

# 腐蚀镀锌输电塔时变承载能力研究

杨子烨<sup>1</sup>,朱超杰<sup>1</sup>,施伟国<sup>1</sup>,杨婷<sup>2</sup>,何紫薇<sup>2</sup>,何畅<sup>2</sup>

(1. 国网上海市电力公司, 上海 200122; 2. 中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410075)

**摘要:**为了研究材料腐蚀作用下输电塔的安全性,通过数值模拟方法结合实验数据建立了输电塔镀锌钢材腐蚀后承载力退化模型。腐蚀效应通过在模型中引入人工腐蚀试验得到的材料力学参数和本构模型实现。在精细化有限元建模基础上对结构各关键点施加风荷载,以逐级加载方法计算不同腐蚀程度的模型关键点和塔腿的最大响应确定结构极限承载力。结果表明,由于腐蚀导致结构质量、刚度下降,输电塔基频随着腐蚀时间的增加不断降低,在镀锌钢材腐蚀周期为1200 h和4200 h时,输电塔承载力分别退化4.2%和5.3%。

**关键词:**风荷载; 腐蚀; 输电塔; 有限元模型

**中图分类号:** TM 752 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2024)03-0046-06

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20240308

## Research on Time-varying Bearing Capacity of Corroded Galvanized Transmission Tower

YANG Ziyue<sup>1</sup>, ZHU Chaojie<sup>1</sup>, SHI Weiguo<sup>1</sup>, YANG Ting<sup>2</sup>, HE Ziwei<sup>2</sup>, HE Chang<sup>2</sup>

(1. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China; 2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China)

**Abstract:** In order to study the safety of transmission towers under material corrosion, a bearing capacity degradation model of galvanized steel for transmission towers after corrosion is established through numerical simulation methods combined with experimental data. The corrosion effect is achieved by introducing material mechanical parameters and constitutive models obtained from artificial corrosion tests into the model. On the basis of refined finite element modeling, wind loads are applied to each key point of the structure, and the maximum response of model key points and tower legs with different degrees of corrosion is calculated using a step-by-step loading method to determine the ultimate bearing capacity of the structure. The results show that due to corrosion, the quality and stiffness of the structure decrease, and the fundamental frequency of the structure continuously decreases with the increase of corrosion time. When the steel corrosion cycle is 1200 h and 4200 h, the bearing capacity of transmission towers deteriorates by 4.2% and 5.3%, respectively.

**Key words:** wind load; corrosion; transmission tower; finite element model

## 0 引言

在电力系统中,铁塔在输电线路中起到支撑和保护输电线路的作用。目前中国高压交直流输电网架主要集中在福建、广东、海南、浙江等用电需求大、经济社会发展水平高的东南沿海地区以及部分内陆地区,而这些地区也是台风灾害侵袭的主要地区<sup>[1]</sup>。历

基金项目:国网上海市电力公司科技项目(5209R230007)

年来台风所导致的输电塔倒塌而造成大范围停电事故,不仅给人民日常生活带来不便,也给社会经济发展造成了巨大损失。

随着中国经济的发展,电网建设规模不断扩大,对电网设施在风灾等剧烈环境下的安全分析技术的需求日益迫切。其中,以钢材腐蚀为主的材料劣化效应对输电塔的抗风承载力影响日益受到关注。输电塔材主要由 Q235 和 Q345 热轧角钢组成,电力系统中的塔线体系长期暴露在空气中,塔材腐蚀严重,

采用镀锌钢仅能缓解大气腐蚀的危害,而角钢严重腐蚀后输电塔倒塌的危险仍然存在。

针对输电塔所用钢材腐蚀后的力学性能,文献[6]对 Q235B 钢材进行室内加速腐蚀试验以及钢材力学性能试验,并求得受腐蚀钢材的屈服强度、抗拉强度和伸长率下降与其失重率的关系式。文献[7]针对钢结构腐蚀而导致的结构全寿命耐久性问题,系统研究了钢结构在海洋大气和工业大气环境下的腐蚀行为和力学性能退化规律,为建立考虑腐蚀效应的输电塔结构安全性分析方法提供了依据。

在输电塔结构腐蚀效应分析方面,文献[8]利用宏观检验、化学成分分析、有限元分析等试验方法对腐蚀后的塔腿进行了分析,并为临近高污染化工区的输电线路防腐措施提供了建议。文献[9]在构件层次力学性能的基础上,利用有限元方法定量分析了4种常见锈蚀类型及锈蚀程度对输电塔角钢力学性能的影响,为输电塔维护及安全性提供了定量分析方法。

