

专 家 介 绍



冯德成,东南大学青年首席教授、博士生导师,教育部“长江学者奖励计划”青年学者、德国“洪堡资深学者”、中国科协“青年人才托举工程”入选者、江苏省杰出青年基金和优秀青年基金获得者。主要从事面向城市基础设施韧性的“监-评-算-增”等方面研究。主持国家“十四五”重点研发计划课题1项、国家自然科学基金4项、江苏省自然科学基金2项、英国皇家学会国际合作与交流项目1项等科研项目。现任领域权威SCI期刊ASCE J. Struct. Eng.、J. Build. Eng. 副主编,国际知名SCI期刊Eng. Fail. Anal.、国内知名期刊《应用基础与工程科学》《应用力学学报》等青年编委。已发表学术论文100余篇,入选爱思唯尔“中国高被引学者”、斯坦福“全球前2%顶尖科学家”生涯榜单和年度榜单。出版中、英文专著各1部、中文教材1部,获授权国家发明专利15件、软件著作权8件,参编行业标准/规程/图集等5部。先后获上海市科技进步一等奖、中国钢结构协会科学技术一等奖、中国公路学会青年科技奖、中国灾害防御协会青年科学奖、国际先进材料学会科学家奖章、欧洲计算方法与应用科学学会青年学者奖等科技奖励。

输电线路抗灾韧性研究进展

马志程^{1,2},余浩东³,刘锋¹,王关霖¹,赵金雄^{1,2},冯德成³

(1. 国网甘肃省电力公司,730000 兰州;2. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院,730070 兰州;

3. 东南大学土木工程学院,210096 南京)

摘 要:目前对于输电线路抗灾的研究和文献多聚焦于某一灾害对输电线路的影响,且主要关注地震和风灾害的作用,缺少对于输电线路在各种灾害下从灾害破坏机理到概率评估再到韧性评估这一针对输电线路抗灾韧性研究的系统性梳理。为了对当前输电线路抗灾韧性研究进展进行系统总结,首先研究了目前有关输电线路在地震、风、洪水、滑坡这4种单一灾害以及风-震、风-冰这2种典型耦合灾害下的破坏机理以及相应的输电线路结构模型和灾害模型;随后对输电线路在这些灾害作用下的概率评估进行了梳理,针对目前有关上述灾害的危险性评估、灾害作用下结构概率评估以及灾害导致损失评估的研究进行了总结,并回顾了目前国内一些进行输电线路抗灾研究团队的研究成果;在此基础上梳理了有关区域输电线路韧性评估的研究,指出区域输电线路的韧性研究的关键和现有研究的不足;最后对输电线路抗灾韧性研究的发展方向进行了展望,并得出了有关输电线路破坏机理模型、灾害作用下结构概率评估方法、区域输电线路韧性的研究关键以及未来输电线路抗灾韧性研究的发展方向。

收稿日期:2024-10-23

基金项目:国家电网有限公司2024年总部科技项目(No. 5700-202433233A-1-1-ZN)

通信作者:冯德成,教授。E-mail:dfeng@seu.edu.cn

引用格式:马志程,余浩东,刘锋,等. 输电线路抗灾韧性研究进展[J]. 应用力学学报,2025,42(5):963-982.

MA Zhicheng, YU Haodong, LIU Feng, et al. A review of disaster resilience of transmission lines[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2025, 42(5):963-982.

关键词:输电线路;抗灾韧性;破坏机理;灾害作用模型;概率评估;灾害危险性;区域电网

中图分类号:TM752

文献标志码:A

文章编号:1000-4939(2025)05-0963-20

A review of disaster resilience of transmission lines

MA Zhicheng^{1,2}, YU Haodong³, LIU Feng¹, WANG Guanlin¹, ZHAO Jinxiong^{1,2}, FENG Decheng³

(1. State Grid Gansu Electric Power Company, 730000 Lanzhou, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Gansu Electric Power Company, 730070 Lanzhou, China;

3. School of Civil Engineering, Southeast University, 210096 Nanjing, China)

Abstract: Most existing studies and literature focus on the impact of specific disasters, primarily earthquakes and wind disasters. There is a lack of systematic research on the resilience of transmission lines to various disasters, encompassing damage mechanisms, probabilistic assessments, and resilience evaluations. This article first summarizes the mechanisms of transmission lines under four types of disasters: earthquakes, wind, floods and landslides, along with their structural and disaster models. Then the probabilistic assessments of transmission lines under these four disasters are reviewed, summarizing current research on disaster risk assessments, structural probabilistic assessments under disaster effects, and loss assessments caused by these disasters. The research results from some domestic teams on the disaster resistance of transmission lines are also reviewed. Based on this, research on the resilience assessment of regional transmission lines is reviewed, highlighting the key factors for resilience and shortcomings of existing studies. Finally, the future direction of research on the disaster resilience of transmission lines is discussed, and relevant conclusions are drawn.

Key words: transmission line; disaster resilience; damage mechanism; disaster impact model; probabilistic assessment; disaster risk; regional power grid

近年来,随着我国经济社会的不断发展,社会生产生活对电力的需求也在日益增加。与此同时,输电线路作为电力系统中的重要设备以及电网的重要组成部分近年来也在快速发展。截至2022年底,全国电网220千伏及以上输电线路回路长度超88万千米^[1],这些输电线路覆盖范围广、电压等级高、负荷容量大、线路情况复杂^[2]。由于输电线路大多暴露野外,所处环境复杂多变,容易受到各种自然灾害的影响,由此引发的输电线路故障往往难以预料。此外,灾害发生时区域输电线路的损坏可能导致其他生命线系统功能瘫痪,故电力系统能否抵御外界破坏和恢复,直接影响到灾害后应急响应和人民生活秩序恢复的速度。我国是世界上自然灾害最为严重的国家之一^[3]。据中国电力可靠性管理中心的统计数据显示,自然灾害、气候因素是造成架空输电线路非计划停运的主要原因^[4]。雷电、雨雪冰冻、风、地震、洪涝、滑坡泥石流、山火等都会威胁电网的安全^[5]。其中雷电导致的输电线路跳闸、异常情况虽然占比最大,但雷电大多是对输电线路的电气设备

造成破坏和影响,只在极少数情况下可能导致绝缘子脱离、导线断裂等对结构的影响。风灾对输电线路的影响有较强的地域性和季节性,在广阔沿海地区的台风高发季节,风致输电线路损毁发生较多。地震的发生频率虽然比风灾要小得多,但地震一旦发生,尤其是强震,对输电线路的影响非常大,例如,在“5·12”汶川特大地震中的极震区内,输电线路及电力设施严重损毁,电网瓦解。

自然灾害具有突发性、不确定性、广泛性和严重性等特点。在这种情况下,如何评估输电线路在灾害作用下的损伤情况及其抗灾韧性是很多学者关心的问题。尽管目前不少研究人员给出了输电线路在不同灾害作用下的计算模型,但如何在模型精度与计算效率之间找到平衡点,建立既接近实际情况又具备较高计算效率的简化模型仍是当前研究需要解决的问题。其次,目前有关输电线路抗灾的研究大多是针对单灾害作用下的研究,对多灾害耦合效应的研究相对较少,而单一灾害评估方法无法全面反映实际灾害作用的复杂性,因此亟需发展多灾害综

合评估方法。此外,现有研究多集中于对单条或某一段输电线路的概率评估,缺乏对区域电网影响的研究。并且,对于输电线路韧性评估的方法不统一且不完备,缺乏具体的量化标准,目前的研究缺少对电网系统和其他基础设施之间相互作用的评估。

本研究梳理了输电线路在单一灾害以及典型耦合灾害下的破坏机理,总结了输电线路在这些灾害作用下的概率评估方法,区域输电线路韧性评估等有关输电线路抗灾韧性研究的关键性问题,在电力系统中引入“韧性”的概念,以此来评估电力系统在应对极端事件时的抗灾能力,并在此基础上对输电线路抗灾韧性研究的发展方向进行了展望。

1 输电线路破坏机理研究

本章对输电线路在地震、风、洪水、滑坡这4种常见单一灾害以及风-震、风-冰这2种典型耦合灾害下的破坏机理进行了总结。灾害破坏机理主要是建立灾害作用与结构响应之间的关系,针对这一问题,一些学者提出了输电线路在不同灾害作用下的模型,这些模型包括结构模型和灾害模型,常见的结构模型包括塔线体系模型和单塔模型(图1)。其中,大连理工大学的李宏男、付兴团队,针对输电线路在风、雨、地震等灾害作用下破坏机理展开了一系列研究,对风作用下塔线体系的响应、风雨联合作用模型、输电线路连续倒塌破坏、地震作用下塔线体系的多维多点激励和桩-土-结构耦合作用进行了研究并提出了相关模型^[6-12],此外还针对风雨共同作用下输电塔的响应开展了风洞试验^[13],针对地震作用下塔线体系开展了多维多点振动台实验^[14]。同济大学李杰、谢强团队对输电线路在风^[15-17]和地震^[18-19]作用下的机理进行了大量理论研究和数值模拟,并针对上述问题进行了大量的风洞试验^[20-21]和振动台实验^[22-23]。山东大学田利团队也针对上述问题也展开了相关研究^[24-29],并针对大跨越输电塔-线耦合体系的地震和风振响应分别展开了风洞试验和振动台实验^[30-32]。重庆大学李正良团队针对大跨越特高压输电线路的塔线结构和单塔结构进行了大量的风洞试验,以获取结构风动力特性和风振响应等数据^[33-35]。浙江大学楼文娟团队则在输电线路的风振响应和导线覆冰问题上开展了大量的理论分析、实验研究和数值模拟^[36-38]。

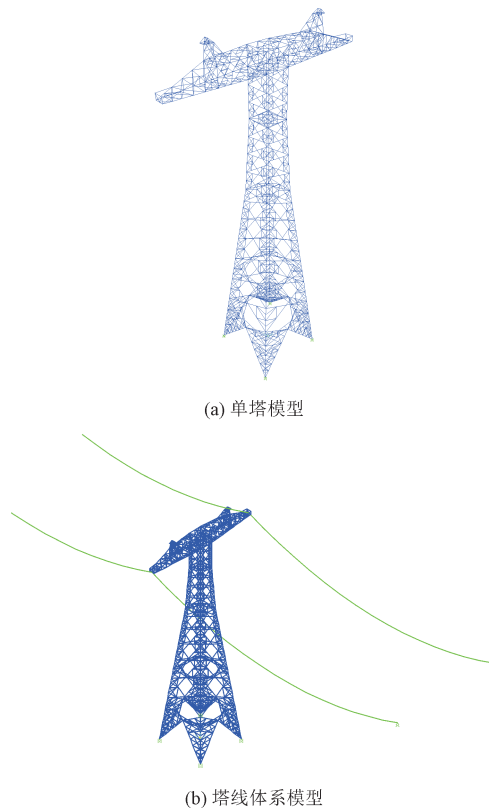


图1 输电线路有限元模型

Fig.1 Finite element model of transmission lines

1.1 地震作用

输电塔线体系是由输电塔基础、输电单塔、绝缘子、连接金具和导线地线组成的复杂空间耦合体系^[39]。在地震作用下,输电塔与导线之间、输电塔与地基土体之间均存在相互作用。在对输电线路进行建模分析时,何运祥^[40]以国内某大跨输电线路为工程背景,采用精细化有限元模型研究了输电塔线体系的动力特性和地震反应,揭示了导线对塔动力特性的作用机理,并考虑了导线跌落及其与地面碰撞对输电塔杆件内力的影响。葛绪章^[41]通过建立输电塔线体系的有限元模型,使用静力分析和模态分析评估断线影响,确定最不利断线工况,研究了断线作用下输电塔线体系的连续倒塌。上述研究所采用的都是较为精细化的实体模型,计算成本大、耗时长。鉴于此,一些学者提出了输电塔线体系的简化模型,WANG等^[42]提出了一种考虑土-结构相互作用的输电塔-绝缘子-线耦合系统的简化模型,该模型将输电塔体简化为多自由度模型,单层输电线路简化为质量集合的多自由度刚杆组合,单层绝缘子简化为单摆模型,同时通过位于基础上的弹簧和阻尼器来模拟地基产生的刚度和阻尼。使用该模型的

