-84.
[6] 杨楠, 黄禹, 董邦天, 等. 基于多主体博弈的电力-天然气综合能源系统联合规划方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6521-6532.
[7] 杨楠, 产雪振, 张志, 等. 台风灾害下考虑源-网-荷协同优化的SCUC复合决策方法[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(10): 33-44.
[8] Batts M E, Simiu E, Russell L R. Hurricane wind speeds in the United States[J]. Journal of the Structural Division, 1980, 106(10): 2001-2016.
[9] Shapiro L J. The asymmetric boundary layer flow under a translating hurricane [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1983, 40(8): 1984-1998.
[10] Meng Yan, Matsui M, Hibi K. An analytical model for simulation of the wind field in a typhoon boundary layer[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995, 56(2/3): 291-310.
[11] Holland G J. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes[J]. Monthly Weather Review, 1980, 108(8): 1212-1218.
[12] 杨万康, 尹宝树, 伊小飞, 等. 基于Holland风场的台风浪数值计算[J]. 水利水运工程学报, 2017(4): 28-34.
[13] 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.
[14] 杨楠, 郝俊聪, 产雪振, 等. 数据驱动的考虑安全约束机组组合问题研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(9): 3654-3668.
[15] 林丰恺, 王建, 赵启, 等. 基于多模态残差网络融合波形与天气信息的输电线路故障原因辨识方法[J]. 电力系统保

护与控制, 2025, 53(20): 23-33.
[16] Liu Yong, Singh C. A methodology for evaluation of hurricane impact on composite power system reliability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 145-152.
[17] Li Wenyuan, Zhou Jiaqi, Xiong Xiaofu. Fuzzy models of overhead power line weather-related outages[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1529-1531.
[18] Liu Haibin, Davidson R A, Rosowsky D V, et al. Negative binomial regression of electric power outages in hurricanes [J]. Journal of Infrastructure Systems, 2005, 11(4): 258-267.
[19] Han S R, Guikema S D, Quiring S M, et al. Estimating the spatial distribution of power outages during hurricanes in the gulf coast region[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(2): 199-210.
[20] Panteli M, Mancarella P. Operational resilience assessment of power systems under extreme weather and loading conditions [C]//2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. July 26-30, 2015, Denver, CO, USA. Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 1-5.
[21] Panteli M, Trakas D N, Mancarella P, et al. Boosting the power grid resilience to extreme weather events using defensive islanding[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6): 2913-2922.
[22] Panteli M, Pickering C, Wilkinson S, et al. Power system resilience to extreme weather: fragility modeling, probabilistic impact assessment, and adaptation measures[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3747-3757.
[23] Wang Chong, Hou Yunhe, Qiu Feng, et al. Resilience enhancement with sequentially proactive operation strategies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 2847-2857.
[24] Li Gengfeng, Zhang Peng, Luh P B, et al. Risk analysis for distribution systems in the northeast U. S. under wind storms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 889-898.
[25] 张志, 郝俊聪, 产雪振, 等. 台风灾害下考虑多元随机变量的分布式鲁棒优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2026, 54(7): 162-173.
[26] 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.

责任编辑:张伟博　王　萍