

极端环境下基于NSGA-III算法的配电网输电线单设备预防维护研究

陈俞喆, 刘勤明, 叶春明, 汪宇杰

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2025年7月27日; 录用日期: 2025年8月19日; 发布日期: 2025年8月27日

摘要

针对配电网输电线在极端条件下的性能退化问题, 以台风条件为例提出了一种考虑维护阈值的单设备输电线维护策略优化模型。该模型首先基于历史台风数据分析台风风场分布特征, 建立了融合风速衰减效应与城市建筑扰动的优化Rankine台风风场模型, 用以计算输电线承受的风速载荷。其次, 根据输电线路金属构件在风速载荷下的形变程度, 结合金属形变理论构建了输电线的动态故障率模型。进而, 考虑输电线动态故障率的最大值约束, 构建了分段维护策略模型; 同时, 依据输电线维护的通用措施及成本, 引入了输电线维护成本和维护加固水平作为决策目标, 建立了联合优化模型。最后, 运用NSGA-III算法对模型进行求解, 并通过算例分析验证模型的有效性, 与非分段维护策略模型进行对比。结果表明, 本文所提模型具有更优越的维护决策优化能力, 有助于配电网系统降低维护成本并提升运行安全性。

关键词

输电线设备维护, 极端天气, 维护阈值, 台风模型, NSGA-III

Research on Preventive Maintenance Strategy for Single Equipment of Distribution Network Transmission Lines Based on NSGA-III Algorithm in Extreme Environments

Yuzhe Chen, Qinming Liu, Chunming Ye, Yujie Wang

Business School of University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jul. 27th, 2025; accepted: Aug. 19th, 2025; published: Aug. 27th, 2025

文章引用: 陈俞喆, 刘勤明, 叶春明, 汪宇杰. 极端环境下基于 NSGA-III 算法的配电网输电线单设备预防维护研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(8): 361-372. DOI: 10.12677/mos.2025.148574

Abstract

In response to the performance degradation problem of distribution network transmission lines under extreme conditions, taking typhoon conditions as an example, a single device transmission line maintenance strategy optimization model considering maintenance thresholds was proposed. The model firstly analyzed the distribution characteristics of typhoon wind field based on historical typhoon data, and established an optimized Rankine typhoon wind field model that integrated wind speed attenuation effect and urban building disturbance to calculate the wind speed load borne by transmission lines. Secondly, considering the deformation degree of metal components of transmission lines under wind speed loads, a dynamic failure rate model of transmission lines was constructed in combination with metal deformation theory. Furthermore, considering the maximum constraint on the dynamic failure rate of transmission lines, a segmented maintenance strategy model was constructed. At the same time, using the general measures and costs of transmission line maintenance, the maintenance cost and reinforcement level of transmission lines were introduced as decision-making objectives, and a joint optimization model was established. Finally, the NSGA-III algorithm was used to solve the model and the effectiveness of the model was verified through case analysis, comparing with the non-segmented maintenance strategy model. The results indicated that the model proposed in this article had superior maintenance decision optimization capabilities, which can help reduce maintenance costs and improve operational safety in distribution network systems.

Keywords

Transmission Line Equipment Maintenance, Extreme Weather Conditions, Maintain Threshold, Typhoon Model, NSGA-III

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全球气候变化加剧导致台风等极端天气频发且增强,对我国东南沿海这一台风重灾区的配电网输电线路构成严重威胁。因此,台风来临前的预防性维护策略至关重要。

现有研究主要集中在操作层面,即关注在应对台风时的具体维护操作。张勇等梳理了我国沿海地区热带气旋资料,探讨了电网防风规划及灾害时的运行状况,并提出了防风措施,如台风登录时电网调度和事故处理原则[1]。黄志都等基于2008至2017年广西电网台风数据,分析了影响电网运行的主要因素,并研究了超强台风“威尔逊”和强台风“海鸥”的环流背景及特征,为广西电网防风措施提供了依据[2]。张锋等介绍了超强台风“云娜”破坏浙江电网的过程及调度工作人员的决策处理,提出了电网工作人员应对台风灾害的有效方法[3]。这些研究推动了电网工作者开展预警方法和防风减灾研究,保障了电力系统的稳定运行。然而,这些研究往往忽视了维护策略的重要性,未能从策略层面进行深入探讨。

在研究台风对电力系统的影响时,通常会引用台风风场模型来模拟台风在地面形成的风场,进而获得设备在风场内受到的风力,并据此分析风力对设备的影响。目前,风险评估中广泛采用的台风风场模型根据参数的不同,可以分为全数值、半经验半数值和全经验三类参数化模型[4]。例如,WRF (Weather Research and Forecasting Model)和MM5等大气模式全数值模型,虽然基于更准确的动力学原理,但由于

计算数据量庞大,在进行台风轨迹随机模拟时实用性较低[5]。相比之下,参数化模型通过有限参数对台风发展过程进行建模,具有较高的计算效率和准确描述气旋内风场的优点,主要包括 Georgiou 模型[6]、Rankine 模型[7]和 Batts 模型[8]。