分析表明,土-结构相互作用可以对工程结构的抗震性能产生明显的影响,而考虑塔线相互作用对塔顶的位移响应有显著影响。此外,还有部分学者采用单塔模型来研究输电塔的地震响应^[43-47],将输电塔作为一个单独的个体进行建模分析,不对导线进行建模,简化或忽略导线振动对输电塔的影响,这类模型往往具有较高的计算效率。尽管从理论上来说导线振动导致的塔线相互作用可能导致邻近输电塔振幅的加剧或减小^[48],但现有的实验和有限元分析表明,在大多数情况下,导线的振动会降低塔体的动力响应^[19,47-50],因此,单塔模型在一般情况下是偏于保守的。

在对输电线路进行地震作用下的时程响应分析时,需要输入地震波,地震波可以分为自然波和人工波,自然波是对历史上所发生地震的实测记录,如迁安波、El-Centro波,而人工波是根据场地土条件、地震烈度等条件同时按照有关规范^[51]人工合成的符合某些统计特征的非平稳地震波时程,此外,规范还要求当采用动力时程分析法进行抗震设计时,输入的地震动时程不应少于3条,其中至少应有一条人工合成地震动时程^[51]。对于输电塔线体系这类跨度大、高度高,不同支点间距离较大的结构体系,地震波到达各支点的时间差异和强度变化不容忽视,因此需要考虑地震分析的空间效应,针对该问题,一些学者对输电塔线体系的多点、多维地震响应进行了研究^[47,52-54]。其中,朱珠^[47]通过建立输电塔线体系的有限元模型,采用时程分析法,研究了输电塔线体系在不同维数地震波作用下以及一致激励、多点激励下的输电塔线体系地震响应特征,发现输电塔构件的内力在多维地震下明显增加,而多点激励则增大了输电塔塔身的位移和加速度响应。此外,还有一些学者则关注输电塔在主余震作用下的损伤情况^[55-57],其中,LIU等^[56]通过在主震和余震之间插入一个20 s的时间间隔,并将该地震波施加在建立的单塔有限元模型上来模拟输电塔在主余震作用下的损伤情况,研究表明在主震期间已经遭受重大破坏的结构,随后的余震会显著加剧破坏的累积。

1.2 风作用

与地震作用下输电线路结构动力响应分析类似,可以采用精细化的有限元模型对塔线体系进行建模,通过相关公式计算作用在输电线路上的风荷载,对输电线路的响应进行分析(图2)^[58-61]。李懿

鹏^[58]建立了一塔两线的精细化塔线体系有限元模型并利用谐波合成法模拟得到了风荷载时程,在此基础上对模型进行了时域分析,探究了不同风速、风角度下塔线体系响应及有限元模拟方法。在上述塔线体系模型中,通过对结构划分节点单元,将计算得到的风荷载加在节点单元上,图2显示了输电线路在风作用下的模拟过程。但实际上,导线与风的作用非常复杂,尤其是在风雨共同作用下导线还有可能发生风雨激振,严重威胁输电线路正常运行。对此一些学者针对输电线路中导线的风雨激振问题展开了研究^[62-66],其中,王辉等^[64]针对塔线体系在风雨激振作用下的动态响应进行了模拟分析,通过对“一塔两线”体系模型进行数值模拟,分析了良态风雨场和湿下击暴流场下的风雨时程荷载对塔线体系的影响,结果表明雨滴冲击对塔线体系的激励增大作用不可忽视。除了上述塔线体系模型,还有部分学者提出了输电线路的单塔模型^[66-70],其中,DA-RESTANI等^[69]建立了双回路垂直钢格构塔的单塔有限元模型,该模型通过在格构单元的中点施加0.05%~0.1%的弯曲位移来考虑构件缺陷和 $P-\delta$ 效应,并采用基于实验的节点滑移模型来反映强风作用下螺栓连接处的节点滑移,风荷载的计算则采用美国土木工程师协会(American Society of Civil Engineers, ASCE)的等效静力风模型。与塔线体系模型相比,简化的单塔模型计算效率更高,但需要注意的是,输电塔单塔模型一般是用在那些仅关注风荷载作用下塔体某些响应特征的问题,对于输电塔线路,一般多采用塔线体系模型来分析输电线路的响应,且目前国内架空输电线路荷载规范在其风荷载计算章节中给出了导地线风荷载的计算方法^[70]。

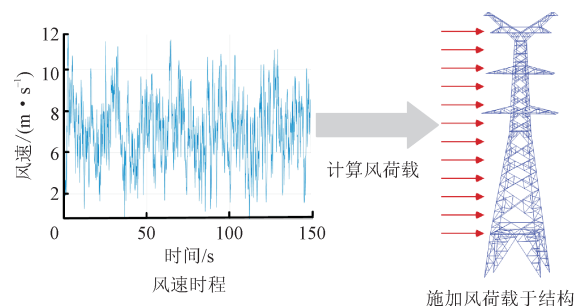


图2 输电线路风作用模拟示意图

Fig. 2 Diagram of wind load simulation on transmission lines

对塔线体系的风荷载,国内外相关规范均给出了相应的计算方法^[70-71],其中,《架空输电线路荷载规范》^[70]给出了导地线风荷载、杆塔风荷载以及绝缘子串风荷载的计算方法,同时还给出了典型气象

区的基本风速。作用在结构上的风荷载可以分为两部分,由平均风引起的静载和由脉动风引起的动载,其中平均风是一个与高度和地面粗糙度有关的不随时间变化的值,而脉动风则是多维多变量各态历经的平稳高斯过程^[72],结构上某一点的风速时程可以视为该点平均风与脉动风的风速时程的叠加。国内规范采用阵风系数来考虑脉动风因素,但该规范并不是将脉动风视为平稳高斯过程,而是通过峰值因子的选取保证风速在97.73%~99.38%的几率范围内^[73]。因此,为了研究输电线路在风速时程下的响应,一些学者对输电线路的脉动风时程的模拟进行了研究^[58,74-76],其中在工程中应用较多的是谐波叠加法,该方法是一种通过将随机过程或随机场模型化为一系列确定性谐波函数的代数和来模拟随机过程的方法。此外,还有部分学者利用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)仿真模拟的方法研究了位于不同地形下的输电线路的风场特征。赵珊鹏等^[77]对位于微地形下的输电线路风场特征进行了研究。智鹏^[78]对位于垭口地形下的塔线体系风场特征进行了模拟。刘春城等^[79]研究了山脉地形迎风面输电线路的风场特征,并建立了不同山脉坡度的山地风场模型。

1.3 洪水作用

如图3所示,洪水对于输电线路的作用主要表现在洪水对于输电塔塔身的冲击作用,对于塔基的冲刷作用,水中杂物对于输电塔的撞击作用,以及塔基长期浸泡在洪水下地基承载力的降低^[80]。其中水流对于输电塔的冲击作用有限,输电塔在洪水作用下的损坏大多是由于洪水对于塔基的冲刷作用以及塔基长期浸泡在洪水下地基承载力的降低导致的,即使是位于江河水域中的输电塔,主要考虑的也是洪水对于塔基的冲刷作用^[81-83]。此外,位于山区的输电塔,当发生洪水时,往往还伴随有滑坡、泥石流等地质灾害的发生^[84-87],与洪水水流的冲击作用相比,这些地质灾害对于输电塔的破坏往往要大得多。

在对输电线路进行洪水作用下的分析之前需要明确洪水所造成的影响,在这方面 FEENEY 等^[88]利用二维水文沉积模型预测河谷中河流侵蚀对电力传输基础设施的威胁,该研究通过 CAESAR-Lisflood 景观演化模型模拟了河流在多个流量增加情景下的河道变化,并预测了输电设施基础在未来可能发生的

侵蚀影响风险。

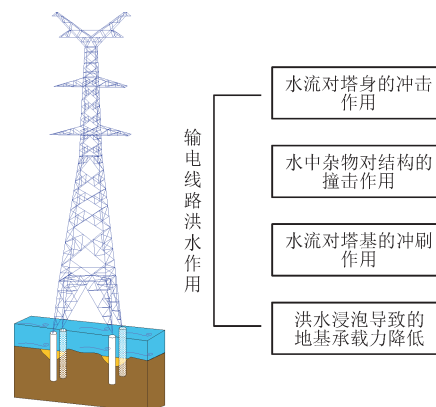


图3 洪水作用类别

Fig. 3 Categories of flood impact

此外,还有研究者使用合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)技术来获取洪水所造成的影响^[89]。关于洪水造成的冲刷作用,参考有关输电塔塔基冲刷作用的文献可以发现^[82,90-92],国内关于输电塔塔基在水流冲刷下的冲刷深度可以按照《架空输电线路基础设计技术规程》^[93]规定的局部冲刷公式计算,同时也可根据《电力工程高压送电线路设计手册》^[94]中的说明,按照《公路工程水文勘测设计规范》^[95]中桥墩的冲刷公式计算。关于浸泡作用,国内专门对于洪水浸泡下输电塔塔基承载力的研究很少。孔凡歌^[96]使用 ABAQUS 软件建立有限元模型,分析非饱和土浸水试验和洪水对输电塔扩展基础及桩基础承载性能的影响。通过模拟不同工况下的孔压、饱和度及浸润面变化,验证了模型的准确性,并得到了各种工况下基础的极限承载力及其变化规律。该问题属于地基中水分入渗对基础承载性能的影响,有不少学者对此类问题展开了研究。廖紫欣^[97]通过分析中峰型降雨及其他雨型下的地基基质吸力和承载力演化,发现地下水位变化及不同降雨模式对地基稳定性有显著影响;程铮^[98]通过建立输电线路基础抗拔桩的有限元模型,研究了在降雨条件下地基中水分入渗对抗拔桩极限承载力的影响。

1.4 滑坡作用

滑坡对输电线路的作用主要表现在2个方面,一是在滑坡过程中,滑坡体对输电塔的冲击作用,二是由于滑坡所导致的输电塔塔基的位移。滑坡对于输电线路造成的破坏与输电线路所处的位置以及滑坡影响范围、规模有很大关系,在有些情况下,尽管

发生了滑坡,但由于输电线路位于滑坡影响范围边缘,此时输电塔几乎没有受到影响,但另一些情况下滑坡会导致输电塔的彻底损毁进而导致输电线路的中断。

郭卓恒^[99]根据滑坡体与输电塔的相对位置关系(图4),将滑坡灾害对输电塔的影响划分为三类4种情况(表1),即输电塔位于易滑坡体上,同时发生剧烈滑坡,这种情况下输电塔将彻底损毁;输电塔位于滑坡冲击范围内,发生缓慢滑坡,这种情况下输电塔不会受到滑坡影响;而剧烈滑坡下位于滑坡体冲击范围内的输电塔和缓慢滑坡下位于滑坡体上输电塔的损伤情况则取决于滑坡体对输电塔的冲击作用和滑坡所造成的输电塔塔基的位移。