综上所述,大部分研究偏重输电塔腐蚀机理进行研究<sup>[10-12]</sup>,对腐蚀后输电塔性能研究较少。为此,下面建立了220 kV猫头输电塔有限元模型,结合镀锌钢腐蚀试验数据,研究塔材腐蚀后输电塔的动力特性和承载力的变化,以期对输电线路的安全分析评价提供参考。

## 1 输电塔有限元模型及动力特性

### 1.1 输电塔简介

输电塔是电力线路的重要承载设备,主要承担线路重量和张力,同时还起到支撑和定位电力线路的作用,保证电力输送线路的安全稳定。输电塔按照功能可以分为直线塔、耐张塔、转角塔、终端塔、换位塔和跨越塔;按照塔体制造材料可分为铁塔、钢筋混凝土塔;根据塔型又可分为酒杯塔、猫头塔、干字塔、羊角塔等。

所研究的对象为220 kV猫头输电塔,该型输电塔由钢制型材组成,杆件间连接采用粗制螺栓,靠螺栓受剪力连接,整体结构具有强度高、负载强、施工方便、应用范围广等特点。为了研究输电塔动力特性以及镀锌钢材腐蚀前后结构的承载能力变化,利用有限元软件对220 kV猫头输电塔进行建模:输电塔呼高为32 m,全高为37 m,根开为8 m;输电塔材

主要为Q235和Q345热轧角钢;建模过程中共定义空间节点7442个,梁单元8344个,单元类型均选用B31线性梁单元。所建立的猫头塔有限元模型如图1所示,Y轴正方向为输电塔高度方向,Z轴为输电塔线路方向,该塔角钢材料规格见表1。

表1 220 kV猫头塔角钢材料规格

材料	角钢规格
Q345	L160×12, L125×10, L125×8, L90×7, L80×6, L70×5
Q235	L100×8, L90×8, L90×7, L80×6, L75×5, L70×5, L63×5, L56×5, L50×4, L45×4, L40×4

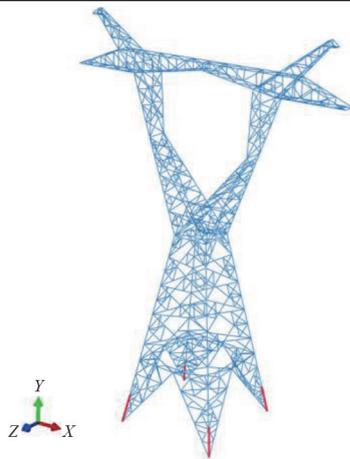


图1 输电塔有限元模型

### 1.2 输电塔动力特性分析

输电塔动力特性决定了结构的动力响应,因此对该型猫头塔进行模态分析,得到结构响应的频率及振型。表2列出了该型猫头塔的前6阶自振频率,图2展示了前3阶振型。

表2 输电塔前6阶自振频率

阶数	1	2	3	4	5	6
频率/Hz	3.349	2.664	2.909	5.262	6.825	6.843

由振动模态分析结果可知,结构第1阶振型为X方向平动振型,第2阶振型为Z方向平动振型,第3阶振型为绕Y轴扭转振型,前3阶自振频率分别为2.349 Hz、2.664 Hz、2.909 Hz。模型前3阶自振频率在输电塔常见频率范围内,验证了模型的准确性。