在输电线路停运建模方面,现有研究多借助统计学手段分析整理数据。针对台风灾害下输电线路的四种故障情况[9],运用指数函数拟合不同故障情形下输电线路故障率与风速及线路参数的关联。通过回归方法构建广义线性模型,确立 $\log(y)$ 与风速的线性关系,其中 y 代表飓风期间的线路停运故障次数[10][11],据此预测飓风来袭时线路的停运故障次数。基于 North Carolina 的历史台风数据,采用负二项回归模型搭建风速与停运率的关系模型。现有相对准确的预测是基于受力条件下的故障率模型是根据金属材料疲劳损伤累积理论,当架空线路承受的作用力超过其耐受极限时,其承受能力会随应变的增加而呈指数态势迅速减少,最终导致输电线路故障,借此提出了一种输电线与故障率关系模型[12]。

本研究通过动态解析气象局发布的 24 小时台风路径预报数据,采用时空插值技术将预测时间步长压缩至分钟级。在传统 Rankine 台风风场模型基础上,结合建筑群风场遮蔽效应与湍流特性修正台风核心区风速分布,提出一种融合城市建筑扰动的精细化台风模型。基于金属材料疲劳损伤累积理论,建立台风动态风压与输电线应力形变的映射关系,实时评估不同地理坐标点位的输电线路故障概率。当预测周期内某区段故障概率最大值超越安全阈值时,系统触发分段维护决策机制。综合考虑维护成本、维护加固水平,构建以最小化维护成本和最大化维护加固水平为双目标的混合维护模型。采用 NSGA-III 算法求解 Pareto 最优解集,从非支配解中筛选最佳分段维护阈值,最终实现台风灾害下配电网风险防控与经济性的动态平衡。

2. 问题描述

本文以台风条件下配电网输电线系统为研究对象。基于对台风致灾机制的分析,考虑到台风灾害影响具有显著的空间异质性——不同地理位置的输电线段受台风带来的极端风荷载威胁的程度存在显著差异。为高效应对这种差异性风险,本文提出并采用了一种“分段式维护策略”。该策略的核心在于:依据台风路径模拟、台风风场模拟,将输电线网络进行精细化风险区划,进而针对划分后的不同区段,差异化地配置技术手段。

3. 数学模型

3.1. 台风路径预测

考虑地形对台风移动的制约,台风在一小时内的运动方向和速度通常相对稳定,不会发生突变。因此,可合理假设台风在一小时内移动方向 θ 只发生微小的变化和台风中心移动速度 v_0 保持恒定。在计算台风中心移动速度 v_0 时,假设 T 时刻和 $T+1$ 时刻预测点的台风实况信息 $O_T(x_T, y_T)$ 和 $O_{T+1}(x_{T+1}, y_{T+1})$ 之间的移动路径可以用保持方向 θ_T^{T+1} 的直线表示。移动距离可以基于球面三角学原理,通过考虑两点间的纬度和经度差异,计算两点纬度的正弦值乘积以及两点纬度的余弦值乘积与经度差的余弦值的乘积之和。随后,对该和取反余弦值以获得两点间的球面角。最后,将该角度乘以球体半径 R ,得到两点间的大圆距离 L 。

$$L_T^{T+1} = R \arccos[\sin y_T \sin y_{T+1} + \cos y_T \cos y_{T+1} \cos(x_{T+1} - x_T)] \quad (1)$$

其中, L_T^{T+1} 表示 T 时刻到 $T+1$ 时刻台风的路径距离, R 为地球的平均半径,通常取 6371 公里。

位置点 $P(x, y)$ 在 t 时刻和台风中心 $O_t(x_t, y_t)$ 的距离同样可以用球面三角学原理计算。

在假设台风中心在两个连续观测时刻之间的速度和移动角度保持不变的情况下, T 时刻到 $T+1$ 时刻

台风的移动速度 v_0^T ，可以通过以下公式计算两个时刻之间的平均移动速度：

$$L_T^{T+1} = v_0^T ((T+1) - T) \quad (2)$$

为了获得更精确的台风数据，气象局提供的 1 小时的时间步长过于宽泛，考虑在 T 时刻到 $T+1$ 时刻之间加入设定的时间步长 t_0 （设定 $t = T + nt_0$ （ $n=1,2,3,\dots,m$ ， $mt_0 < 1\text{ h}$ ）， t 时刻的台风中心坐标为 $O_t(x_t, y_t)$ ，根据 t 时刻前后气象局所提供的 $O_T(x_T, y_T)$ 和 $O_{T+1}(x_{T+1}, y_{T+1})$ 台风中心坐标信息， t 时刻的台风中心坐标如下[13]：

$$\begin{cases} y_t = y_T + \frac{|O_T O_t|}{|O_T O_{T+1}|} (y_{T+1} - y_T) \\ x_t = x_T + \frac{|O_T O_t|}{|O_T O_{T+1}|} \frac{\cos(y_{T+1})}{\cos(y_t)} (x_{T+1} - x_T) \end{cases} \quad (3)$$

3.2. 台风风速分布模型

最大风速半径 $R_{\max}$ 是研究台风风场分布的关键参数，但由于其不确定性，气象台的观测点难以准确预测。现有研究主要采用径向压力分布公式量化 $R_{\max}$ 。

$$p = p_c + (p_n - p_c) \exp \left(- \left(\frac{R_{\max}}{r} \right)^\beta \right)$$