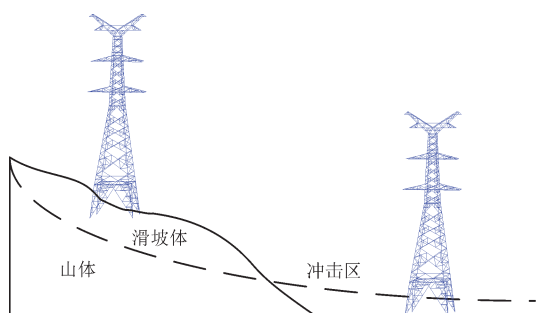


图4 输电塔与滑坡体相对位置示意图

Fig. 4 Diagram of the relative position between transmission towers and landslide bodies

表1 滑坡作用下输电塔损伤状态分类表

Tab. 1 Classification of transmission tower damage states under landslide impact

影响分类	滑坡状态	输电塔位置	损伤状态
1	剧烈滑坡	滑坡体	彻底摧毁
2	剧烈滑坡	冲击区	取决于滑坡冲击力和塔基位移
3	缓慢滑坡	滑坡体	
4	缓慢滑坡	冲击区	没有影响

在上述分类中,第一类和第二类情况下输电塔的损伤状态是明确的,因此有学者通过对输电塔模型施加冲击力与位移来模拟分析第三类情况下输电线路的响应及损伤状态^[99-102]。郑武略等^[102]建立了一个两塔三线的有限元模型,通过在输电塔塔腿处施加位移来模拟滑坡作用,同时对模型施加风荷载,研究了滑坡区输电塔体系在风荷载下的响应。需要注意的是,这些研究只是讨论了作用在输电塔上的冲击力、位移与结构响应的关系,而对于滑坡产生的

冲击力和位移的大小没有进行研究,输电线路滑坡分析的难点不在于如何对输电塔施加作用力与位移,而是对于输电塔所处位置可能发生滑坡的预测。

滑坡的产生与地形、地质、气候(主要是降水)有关,此外还有一些人为活动也会导致滑坡^[103],基于此,一些学者研究了输电线路所在位置地形地质以及降水条件与滑坡的关系^[84,104-105]。汤奕等^[84]根据气象数据建立了预测累计降雨量的模型,并在此基础上根据统计资料,建立了中国东南某省份有效降雨量与滑坡概率之间的模型。部分学者利用岩土仿真分析软件预测滑坡作用下输电塔的塔基位移^[106-108],其中,高利松^[106]根据输电塔所在坡面的地貌、地质信息在 GeoStudio 岩土仿真分析软件中建立坡面的模型,研究了在不同降水条件下滑坡体的安全系数和输电塔的塔基位移。还有部分研究者对输电塔线结构在滑坡作用下的倒塌模式展开研究, YU 等^[109]在 Matlab 中基于显式算法模拟了结构在滑坡作用下输电塔的非线性动态响应和倒塌过程并识别其倒塌机制,分析了2种滑坡下基础的失效情况(同侧2个塔腿失效、3个塔腿失效),并通过对塔顶位移响应及渐进倒塌行为的分析,发现滑坡作用下输电塔线结构的倒塌模式主要受输电塔基础失效模式和电缆拉力的影响。

1.5 灾害耦合作用

除上述4种灾害单独作用外,在现实情况中输电线路还有可能受到多种灾害的联合作用,如风-震、风-冰、风-雨等。考虑到灾害耦合种类的多样性以及篇幅所限,本研究以风-震、风-冰耦合为例,来介绍输电线路灾害耦合作用的破坏机理。

关于输电线路风-震耦合作用的破坏机理,根据考虑地震作用与风作用的先后顺序可分为3种情况,即先风后震、先震后风以及风震同时发生。LI 等^[110]开展了输电线路结构风致疲劳情况下的地震响应分析,研究了先风后震情况下的结构响应,该研究基于现场实测数据进行了输电线路结构的风致疲劳分析,得到结构的损伤状态和材料的劣化模型,并在此基础上选择地震动记录和风荷载时程对结构进行有限元分析,发现忽略累积损伤的影响可能会导致对结构在地震作用下响应的低估。JEDDI 等^[111]利用所开发的多自由度三维高保真有限元模型,对

输电塔在纵、横两个方向上先风后震以及先震后风两种灾害顺序下结构的响应进行了研究,并与单一风或地震灾害作用下输电塔的破坏模式进行比较,发现风-震或震-风这样的多灾害作用下输电塔的破坏模式与单一灾害作用下的破坏模式有着明显不同。对于风震同时发生的情况,尽管目前在不少研究中都假设这两种灾害同时发生的概率为0^[112-113],但是实际上,在空旷多风地带发生地震时,结构一般也同时受到风作用,针对该情况,王文明等^[114]在ABAQUS软件中建立了输电塔-线体系有限元模型,通过风场模拟生成加载点处的风荷载时程,同时施加地震波对结构响应进行分析,研究了风速、风向以及耦合作用时间对结构动力响应的影响。

风-冰耦合作用是一种常见的输电线路多灾害耦合作用,目前国内外关于风-冰耦合作用的研究较多。在风与覆冰导线作用方面,刘竹丽等^[115]以覆冰八分裂输电线路为对象,用Fluent计算导线的气动力系数,根据舞动机理判断初始风攻角区,并在ABAQUS中建立八分裂输电导线的有限元模型,分析了导线的气动特性及驰振稳定性,研究了不同绝缘子串连接形式、风速及初始风攻角对覆冰导线响应的影响。上述研究中覆冰荷载是根据区域导线的覆冰特征进行计算,但实际工程中对输电线路的覆冰预测非常困难。针对该问题,HUANG等^[116]提出了一种新的覆冰模拟方法,该方法充分考虑了微地形和微气象的影响,通过高分辨率的地形数据,识别架空输电线路区域的典型微地形,并分析不同地形下的覆冰厚度特征。除了数值模拟以外,一些研究人员采用实验的方法来研究风荷载作用下覆冰输电线的振动特性和气动系数等空气动力学特征^[117-118]。此外,还有学者针对覆冰脱落时风荷载作用下导线的响应展开了研究,其中,LOU等^[119]探

讨了风作用与覆冰脱落对导线跳跃高度的耦合影响,该研究通过风洞试验获取了新月形截面覆冰导线的空气动力系数,并通过数值模拟分析了特高压输电线路在覆冰脱落与风共同作用下的动态响应。研究了风速、风攻角、覆冰厚度及覆冰脱落率对导线最大跳跃高度的影响,并提出了考虑冰-风耦合作用的导线最大跳跃高度经验公式。

2 输电线路概率评估研究

不同于传统对结构损伤的确定性评估,基于结构可靠度理论的概率评估,认为工程中的各种不确定性因素具有随机性,因此采用概率模型进行结构分析^[120]。这些不确定性不仅包括灾害作用,还包括结构构件本身的不确定性,且近年来的研究表明,在进行结构概率评估时,结构构件自身的不确定性是不可忽略的^[121]。

就灾害作用下输电线路的概率评估而言,输电线路所面临的各类灾害的作用以及输电线路自身的材料设计参数存在诸多不确定性。与传统的确定性评估相比,概率评估在考虑不确定性、提供量化风险、优化资源分配、提高决策科学性以及综合评估多种灾害等方面,具有显著的优点。灾害作用下结构概率评估主要包括对灾害的危险性评估和对结构的易损性评估^[122],在此基础上还可以进一步评估由结构损坏带来的人员财产损失以及修复时间和成本^[123-124]。图5为输电线路概率评估框架。研究人员根据输电线路灾害破坏机理,结合结构概率分析方法,对灾害作用下输电线路进行了概率评估。同济大学李杰、谢强团队^[125-127]和大连理工大学李宏男、付兴团队^[128-130]均对输电线路在地震和风等灾害作用下的概率评估问题展开了研究。

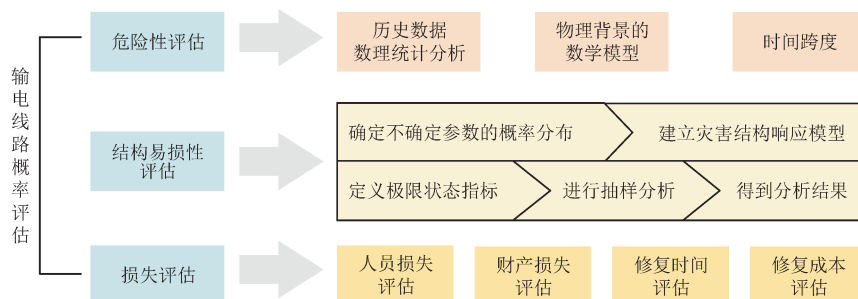


图5 输电线路概率评估框架

Fig. 5 Probabilistic assessment framework for transmission lines

2.1 地震作用下概率评估

对于地震作用下输电线路的概率评估,在土-结构耦合以及塔-线耦合问题上,WANG等^[42]建立了考虑土-结构相互作用的输电塔-绝缘子-线耦合系统的简化模型,并采用概率密度演化(probability density evolution equation, PDEM)方法研究了地震动不确定性下输电线路位移的概率密度函数(probability density function, PDF)随地震动时程的变化,该研究采用GF偏差(GF-discrepancy)方法生成一组代表点,再利用降维谱表示法(DR-SRM)生成相应的随机地震动,通过建立的输电线路简化耦合模型求解每个随机地震动作用下的位移和速度响应时程,通过建立地震响应的广义概率密度演化方程,最终得到地震响应的概率密度函数。对于主余震序列问题,刘俊才^[55]选取了一定数量的真实主余震序列和地震动强度指标,比较了主震和余震强度指标的分布和相关性,并分析了这些指标对输电塔变形和损伤的影响规律;基于变形发展和承载性能退化将输电线路性能状态划分为5个等级,建立塔线体系有限元模型并进行数值模拟,通过Pushover分析和等能量法确定了不同状态的临界限值;此外,研究了不同合成方法、输入方向和断层类型对输电塔结构需求的影响,明确了余震损伤考虑原则;最后,基于场地条件和设防要求,得到地震危险性曲线,开展易损性分析,研究余震对结构不同性能状态超越概率的影响,进行输电塔线体系的概率性地震风险分析。还有部分学者针对多维地震入射方向的不确定性问题展开研究,其中,龚俊^[131]提出了一种多入射角地震易损性分析方法,该研究首先从数据库选取多维地震动,分析地震动特性随入射方向的变化,并提出分类方法和选择标准,采用地震动对塔线耦合体系进行多方向激励,研究其地震响应和失效模式对入射方向的敏感性;随后,基于地震需求和抗震能力与入射方向相关和无关的思想,提出多入射角地震易损性分析方法,选取近场和远场地震动,用于塔线耦合体系的全荷载域动力时程分析,结合拉丁超立方抽样方法,建立概率抗震能力模型及不同入射方向的概率地震需求模型;最后,进行多入射角地震易损性分析,建立不同极限状态下的易损性平面。

