

船舶及海洋工程装备

海洋大气环境下输电塔线体系
强风响应模拟分析程江洲^{1,2}, 谢卓然^{1*}, 李欣^{1,2}, 张志强¹, 邓海峰³, 郑皓文¹

(1.三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2.湖北省输电线路工程技术研究中心, 湖北 宜昌 443002; 3.国网湖北省电力公司宜昌供电公司运维检修部, 湖北 宜昌 443002)

摘要: **目的** 以实际现场数据为基础, 研究沿海地区输电塔线体系风灾薄弱点。**方法** 结合实际受灾情况, 研究易受台风侵袭的输电线路所处地理气候特性, 研究海洋大气腐蚀环境下输电塔钢构件腐蚀机理, 并建立腐蚀深度以及力学性能退化时变模型。通过建立塔线体系有限元模型, 对其施加风荷载, 重现其风致响应过程, 并对风致倒塌结果进行分析。**结果** 塔脚与地基交接处的角钢全部压弯, 塔身主材应力比超载6%~23%, 造成整体失稳。塔头受扭严重, 塔头曲臂实际承受荷载超过设计所能承受荷载20%~38%。**结论** 所提钢结构腐蚀时变模型能更好地拟合实际塔线体系抗风能力, 且在台风背景下, 塔体下部以及塔腿下部杆件的抗风能力对输电塔倒塌具有决定性作用, 研究结果可为沿海输电线路设计提供参考。

关键词: 输电塔线体系; 莫兰蒂台风; CI腐蚀; 海洋大气; 有限元分析; 风致倒塌

中图分类号: TM754

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)02-0052-10

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.02.007

Simulation and Analysis of Strong Wind Response of Transmission Tower
Line System under Marine Atmospheric EnvironmentCHENG Jiangzhou^{1,2}, XIE Zhuoran^{1*}, LI Xin^{1,2}, ZHANG Zhiqiang¹, DENG Haifeng³, ZHENG Haowen¹

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. Hubei Transmission Line Engineering Technology Research Center, Hubei Yichang 443002, China; 3. State Grid Hubei Electric Power Company Yichang Power Supply Company Operation and Maintenance Department, Hubei Yichang 443002, China)

ABSTRACT: The work aims to study the vulnerability of the transmission tower line system in the coastal area based on the actual field data. First of all, combined with the actual disaster situation, the geographical and climatic characteristics of the transmission lines that were vulnerable to typhoons were studied, and the corrosion mechanism of steel members of the transmission tower under the marine and atmospheric corrosion environment was studied, and a time-varying model of corrosion depth and mechanical properties degradation was established. Then, a finite element model of the tower line system was established, the wind load was applied to it to reproduce the wind-induced response process and analyze the wind-induced collapse

收稿日期: 2024-12-13; 修订日期: 2025-01-06

Received: 2024-12-13; Revised: 2025-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(52107107)

Fund: National Natural Science Foundation of China (52107107)

引文格式: 程江洲, 谢卓然, 李欣, 等. 海洋大气环境下输电塔线体系强风响应模拟分析[J]. 装备环境工程, 2025, 22(2): 52-61.

CHENG Jiangzhou, XIE Zhuoran, LI Xin, et al. Simulation and Analysis of Strong Wind Response of Transmission Tower Line System under Marine Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(2): 52-61.

*通信作者 (Corresponding author)

results. The result showed that the angle steel at the junction of the tower foot and the foundation was all bent, and the stress ratio of the main material of the tower body was overloaded by 6%-23%, resulting in overall instability. The tower head was twisted seriously, and the actual load borne by the tower head bend arm exceeded the designed load by 20%-38%. In conclusion, the proposed time-varying steel structure corrosion model can better fit the wind resistance of the actual tower line system, and the wind resistance of the lower part of the tower body and the lower member of the tower leg in the background of the typhoon plays a decisive role in the collapse of the tower, and the results of the study can provide a reference for the design of coastal transmission lines

KEY WORDS: transmission tower line system; typhoon Meranti; Cl⁻ corrosion; marine atmosphere; finite element analysis; wind-induced collapse

随着“一带一路”和“现代海洋城市”等倡议的推进, 强化沿海城市基础设施长期服役过程中的稳定性是建设海洋强国的重要支撑。输电线路作为电力系统不可或缺的组成部分, 其安全可靠运行对于社会经济发展至关重要。随着全球气候变暖趋势不断加剧, 沿海城市输电线路不仅面临着海洋大气腐蚀的风险, 还频繁遭受台风、强降雨等极端天气的袭击。台风灾害发生的概率较低, 但每次都造成难以估量的损失^[1-3]。2016 年第 14 号台风“莫兰蒂”登陆福建厦门, 期间发生的输电塔形态破坏包括杆塔倾倒、塔头变形和横担弯曲等共有 27 基。输电塔在台风灾害中受损严重, 极大地影响了社会的正常运行, 因此输电塔的抗风设计一直是研究的热门话题。

近年来, 国内外学者对于输电线路抗风性能做了大量的研究。朱宽军等^[4]考虑了时空演化特性, 对风速场进行了模拟, 以 220 kV 输电线路为例, 对其风致响应进行对比分析。刘石等^[5]以广东省某 220 kV 线路为例, 通过逐级加载的方式分析了输电塔线体系的极限荷载。李悦等^[6]利用参数共振理论推导了输电塔杆件的动力失稳区和激发系数表达式, 对输电塔杆件的动力稳定性进行了评估。Jeddi 等^[7]通过气弹性模型风洞试验开展了多角度风荷载作用下的风振响应分析, 研究了高阶振型对输电塔风振响应的影响。前述研究多采用平稳风速模型模拟各类风场, 但对于台风等强风风场, 其区别于自然风的非平稳性是破坏输电塔线体系的关键, 并且少有研究考虑沿海地区大气腐蚀对长期服役的输电塔本构模型的影响, 使得研究结果与工程实际有所差异。因此, 对于台风灾害情况下沿海地区输电塔线体系的受损过程还需要进一步研究^[8-10]。

针对前述问题, 本文以“莫兰蒂”台风时期厦门地区输电线路受损情况为例。考虑长期服役钢构件大气腐蚀情况, 建立钢构件性能腐蚀时变模型。在 ANSYS 有限元仿真软件中建立腐蚀后等比例输电塔线体系三塔四线模型。同时根据现场实测数据, 考虑台风的涡旋风场特性, 采用谐波叠加法生成脉动风。通过对塔线体系施加相应风荷载, 模拟其在台风天气下输电塔线体系的受力情况。根据输电塔构件失效准