其中， p 表示观测点气压值， p_c 表示台风中心气压值， p_n 表示远离台风时的环境气压，通常取 1010 hPa， r 表示观测点到台风中心的距离， β 表示台风气压分布系数，取值范围在 1.0~2.5，根据 Yasui *et al.* 等[14] 对香港地区的台风进行研究的过程中，给出了相似地形的。该公式利用台风中心的气压分布计算最大风速半径，考虑了台风内部动力学特性和环境条件的影响。径向压力分布公式已在热带气旋风速分布研究中得到广泛应用和验证。因此，最大风速半径模型如下：

$$R_{\max} = L_p \left[-\ln \left(\frac{p - p_c}{p_n - p_c} \right) \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (4)$$

位置点 $P(x, y)$ 台风在 t 时刻的整体风速模型通常由两部分组成：台风的移动风场模型和台风的旋转风场模型。移动风场模型主要描述台风整体随时间移动时风速的分布情况。旋转风场模型则侧重于描述台风内部风速的旋转分布，尤其是台风眼附近的强风区域。因此，台风的在 t 时刻整体风速模型为：

$$v_p^t = v_d^t + v_r^t \quad (5)$$

其中， v_p^t 表示位置点 P 在 t 时刻受到的台风整体风速， v_d^t 表示位置点 P 在 t 时刻受到的台风移动风速， v_r^t 表示位置点 P 在 t 时刻受到的台风旋转风速。

在本研究中，选择宫崎正卫模型来进行台风移动风速的预测，则 t 时刻位置点 p 的移动风速为：

$$v_d^t = v_0^t \exp \left(- \frac{\pi L_p^t}{10 R_{\max}} \right) \quad (6)$$

其中， v_d 代表当前场点的移动风速(单位：m/s)； v_0 表示台风中心的移动速度； $R_{\max}$ 是台风的最大风速半径(单位：km)，即台风的最大风圈半径。

本研究采用的旋转风场模拟方法基于 Rankine 模型，该模型通过构建轴对称涡旋结构表征热带气旋的径向风速分布特征。其核心理论假设气旋系统呈理想化圆形对称形态，采用分段函数描述风速随距气

旋中心距离的演变规律。该模型通过划分临界半径(即最大风速半径 $R_{\max}$)构建二维结构区划体系:当目标点与台风中心的间距处于最大风速半径范围内时,属于气旋的内核区域,此时风速与半径呈正比例关系;当间距超出临界半径时,则归为外核区域,风速随半径增大呈反比例衰减。这种双区段数学表征模式,通过指数函数调节过渡区域的风速变化梯度,实现了对台风核心强风区与外围衰减区的系统性数学建模。但 Rankine 涡旋模型在描述台风风场结构时存在双重局限:其一,物理机制层面未能整合关键动力学要素;其二,数学表征层面过度简化风速衰减规律。台风风速径向分布本质上受控于气压梯度力与科里奥利力的动态平衡,同时受海气界面能量交换(如海洋热通量)、下垫面摩擦耗散等环境因素的显著调制。而原模型仅通过线性分段函数建立风速-半径关系,未体现环境因子对湍流动能输送的影响。

考虑城市建筑群通过多重物理机制改变台风风场动力结构,为定量表征这种衰减效应,在原有基础上引入形态衰减因子 ∂ 。该因子基于城市边界层动力学和台风与建筑群相互作用的多重机制。根据 Martilli 提出的城市冠层模型理论[15],建筑群通过增加表面粗糙度和产生拖曳力显著改变近地面风场结构,这一过程可表述为指数衰减形式,同时考虑建筑高度与阻力关系为 $\frac{C_d(\xi)}{h(\xi)}$,粗糙子层内风速廓线的对数律特

征为 $\frac{z}{z_0(\xi)}$,积分项则可以反映了沿台风路径的动量损失累积效应。

$$\partial(L'_p, z) = \exp \left[- \int_{r_0}^r \frac{C_d(\xi)}{h(\xi)} \frac{z}{z_0(\xi)} d\xi \right]$$

其中, $C_d(\xi)$ 表示位置 ξ 处的建筑拖曳系数, $h(\xi)$ 表示位置 ξ 处的建筑物平均高度, $z_0(\xi)$ 表示位置 ξ 处的城市粗糙长度, r 表示台风的半径。

综上考虑,坐标点 $P(x, y)$ 在 t 时刻受到的风速为:

$$v'_p = \begin{cases} v'_0 e^{-\frac{\pi L'_p}{10 R_{\max}}} + \partial(L'_p, z) v_{\max} \left(\frac{L'_p}{R_{\max}} \right)^k \exp \left(- \frac{L'_p}{R_{\max}} \right) & L'_p \leq R_{\max} \\ v'_0 e^{-\frac{\pi L'_p}{10 R_{\max}}} + \partial(L'_p, z) V_{\max} \left(\frac{R_{\max}}{L'_p} \right)^m \exp \left(- \frac{L'_p - R_{\max}}{R_c} \right) & L'_p \geq R_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