## 2 腐蚀对输电塔动力特性的影响

### 2.1 钢材材料性能

输电塔镀锌钢材在腐蚀后会导致承载力的退化,具体表现为以下方面:1)腐蚀导致钢材表面金属被侵蚀,从而使起初的截面尺寸减小,而导致钢材

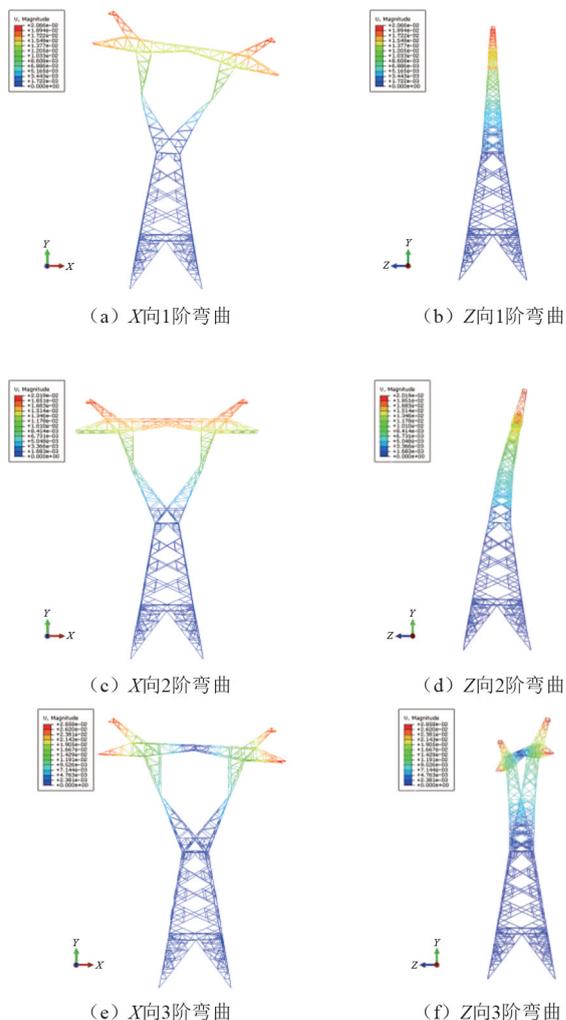


图 2 输电塔前 3 阶振型

承载能力下降;2) 腐蚀使钢材表面发生氧化、脱层和微裂纹等现象,从而导致钢材屈服强度、抗拉强度和屈服点等机械性能参数下降;3) 腐蚀造成的局部减薄和增强区域会使钢材的刚度下降,从而影响其整体的承载能力;4) 腐蚀引起的局部薄弱部位容易引发疲劳开裂,减小其疲劳寿命,提前发生疲劳破坏。

承载力退化会受到许多因素的影响,如腐蚀介质的性质、腐蚀程度、材料本身的性质等,因此引用文献[7]所进行的材料拉伸试验,并结合有限元模型进一步研究输电塔镀锌钢材腐蚀后承载力退化规律。该文献对 4 mm 厚钢材分别进行了 7 个周期的盐雾试验加速腐蚀(600 h、1200 h、1800 h、2400 h、3000 h、3600 h 和 4200 h)。为了在有限元模型中设置镀锌钢在经历不同程度腐蚀后的材料性能,这里仅参考腐蚀时间为 1200 h 和 4200 h 试件的试验结果,如表 3 所示。表中: $c$  为平均腐蚀率; $F_c$  为钢材抗拉极限承载力; $\sigma_{uc}$  为钢材极限强度; $\varepsilon_b$  为钢材极

限强度所对应的应变; $E_c$  为钢材弹性模量;编号 4-0- $x$ 、 $F_y-x$  中,4 表示厚度为 4 mm,0 表示未腐蚀, $x$  对应的数字表示该项试验的平行试件编号, $F$  表示盐雾试验,数字  $y$  对应的“2”和“7”分别表示腐蚀时间为 1200 h 和 4200 h。

表 3 4 mm 厚试件拉伸试验后力学性能指标

编号	$c/\%$	$F_c/\text{kN}$	$\sigma_{uc}/\text{MPa}$	$E_c/\text{GPa}$	$\varepsilon_b$
4-0-1	0	40.03	517.5	200.9	0.169
4-0-2	0	40.85	517.6	200.1	0.151
4-0-3	0	41.58	522.6	201.8	0.162
F2-1	10.09	35.56	499.4	194.6	0.129
F2-2	11.83	34.18	489.5	193.0	0.141
F7-1	21.29	30.64	491.5	186.7	0.085
F7-2	22.45	28.33	461.3	185.0	0.074

从表 3 可以看出,随着腐蚀周期的增加,平均腐蚀率逐渐增加,钢材的抗拉极限承载力、极限强度和弹性模量都呈明显降低趋势,且腐蚀率越大,承载力下降幅度越大,极限应变值越小。