则, 判定其受损情况, 对输电塔线体系的失稳失效过程以及薄弱杆件进行研究。

1 台风脉动风速模拟

1.1 “莫兰蒂”台风案例分析

台风作为常见的自然灾害, 其对我国沿海地区的输电线路带来的冲击不可忽视。当输电塔和导地线受到高于其最大设计风速的强风影响时, 存在铁塔折断和导线断裂的风险。2016 年 9 月 15 日第 14 号超强台风“莫兰蒂”登陆于厦门市翔安区, 登陆时中心最大风力为 15 级 (48 m/s), 为强台风级别, 最大阵风出现在五缘大桥 (64.2 m/s), 创下厦门自新中国成立以来的新记录。台风“莫兰蒂”造成杆塔损坏共有 27 基, 主要损坏情况为输电塔倾斜或倒塌、塔头变形和横担弯曲等。220 kV 共有 15 基, 其中倒塔 10 基, 塔头变形 5 基。从杆塔型式看, 220 kV 及以上倒塔、变形的 22 基杆塔全部为直线塔, 其中 20 基为猫头型直线塔。“莫兰蒂”台风路径图以及受损塔分布图如图 1 所示, 其中蓝色部分为 220 kV 塔型。

针对事故现场尚无自动气象站的情况, 结合当地的地形地貌以及气候环境, 本文拟采用杏林大桥自动化站、同安大桥自动站 2 个自动监测站为此次事故现场风速的气象站。选取事故点 10 min 内平均最大风速为 42.9 m/s, 瞬间最大风速为 63.1 m/s。

1.2 风速模拟

由大量实测数据可知, 风速时程由 2 部分组成, 如式 (1) 所示。其中一部分周期通常在 10 min 以上, 整体比较稳定, 对输电塔的影响主要为静力作用, 为平均风速。另外, 在风速的时程曲线上, 也存在着一部分具有更高频率、更短周期的风, 这些风会导致输电塔架发生振动, 为脉动风^[4]。

$$V(z, t) = \bar{V}(z) + v(z, t) \quad (1)$$

式中: $\bar{V}(z)$ 为平均风速; $v(z, t)$ 为脉动风速。

研究中一般采用指数律换算公式来模拟计算不同高度处的平均风速值, 如式 (2) 所示。

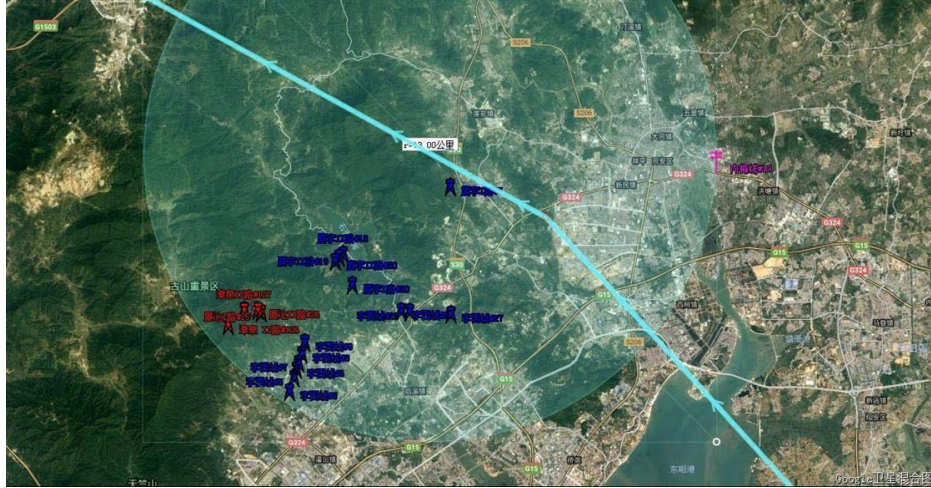


图1 各倒塌、变形杆塔位置分布
Fig.1 Position distribution of collapsed and deformed poles and towers

$$\frac{\bar{V}}{\bar{V}_{10}} = \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha \quad (2)$$

式中： α 为地面粗糙度； z 为高度； \bar{V} 为当前高度处平均风速； \bar{V}_{10} 为 10 m 高度处的平均风速。

脉动风速的模拟常采用稳定的高斯随机过程，而这种高斯随机过程的一个关键数值特性是功率谱密度函数，它用于描述脉动风速在特定频率范围内所包含的能量值。台风的脉动风速比常见的阵风更强，选择沿高度变化的 Kaimal 风速谱来描述^[11]。

$$S_v(n) = 200V_*^2 \frac{f_*}{n(1+50f_*)^{5/3}} \quad (3)$$

$$f_* = \frac{nz}{\bar{v}(z)} \quad (4)$$

式中： f_* 为无量纲 Monin 坐标； n 为脉动风频率； V_* 为摩擦速度或者剪切速度； $\bar{v}(z)$ 为离地高度为 z 处的平均速度。

1.3 台风脉动特性分析

台风风场由于其内部复杂的结构特性以及温湿湿度场，使其具有区别于自然风场的非高斯性和非平稳性。利用空间相干函数刻画不同位置湍流的相关关系，湍流的时间和空间相干性通常用 Davenport 函数对其进行定量描述，其高低与频率和距离密切相关^[12]。具体来说，当频率为 0 时，湍流是完全相干的，与距离无关。但对于大规模涡旋风场，其湍流相干性则随距离的增大而降低。

由于台风风场的湍流相干函数存在时变性，因此引入基于 Krenk 模型拓展的时变相干函数模型^[13-14]：

$$\gamma_{jk}(n,t) = \left[1 - \frac{1}{2} \frac{n_x(t)r}{\bar{U}_T(t)} D(t)\right] \exp\left[-\frac{n_x(t)r}{\bar{U}_T(t)} D(t) + i \frac{2\pi nr}{\bar{U}_T(t)} d(t)\right] \quad (5)$$

$$n_x(t) = \sqrt{n^2 + \left[\frac{U_T(t)}{2\pi L(t)}\right]^2} \quad (6)$$

式中： $\gamma_{jk}(n,t)$ 为第 j 、 k 点处湍流间的时变相干函数； r 为第 j 、 k 点之间的间距； $\bar{U}_T(t)$ 为时变平均风速； $d(t)$ 、 $L(t)$ 、 $D(t)$ 为待拟合参数； i 为虚数，描述相干函数的相位。

采用 Gurley 相关性变形对高斯过程进行非高斯变换。Gurley 相关性变形的计算方法为^[15]：

$$R_{\text{non}} = \alpha^2 \left[R_n + 2h_3^2 R_n^2 + 6h_4^2 R_n^3\right] \quad (7)$$

$$v_{\text{non}} = \alpha \left[v_n + h_3(v_n^2 - 1) + h_4(v_n^3 - 3v_n)\right] \quad (8)$$