其中, k, m 为区域特征参数,分别表征眼墙区和外围区的动量传输效率。设置无量纲缓冲系数物理量,其中 $e^{-\left(\frac{L'_p}{R_{\max}}\right)}$ 控制眼墙区湍流耗散强度, $e^{-\left(\frac{L'_p - R_{\max}}{R_c}\right)}$ 反映外围区环境风场耦合效应。

3.3. 台风条件下输电线故障率模型

在台风条件下,台风引发的强风载荷是诱发架空输电线路故障的主要致因。从材料力学角度分析,输电线路作为弹性体存在确定的机械载荷耐受极限,当外部风致应力超过该阈值时,其结构承载能力将遵循非线性衰减规律:随着塑性应变的累积,材料抵抗变形的能力呈指数函数形式急剧衰减,这一力学失稳过程将导致线路发生不可逆的结构失效,进而引发输电系统的功能性故障。本文采用杨毅豪等在2019年依据金属形变理论提出的输电线故障率模型[16]:

$$\lambda_p(t) = e^{\left[\frac{0.6931(v'_t - v_d)}{v_d} \right]} - 1 \quad (8)$$

3.4. 台风条件下输电线维护模型

极端天气下的维护策略应只考虑一次维护机会。这意味着在维护资源有限且作业环境恶劣的情况下,

维护决策需要更加谨慎和精准。为了有效应对台风对输电线路的影响,维护策略可分为小修、大修两种类型。(1) 小修策略,维护阈值为 $[0.08, \lambda_r]$ 。主要包括无人机巡检和输电线路部分加固。无人机巡检能够快速、高效地对输电线路进行全方位检查,及时发现潜在的故障隐患。通过无人机搭载的高清摄像头和传感器,可以对输电线路的绝缘子、导线连接点等关键部位进行精准检测,及时发现如绝缘子破损、导线磨损等问题。同时,对输电线路的部分薄弱环节进行加固,如对易受风力影响的导线支撑点进行加固处理,能够有效提高输电线路的抗风能力,降低故障发生的概率。(2) 大修策略,维护阈值为 $[\lambda_r, 1]$ 。主要包括对输电线路整档进行加固,这种策略适用于输电线路故障风险较高、小修难以有效解决问题的情况。整档加固可以全面提升输电线路的结构强度和稳定性,使其能够更好地抵御台风等极端气象条件的侵袭。

在设备可靠性工程中,维护策略的调整会触发成本传导机制。具体而言,当维护阈值设置过高时,设备在高维护阈值范围内将面临更高的故障率。这不仅增加了设备的故障风险,还会导致维护策略成本的显著提升。因为小修的工作内容主要在于对输电线路两档进行加固,破损的地方进行修补。输电线路的加固费用为固定值 β ,依据 IEEE Std 493-2007 (Gold Book)中提出的修补的费用会随着故障率的增大而呈线性变化[17],并给出部分地区参数 α (边际成本)的具体数值,考虑到输电线路小修成本会随着故障率的变化成线性递增,因此小修的成本为:

$$C_s(\rho) = \alpha(\rho - 0.08) + \beta$$

其中, α 为边际成本, β 为启动小修的基本费用。

输电线路整档加固的成本会随着预测故障率最大值的增大而显著增加,根据 IEC 60300-3-11 (2018)[18]中提出的重大维修成本应符合指数模型,高故障率的情况下,设备共同出现故障的可能性越高,因此高故障率情况下,更换和维修所需的成本也会大幅增长。美国 PJM 电网案例[19]显示,当处于大修范围时,大修成本增长规律为 ke^{ρ} 形式,系数 $k \in (1.05, 1.25)$ 。因此大修的成本为:

$$C_b(\rho) = \gamma e^{\rho - 0.08} + \delta$$

其中, γ 为大修成本基数, δ 为启动大修的基本费用。

为了提高维护策略成本的可视化程度,采用区域平均维护费用(AAC)对成本进行量化。模型如下:

$$AAC = \frac{\sum_{i=1}^{P_n} \{C_s, C_b\}}{n}$$

在台风气象条件下,为实现输电线路维护的高效性和经济性,本文考虑了基于维护加固水平约束[20]的维护策略。维修加固水平是指在输电线路加固过程中所达到的加固程度,以及对各项维修资源所发挥的技术作用和设备维护程度进行综合评价的指标,它直接决定了输电线路在维护后的抗风性能。具体而言,经济水平越高(低),维修加固水平越高(低),输电线路在台风等极端天气条件下的抗风能力越强(弱)。因此,通过设定维修加固水平约束,可以在有限的时间和资源条件下,通过合理的维护措施,使输电线路的抗风能力达到预定的安全标准,也保证在极端天气下资源的有效利用。

$$E_{P_i} = \left(P^x G^y T^z \right) \left(C_{P_i} \sum_{k=1}^m M_{k, P_i} \sum_{j=1}^w W_{j, P_i} \right)^z$$

其中, P 为人工维修水平, G 为物力维修水平, T 为技术维修水平, C_T 表示对维修的财力投入量, M_k 表示第 k 类的人力资源维修中的投入量, W_j 表示第 j 类的物力资源在维修中的投入量, x 为人力资源在维修中的重要性程度, y 为物力资源在维修中的重要性程度, z 为技术资源在维修中的重要性程度。