2.2 风作用下概率评估

对于风作用下输电线路的概率评估,针对单塔模型,DARESTANI等^[69]建立了输电塔单塔有限元模型。首先,采用ASCE的风荷载标准计算作用在塔身上的风荷载,并定义了无损伤、轻微损伤、中度损伤、严重损伤和倒塌5种损伤状态;在此基础上考虑了材料特性、构件节点缺陷、风致荷载和螺栓滑移曲线等不确定性因素,其中螺栓滑移曲线的不确定性通过采用经过实验验证的概率模型生成螺栓连接的滞回曲线来体现,部分不确定参数见表2;最后采用逻辑回归模型,根据输电塔有限元分析的失效结果建立易损性模型,得到输电塔单塔在飓风作用下的易损性。针对塔线体系模型,谭淳元^[132]建立了输电塔线体系有限元模型。首先,通过建立结构所在的风场,选取适当的风速离散点、风剖面模型和功率谱密度函数并通过功率谱法建模脉动风速,利用数论选点方法选择基本随机变量,并检验所生成的脉动风速样本;随后,计算输电塔-线体系的等效风荷载和气动阻尼,进行时域有限元分析,提取包括塔段位移、基底剪力与弯矩等风致响应;最后,基于这些响应结合规范限制对失效模式进行定义,采用概率密度演化理论分析得到概率密度演化曲线,并进一步分析塔-线体系的抗风可靠度。LI等^[133]采用考虑平均风压的随机性、脉冲风压的随机过程以及结构的随机动力效应的特高压输电塔等效静风荷载模型,通过引入等效极值事件,将结构可靠性简化为各失效模式的串联系统,并提出了相应的等效极值变量;利用点估计法求解等效极值变量的统计矩信息,并根据统计矩信息使用四阶矩法求解结构系统的可靠性指数和系统失效概率。还有一些学者针对输电线路在风荷载作用下的疲劳寿命展开概率评估。RONG等^[134]提出了一种考虑实际风场中风向和风速的联合分布概率的多变量构件疲劳损伤分析方法,通过建立大跨距输电塔线系统的精细有限元模型;利用线性滤波法生成风荷载,并根据过去的气象统计,进行了风向和风速联合分布概率的风致疲劳敏感性分析,通过雨流计数法和Miner疲劳累积损伤理论计算塔线系统的风致疲劳损伤并分析其疲劳寿命。

表2 风作用下输电线路概率评估不确定参数表

Tab. 2 Uncertain parameters for probabilistic assessment of transmission lines under wind loads

项目	性能	符号	分布类型	平均值	变异系数
钢材料 ^[71,135]	弹性模量	E	对数正态分布	$2.0 \times 10^{11} (\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	0.06
	塔腿屈服应力	f_{ym}	对数正态分布	$4.02 \times 10^8 (\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	0.10
	支撑构件屈服应力	f_{yb}	对数正态分布	$2.9 \times 10^8 (\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	0.10
	屈服后弹性模量	E_{st}	对数正态分布	$0.02E$	0.25
风荷载 ^[71,136]	阵风因子	G	正态分布	根据美国土木工程学会(ASCE)风荷载标准的等效静力风模型 ^[71] 计算	0.11
	力系数	C_f	正态分布		0.12
	风速压力暴露系数	K_z	正态分布		0.16
	风向因子	K_d	正态分布		0.08

2.3 洪水作用下概率评估

目前对于洪水作用下输电线路的概率评估相关研究较少。王兆坤^[137]建立了考虑洪水流量的随机特性的洪涝灾害对电力系统影响模型,并使用不同特征量提取方法,修正影响模型,以提高模型准确性;随后,构建降雨强度与洪涝灾害的关系模型,同时考虑洪涝灾害的不确定性,提出基于机会约束的评估模型,并基于洪水流量的随机特性,计算多个水库入库洪水流量的联合概率分布,在此基础上结合洪涝灾害对电力系统影响模型,计算输变电线路停运故障概率;最后根据经济损失模型,评估了因洪水导致输电线路故障进而导致的工业、商业和居民用户的直接和间接经济损失。ZHOU 等^[138]提出了一种基于概率流的风险评估方法,用于定量评估极端降水条件下电力系统的运行状态。首先,采用暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)建立降雨量与特定区域水位之间的关系,该方法采用机器学习算法输出考虑内涝风险的电力设施运行状态;在此基础上,开发了基于半不变性和 Gram-Charlier 级数展开的概率流方法,以描述电力设施停运的概率;最后,评估了在暴雨导致洪水作用下的电力供应安全风险,评估结果为电力系统运营者在极端降水天气条件下做出正确的调度决策提供了有效的指标。ESPADA 等^[139]以 2011 年昆士兰洪灾为研究对象,通过高分辨率数字高程模型和城市形态 3D 分析、模糊逻辑空间分析、邻近度分析、样方分析、事件收集分析、全局和局部莫兰指数等地理空间自相关技术及热点分析方法,分析了一系列地理变量,使用自组织神经网络(self-organizing neural networks, SONN)解决了指示变量的充分性问题;通

过贝叶斯联合条件概率,探讨了洪水风险建模的适用性,并对研究区域的洪水风险和气候适应能力进行空间建模,研究开发了洪水风险适应能力指标/策略联结模型,将洪水风险与气候适应评估结合。CHEN 等^[140]提出了一种综合风险概率评估框架,用于评估受洪水影响的输电塔,该框架通过机载激光雷达获取的三维点云数据来提取输电塔的几何结构,并设计了一系列新的点云分割和拟合算法,估算输电塔的倾斜角,在此基础上评估洪水对输电塔的伤害风险。

2.4 滑坡作用下概率评估

对于滑坡作用下输电线路的概率评估,李伟^[141]通过二项 Logistic 回归方法构建了降雨作用下滑坡灾害发生概率模型(图 6);将输电线路等效为串联模型,并划分为跨越滑坡区域与不跨越滑坡区域 2 种状态,分别计算在这 2 种状态下线路的损坏概率,在此基础上构建了滑坡灾害下输电线路损坏概率模型;最后,以此为基础评估了输电线路在滑坡灾害作用下的直接经济损失和间接经济损失。在输电线路杆塔的概率评估方面,刘书豪^[142]根据历史灾害样本及地质地理数据,研究了输电线路滑坡灾害的关键因素,建立了滑坡风险评价因子指标体系,并对输电线路沿线区域的降雨条件展开了分析;统计诱发滑坡的降雨阈值,定义极端降雨条件及其对滑坡的影响,对重点段输电线路的滑坡易发性利用逻辑回归模型和随机森林模型进行区划,结合降雨条件和贝叶斯概率计算滑坡的时空概率,在不同降雨工况下,建立输电线路杆塔破坏滑坡模型;利用数值模拟方法计算滑坡危险性系数和破坏概率,分析滑坡变形对输电杆塔的影响,进行滑坡危险性和输电杆塔易

损性评价,结合破坏概率和易损性曲线计算滑坡导致的经济风险。韩波^[143]基于易损性理论给出了滑坡灾害下电网易损性分析框架和分析方法,通过确定滑坡灾害下电网的易损性因素和指标,运用解释结构模型分析风险因素关系,建立各层次的解释结构模型,并通过 MICMAC 分析了解各因素特点;随后,对指标进行量化分析,筛选指标并完善评估体系,使用网络分析法计算指标权重并建立易损性评估模型。此外,机器学习也被用于输电线路所在区域滑坡的概率评估,GE 等^[144]通过相关性和敏感性分析进行参数筛选,并采用了 5 种不同方法,包括层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)、信息值法(information value, IV)、分形理论(fractal theory, FT)、反向传播神经网络(back propagation neural network, BPNN)和支持向量机(support vector machines, SVM),通过受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)和累积滑坡百分比曲线验证结果,选取最优模型,并使用该模型预测输电线路所在区域滑坡的空间分布,制作了该区域的滑坡易发性地图。

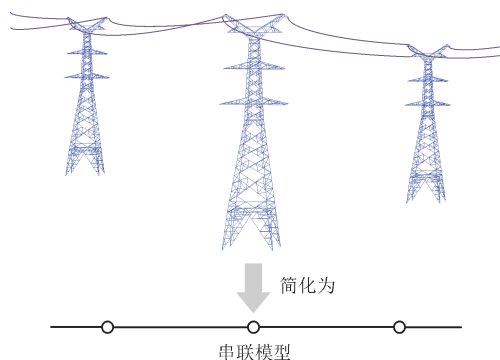


图6 滑坡作用下输电线路概率评估简化模型
Fig. 6 Simplified model for probabilistic assessment of transmission lines under landslide impact

2.5 灾害耦合作用下概率评估

与作用机理部分对应,同样以风-震、风-冰耦合为例,来介绍输电线路灾害耦合作用下的概率评估。

在风-震耦合方面,LI 等^[110]在先风后震破坏机理的基础上,建立了时变不确定性数值模型,分析地震与风荷载共同作用下塔体的响应;通过动态分析和统计回归,生成时变概率多灾害需求模型,得出输电塔的全寿命多灾害易损性曲面。还有学者将机器学习的方法引入输电塔的风-震耦合评估中,JEDDI 等^[111]在风-震耦合破坏机理研究的基础上引入了一种基于主动学习的概率分类方法,利用有限数量的非线性时程分析数据,训练了一个基于极限梯度提

升(XGBoost)的分类模型,预测输电塔在多灾害下的倒塌概率,并生成了多灾害下的易损性曲面。FADEL 等^[145]采用考虑几何和材料非线性的时程分析,在考虑几何和材料属性不确定性的基础上评估输电线路的失效概率,对输电线路进行了风-震耦合的多灾害评估,并构建了易损性曲线。此外还有研究者对区域输电系统在风-震耦合下的风险展开评估,SALMAN 等^[146]提出了一个用于评估电力系统在地震和飓风等多灾害下的风险评估的框架,包括概率加权的确定性灾害分析模型、组件易损性模型、基于拓扑的系统性能模型,并进行了网络系统的组件重要程度以及生命周期成本分析,实现了从组件到结构再到整个区域输电系统的多灾害风险评估。

在输电线路风-冰耦合评估方面,李嘉祥等^[147]通过建立一塔两线的有限元模型,利用 Copula 函数建立了覆冰厚度-风速以及覆冰厚度-风向的联合概率分布模型,通过随机抽样得到荷载组合并将其代入有限元模型中进行分析,最后根据大量的有限元分析结果研究了输电塔线体系在这 2 种不确定性组合情况下的易损性。XIAO 等^[148]提出了一种评估输电塔-线系统在覆冰和风荷载共同作用下承载力和易损性曲面的方法,该方法基于非线性静态推覆分析(nonlinear static pushover analysis, NSPA),通过将 NSPA 曲线与增量动态分析曲线对比,确定了覆冰厚度和 3 s 阵风平均风速作为易损性曲面的强度衡量标准,并通过引入修正系数来考虑风的时空变化不确定性。针对风致疲劳问题,LI 等^[149]提出了一种考虑风致疲劳损伤的输电塔在风-冰灾害耦合作用下失效概率的评估框架;该框架采用 Copula 函数建立了风速和风向的联合概率模型,并结合 Miner 线性损伤理论和 S-N 曲线,计算输电塔的风致疲劳损伤,在此基础上计算不同服役年限的输电塔在风-冰耦合作用下的易损性;最后将结构易损性函数与冰厚和风速的联合概率分布模型相结合,计算了不同服役年限下输电塔在风-冰耦合灾害中的失效概率。还有一些学者^[150-151]则将机器学习算法引入输电线路风-冰耦合的概率评估中,使用机器学习算法来预测风速或是基于数值模拟得到的数据库直接构建输电线路在覆冰条件下的风险评估模型。