式 (7)、(8) 中的参数计算方法为：

$$h_3 = \gamma_3 / (4 + 2\sqrt{1 + 1.5\gamma_4}) \quad (9)$$

$$h_4 = (\sqrt{1 + 1.5\gamma_4} - 1) / 18 \quad (10)$$

$$\alpha = (1 + 2h_3^2 + 6h_4^2)^{-1/2} \quad (11)$$

式中： γ_3 为脉动风速序列的偏度； γ_4 为脉动风速序列的峰度； v_n 和 R_n 为高斯脉动风速序列及其自相关函数； v_{non} 和 R_{non} 为非高斯脉动风速序列及其自相关函数。

在进行后续动力分析时，首先要获取一个符合实际情况的脉动风速时程，通过对塔线体系进行瞬态动力分析，获取该时间段内塔体响应情况。为获取更加全面和准确的结果，可以增加其荷载步数。基于上述方法，设置时间步长为 0.1 s，模拟风速为 42.9 m/s 时，10 m 高处的风速时程，风速模拟结果如图 2 所示。

2 近海大气环境钢结构腐蚀模型

2.1 钢材海洋大气腐蚀机理

钢材是国家基建不可或缺的物质，尤其在输电塔等结构中承担重要的功能。然而，长期服役和沿海气

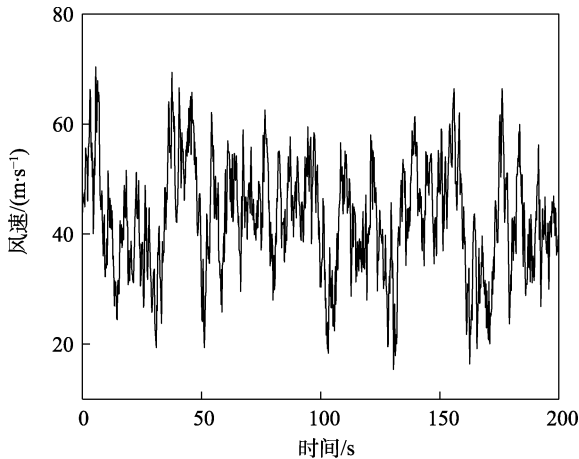


图 2 脉动风速历程
Fig.2 Time history of pulsating wind speed

候的腐蚀对输电塔线体系结构的力学性能产生了巨大的影响。腐蚀会导致钢材材料性质的恶化, 构件截面尺寸的减小, 从而影响了其结构的屈服强度、承载能力、延展性能等, 使得输电线路运行可靠性和使用寿命大幅下降^[16]。

在海洋大气环境中, 以 Cl^- 为主导的钢材腐蚀机理如图 3 所示, 可分为 2 个主要阶段。 NaCl 具有极强的吸湿性, 在附着于钢材表面时, 会迅速形成薄液膜, 从而加速腐蚀的电化学反应。 Cl^- 分子尺寸极小, 能够穿过锈蚀层与钢材, 与其发生电化学反应, 同时还能溶解锈蚀层中的氢氧化亚铁, 使得锈蚀层缝隙增大, 并产生细小裂缝^[17]。

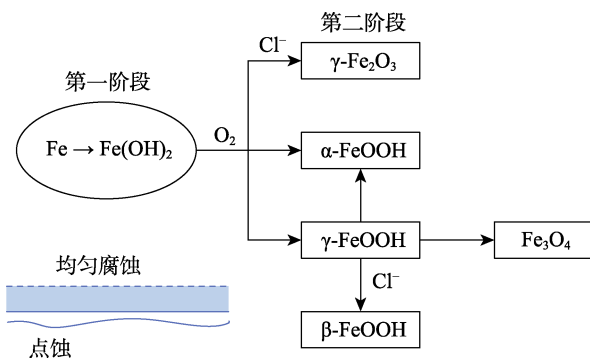


图 3 海洋大气腐蚀机理
Fig.3 Mechanism of marine atmospheric corrosion

2.2 钢材腐蚀预测模型

目前对于钢材的大气腐蚀程度常用质量损失率来进行评判, 即由于腐蚀造成的钢材质量变化情况。

$$n_t = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \times 100\% \quad (12)$$

式中: n_t 为经大气腐蚀时间 t 后钢材的质量损失率; m_0 为钢材初始质量; m_t 为清除腐蚀产物后的钢材质量。

有学者针对钢材质量损失率提出了不同的腐蚀时变模型, 这些模型多基于实际钢材腐蚀数据进行回归模拟, 主要可分为简单模型和分段模型两大类。简单模型包括幂函数模型、指数模型等, 然而, 钢材锈蚀过程的复杂性导致锈蚀产物对速率产生影响, 使得简单模型难以准确模拟 20 a 以上长期服役钢材的锈蚀过程。分段模型则根据锈蚀原理, 将腐蚀过程划分为不同阶段, 并采用不同的函数进行拟合。经过验证, 分段模型被证明更适用于长期服役钢材锈蚀情况的预测。

在自然大气环境中, 钢结构的大气腐蚀速率与温度、湿度、服役时间以及腐蚀粒子浓度密切相关。随着腐蚀的进行, 腐蚀产物堆积在钢结构表面, 形成一种保护性薄膜, 使得腐蚀速率减缓^[18]。腐蚀过程前期多为点蚀等非均匀腐蚀, 到后期均匀腐蚀比例逐渐升高。通常在钢结构服役 20 a 后, 腐蚀层厚度保持不变, 腐蚀速率趋于平稳。钢材腐蚀时变模型如式 (13) 所示^[19]。

$$\begin{cases} d_t = r_{\text{corr}} t^b, 1 < t \leq 20 \\ d_t = r_{\text{corr}} [20^b + b(20^{b-1})(t-20)], t > 20 \end{cases} \quad (13)$$

式中: d_t 为腐蚀深度; t 为暴露时间; r_{corr} 为第 1 年的平均腐蚀速率; b 为金属环境特性参数, 在无实验数据的情况下, 钢材取 0.523。

考虑海洋大气环境中的相对湿度、温度、 SO_2 含量以及 Cl^- 沉积率等因素, 根据相关规范^[20]规定, 钢材第 1 年的腐蚀速率可由式 (14) 确定。

$$\begin{aligned} r_{\text{corr}} = & 1.77 P_d^{0.52} \exp(0.02 R_H + f_{\text{St}}) + \\ & 0.102 S_d^{0.62} \exp(0.033 R_H + 0.040 \theta) \quad (14) \\ P_d = & 0.8 P_c \end{aligned}$$