为了提高维护加固水平的可视化程度,采用区域平均维护加固水平(MML)进行量化。模型如下:

$$MML = \frac{\sum_{P_n}^{P_n} (P^x G^y T^z) \left(C_{P_i} \sum_{k=1}^m M_{k,P_i} \sum_{j=1}^w W_{j,P_i} \right)^z}{n}$$

4. NSGA-III 算法

本文以最小化维护成本($f_1 = \min AAC$)和最大化维护加固水平($f_2 = \max MML$)为目标，维护阈值(λ_1, λ_2)为输出构建台风条件下考虑配电网输电线维护策略的双目标优化模型。

本研究采用 NSGA-III 算法优化台风灾害下的分段维护策略：首先初始化维护阈值 $\lambda_r = 0.2$ 、维护成本以及维护加固水平，并设定进化代数 $Gen = 0$ ；随后启动分层优化机制(Front = 1)，通过非支配排序识别当前前沿解集，赋予虚拟适应度值后引入基于三角共享函数的小生境技术维持种群多样性；基于共享适应度执行选择，采用模拟二进制交叉和多项式变异生成子代；每完成一层前沿分级即计算全局目标函数——维护成本总和 $\sum_{P_i}^{P_n} \{C_s, C_b\}$ 与维护加固水平总和 $\sum_{P_i}^{P_n} E$ ；循环递增前沿层级直至种群全部分级完成，最终当 Gen 达到最大进化代数时输出 Pareto 最优解集，实现维护成本与安全加固水平的动态权衡优化。

5. 算例分析

5.1. 数据准备

从中国气象网调取 2022 年期间所有的台风数据。经过整理，相关数据如表 1 所示：

Table 1. Typhoon data in 2022

表 1. 2022 年台风数据

时间点	经度	纬度	最大风速(m/s)	台风中心气压(hpa)	台风名称
2022-04-07 08:00:00	148.5	39	13	1002	Malakas
2022-04-07 14:00:00	147.6	4	13	1002	Malakas
2022-04-07 20:00:00	147	4.2	15	1000	Malakas
...	...	...	...	...	...
2022-12-13 14:00:00	132.1	18	13	1004	Pakhar

以上海地区为例，调选出对上海造成影响的台风数据，并调取上海市 11 个气象观测点在台风入侵时间内的气象数据，其中，一个时间点三个观测点为例的气象观测数据，如 2 所示。基于气象数据，筛选出风速(v')数据，如表 2 所示：

Table 2. Wind speed data from Shanghai meteorological station in 2022

表 2. 2022 年上海气象站风速数据

时间点	站点	风速(m/s)
2022-09-14 20:00:00	58361	2
2022-09-14 20:00:00	58362	10.3
2022-09-14 20:00:00	58365	6.3

以上海地区为例，设置形态衰减因子参数如表 3 所示：

Table 3. Morphological attenuation factor parameter
表 3. 形态衰减因子参数

参数	数值
r_0	0
r	350,000
C_d	0.6
h	70
z_0	2
z	10

5.2. 城市台风风速分布模型拟合

本文结合气象网提供的台风路径信息(包含经纬度、最大风速 $v_{\max}$ 、台风中心气压), 计算出台风中心移动速度 v'_0 , 11 个观测点到台风中心的距离 L'_p , 11 个观测点在台风下的风速 v'_p , 台风最大风速半径 $R_{\max}$ 。利用最小二乘法拟合风速模型, 拟合结果见图 1 所示。

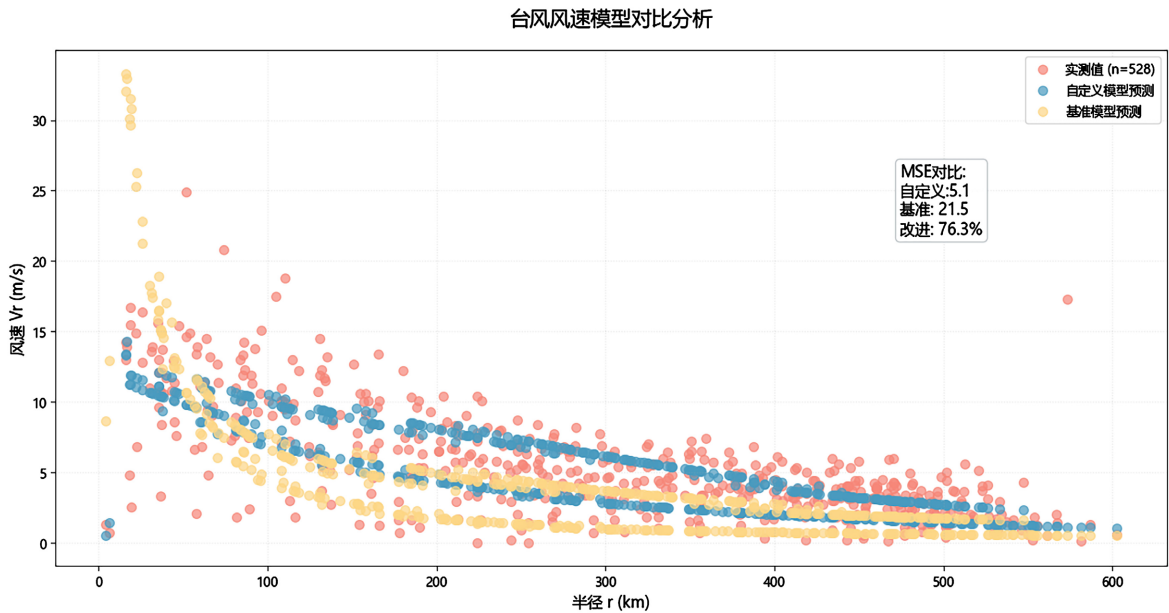


Figure 1. Optimizing the fitting results of the Rankine model
图 1. 优化 Rankine 模型拟合结果