试件在不同腐蚀周期下的应力-应变曲线如图 3 所示。从图 3 中可以看出随着腐蚀周期和腐蚀率的增大,钢材的应力-应变曲线发生了明显的变化:未腐蚀试件有明显的弹性、屈服、强化和颈缩 4 个阶段;而对于腐蚀后的钢材,试件屈服平台阶段随着腐蚀周期的增加而明显缩短甚至消失,曲线上比例极限即屈服点明显下降,表示在应变增加时,钢材应力保持相对稳定的范围变窄,即弹性变形能力下降也意味着腐蚀周期越长的钢材在同样应力条件下,可能会发生塑性变形。结合表 3 和图 3 发现,随着腐蚀率的增加,钢材应力-应变曲线的强化阶段明显变短,颈缩现象逐渐消失,试件更容易发生断裂破坏。

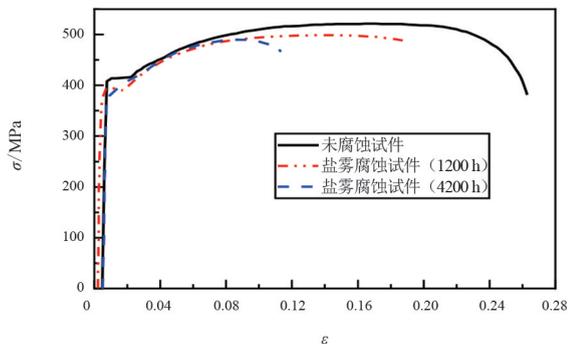


图 3 试件应力-应变曲线

## 2.2 输电塔腐蚀后动力特性变化

文献[7]通过室内模拟腐蚀试验,建立了某些地区镀锌钢室内模拟加速腐蚀与大气暴露腐蚀的相

关性预测模型以及相应地区镀锌钢腐蚀深度预测模型。该文献建立的中国东部沿海海洋大气环境的相关模型,如式(1)和式(2)所示。

室内外腐蚀时间模型为

$$T_c = 42.66T_{QD} \quad (1)$$

镀锌钢腐蚀深度模型为

$$D_{QD} = 1.237T_{QD} \quad (2)$$

式中: $T_c$ 为预测相应地区镀锌钢大气暴露腐蚀所对应的室内加速腐蚀时间, h;  $T_{QD}$ 为中国沿海地区大气暴露腐蚀时间;  $D_{QD}$ 为镀锌钢在中国东部沿海地区大气暴露腐蚀深度,  $\mu\text{m}$ 。

基于式(1)和式(2)可预测镀锌钢在与中国东部沿海相似海洋大气环境的腐蚀行为,即可通过室内盐雾试验工况下进行的 1200 h 和 4200 h 的加速腐蚀试验,得到中国东部沿海地区镀锌钢分别在约 28 年和 98 年后的腐蚀深度各为 37.8  $\mu\text{m}$  和 121.8  $\mu\text{m}$ 。

依据上述模型,分别建立了中国东部沿海地区使用时间为 28 年和 98 年的输电塔有限元模型,并进行模态分析,各模型前 6 阶频率如表 4 所示。表中显示,随着使用年限的增加,输电塔腐蚀程度增加,频率逐渐降低,说明腐蚀导致钢材截面尺寸减小,频率降低。

表 4 不同输电塔模型前 6 阶频率

阶数	频率/Hz		
	未腐蚀	28 年	98 年
1	2.349	2.347	2.345
2	2.664	2.663	2.661
3	2.909	2.907	2.906
4	5.202	5.200	5.198
5	6.825	6.823	6.822
6	6.843	6.842	6.841

### 3 输电塔的承载能力研究

#### 3.1 加载方法

输电塔结构有高耸、质轻的特点,主要承受铁塔、导线的自重荷载以及主要由风力和地震作用的动力荷载。输电塔大多处于开阔地区,受风力作用最为频繁,风力带来的荷载作用在输电塔结构中会直接产生应力和变形。因此,这里仅将横向风荷载作为动力荷载考虑。通常,在输电塔设计规范中,仅考虑静风荷载的作用,故对结构进行受力分析时认

为其为静风荷载。在实际工程中输电塔基础一般深埋于土壤中,可将其视为固定约束。

在输电塔上离散地选取 5 个关键节点,把对应离地高度处的风荷载施加在关键节点上。为了研究风荷载作用下结构的极限承载力,仅考虑横向风荷载和结构自重,而不考虑其余竖向荷载,其荷载施加方式如图 4 所示。