3 区域输电线路韧性评估研究

“韧性”(resilience)这一概念最早由加拿大学者

HOLLING 于 1973 年提出,并最初应用于生态学,用以描述生态系统在遭受外部干扰后保持稳定或恢复至稳定状态的能力^[152]。近年来,区域输电线路的韧性评估已成为国内外学者研究的焦点。美国作为最早提出“韧性电网”概念的国家之一,强调在构建智能电网的同时,提高电网的韧性,即电网系统在面对潜在破坏性事件时,应具备预防、抵抗和快速恢复的能力^[153-155]。英国能源研究中心(UK Energy Research Centre, UKERC)亦提出了相似的观点,将韧性定义为系统在面对外部干扰时的抵抗能力,以及在受影响后迅速恢复并继续服务的能力^[156]。国内学者 OUYANG 等^[157]于 2014 年将韧性概念引入电力系统,并提出包含“4R”属性(鲁棒性、冗余性、有源性和快速性)的韧性定义。别朝红等^[158-159]则提出了“弹性电网”的概念,并进一步定义了“弹性电力系统”及其能力。尽管不同学者对“韧性”和“韧性电网”的理解存在差异,但其核心内涵均围绕“维持”、“抵抗”和“恢复”展开,即电力系统在面临潜在风险时,应能维持原状、抵抗外部干扰,并在干扰或破坏后可以迅速恢复。

研究区域输电线路的韧性,关键在于构建相应的评估方法和指标。目前,电力系统的韧性评估方法尚未统一,国内外学者提出了多种分析方法和评估指标用以评估区域输电线路的韧性性能,依照现有的文献和技术,这些方法和指标可大致分为定性和定量两大类。

定性的评估方法多样,各具特色。例如,CARLSON 等^[160]在研究基础设施(包含输电系统)韧性时提出了一种多层次、多维度的“系统的系统化”(system of systems)方法来进行对关键基础设施、社区和区域的当前状态和潜在改进措施的全面韧性评估,该方法使用调查问卷、政府数据等方式,通过改进基础设施调查工具(infrastructure survey tool, IST)和构建韧性测量指数(resilience measurement index, RMI),旨在为决策者提供全面、可利用的韧性测量结果,以支持风险管理和资源分配的决策过程。黄海静等^[161]建立了电力系统安全韧性管理三角形模型,并结合自评价、监管部门评价和第三方评价等方式实现了输电线路韧性的定性分析。定性的评估方法虽然简单,但这类评估方法得到的是一个“静态”的系统,无法得出输电线路系统在面临外界灾害或破坏时不同阶段的变化,且定性评价存在较为主观的个人因素,可能存在差异。

鉴于定性评估方法的局限性,学者们在此基础上进一步提出了区域输电线路的定量研究方法。定量分析的核心在于评估电力系统在面对自然灾害、人为攻击或其他干扰事件时的鲁棒性、自愈能力以及快速恢复正常运行等能力。图 7 描绘了区域输电线路在遭受外界破坏前、中、后的简化系统性能演变曲线(以直代曲),其中 $Q(t)$ 表示为系统性能与时间 t 的函数, t_1 表示系统受到外界扰动的开始, t_2 表示外界扰动结束系统达到稳定状态, t_3 表示系统开始恢复, t_4 表示系统恢复到新的稳定状态。

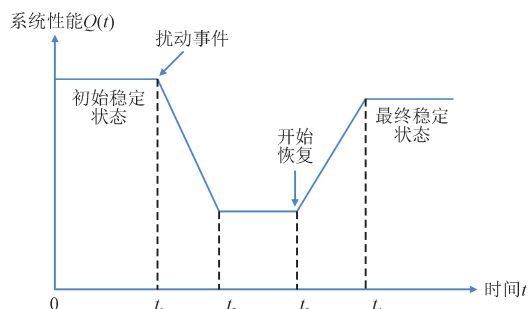


图 7 区域输电线路系统性能演变曲线

Fig. 7 Performance evolution curve of regional transmission line systems

CIMELLARO 等^[162-165]根据其韧性评估框架,提出了将系统功能随时间变化的函数与时间的积分作为量化评价指标,即

$$R = \int_{t_{OE}}^{t_{RE}} Q(t) dt \quad (1)$$

其中: $Q(t)$ 为某一系统功能随时间变化的函数(0 ~ 100%); R 为韧性评估指标,指标越大则系统的抗震韧性越好; t_{OE} 为干扰发生时刻; t_{RE} 为从受干扰到恢复的时间。后来 CIMELLARO 又对韧性指标进行了无量纲化处理,同时又引入了不同的权重系数 α ,可以根据不同目标进行评估,即

$$R = \alpha \int_{t_{LC}}^{t_{LC}} \frac{Q_1(t)}{t_{LC}} dt + (1 - \alpha) \int_{t_{LC}}^{t_{LC}} \frac{Q_2(t)}{t_{LC}} dt \quad (2)$$

其中, t_{LC} 为系统韧性评估的控制时间。

除了利用函数的形式进行定量分析, OUYANG 等^[157]引入概率模型来评估电力系统在飓风下的韧性。CHANDA 等^[166]结合图论,提出了一种利用层次分析法和渗流理论对配电系统弹性进行量化和赋能的方法,可以定量分析电力系统的韧性。综上所述,在评估电力系统的韧性时,系统恢复时间是关键的定量指标,这指的是从系统遭受干扰到实现全面或部分电力供应恢复所需的时长。这一指标显著反映了电力系统在面对紧急情况时的反应速度。除此

之外,供电的连续性、稳定性以及系统对各类干扰的应对能力同样是衡量系统韧性的关键要素。

现有研究表明,当前提升输电线路韧性的方法与措施在时间次序上大致可以分为事前准备、事中抵御与应急响应、事后恢复 3 个阶段。

在灾害等外部破坏来临之前进行输电线路的风险评估与紧急预案工作,防范风险。KOPSIDAS 等^[167]使用双序列蒙特卡罗模拟循环提出电缆在紧急情况下故障和老化的框架,可让电力公司了解易受影响的电缆以便提前采取措施进行预防;ESKAN-DARPOUR 等^[168]利用机器学习提出一种基于逻辑回归的预测方法,用于确定电网各部件在飓风来临时的停电概率,以确保可以找出更易于受损的元件进行提前加固或升级。

在外界破坏发生的时候,需提高对外界干扰的抵抗能力并能做出及时响应的能力,如合理分配移动储能设备、应急发电机等设备抵消断电影响。GHOLAMI 等^[169]提出了一个两阶段随机线性规划(stochastic linear programming, SLP)框架,结合移动电源、风电等设备,充分利用微电网尽可能的提高电网的韧性和恢复能力,以达到减少电力中断影响的能力。

灾害结束后尽可能恢复电力系统至正常使用状态,同时为下一次的破坏来临做准备。ANG^[170]制定并求解了一个混合整数恢复优化程序,用于规划因自然灾害或恐怖袭击而受损的输电网的恢复决策工作。综上所述,通过对输电线路的受灾不同阶段进行分析,可以在很大程度上提升区域输电线路的韧性,减少或防范外界破坏对电力系统的损伤。

尽管当前在区域输电线路的韧性研究方面已经取得了一定的进展,但仍面临许多挑战。总结有以下不足:目前对于输电线路的韧性研究还是以电网中的组件为主,如对输电塔的易损性分析,而缺少对全体线路的整体考量;另外,对电网系统的分析仍是以理想化的简化模型为主,并未考虑实际输电塔模型的不同、不同地质地貌、组件的新老状态等实际情况的多样性,对于输电线路韧性评估的方法十分不统一且不完备,没有一个具体的量化标准;最后,当前研究缺少对电网系统和其他基础设施之间相互作用对整个生命线韧性的影响。

从全局视角审视,韧性标准的构建仍处于初级阶段,主要表现为无指导性文件和准则、针对电力系统的具体韧性标准尚未形成,且评价方法也未有明

确的统一性或强制性规范^[171]。所以,建议标准制定机构,积极汲取我国城市发展过程中涌现的新理念,逐步将其细化并应用到不同的评价体系之中,为我国提供一套既符合国情又便于普及的韧性建设、评估和提升的综合性参考方案。

4 未来发展方向

在灾害破坏机理方面,有关灾害作用下输电线路的模型建立有 2 个发展方向,一是建立尽可能精细化的结构模型和灾害模型,使对这一过程的模拟尽可能接近实际情况,但这会带来计算量大的问题,尤其是在概率分析时需要进行成百上千次计算的情况下,会非常耗时;另一个方向是对结构和灾害作用进行合理的简化,建立简化计算模型,这种模型的准确程度可能不如精细化模型,但较精细化模型计算量小,计算耗时短,尤其是在计算次数多的情况下,这种方法在计算耗时方面的优势明显。如何建立一个尽可能接近实际情况而同时又有较高计算效率的简化模型是输电线路灾害破坏机理方面未来的研究方向之一。此外,目前有关灾害破坏机理方面的研究大多是单灾害的研究,对多灾害耦合效应,例如地震引发的次生灾害(如滑坡)对输电线路的影响等的研究较少,但这种情况在现实中却普遍存在,忽略这一情况可能会造成对输电线路响应的低估,因此多灾害耦合问题也是灾害破坏机理方面的研究方向之一。

在概率评估方面,对于灾害作用下输电线路的概率评估主要集中在单灾害作用,其中对于地震和风这两种作用下输电线路概率评估的研究较多,而对于洪水和滑坡这两种作用下,由于灾害过程及破坏机理较地震和风更复杂,有待进一步研究。对于多灾害耦合下的概率评估研究较少,但各灾害并非独立出现。在多灾害情景下,输电线路的响应和失效机制会因为不同灾害的交互作用而变得更加复杂,传统的单灾害评估方法无法全面反映这种复杂性。因此,有必要发展多灾害综合评估的方法,以便更准确地预测结构在多灾害作用下的性能和可靠性。此外现有研究大多限于对某一条、某一段输电线路的概率评估,而关于输电线路故障对区域电网影响的研究很少,如何进行区域电网的风险评估,量化输电线路失效对整个区域电网性能的影响,这也是未来的研究方向之一。

韧性评估方面,各行各业都进行了众多研究,而区域输电线路的韧性评估仍处于起步阶段,并未形成行业规范。而目前对于房屋建筑、桥梁建设等传统土木领域,相关的韧性评估研究相对成熟,已有足够相关的设计思路、评估标准和计算方法,因此可以借鉴其思路来考虑区域输电线路韧性评估。同时相关组织和政府可以联合起来,根据国内外学者的研究并结合现阶段出现的问题,针对电网系统和其他基础设施之间相互作用对整个生命线韧性的影响,提出新的理念,逐步将其细化并应用到不同的评价体系之中,形成既符合国情又便于普及的韧性评估参考方案,并制定出相关规范。最后,如何在满足工程实际(即结合现有输电线路)的基础上开展输电线路韧性研究更是未来的重要研究课题之一。

5 结 论

本研究主要从输电线路破坏机理、输电线路概率评估以及区域电网线路韧性评估等角度总结分析了输电线路抗灾韧性的研究进展,并对其未来发展方向进行了展望,主要结论如下。

1) 输电线路破坏机理模型包括结构模型和灾害模型,结构模型按精细化程度可分为精细化模型和简化模型,按建模范围可分为塔线体系模型和单塔模型,这些模型各有优劣,在进行研究时,需根据实际情况和研究需要选用合适的模型。