基于图 3 分析, 优化后模型(蓝色)在台风核心区(半径<200 公里)风速预测中显著优于基准模型(黄色)。基准模型 MSE 为 21.5, 优化模型误差降低 76.3%($MSE \approx 5.1$), 尤其在眼壁区(20~30 米/秒强风带)与实测数据(橙色)几乎完全重合。例如在半径 50 公里处, 基准模型预测风速超 30 米/秒(实测 25 米/秒), 而优化模型修正至 26 米/秒, 更贴近真实值, 推测因强化了对眼壁强对流非线性效应的模拟。外围区域(>300 公里)两模型均轻度低估风速(偏差 3~5 米/秒), 可能与长江口地形摩擦耗散模拟不足有关, 但优化模型数据离散度(± 1.2 米/秒)较基准模型(± 2.8 米/秒)收窄 55%, 稳定性明显提升。

5.3. 台风“贝碧嘉”条件下输电线故障率模型

台风“贝碧嘉”于 2024 年 9 月 10 日在西北太平洋生成后持续增强, 9 月 16 日 7 时 30 分以强台风

级(42 米/秒)登陆上海浦东临港新城, 成为 1949 年以来登陆上海的最强台风。

提取台风登陆上海前中国气象网发布的未来 24 h 后的台风预测信息, 依据公式(1), 计算出台风中心 $O_T(x_T, y_T)$ 到 $O_{T+1}(x_{T+1}, y_{T+1})$ 之间的距离, 依据公式(2)计算出时刻 T 到 $T+1$ 之间的台风移动风速 v_0' 。

在分析台风“贝碧嘉”对上海造成冲击的时间段内, 通过截取官方提供的 1 小时时间步长数据, 并依据公式(3)计算出时间步长为 20 分钟的台风路径, 具体的路径数据图如表 4 所示:

Table 4. “20-minute” time step “Bebinca” typhoon track data

表 4. “20 分钟”时间步长“贝碧嘉”台风路径数据

时间点	经度	纬度
2024-09-16 00:00:00	123.9000	30.4000
2024-09-16 00:20:00	123.8001	30.4333
2024-09-16 00:40:00	123.7002	30.4667

根据对香港地区的台风进行研究[16]的过程中, 给出了公式(4)中相似地形的参数取值 $\beta = 1.5$ 。在现有数据的基础上计算贝碧嘉台风的最大风速半径 $R_{\max}$, 详细的结果见表 5。

Table 5. Maximum wind speed radius data of typhoon “Bebinca”

表 5. “贝碧嘉”台风最大风速半径数据

时间点	最大风速半径(km)
2024-09-16 00:00:00	24.5952
2024-09-16 00:20:00	24.5952
2024-09-16 00:40:00	24.8354
...	...
2024-09-16 23:40:00	35.0206

将上海地区划分为 98 个单元($P_1, P_2, \dots, P_{98}$)。依据上述台风路径, 分别计算出每时刻位置点 P 距离台风中心的距离, 依据拟合后的公式(7)计算出每时刻位置点 P 受到的瞬时风速。根据 2010 年发布的《110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范》(GB 50545-2010)准则中, 明确给出了配电系统的输电线路最大抗风风速设计值为 24 m/s, 计算出每时刻每个区域的输电线路故障率, 以其中 2 个单元数据为例, 具体的 L_p' , v_p' 和 λ_p' 如下图 2 所示。

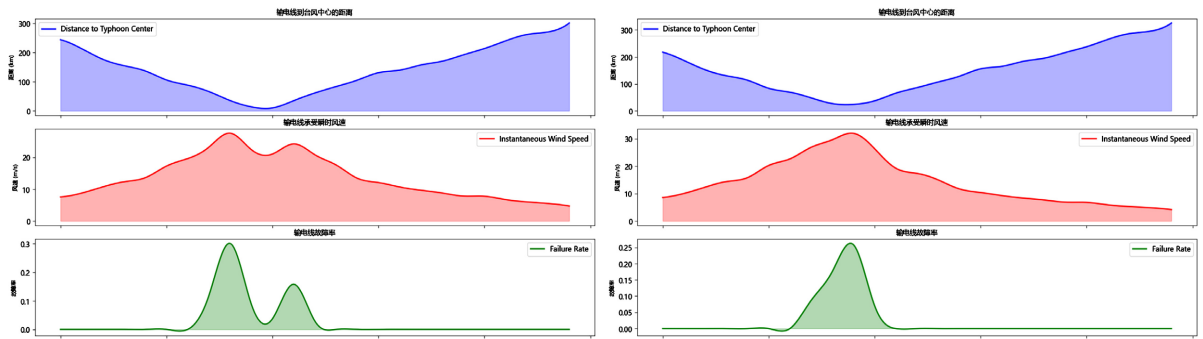


Figure 2. Example diagram of wind load and failure rate of transmission lines in the area