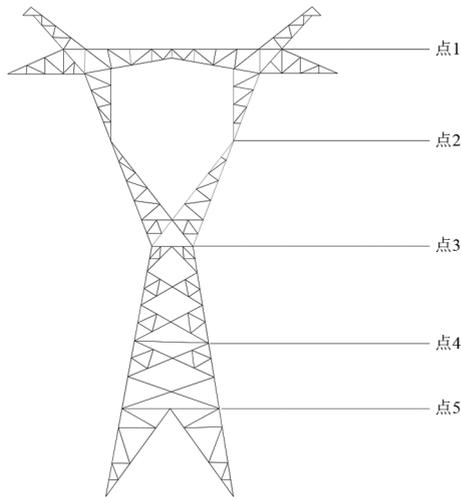


图 4 输电塔风荷载施加关键节点

#### 3.2 风荷载作用下的极限承载力

在图 4 所标关键位置处施加逐渐增加的横向静风荷载,荷载增加幅度为 2 kN,时间步长为 0.02 s,利用有限元分析软件进行计算,直至结果不收敛后说明已达到结构极限承载力则计算停止。图 5 为 5 个关键节点的位移时程曲线,图 6 为风荷载增加时塔腿轴力增加的时程曲线。从图 5 和图 6 中可以看出,当时间到达 3.59 s 后计算停止,说明此时可能到达结构所能施加的极限荷载。

塔腿的最大正应力沿纵向呈减少趋势,在图 6 中塔腿最底部单元(参考图 1)轴力在 3.58 s 时出现拐点,后续荷载的增加使轴力骤降且计算终止,说明此时已达到结构的极限承载力为 358 kN。

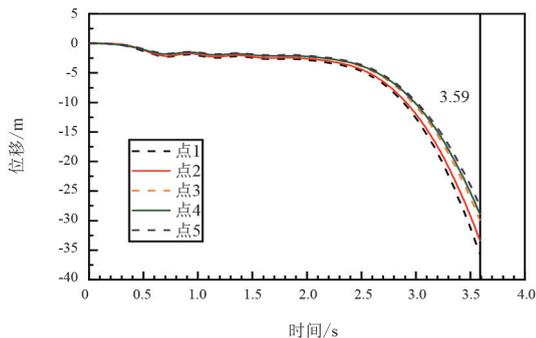


图 5 风荷载增加时关键节点位移响应时程

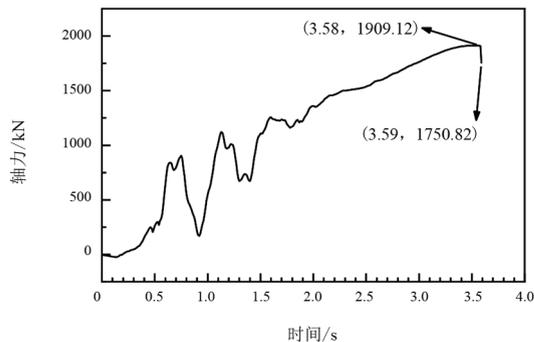


图 6 风荷载增加时塔腿轴力时程曲线

## 4 钢材腐蚀后输电塔承载力退化规律

以第 3.2 节同样的荷载施加方法, 分别对腐蚀周期为 28 年和 98 年的输电塔有限元模型进行承载能力计算。图 7 和图 8 分别为两个不同使用年限输电塔模型在 5 个关键节点的位移响应时程曲线, 图 9 为不同腐蚀程度的输电塔模型塔腿轴力时程曲线。结合图 7—图 9 可以看出, 在时间分别为 3.43 s 和 3.39 s 时, 腐蚀周期为 28 年和 98 年的模型计算停止且塔腿轴力出现拐点。因此可以得出两个模型的极限承载力分别为 344 kN 和 342 kN。

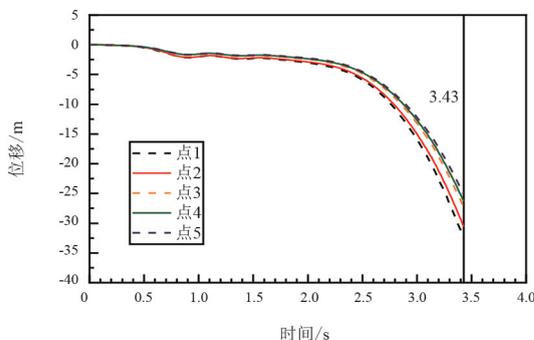


图 7 输电塔关键节点位移响应时程(28 年)