2) 灾害作用下结构概率评估主要包括对灾害的危险性评估和对结构的易损性评估,可根据研究需要在此基础上进一步评估由结构损坏带来的人员财产损失以及修复时间和成本。

3) 研究区域输电线路的韧性关键是构建相应韧性评估的方法和指标,量化区域输电线路的韧性。

4) 高效的灾害破坏机理模型、多灾害耦合下的概率评估、量化输电线路失效对区域电网性能影响以及一套既符合国情又便于普及的韧性建设、评估和提升的综合性参考规范是未来输电线路抗灾韧性研究的发展方向。

参考文献:

- [1] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告(2023)[M]. 北京:中国建材工业出版社,2023.
- [2] 敖志敏,方曦,田刚,等. 山地环境输电线路故障分类及巡检措施分析[J]. 电力大数据,2021,24(4):63-69.
AO Zhimin, FANG Xi, TIAN Gang, et al. Analysis of fault classification and inspection measures for transmission lines in mountain environment[J]. Power systems and big data, 2021, 24(4): 63-69 (in Chinese).
- [3] 秦大河,张健云,闪淳昌,等. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理及适应国家评估报告[M]. 北京:科学出版社,2015.
- [4] 陈丽娟,李霞. 2011 年全国输变电设施可靠性分析[J]. 中国电力,2012,45(7):89-93.
CHEN Lijuan, LI Xia. Statistic analysis on reliability of power transmission and transformation facilities in China in 2011[J]. Electric power, 2012, 45(7): 89-93 (in Chinese).
- [5] 陈鹏云,曹波,罗弦,等. 中国电网主要自然灾害运行数据及特征分析[J]. 中国电力,2014,47(7):57-61.
CHEN Pengyun, CAO Bo, LUO Xian, et al. Operation data and feature analysis of the main natural disasters of power network in China[J]. Electric power, 2014, 47(7): 57-61 (in Chinese).
- [6] 李宏男,徐静. 考虑桩-土-结构动力相互作用的输电塔线体系简化抗震计算模型[J]. 岩土工程学报,2009,31(11):1763-1767.
LI Hongnan, XU Jing. Simplified aseismic calculation model for transmission tower-line system considering pile-soil dynamic interaction[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2009, 31(11): 1763-1767 (in Chinese).
- [7] 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 Shifeng, LI Hongnan, ZHANG Zhuoqun, 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 (in Chinese).
- [8] 田利,李宏男. 输电塔线体系在多维地震激励下的响应分析[J]. 土木建筑与环境工程,2013,35(1):86-95.
TIAN Li, LI Hongnan. Seismic response analysis of transmission tower-line system under multi-component ground motion excitations[J]. Journal of civil and environmental engineering, 2013, 35(1): 86-95 (in Chinese).
- [9] 田利,李宏男,李术才. 多点地震激励下考虑地形变化输电塔线体系的响应分析[J]. 应用基础与工程科学学报,2013,21(2):257-266.
TIAN Li, LI Hongnan, LI Shucan. Seismic response of transmission tower-line system considering topographic variation under multiple-support ground motion excitations[J]. Journal of basic science and engineering, 2013, 21(2): 257-266 (in Chinese).
- [10] 汪佳,付兴,李宏男. 输电塔线体系多因素风致动力响应分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2020,36(1):1-10.
WANG Jia, FU Xing, LI Hongnan. Dynamic analysis of a transmission tower-line system under wind loading with multiple factors[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (natural science), 2020, 36(1): 1-10 (in Chinese).
- [11] 张鹏,李宏男,田利,等. 输电塔-线体系振动控制研究进展[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(3):465-473.
ZHANG Peng, LI Hongnan, TIAN Li, et al. A review of vibration control techniques of the transmission tower-line system[J]. Jour-

- nal of Shenyang Jianzhu University (natural science), 2018, 34 (3): 465-473 (in Chinese).
- [12] 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 Zhuoqun, LI Hongnan, LI Shifeng, et al. Disaster analysis and safety assessment on transmission tower-line system: an overview[J]. China civil engineering journal, 2016, 49(12): 75-88 (in Chinese).
- [13] 付兴,林友新,李宏男. 风雨共同作用下高压输电塔的风洞试验及反应分析[J]. 工程力学,2014,31(1):72-78.
FU Xing, LIN Youxin, LI Hongnan. Wind tunnel test and response analysis of high-voltage transmission tower subjected to combined loads of wind and rain[J]. Engineering mechanics, 2014, 31(1): 72-78 (in Chinese).
- [14] 李宏男,田利,张鹏. 高压输电塔-线体系多维多点振动台试验模型研究[C]//第八届全国地震工程会议论文集. 重庆:中国建筑学会,2010:626-628.
- [15] 李悦,谢强,张骥,等. 随机风场作用下输电塔线体系的杆件动力稳定性评估[J]. 高电压技术,2023,49(3):1234-1243.
LI Yue, XIE Qiang, ZHANG Jian, et al. Dynamic stability assessment of bracings in transmission tower-line system under stochastic wind[J]. High voltage engineering, 2023, 49(3): 1234-1243 (in Chinese).
- [16] 汪大海,李杰. 强风下高压输电塔线系统非线性随机动力响应[J]. 振动与冲击,2010,29(6):62-65.
WANG Dahai, LI Jie. Nonlinear stochastic response of transmission tower-line system under strong wind[J]. Journal of vibration and shock, 2010, 29(6): 62-65 (in Chinese).
- [17] 赵桂峰,李杰,谢强,等. 高压输电塔线耦联体系风振响应有限元分析与现场实测对比研究[J]. 自然灾害学报,2014,23(1):64-74.
ZHAO Guifeng, LI Jie, XIE Qiang, et al. Finite element analysis and field measurement of wind-induced vibration response of high-voltage transmission tower-line coupling system[J]. Journal of natural disasters, 2014, 23(1): 64-74 (in Chinese).
- [18] 卜祥航,曹永兴,梁寅彬,等. 地震作用下输电线路塔线耦合的动力响应数值分析[J]. 工业建筑,2020,50(8):128-133.
BU Xianghang, CAO Yongxing, LIANG Huangbin, et al. Numerical simulations on dynamic responses of a transmission tower-conductor coupling system under earthquake action[J]. Industrial construction, 2020, 50(8): 128-133 (in Chinese).
- [19] 李钢,谢强,文嘉意. 地震作用下输电塔线耦联体系导线减震作用研究[J]. 地震工程与工程振动,2015,35(5):47-53.
LI Gang, XIE Qiang, WEN Jiayi. Vibration energy absorption effects of conductors in transmission tower-wire coupling system subjected to earthquake[J]. Earthquake engineering and engineering dynamics, 2015, 35(5): 47-53 (in Chinese).
- [20] 何清清,谢强,田雷. 特高压多回路输电塔横担体型系数风洞试验研究[J]. 全球能源互联网,2018,1(2):144-149.
HE Qingqing, XIE Qiang, TIAN Lei. Wind tunnel tests on drag coefficient of cross arm in multi-circuit ultra-high voltage transmission tower[J]. Journal of global energy interconnection, 2018, 1(2): 144-149 (in Chinese).
- [21] 赵桂峰,谢强,梁枢果,等. 高压输电塔线体系风致非线性振动气弹模型风洞试验[J]. 同济大学学报(自然科学版),2009,37(9):1157-1164.
ZHAO Guifeng, XIE Qiang, LIANG Shuguo, et al. Wind tunnel test on wind-induced nonlinear vibrations of high-voltage transmission tower-line coupling system[J]. Journal of Tongji University (natural science), 2009, 37(9): 1157-1164 (in Chinese).
- [22] 白杰,谢强,薛松涛,等. 特高压格构式输电塔线体系振动台试验设计[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2013,40(4):20-25.
BAI Jie, XIE Qiang, XUE Songtao, et al. Shaking table test model design for UHV latticed transmission tower-line coupling system[J]. Journal of Hunan University (natural sciences), 2013, 40(4): 20-25 (in Chinese).
- [23] 谢强,白杰,薛松涛. 特高压交流同塔双回输电塔地震模拟振动台试验[J]. 高电压技术,2012,38(6):1410-1419.
XIE Qiang, BAI Jie, XUE Songtao. Shake table test on UHV AC double circuit transmission tower[J]. High voltage engineering, 2012, 38(6): 1410-1419 (in Chinese).
- [24] 刘俊才,田利,张睿,等. 远场地震作用下输电塔-线体系最不利输入方向预测研究[J]. 工程力学,2020,37(增刊1):97-103.
LIU Juncai, TIAN Li, ZHANG Rui, et al. Study on the prediction of the most adverse input direction of transmission tower-line system under far-field seismic ground motions[J]. Engineering mechanics, 2020, 37(S1): 97-103 (in Chinese).
- [25] 孟令星,俞琪琦,曾玉洁,等. 考虑导线影响的风致输电塔倒塌模拟[J]. 低温建筑技术,2016,38(7):81-84.
MENG Lingxing, YU Qiqi, ZENG Yujie, et al. Simulation of wind induced collapse of transmission towers considering the influence of conductors[J]. Low temperature architecture technology, 2016, 38(7): 81-84 (in Chinese).
- [26] 田利,刘凯悦,刘俊才,等. 基于土弹簧的桩-土-输电塔抗震性能研究[J]. 地震工程学报,2022,44(6):1268-1276.
TIAN Li, LIU Kaiyue, LIU Juncai, et al. Seismic response of pile-soil-transmission tower based on soil springs[J]. China earthquake engineering journal, 2022, 44(6): 1268-1276 (in Chinese).
- [27] 田利,俞琪琦,尹东,等. 高压输电塔-线体系抗风雨的研究现状[J]. 工业建筑,2014,44(6):101-107.
TIAN Li, YU Qiqi, YIN Dong, et al. State of the art: wind-rain resistance of power transmission tower-line system[J]. Industrial construction, 2014, 44(6): 101-107 (in Chinese).
- [28] 袁光英,潘海洋,马瑞升,等. 考虑不同地震输入方向的输电塔-线体系连续性倒塌研究[J]. 地震工程学报,2020,42(4):840-846.
YUAN Guangying, PAN Haiyang, MA Ruisheng, et al. Study of progressive collapse of transmission tower-line system considering different incident angles of earthquake waves[J]. China earthquake engineering journal, 2020, 42(4): 840-846 (in Chinese).
- [29] 张亮,牛凯,罗贤超,等. 风冰荷载作用下输电塔-线体系参数敏感性分析[J]. 山东大学学报(工学版),2024,54(3):132-140.