式中: R_H 为年平均相对湿度; T 为年平均温度; P_d 为 SO_2 年平均沉积率; S_d 为 Cl^- 年平均沉积率; f_{St} 为钢材相关系数, 当 $\theta \leq 10^\circ\text{C}$ 时, $f_{\text{St}} = 0.150(\theta - 10)$, 否则 $f_{\text{St}} = -0.054(\theta - 10)$; P_c 为 SO_2 年平均浓度。

本文以厦门地区“莫兰蒂”台风输电线路受损情况为背景。经查阅, 厦门地区年平均相对湿度为 77%, 年平均温度为 21.3°C , 其大气环境为海洋大气, 碳钢腐蚀等级为 C3, 氯离子沉积率为 $4 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 二氧化硫的质量浓度为 $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。结合厦门地区气候条件, 由式 (13) 计算钢材腐蚀深度随服役时间的变化情况, 结果如图 4 所示^[21-22]。

2.3 腐蚀后钢材力学性能

钢材腐蚀后的力学性能变化主要为屈服强度降低, 屈服平台缩短、极限强度降低、伸长性能降低等。若假设输电塔钢结构服役期间均为均匀腐蚀, 则可用钢材厚度变化来定义质量损失率, 如式 (15) 所示。参考郑山锁教授团队^[23]的大气环境钢材性能退化实验数据, 其拟合的钢材屈服强度和极限强度退化模型

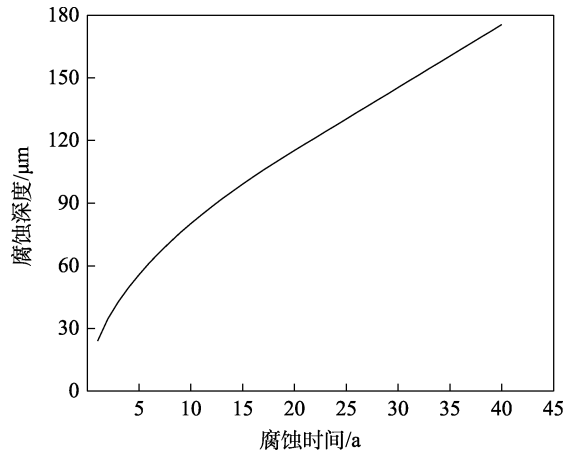


图4 钢材腐蚀深度时变规律

Fig.4 Time-varying rule of corrosion depth of steel

结果均较为理想,可得钢材力学性能指标与钢材质量损失率的关系如式(16)所示。输电塔钢构件初始性能参数见表1。

$$n_t = \frac{d_t}{d_0} \times 100\% \quad (15)$$

$$\begin{cases} f_y = (1 - 0.810n_t) f_{y0} \\ f_u = (1 - 0.707n_t) f_{u0} \\ \delta = (1 - 1.412n_t) \delta_0 \\ E = (1 - 0.932n_t) E_0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: d_0 为构件初始厚度; d_t 为服役时间 t 后构件清除腐蚀产物后的厚度; f_{y0} 、 f_y 为钢材腐蚀前后的屈服强度; f_{u0} 、 f_u 为钢材腐蚀前后的极限强度; δ_0 、 δ 为钢材腐蚀前后的伸长率; E_0 、 E 为钢材腐蚀前后的弹性模量。

表1 输电塔钢结构参数

Tab.1 Parameters of transmission tower steel structure

钢材	弹性模量/ MPa	泊松比	屈服强度/ MPa	切线模量/ MPa
Q345	2.1×10^5	0.3	345	2.1×10^4
Q235	2.1×10^5	0.3	235	2.1×10^4

根据输电塔结构钢材型号,选取 Q235 和 Q345 这 2 种钢材进行近海大气腐蚀力学性能计算,以 L125 mm×10 mm 规格的角钢为例,其性能衰减趋势如图 5 所示。

3 腐蚀后输电塔线体系建模

“莫兰蒂”台风时期,厦门地区某 220 kV 线路直线型猫头塔受损严重。本文以实际案例为基础,采用 ANSYS 有限元软件建立三塔四线体系模型。倒塔较多的 220 kV 李西线、220 kV 厦李线建设年份距今

基本超过 20 a,设定塔线体系服役时间为 25 a,初始设计风速 35 m/s,计算所得输电塔体角钢腐蚀深度为 130.31 μm 。以减去腐蚀深度的角钢尺寸为基础,搭建蚀后输电塔线体系有限元模型。塔型呼高 42 m,本体高 36 m,档距为 570 m。结构钢材型号包括 Q235、Q345 等 2 种,采用 L 形角钢。输电导线型号为 LGJ-300/40,弹性模量为 7 300 MPa,直径为 23.94 mm,截面积为 338.99 mm^2 。根据具体图纸,在 ANSYS 有限元软件中创建一个三维输电塔线体系模型^[24],并根据蚀后钢结构性能参数,对塔线体系的整体力学性能进行设置。

架空导线在自身重力影响下会产生一定弧垂,属于柔性结构,也是垂跨较小的结构之一。由于导线只能承受轴向拉力,选用 LINK10 单元对其进行有限元建模。悬垂绝缘子串是由多个输电绝缘子片组成的,可以近似地视为一个拉杆模型,采用 LINK180 单元模型^[25-26]。塔线体系有限元模型如图 6 所示。

4 腐蚀影响下塔线体系风致响应

4.1 风荷载施加

塔线体系的初始状态为考虑自重的结构状态分析,随后将输电塔分段处理,如图 7 所示。对每一段施加不同的风荷载,取每一段的中间高度计算该点的风速值,将风速值转化为对应荷载值施加到对应塔段。

在遭受台风时,电杆主要受到 2 种外力。

1) 导线受到的风荷载:

$$W_x = \beta_c \cdot \alpha_L \cdot \mu_z \cdot \mu_{SC} \cdot d \cdot L_p \cdot B_1 \cdot \sin^2 \theta \quad (17)$$

式中: W_x 为垂直于导线及地线方向的风荷载标准值; β_c 为导线阵风系数; μ_z 为风压高度变化系数; μ_{SC} 为导线或地线的体型系数; d 为导线或地线的外径; L_p 为杆塔的水平档距; θ 为风向与导线或地线方向之间的夹角; α_L 为档距折减系数; B_1 为导线覆冰风荷载增大系数。各参数取值参考 DL/T 5551—2018《架空输电线路荷载规范》^[27],具体数值见表 2。