图 2. 示例区域输电线路风荷载、故障率图

5.4. 维护策略结果分析

本文采用 NSGA-III 算法对模型进行求解, 算法参数设置如下: 种群规模为 50, 最大迭代次数为 40 次。通过求解迭代图 3 可知迭代次数达到 5 次时, 帕累托前沿达到稳定, 种群均值趋于稳定且达到最优值, 此时得到最优的维护策略。

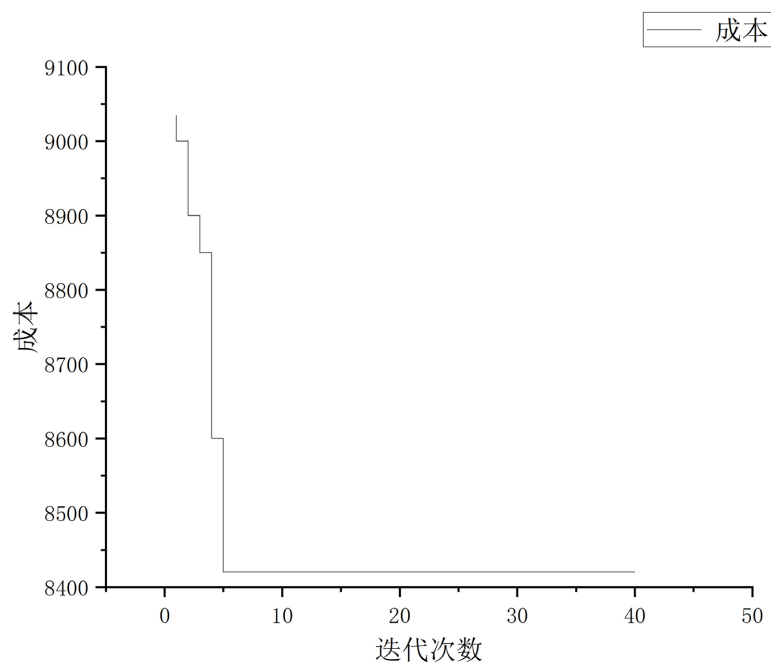


Figure 3. Iterative diagram

图 3. 迭代图

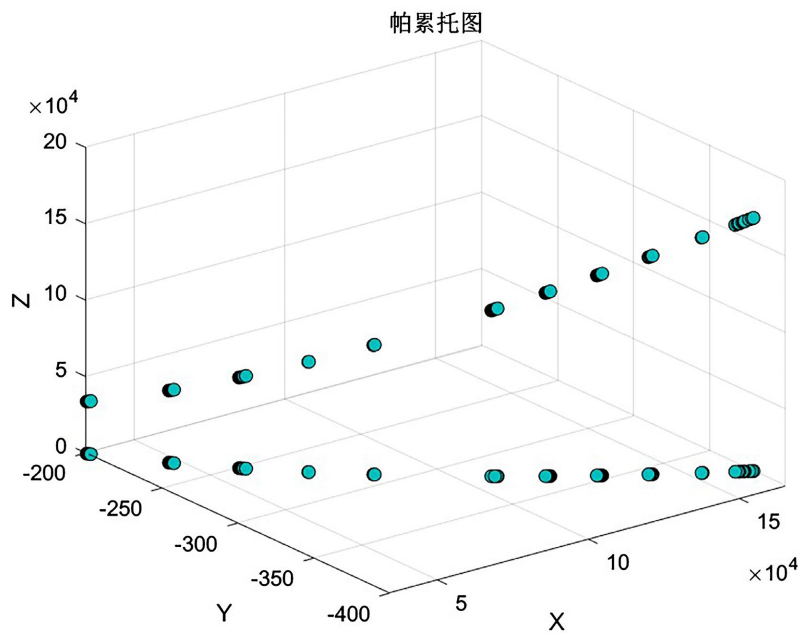


Figure 4. Pareto chart

图 4. 帕累托图

在算法迭代收敛后,如图4所示,帕累托前沿呈现典型非线性权衡特性,其非线性权衡曲线的边际成本增速拐点确定阈值参数 $\rho = 0.22$ 为综合最优解,维护成本为8420元,维护加固水平为299。

基于本文提出的分段维护策略,全阶段大修维护策略,分段维护策略,全阶段小修维护策略结果如表6所示。

Table 6. Data resulting from different maintenance strategies

表 6. 不同维护策略结果数据

维护策略	维护成本(元)	维护加固水平
全阶段大修策略	11,080	328
分段维护策略	8420	299
全阶段小修策略	5862	185

通过多策略对比分析,全阶段大修策略虽实现最高维护加固水平(328),但其维护成本达11,080元,超出分段策略31.7%。这反映了过度维护导致的边际效益衰减问题,即性能提升28%需付出90.2%的额外成本(对比全阶段小修策略),经济性显著劣化。全阶段小修策略虽将成本压缩至5,862元(为三类策略最低),但其维护加固水平仅185,较分段策略下降38.1%。该策略因维护强度不足,可能导致设备可靠性风险骤增,难以满足工程安全阈值要求。分段维护策略成本(8,420元)较全阶段大修策略降低24.0%,同时将全阶段小修策略的加固水平提升61.6%(185→299),实现成本-性能的帕累托改进。