- ZHANG Liang, NIU Kai, LUO Xianchao, et al. Sensitivity analysis of transmission tower-line system parameters under wind and ice loads[J]. Journal of Shandong University (engineering science), 2024, 54(3): 132-140 (in Chinese).
- [30] 田利, 牛延宏, 马瑞升, 等. 大跨越输电塔-线耦联体系振动台试验模型设计研究[J]. 世界地震工程, 2017, 33(3): 42-50.
- TIAN Li, NIU Yanhong, MA Ruisheng, et al. Design study on shaking table test model of a long span transmission tower-line coupling system[J]. World earthquake engineering, 2017, 33(3): 42-50 (in Chinese).
- [31] 田连博, 王文明, 曾玉洁, 等. 大跨越输电塔-线耦联体系风洞试验气弹模型设计研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(5): 74-78.
- TIAN Lianbo, WANG Wenming, ZENG Yujie, et al. Design study of an aero-elastic model of long span transmission tower-line system in wind tunnel[J]. Industrial construction, 2017, 47(5): 74-78 (in Chinese).
- [32] 王文明, 孙宗德, 曾玉洁, 等. 大跨越输电塔-线耦联体系风振响应风洞试验研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(5): 79-84.
- WANG Wenming, SUN Zongde, ZENG Yujie, et al. Wind tunnel test on wind-induced vibration response of long-span transmission tower-line system[J]. Industrial construction, 2017, 47(5): 79-84 (in Chinese).
- [33] 李正良, 肖正直, 韩枫, 等. 1 000 kV 汉江大跨越特高压输电塔线体系气动弹性模型的设计与风洞试验[J]. 电网技术, 2008, 32(12): 1-5.
- LI Zhengliang, XIAO Zhengzhi, HAN Feng, et al. Aeroelastic model design and wind tunnel tests of 1 000 kV Hanjiang long span transmission line system[J]. Power system technology, 2008, 32(12): 1-5 (in Chinese).
- [34] 赵爽, 晏致涛, 李正良, 等. 1 000 kV 苏通大跨越输电塔线体系气弹模型的风洞试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 5257-5265.
- ZHAO Shuang, YAN Zhitao, LI Zhengliang, et al. Investigation on wind tunnel tests of an aeroelastic model of 1 000 kV Sutong long span transmission tower-line system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 5257-5265 (in Chinese).
- [35] 赵爽, 晏致涛, 李正良, 等. 基于风洞试验的苏通大跨越输电塔风振系数研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(11): 35-44.
- ZHAO Shuang, YAN Zhitao, LI Zhengliang, et al. Investigation on wind-induced vibration coefficients of Sutong long span transmission tower based on wind tunnel tests[J]. Journal of building structures, 2019, 40(11): 35-44 (in Chinese).
- [36] 楼文娟, 杨悦, 卢明, 等. 连续多跨输电线路动态风偏特征及计算模型[J]. 电力建设, 2015, 36(2): 1-8.
- LOU Wenjuan, YANG Yue, LU Ming, et al. Conductor swinging dynamic characteristic and calculation model of continuous multi-span transmission line[J]. Electric power construction, 2015, 36(2): 1-8 (in Chinese).
- [37] 楼文娟, 张跃龙, 黄铭枫. 新月形覆冰输电导线脱冰跳跃高度风载放大系数研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(21): 272-278.
- LOU Wenjuan, ZHANG Yuelong, HUANG Mingfeng. Study on amplification factor of jump height of crescent-shaped iced transmission conductor following ice shedding under wind action[J]. Journal of vibration and shock, 2022, 41(21): 272-278 (in Chinese).
- [38] 楼文娟, 夏亮, 蒋莹, 等. B类风场与台风风场下输电塔的风振响应和风振系数[J]. 振动与冲击, 2013, 32(6): 13-17.
- LOU Wenjuan, XIA Liang, JIANG Ying, et al. Wind-induced response and wind load factor of transmission tower under terrain B wind field and typhoon wind field[J]. Journal of vibration and shock, 2013, 32(6): 13-17 (in Chinese).
- [39] 李春祥, 李锦华, 于志强. 输电塔线体系抗风设计理论与发展[J]. 振动与冲击, 2009, 28(10): 15-25.
- LI Chunxiang, LI Jinhua, YU Zhiqiang. A review of wind-resistant design theories of transmission tower-line systems[J]. Journal of vibration and shock, 2009, 28(10): 15-25 (in Chinese).
- [40] 何运祥. 大跨越输电塔的抗震及绝缘子断裂分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [41] 葛绪章. 基于断线作用的输电塔—线体系连续倒塌动力效应研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [42] WANG L, WANG T, LI Z L, et al. Stochastic seismic dynamic response analysis for coupled transmission tower-insulator-line systems considering soil-structure interaction[J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2024, 181: 108662.
- [43] 李健. 近场罕遇地震作用下干字型输电塔的动力响应分析[J]. 低碳世界, 2022, 12(10): 85-87.
- LI Jian. Dynamic response analysis of a T-shaped transmission tower under rare near-field earthquakes[J]. Low carbon world, 2022, 12(10): 85-87 (in Chinese).
- [44] 刘鸣, 徐亿, 王传生, 等. 钢管角钢组合输电塔的动力特性及地震时程分析[J]. 特种结构, 2015, 32(6): 33-41.
- LIU Ming, XU Yi, WANG Chuansheng, et al. Dynamic property and seismic time-procedure analysis of steel tube-angle combo transmission tower[J]. Special structures, 2015, 32(6): 33-41 (in Chinese).
- [45] 袁哲峰, 牛方义, 郭小飞, 等. 输电塔纵向地震作用下抗震简化模型研究[J]. 建材世界, 2024, 45(2): 115-118.
- YUAN Zhefeng, NIU Fangyi, GUO Xiaofei, et al. Research on simplified seismic model of transmission tower under longitudinal seismic action[J]. The world of building materials, 2024, 45(2): 115-118 (in Chinese).
- [46] 赵仰康, 王晨, 宋鹏彦. 横隔数对猫头型输电塔抗震性能的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(6): 1287-1293.
- ZHAO Yangkang, WANG Chen, SONG Pengyan. Effect of the number of cross-sections on seismic response of catenary-type transmission tower structures[J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2022, 42(6): 1287-1293 (in Chinese).
- [47] 朱珠. 多点激励下高压输电塔线体系地震反应分析[D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2016.
- [48] 张健. 高烈度地区地震对塔线体系的影响研究[J]. 电力勘测设计, 2023(8): 51-56.
- ZHANG Jian. Research of seismic effect on the transmission line system in high intensity area[J]. Electric power survey & design,

- 2023(8):51-56(in Chinese).
- [49] 白杰,谢强,薛松涛. 1 000 kV 特高压同塔双回路输电线路塔线耦联体系地震模拟振动台试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2013,33(7):116-123.
- BAI Jie, XIE Qiang, XUE Songtao. Shaking table tests on 1 000 kV UHV AC double circuit transmission tower-conductor coupling systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013,33(7):116-123(in Chinese).
- [50] 代奥雄. 多维地震作用下输电塔线体系地震效应研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2017.
- [51] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 电力设施抗震设计规范:GB 50260—2013[S]. 北京:中国计划出版社,2013.
- [52] 庞继磊. 考虑行波效应的输电塔线耦联体系多维地震响应分析[D]. 阜阳:辽宁工程技术大学,2014.
- [53] 田利,李宏男,侯和涛. SMART-I 台阵多维多点地震激励下输电塔线体系响应分析[C]//第21届全国结构工程学术会议论文集. 沈阳:中国力学学会,2012:325-329.
- [54] 张志尧. 多维多点地震下特高压直流塔线体系的响应分析[D]. 保定:华北电力大学,2020.
- [55] 刘俊才. 主余震序列下输电塔-线体系概率性风险分析与韧性评估[D]. 济南:山东大学,2023.
- [56] LIU J C, MENG X R, TIAN L, et al. Multi-metric evaluation of the optimal intensity measure for mainshock-aftershock fragility analysis of transmission towers [J]. Engineering structures, 2024, 308: 118020.
- [57] LIU J C, TIAN L, MENG X R, et al. Seismic fragility assessment of a transmission tower considering mainshock-aftershock sequences [J]. Journal of constructional steel research, 2022, 194: 107344.
- [58] 李懿鹏. 输电塔线体系的风致响应和耦联效应研究[D]. 杭州:浙江大学,2023.
- [59] 王胜辉,高凯,马康,等. 基于非线性结构分析的架空输电线路风致位移响应研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2024,51(4):94-102.
- WANG Shenghui, GAO Kai, MA Kang, et al. Research on wind-induced displacement response of overhead transmission lines based on nonlinear structural analysis[J]. Journal of North China Electric Power University(natural science edition), 2024, 51(4):94-102(in Chinese).
- [60] 朱岚康,沙沐,徐万海,等. 脉动风作用下塔线体系的风致响应特性分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2023,42(5):58-67.
- ZHU Lankang, SHA Mu, XU Wanhai, et al. Wind-induced response analysis of tower line system under fluctuating wind[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(natural science), 2023,42(5):58-67(in Chinese).
- [61] YAN B, LIN X S, LUO W, et al. Numerical study on dynamic swing of suspension insulator string in overhead transmission line under wind load[J]. IEEE transactions on power delivery, 2010,25(1):248-259.
- [62] 李宏男,任月明,白海峰. 输电塔体系风雨激励的动力分析模型[J]. 中国电机工程学报, 2007,27(30):43-48.
- LI Hongnan, REN Yueming, BAI Haifeng. Rain-wind-induced dynamic model for transmission tower system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007,27(30):43-48(in Chinese).
- [63] 孟超. 输电导线风雨致振机理的研究[D]. 保定:华北电力大学,2015.
- [64] 王辉,戴根,张鑫. 不同类风场雨滴冲击荷载对输变电塔线体系动力响应的影响研究[J]. 应用力学学报, 2024,41(2):404-410.
- WANG Hui, DAI Gen, ZHANG Xin. Influence of raindrop impact load on dynamic response of transmission tower line system in different wind fields[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2024, 41(2):404-410(in Chinese).
- [65] ZHOU C, LIU Y B. A theoretical model of rain-wind-induced in-plane galloping on overhead transmission tower-lines system[J]. Advances in mechanical engineering, 2015,7(9):1-10.
- [66] 宋子良,南阳,张世杰. 强风作用下高压输电塔破坏分析[J]. 无线互联科技, 2021,18(8):100-101.
- SONG Ziliang, NAN Yang, ZHANG Shijie. Analysis on the damage of high voltage transmission tower under strong wind[J]. Wireless internet technology, 2021,18(8):100-101(in Chinese).
- [67] 张顺,王振国,姜文东,等. 特高压输电塔龙卷风荷载特性的数值模拟[J]. 中国电力, 2023,56(10):153-163.
- ZHANG Shun, WANG Zhenguo, JIANG Wendong, et al. Numerical study of ultra-high voltage transmission tower wind loads characteristics against tornado[J]. Electric power, 2023,56(10):153-163(in Chinese).
- [68] 张哲铨,许金一,潘泽昊. 非稳态冲击风下输电塔风致振动特性研究[J]. 低温建筑技术, 2023,45(9):124-127.
- ZHANG Zhequan, XU Jinyi, PAN Zehao. Study on wind-induced vibration characteristics of transmission tower under non-stationary downburst[J]. Low temperature architecture technology, 2023,45(9):124-127(in Chinese).
- [69] DARESTANI Y M, JEDDI A B, SHAFIEEZHADEH A. Hurricane fragility assessment of power transmission towers for a new set of performance-based limit states [M]//STEWART M G, ROSOWSKY D V. Engineering for Extremes; Decision-Making in an Uncertain World. Cham: Springer International Publishing, 2022:167-188.
- [70] 国家能源局. 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.
- [71] ASCE. Minimum design loads for buildings and other structures: ASCE/SEI 7-10[S]. Reston, VA, USA: ASCE, 2013.
- [72] TAMURA Y, KAREEM A. Advanced structural wind engineering [M]. Tokyo: Springer Japan, 2013.
- [73] 肖元博,张林枫,张广玉,等. 架空输电线路荷载规范中导线风荷载的分析[J]. 电力勘测设计, 2024(2):45-50.
- XIAO Yuanbo, ZHANG Linfeng, ZHANG Guangyu, et al. Analysis and comparison of load specification for overhead transmission lines [J]. Electric power survey & design, 2024(2):45-50(in Chinese).
- [74] 汪峰,王鑫,刘章军,等. 架空输电线路非平稳台风风场数值模