2) 杆塔受到的风荷载:

$$W_S = W_0 \cdot \mu_z \cdot \mu_S \cdot \beta_z \cdot B_2 \cdot A_S \quad (18)$$

式中: W_S 为杆塔风荷载标准值; μ_S 为构件体型系数; β_z 为高度 z 处的杆塔风振系数; B_2 为杆塔构件覆冰风荷载增大系数,对于按有冰设计的各类情况,5 mm 冰区取 1.1,10 mm 冰区取 1.2,对无冰情况取 1.0; A_S 为迎风面构件的投影面积计算值。具体数值见表 3。

4.2 风致倒塌结果分析

采用瞬态分析对各个荷载输入下的结构响应进行计算,荷载总时程为 100 s,时间步长为 0.1 s,共 1 000 个荷载步。依据受灾当地实际情况,采用 90°

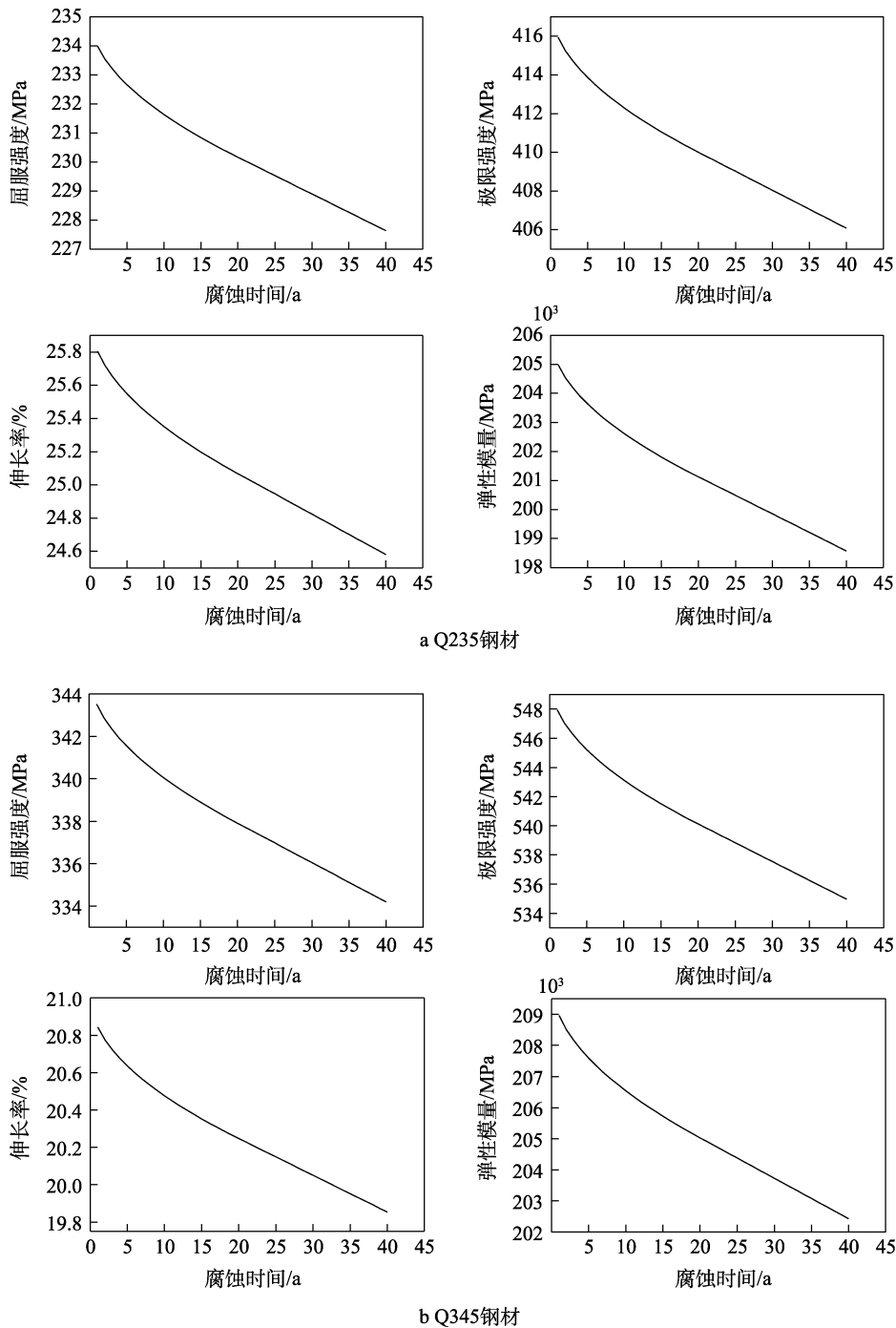


图 5 输电塔构件力学性能变化

Fig.5 Mechanical properties change of transmission tower members: a) Q235 steel; b) Q345 steel

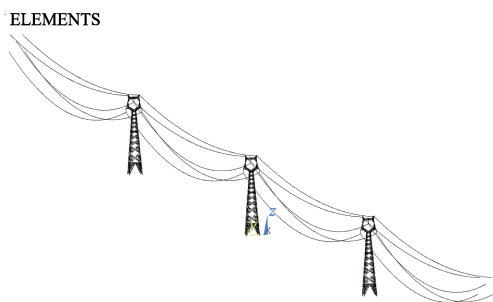


图 6 输电塔线体系模型

Fig.6 Model of transmission tower line system

风向角对塔线体系施加风荷载, 提取塔顶 317 节点位移如图 8 所示。

由图 8 可知, 随着风荷载的输入, 输电塔塔顶在达到极限位移之后, 整体发生失稳, 由于台风风速脉动过程剧烈, 整个抗风过程持续时间较短。据调查, 实际受灾情况中该塔型塔颈连接处下方弯折, 折断处有锈迹。此处主材断裂引起与其相关联的其他构件发生屈服破坏, 最后造成塔头弯折。塔体钢结构锈蚀对于塔身整体抗风能力有极大影响, 局部构件破坏是造成塔身整体失稳的主要因素。