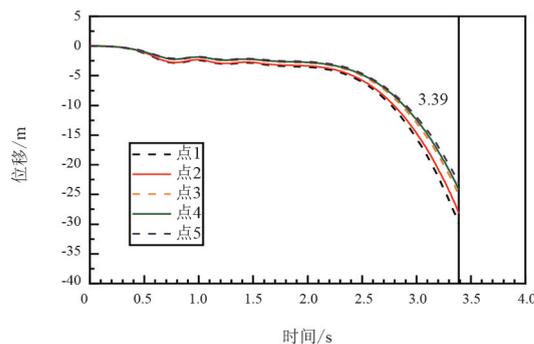


图 8 输电塔关键节点位移响应时程(98 年)

表 5 列出了不同腐蚀程度模型输电塔承载力计算结果。可以看出, 作为塔材的镀锌钢在腐蚀后使

得结构极限承载力下降, 下降幅度随着腐蚀周期的增长而增长, 输电塔抵抗变形能力下降。

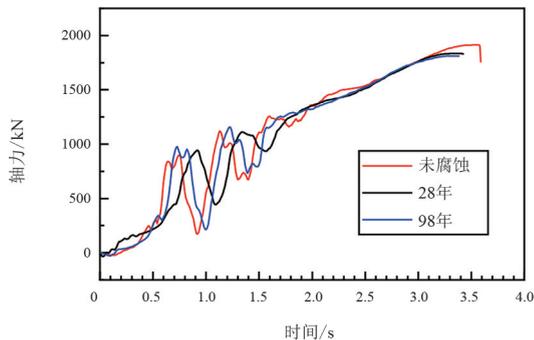


图 9 不同腐蚀程度的输电塔塔腿轴力时程

表 5 不同腐蚀程度的输电塔承载力计算结果

计算参数	未腐蚀	28 年	98 年
塔腿轴力最大值/kN	1 909.12	1 833.46	1 810.40
关键点位移最大值/m	35.28	32.18	29.46
极限承载力/kN	358	343	339
承载力下降*/%	0	4.2	5.3

注: \* 为与未腐蚀模型相比。

## 5 结 论

目前, 对腐蚀后输电塔承载力性能的研究较少, 为此, 上面依据镀锌钢腐蚀试验建立了 220 kV 猫头输电塔有限元模型, 研究了塔材腐蚀后输电塔的动力特性和承载力的变化。

1) 研究了材料腐蚀后输电塔的动力特性变化规律。钢材腐蚀后的截面尺寸减小, 质量损失, 造成结构整体振动周期增加, 频率呈现不断降低的趋势。

2) 对风荷载下输电塔钢材腐蚀后的极限承载力损失进行了量化。初始结构极限承载力为 358 kN 时, 腐蚀周期为 1200 h、4200 h 的结构极限承载力为分别为 344 kN、342 kN, 承载力分别退化了 4.2%、5.3%。

### 参考文献

- [1] 徐湘忆, 毛玮韵, 高凯, 等. 台风对电网的影响分析及应对措施[J]. 四川电力技术, 2022, 45(6): 31-34.
- [2] 李小芳, 杨伟军, 谢文平, 等. 强台风频发区输电塔破坏特征研究[J]. 中国高新技术企业, 2016(12): 28-30.
- [3] SIMITSES G J. Effect of static preloading on the dynamic stability of structures[J]. AIAA Journal, 1983, 21(8): 1174-1180.

- [4] 凌晓斌,杜伟,周转,等.输电塔-线体系的风致动力稳定性分析[J].科学技术与工程,2022,22(8):3134-3143.
- [5] 张恩旺,潘金龙,梁鸿宇,等.钢结构的腐蚀及防腐措施的研究[J].安徽建筑,2022,29(6):70-71.
- [6] 史炜洲,童乐为,陈以一,等.腐蚀对钢材和钢梁受力性能影响的试验研究[J].建筑结构学报,2012,33(7):53-60.
- [7] 陈尧.腐蚀环境下基于全寿命设计需求与时变可靠度的钢结构性能退化规律研究[D].南京:东南大学,2021.
- [8] 陈浩,张涛,房文轩,等.220 kV 输电铁塔塔腿腐蚀失效原因分析[J].材料保护,2020,53(12):139-142.
- [9] 高超,刘建军,郑逸川,等.锈蚀对输电塔角钢力学性能的影响[J].腐蚀与防护,2020,41(8):32-38.
- [10] 郑恒伟,余俊锋,施佳欢.腐蚀对输电塔交叉斜材力学性能影响[C]//2022年工业建筑学术交流会议论文集(下册).北京:中冶建筑研究总院有限公司,2022:514-518.
- [11] 葛兆军,张强,黄耀,等.输电铁塔耐候钢在不同大气环境下的腐蚀行为[J].中国电力,2016,49(12):8-14.
- [12] YE L G, LI W Z, HE C G. Research on detection method of tower corrosion based on hough transform[C]//2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA), 27-29 Jun. 2020, Dalian, China. IEEE, 2020: 433-436.