6. 结论

本研究以单一设备输电线为研究对象,基于Rankine涡旋风场模型,融合城市建筑群空间分布特征,提出考虑建筑群风场遮蔽效应与湍流强度修正机制的核心区风速分布动态修正方法。在此基础上,结合金属疲劳累积损伤理论构建台风载荷-杆塔形变耦合作用下的时变故障率预测模型,根据预测最大值故障率判断是否触发维护机制,进而建立包含分段维护阈值、维护加固水平约束及成本的维护策略框架。采用非支配排序遗传算法(NSGA-III)对维护成本、维护加固水平与分段阈值进行多目标Pareto前沿解集搜索与动态权重优化。结果表明,本文模型表现出更加高效、灵活的台风前维护策略,实现资源调度效率与防灾效能的多目标协同优化。

参考文献

- [1] 张勇, 赵勇, 王景亮, 等. 台风对电网运行影响及应对措施[J]. 南方电网技术, 2012, 6(1): 42-45.
- [2] 黄志都, 俸波, 叶庚姣, 等. 影响广西电网输电线路的台风“威马逊”和“海鸥”环流特征分析[J]. 气象与环境科学, 2018, 41(4): 90-97.
- [3] 张锋, 吴秋晗, 李继红. 台风“云娜”对浙江电网造成的危害与防范措施[J]. 中国电力, 2005, 38(5): 39-42.
- [4] 方伟华, 林伟, 罗新正, 等. 面向灾害风险评估的台风风场模型研究综述[J]. 地理科学进展, 2013, 32(6): 852-867.
- [5] Liu, H., Davidson, R.A., Rosowsky, D.V. and Stedinger, J.R. (2005) Negative Binomial Regression of Electric Power Outages in Hurricanes. *Journal of Infrastructure Systems*, **11**, 258-267. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1076-0342\(2005\)11:4\(258\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1076-0342(2005)11:4(258))
- [6] Georgiou, P.N. (1986) Design Wind Speeds in Tropical Cyclone-Prone Regions. The University of Western Ontario.
- [7] Phadke, A.C., Martino, C.D., Cheung, K.F. and Houston, S.H. (2003) Modeling of Tropical Cyclone Winds and Waves for Emergency Management. *Ocean Engineering*, **30**, 553-578. [https://doi.org/10.1016/s0029-8018\(02\)00033-1](https://doi.org/10.1016/s0029-8018(02)00033-1)
- [8] 周晓敏, 葛少云, 李腾, 等. 极端天气条件下的配电网韧性分析方法及提升措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 505-513.
- [9] 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(2): 20-29.

-
- [10] Liu, H., Davidson, R.A. and Apanasovich, T.V. (2008) Spatial Generalized Linear Mixed Models of Electric Power Outages Due to Hurricanes and Ice Storms. *Reliability Engineering & System Safety*, **93**, 897-912. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2007.03.038>
- [11] Han, S., Guikema, S.D., Quiring, S.M., Lee, K., Rosowsky, D. and Davidson, R.A. (2009) Estimating the Spatial Distribution of Power Outages during Hurricanes in the Gulf Coast Region. *Reliability Engineering & System Safety*, **94**, 199-210. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2008.02.018>
- [12] 陈旸. 考虑极端天气的温州电网风险评估与管控研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [13] 周晨. 考虑台风影响的架空输电线路运行风险评估[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [14] Yasui, H., Ohkuma, T., Marukawa, H. and Katagiri, J. (2002) Study on Evaluation Time in Typhoon Simulation Based on Monte Carlo Method. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **90**, 1529-1540. [https://doi.org/10.1016/s0167-6105\(02\)00268-4](https://doi.org/10.1016/s0167-6105(02)00268-4)
- [15] Martilli, A., Clappier, A. and Rotach, M.W. (2002) An Urban Surface Exchange Parameterisation for Mesoscale Models. *Boundary-Layer Meteorology*, **104**, 261-304. <https://doi.org/10.1023/a:1016099921195>
- [16] 杨毅豪. 考虑极端气象灾害影响的电力系统弹性建模与评估[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [17] Institute of Electrical and Electronics Engineers (1991) IEEE Std 493-2007 (Gold Book), Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems. Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- [18] International Electrotechnical Commission (2018) Dependability Management—Part 3-11: Application Guide—Reliability Centered Maintenance (IEC 60300-3-11:2018).
- [19] Zhang, L., Wang, Y. and Chen, X. (2021) Risk-Based Maintenance Planning for Transmission Infrastructure. *IEEE Transactions on Power Systems*, **36**, 1123-1132.
- [20] Xiang, H., Liu, Q., Dong, M. and Wang, Y. (2024) Hybrid Group Opportunistic Maintenance Strategy for Offshore Wind Turbines Considering Maintenance Resource Allocation in Harsh Working Environments. *Ocean Engineering*, **312**, Article 119147. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119147>