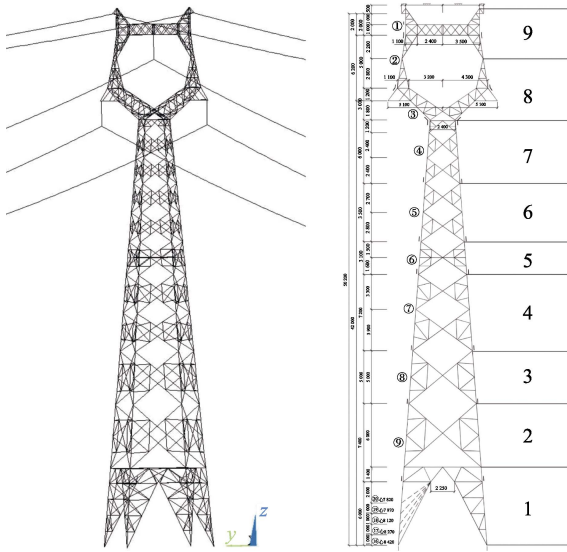


图7 输电铁塔示意图
Fig.7 Transmission tower diagram

此次台风灾害风速过大,塔体受损严重,塔脚与地基交接处的角钢全部被压弯,造成整体失稳,具体受损位置如图9所示,为下数第2个塔段主材及相邻斜材失稳以及塔腿出现破坏。根据现场观察,ZM2猫头塔,朝垂直线路方向倒塔。塔腿以上第3个节间开始破坏,该节间主材弯曲失稳,交叉斜材扭曲、辅助才脱落,该节间以上至瓶口位置塔身主材、斜材严重失稳、扭曲。模拟验证结果说明,杆塔所承受荷载远超设计所能承受荷载。

失稳主材代表节点 629 节点的位移时程图如图10所示,图中该主材随风速脉动程度而振动,位移变化速度随之改变,在达到极限位移后发生失稳。在台风等不规则风场作用下,塔体必非常容易产生振动,在阵风与振动频率相同时,则振幅加大。振幅加大就会引起杆件内力的增加,最终达到其极限值而发生破坏。

表2 导地线风荷载计算参数取值

Tab.2 Values of wind load calculation parameters for conductor-earth line

导地线	离地高度/m	α_L	μ_{SC}	β_c	d	L_p	覆冰增大系数	$\sin\theta$	组合系数	风载系数
下导线	42	0.75	1.1	1	0.047 88	570	1	1	1.4	31.521 80
上导线	48.2	0.75	1.1	1	0.047 88	570	1	1	1.4	31.521 80
地线	50.2	0.75	1.2	1	0.016	570	1	1	1.4	11.491 20

表3 杆塔风荷载计算参数取值

Tab.3 Values of wind load calculation parameters for transmission towers

塔段	离地高度/m	μ_s	A_s	组合系数	节点板增大系数	覆冰增大系数	风载系数
1	3.00	2.4	3.16	1.4	1.1	1	11.711
2	9.70	2.4	9.99	1.4	1.1	1	37.012
3	15.90	2.4	6.04	1.4	1.1	1	22.352
4	22.00	2.4	7.37	1.4	1.1	1	27.307
5	27.15	2.4	2.70	1.4	1.1	1	9.983
6	31.45	2.4	4.07	1.4	1.1	1	15.084
7	37.20	2.4	3.41	1.4	1.1	1	12.644
8	43.10	2.4	2.98	1.4	1.1	1	11.026
9	48.35	2.4	2.25	1.4	1.1	1	8.348

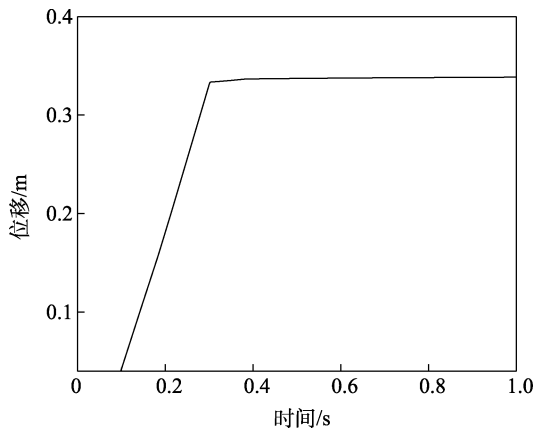


图8 塔头位移时程图
Fig.8 Displacement of tower head

对失稳前的塔体进行分析可知,猫头塔的塔头受扭严重,塔头曲臂实际承受荷载超过设计所能承受荷载 20%~38%。铁塔在顺时针扭转倾倒的过程中,因右侧导线档距拉大,绝缘子串偏斜,导线横担随其偏斜角度的增大,承担的外荷载也加大,最终导致失稳,并沿受力方向弯曲,左侧导线情况相反。与现场情况相符。猫头塔塔颈塔头受损情况如图11所示。

实际情况中,220 kV 线路中倒塌情况为:从塔腿或塔身底部始倾倒;塔材从横担处开始扭曲,塔头变形。本文模拟的结果与“莫兰蒂”台风事故该塔型破坏弯折位置相同,塔体倾倒部位主要为塔身底部和塔腿底部,塔头发生严重变形。当输电塔的塔体结构在下部杆件发生失效后,会在极短的时间内发生倒

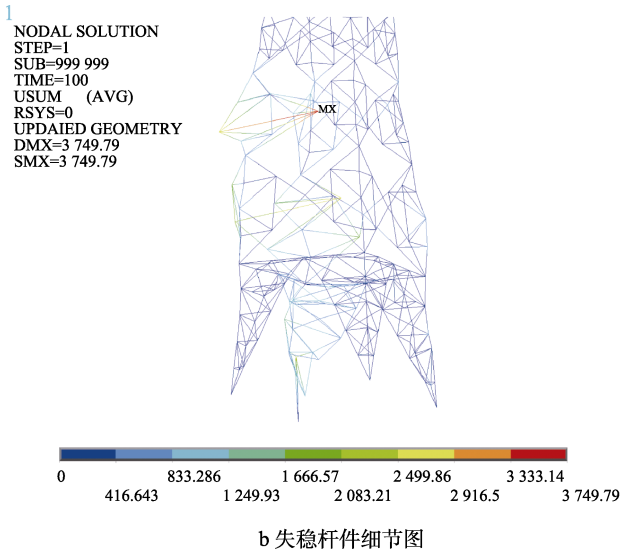
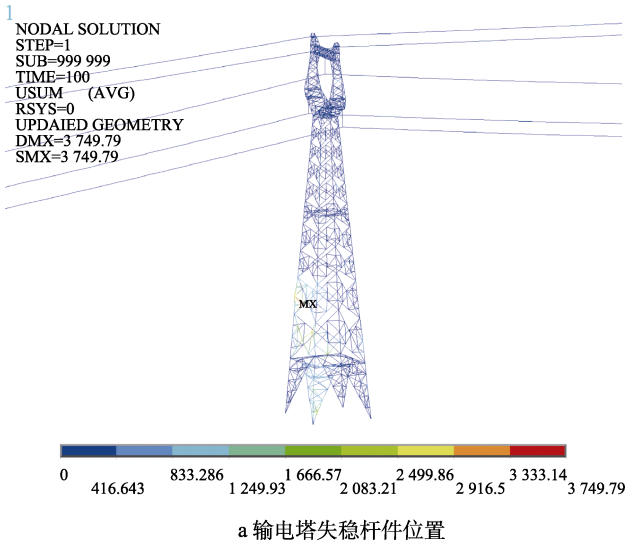