#### 作者简介:

杨子焯(1988),男,博士,工程师,研究方向为输电线路结构设计;

朱超杰(1987),男,硕士,高级工程师,研究方向为输电线路电气设计;

施伟国(1970),男,高级工程师,从事电力系统设计研究与管理工

作;杨婷(2002),女,本科生,研究方向为输电线路防灾减灾;

何紫薇(1999),女,硕士研究生,研究方向为电力系统防灾减灾;

何畅(1992),男,博士,讲师,从事电力系统防灾减灾研究。(收稿日期:2023-08-13)

(上接第45页)

#### 参考文献

- [1] 陈宗器.西电东输的现状和展望[J].华通技术,2004(3):33-39.
- [2] 王昊昊,罗建裕,徐泰山,等.中国电网自然灾害防御技术现状调查与分析[J].电力系统自动化,2010,34(23):5-10.
- [3] 赖芳.大渡河中下游沿岸生态环境脆弱性时空分布及地质影响因素研究[D].成都:成都理工大学,2020.
- [4] 姚李.基于GIS的大渡河流域地质灾害危险性评价[D].成都:成都理工大学,2020.
- [5] 王家柱,高延超,铁永波,等.基于斜坡单元的山区城镇滑坡灾害易发性评价:以康定为例[J].沉积与特提斯地质,2023,43(3):640-650.
- [6] 徐如阁,郑万模,巴仁基,等.大渡河流域泥石流发育特征研究[J].人民长江,2013,44(S1):117-119.
- [7] 巴仁基,王丽,郑万模,等.大渡河流域地质灾害特征与分布规律[J].成都理工大学学报(自然科学版),2011,38(5):529-537.
- [8] 丁俊,鄢毅,岳昌桐,等.四川省大渡河流域地质灾害分布及其发展趋势浅析[J].中国地质灾害与防治学报,2007(S1):22-25.
- [9] 宋红伟,赵东力,姬道新,等.以地貌单元划分线路工程地质灾害危险性评估区段的可行性分析——以三门峡电厂~洛阳牡丹变500 kV输电线路工程为例[J].地下水,2007,29(2):115-117.
- [10] 李伟强,曾渠丰.山区输电线路工程勘察中的地质灾害问题与治理方法[J].湖北地矿,2002,16(4):47-50.
- [11] 陈先勇.浅析地震滑坡、崩塌及地裂缝性质特征和塔基场地选择原则[C]//四川省地质学会水文地质工程地质专业委员会,四川省地质学会环境地质专业委员会,四川省水力发电工程学会地质及勘探专业委员会,四川省水力分会工程地质与岩石力学专业委员会.2010四川省水文、工程、环境地质学术交流会论文集.《四川地质学报》编辑部,2010:59-64.
- [12] 陈满,陈龙,张世殊,等.川藏联网输变电线路工程地质灾害发育规律与特征研究[C]//中国地质学会工程地质专业委员会.2016年全国工程地质学术年会论文集.科学出版社,2016:1464-1470.
- [13] 何永东.输电线路工程地质灾害事故的预防和整治管理[J].凉山大学学报,2003,5(1):25-27.
- [14] 林晋辉.锦屏一级水电站G1002电塔塔基边坡失稳机理及防治对策研究[D].成都:西南交通大学,2014.
- [15] 全国地震标准化技术委员会.中国地震动参数区划图:GB 18306—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [16] 李源亮.川西地区地质灾害危险性及其工程地质环境质量对输变电工程规划影响研究[D].成都:成都理工大学,2018.
- [17] 范荣全,董斌,李源亮,等.川西地区输变电工程地质环境质量评价[J].科学技术与工程,2020,20(2):544-549.

#### 作者简介:

范荣全(1964),男,硕士,教授级高级工程师,从事电工程理论与新技术研究。(收稿日期:2023-07-13)