图 9 输电塔受损位置

Fig.9 Location of damaged transmission tower: a) location of transmission tower unstable member; b) detail drawing of unstable member

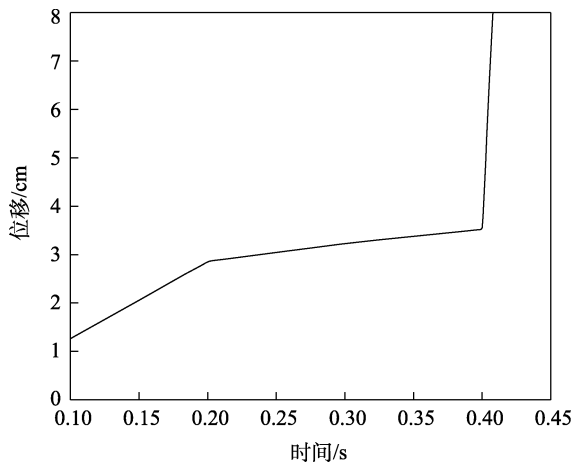


图 10 失稳主材位移时程图

Fig.10 Displacement time history diagram of unstable main material

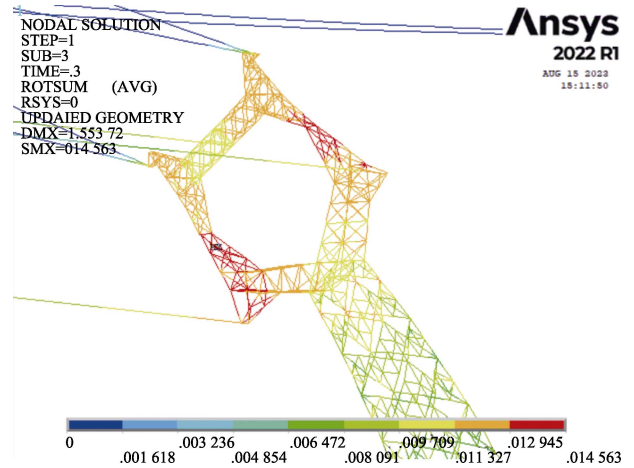


图 11 塔头曲臂受扭情况

Fig.11 Torsion of tower head bend arm

塌。当塔体结构在上部杆件发生失效时,即使没有倒塌,也会产生严重变形。

5 结论

本文以“莫兰蒂”台风厦门地区受灾情况为背景,区别于自然风的模拟,考虑台风的非高斯性和空间相关性,计算相应的脉动风速时程。建立了海洋大气环境下输电塔钢构件的腐蚀时变模型,对其力学性能参数进行了更新,在 ANSYS 中进行了抗风倒塌模拟,分析了塔体具体失稳过程,以及易受损杆件。结合实际受灾情况,得出了如下结论:

1) 结合当地实际情况,台风期间倒塔处的瞬时风速过大是杆塔倒塌的主要原因,早期设计规范的防风设计标准不高,以及海洋大气腐蚀环境下的长期服役,导致早期运行的杆塔自身抗风能力不强。

2) 在海洋大气环境中长时间服役的输电塔结构,力学性能衰退显著,且初始阶段效果显著,后期衰减速度趋于平稳。因此,应加强沿海地区输电线路防腐蚀设计,保证输电线路长期稳定运行。

3) 结合模拟结果以及实际情况发现,输电塔塔身底部迎风面杆件主要受拉弯应力,背风面杆件主要受压弯应力,并且塔头表现为显著的扭转效应。塔身底部杆件失效后,塔身迅速发生倒塌,具体需要加固的部位和后续沿海地区输电塔设计也应着重关注塔身底部以及塔腿底部。

4) 本文研究所选对象较为单一,研究结果缺乏普适性。在后续研究中,可从多方面、多角度进行输电塔线体系抗风性能研究,并建立合理可靠的塔线体系失效评判标准,为防治输电线路风灾提供参考。

参考文献:

[1] 杜诗嘉,郭创新,俞啸玲,等. 台风灾害下的弹性配

- 电网研究综述与展望[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(2): 176-186.
- DU S J, GUO C X, YU X L, et al. Review and Prospect of Resilient Distribution Network under Typhoon Disaster[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(2): 176-186.
- [2] 张卓群, 李宏男, 李士锋, 等. 输电塔-线体系灾变分析与安全评估综述[J]. 土木工程学报, 2016, 49(12): 75-88.
- ZHANG Z Q, LI H N, LI S F, et al. Disaster Analysis and Safety Assessment on Transmission Tower-Line System: An Overview[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(12): 75-88.
- [3] 李旭, 谭新玉. 输电线路防冰/除冰涂层技术发展与创新综述[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2023, 45(5): 142-152.
- LI X, TAN X Y. Review on Development and Innovation of Anti-Icing/de-Icing Coatings for Power Transmission Lines[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2023, 45(5): 142-152.
- [4] 朱宽军, 徐鸿. 考虑风速时空分布特性的高压输电塔-线体系风致响应分析研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2348-2356.
- ZHU K J, XU H. Analysis on Wind-Induced Responses of High Voltage Tower-Line System Considering the Spatial-Temporal Distribution Characteristics of Wind Speed[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2348-2356.
- [5] 刘石, 黄正, 杨毅, 等. 台风等效静风荷载作用下输电塔线体系极限承载力分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(5): 757-763.
- LIU S, HUANG Z, YANG Y, et al. Ultimate Bearing Capacity Analysis of Transmission Tower-Line System under Equivalent Static Typhoon Wind Load[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(5): 757-763.
- [6] 李悦, 谢强, 张欣, 等. 强风作用下输电塔线体系连续性倒塌分析[J/OL]. 西南交通大学学报, 2022: 1-8. (2022-11-10). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=XNJT20221109003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- LI Y, XIE Q, ZHANG X, et al. Analysis of Continuous Collapse of Transmission Tower-Line System under Strong Wind[J/OL]. China Industrial Economics, 2022: 1-8. (2022-11-10). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=XNJT20221109003&dbname=CJF-D-&dbcode=CJFQ>.
- [7] JEDDI A B, AZZI Z, SHAFIEEZADEH A, et al. Revisit of Underestimated Wind Drag Coefficients and Gust Response Factors of Lattice Transmission Towers Based on Aeroelastic Wind Tunnel Testing and Multi-Sensor Data Fusion[J]. Engineering Structures, 2023, 278: 115486.
- [8] 王玲, 牟献良, 朱蕾, 等. 大气环境腐蚀性分类分级研究综述[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 24-27.
- WANG L, MU X L, ZHU L, et al. Review of Atmospheric Corrosivity Classification[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(6): 24-27.
- [9] 周鲁军, 杨善武. 海洋工程用钢的大气腐蚀与耐候钢的发展[J]. 中国冶金, 2022, 32(8): 7-24.
- ZHOU L J, YANG S W. Atmospheric Corrosion of Steels for Marine Engineering and Development of Weathering Steels[J]. China Metallurgy, 2022, 32(8): 7-24.
- [10] 贾晨, 邵永松, 郭兰慧, 等. 建筑结构用钢的大气腐蚀模型研究综述[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(8): 1-9.
- JIA C, SHAO Y S, GUO L H, et al. A Review of Atmospheric Corrosion Models of Building Structural Steel[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(8): 1-9.
- [11] 李士锋, 李宏男, 张卓群, 等. 强风荷载作用下输电线路的连续倒塌破坏分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(5): 835-841.
- LI S F, LI H N, ZHANG Z Q, et al. Power Transmission Line Progressive Collapsed Analysis under Strong Wind Load[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(5): 835-841.
- [12] DAVENPORT A G. A Statistical Approach to the Treatment of Wind Loading on Tall Masts and Suspension Bridges[D]. Bristol, South West England, UK: University of Bristol, 1961.
- [13] 陶天友, 王浩. 台风非平稳湍流特性研究进展与思考[J]. 空气动力学学报, 2021, 39(4): 162-171.
- TAO T Y, WANG H. Research Progress and Considerations in the Research of Non-Stationary Turbulent Characteristics of Typhoon Wind Fields[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2021, 39(4): 162-171.
- [14] 裴慧坤, 樊银平, 杨兴. 空间相关性的不确定性对输电塔动力风荷载的影响[J]. 工业建筑, 2019, 49(12): 19-24.
- PEI H K, FAN Y P, YANG X. Influence of Spatial Correlative Uncertainty on Dynamic Wind Load of Transmission Tower[J]. Industrial Construction, 2019, 49(12): 19-24.
- [15] 张军强, 李楠, 高永亮, 等. 大场域来流空间强风风场的数值模拟研究[J]. 高压电器, 2021, 57(7): 98-104.
- ZHANG J Q, LI N, GAO Y L, et al. Study on Numerical Simulation of Strong Wind Field in Large Field and Inflow Space[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(7): 98-104.
- [16] 曹琛, 郑山锁, 胡卫兵, 等. 大气环境腐蚀下钢结构力学性能研究综述[J]. 材料导报, 2020, 34(11): 11162-11170.
- CAO C, ZHENG S S, HU W B, et al. Review of Research on Mechanical Properties of Steel Structure under Atmospheric Environment Corrosion[J]. Materials Reports, 2020, 34(11): 11162-11170.
- [17] 余倩倩, 常安, 顾祥林, 等. 海洋大气环境下锈蚀钢

- 构件疲劳性能研究进展[J]. 工业建筑, 2024, 54(1): 11-19.
- YU Q Q, CHANG A, GU X L, et al. State-of-the-Art on Fatigue Properties of Corroded Steel Members Subjected to Marine Atmosphere[J]. Industrial Construction, 2024, 54(1): 11-19.
- [18] 杨雅婷. 考虑腐蚀影响的服役杆塔抗风时变可靠度分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2022: 16-17.
- YANG Y T. Time-Varying Reliability Analysis of Wind Resistance of Service Towers Considering Corrosion Influence[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022: 16-17.
- [19] 王友德, 徐善华, 李晗, 等. 一般大气环境下锈蚀结构钢表面特征与随机模型[J]. 金属学报, 2020, 56(2): 148-160.
- WANG Y D, XU S H, LI H, et al. Surface Characteristics and Stochastic Model of Corroded Structural Steel under General Atmospheric Environment[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(2): 148-160.
- [20] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属和合金的腐蚀室内大气低腐蚀性分类第2部分: 室内大气腐蚀性的测定: GB/T 24513.2—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Corrosion of Metals and Alloys—Classification of Low Corrosivity of Indoor Atmospheres: Part 2: Determination of Corrosion Attack in Indoor Atmospheres: GB/T 24513.2—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [21] 倪清钊. 电力金属材料的腐蚀研究与寿命预测[D]. 上海: 上海电力学院, 2017: 26-27.
- NI Q Z. Corrosion Research and Life Prediction of Power Metal Materials[D]. Shanghai: Shanghai University of Electric Power, 2017: 26-27.
- [22] 马长李, 马瑞萍, 白云辉. 我国沿海地区大气环境特征及典型沿海地区大气腐蚀性研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(8): 65-69.
- MA C L, MA R P, BAI Y H. Characteristics of Atmospheric Environment in China's Coastal Areas and Atmospheric Corrosion in Typical Coastal Regions[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(8): 65-69.
- [23] 杨松, 郑山锁, 田忠祥, 等. 锈蚀 Q345B 钢力学特性试验及循环本构模型研究[J]. 工程力学, 2025, 42(2): 206-215.
- YANG S, ZHENG S S, TIAN Z X, et al. Experimental Study on Mechanical Properties and Cyclic Constitutive Model of Corroded Q345B Steel[J]. Engineering Mechanics, 2025, 42(2): 206-215.
- [24] 宋鹏彦, 赵仰康, 杨保卫. 基于整体易损性的猫头型输电塔抗倒塌能力分析[J]. 计算力学学报, 2023, 40(5): 710-717.
- SONG P Y, ZHAO Y K, YANG B W. Anti-Collapse Capacity Assessment of Owl Type Transmission Towers Based on Global Seismic Fragility Analysis[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2023, 40(5): 710-717.
- [25] 王纵开. 输电杆塔结构耐受风速分析及其应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- WANG Z K. Analysis and Application of Wind Speed Tolerance of Transmission Tower Structure[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [26] ROMAN R R, MIGUEL L F F, ALMINHANA F. Model Uncertainty Applied to the Failure Analysis of Transmission Towers[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 158: 108023.
- [27] 电力规划设计总院. 架空输电线路荷载规范: DL/T 5551—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- Electric Power Planning and Design General Institute. Load Specification for Overhead Transmission Lines: DL/T 5551—2018[S]. Beijing: China Planning Press 2018.