- 拟与验证[J]. 科学技术与工程,2024,24(13):5406-5414.
- WANG Feng, WANG Xin, LIU Zhangjun, et al. Numerical simulation and verification of unsteady typhoon wind fields on overhead transmission lines[J]. Science technology and engineering, 2024, 24(13):5406-5414 (in Chinese).
- [75] 张兴恒. 基于等几何采样的风场高效模拟方法及输电线路风振响应研究[D]. 大连:大连理工大学,2022.
- [76] QIN L, YUAN J J, LI W. Random wind-induced response analysis of transmission tower-line system[J]. Energy procedia, 2012, 16, Part C:1813-1821.
- [77] 赵珊鹏, 马爱彪, 张友朋, 等. 微地形风场下架空输电导线风致振动特性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(4):1567-1580.
- ZHAO Shanpeng, MA Aibiao, ZHANG Youpeng, et al. Analysis of wind-induced vibration characteristics of overhead transmission line in micro terrain wind field[J]. Journal of Central South University (science and technology), 2024, 55(4):1567-1580 (in Chinese).
- [78] 智鹏. 垭口地形下 500 kV 塔线体系振动及气动特性分析[D]. 北京:华北电力大学,2021.
- [79] 刘春城, 孙红运. 山脉地形迎风面输电线路风偏响应特性[J]. 振动工程学报, 2022, 35(4):1020-1028.
- LIU Chun Cheng, SUN Hongyun. Wind-induced swing characteristics of transmission lines on the windward side of mountain terrain[J]. Journal of vibration engineering, 2022, 35(4):1020-1028 (in Chinese).
- [80] 饶卫申, 滕海军, 白晓昆, 等. 架空输电线路杆塔防汛问题分析[J]. 机电技术, 2017(1):49-50.
- RAO Weishen, TENG Haijun, BAI Xiaokun, et al. Analysis of flood control issues for overhead transmission line poles and towers[J]. Mechanical & electrical technology, 2017(1):49-50 (in Chinese).
- [81] 丘海珊, 唐肖岗. 输电线路工程跨越漕河防洪影响评价[J]. 海河水利, 2021(3):62-64.
- QIU Haishan, TANG Xiaogang. Evaluation of the impact of transmission line engineering across the Caohe River on flood control[J]. Haihe water resources, 2021(3):62-64 (in Chinese).
- [82] 王迟, 丘海珊, 李兴凯, 等. 关于游荡型河道塔基冲刷问题的探讨[J]. 电力勘测设计, 2019(增刊1):29-31.
- WANG Chi, QIU Haishan, LI Xingkai, et al. Discussion on the issue of foundation scouring in wandering river[J]. Electric power survey & design, 2019(S1):29-31 (in Chinese).
- [83] 周毅, 桂红华, 童辉. 高压输电线路跨越河流对防洪的影响评价[J]. 人民长江, 2009, 40(5):16-18.
- ZHOU Yi, GUI Honghua, TONG Hui. Research on assessment of impact of river-crossing HV transmission line on flood control[J]. Yangtze river, 2009, 40(5):16-18 (in Chinese).
- [84] 汤奕, 徐香香, 陈彬, 等. 降雨滑坡灾害对输电杆塔故障的时空强在线预警[J]. 中国电力, 2020, 53(1):56-65.
- TANG Yi, XU Xiangxiang, CHEN Bin, et al. Space-time-intensity online early-warning of transmission tower faults by caused rainfall-induced landslides[J]. Electric power, 2020, 53(1):56-65 (in Chinese).
- [85] 于虹, 李昊, 许标, 等. 基于 SPH-FEM 耦合方法的泥石流冲击输电塔基础的动力分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44(1):68-78.
- YU Hong, LI Hao, XU Biao, et al. Dynamic response of transmission tower foundation impacted by debris flow using coupled SPH-FEM method[J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2024, 44(1):68-78 (in Chinese).
- [86] 张瀛. 波密至扎木 110 kV 输电线路工程沿线泥石流灾害分析与防治[D]. 兰州:兰州大学,2021.
- [87] HAO L N, LI W L, GUO P, et al. Geohazard detection and analysis along an electricity transmission line in Tibet, China[J]. Arabian journal of geosciences, 2020, 13(15):727.
- [88] FEENEY C J, GODFREY S, COOPER J R, et al. Forecasting riverine erosion hazards to electricity transmission towers under increasing flow magnitudes[J]. Climate risk management, 2022, 36:100439.
- [89] LIU L G, DU R J, LIU W L. Flood distance algorithms and fault hidden danger recognition for transmission line towers based on SAR images[J]. Remote sensing, 2019, 11(14):1642.
- [90] 白禹. 输电铁塔基础局部冲刷深度计算方法探讨[J]. 吉林电力, 2016, 44(6):29-30.
- BAI Yu. Discussion on calculation method of local scour depth of transmission tower foundation[J]. Jilin electric power, 2016, 44(6):29-30 (in Chinese).
- [91] 陈雅倩, 赵国强. 高压输电线路工程线塔基础冲刷分析计算[J]. 水科学与工程技术, 2024(2):57-60.
- CHEN Yaqian, ZHAO Guoqiang. Analysis and calculation of erosion on foundation of high voltage transmission line tower engineering[J]. Water sciences and engineering technology, 2024(2):57-60 (in Chinese).
- [92] 石军, 张成, 赵建文, 等. 二维水动力数学模型在输电线路防洪评价中的应用[J]. 山东电力技术, 2018, 45(6):17-20.
- SHI Jun, ZHANG Cheng, ZHAO Jianwen, et al. Application of two dimensional hydrodynamic mathematical model in flood control evaluation of transmission lines[J]. Shandong electric power, 2018, 45(6):17-20 (in Chinese).
- [93] 国家能源局. 架空输电线路基础设计技术规程:DL/T 5219—2014[S]. 北京:中国电力出版社,2014.
- [94] 国家电力公司东北电力设计院. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 2版. 北京:中国电力出版社,2003.
- [95] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程水文勘测设计规范:JTG C30—2015[S]. 北京:人民交通出版社,2015.
- [96] 孔凡歌. 洪水浸泡对输电塔基础承载性能影响的研究[D]. 长春:东北电力大学,2023.
- [97] 廖紫欣. 中峰型降雨入渗下地基基质吸力演化规律与承载性能研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2020.
- [98] 程铮. 降雨条件下输电塔杆基础稳定性分析[J]. 中国新技术新产品, 2022(15):122-124.
- CHENG Zheng. Stability analysis of transmission tower foundation under rainfall conditions[J]. New technology & new products of

- China, 2022(15):122-124(in Chinese).
- [99] 郭卓恒. 山地输电塔线的结构分析与监测信息处理研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2018.
- [100] 王彦海, 李清泉, 陈波, 等. 滑坡灾害下 500 kV 铁塔安全性分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2020, 42(1):74-79.
WANG Yanhai, LI Qingquan, CHEN Bo, et al. Safety analysis of a 500 kV transmission tower under landslide disaster[J]. Journal of China Three Gorges University(natural sciences), 2020, 42(1):74-79(in Chinese).
- [101] 王彦海, 刘晓亮, 任文强, 等. 滑坡区输电塔线体系抗变形能力及动力响应分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(25):10725-10731.
WANG Yanhai, LIU Xiaoliang, REN Wenqiang, et al. Anti-deformation ability and dynamic response analysis of transmission tower-line system in landslide area[J]. Science technology and engineering, 2021, 21(25):10725-10731(in Chinese).
- [102] 郑武略, 张富春, 王彦海, 等. 滑坡区输电铁塔安全性分析与评价[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(9):25-33.
ZHENG Wulve, ZHANG Fuchun, WANG Yanhai, et al. Safety analysis and evaluation of transmission towers in landslide areas[J]. Power system and clean energy, 2019, 35(9):25-33(in Chinese).
- [103] 卢俊鹏, 朱志鹏, 颜文琴. 滑坡地质灾害的影响因素及防治措施[J]. 江苏建材, 2024(1):125-126.
LU Junpeng, ZHU Zhipeng, YAN Wenqin. Influencing factors and prevention measures of landslide geological hazards[J]. Jiangsu building materials, 2024(1):125-126(in Chinese).
- [104] 李哲, 梁允, 熊小伏, 等. 基于层次分析法的输电线塔基降雨滑坡预警方法[J]. 智能电网, 2014, 2(9):29-33.
LI Zhe, LIANG Yun, XIONG Xiaofu, et al. A rainfall caused landslide early-warning method for transmission line tower based on analytic hierarchy process[J]. Smart grid, 2014, 2(9):29-33(in Chinese).
- [105] ZHOU Y Q, SHENG Q, CHEN J, et al. The failure mode of transmission tower foundation on the landslide under heavy rainfall: a case study on a 500 kV transmission tower foundation on the Yanzi landslide in Badong, China[J]. Bulletin of engineering geology and the environment, 2022, 81(3):125.
- [106] 高利松. 工程开挖和降雨作用下杆塔基础滑坡的稳定性[D]. 武汉:湖北工业大学, 2020.
- [107] 黄晨忱, 殷坤龙, 梁鑫, 等. 极端工况下滑坡区超高压输电线路杆塔基础失稳评估分析[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(4):139-147.
HUANG Chenchen, YIN Kunlong, LIANG Xin, et al. Analysis of landslide deformation under extreme conditions and its influence on the foundations of UHV transmission lines[J]. Safety and environmental engineering, 2021, 28(4):139-147(in Chinese).
- [108] 王嵩志. 藏中联网工程大型输电杆塔变形破坏模式及灾害预警研究[D]. 成都:成都理工大学, 2019.
- [109] YU H, LI H, ZHANG Z Q, et al. Failure patterns of transmission tower-line system caused by landslide events[J]. Energies, 2022, 15(19):7155.
- [110] LI C, PAN H Y, TIAN L, et al. Lifetime multi-hazard fragility analysis of transmission towers under earthquake and wind considering wind-induced fatigue effect[J]. Structural safety, 2022, 99:102266.
- [111] JEDDI A B, SHAFIEEZADEH A, HUR J, et al. Multi-hazard typhoon and earthquake collapse fragility models for transmission towers: an active learning reliability approach using gradient boosting classifiers[J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2022, 51(15):3552-3573.
- [112] ELLINGWOOD B R, ROSOWSKY D V, LI Y, et al. Fragility assessment of light-frame wood construction subjected to wind and earthquake hazards[J]. Journal of structural engineering, 2004, 130(12):1921-1930.
- [113] ZHU Z W, LEI W, WANG Q H, et al. Study on wind-induced vibration control of linked high-rise buildings by using TMDI[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2020, 205:104306.
- [114] 王文明, 王冠惠, 盛寒柯, 等. 输电塔-线体系罕遇地震-风共同作用下的多灾害响应研究[J]. 世界地震工程, 2023, 39(3):165-173.
WANG Wenming, WANG Guanhui, SHENG Hanke, et al. Study on the multiple hazard responses of transmission tower-line system under rarely occurred earthquake and wind[J]. World earthquake engineering, 2023, 39(3):165-173(in Chinese).
- [115] 刘竹丽, 霍翔宇, 伍川, 等. 考虑耐张绝缘子串的八分裂输电线路舞动特性研究[J]. 应用力学学报, 2023, 40(5):1085-1095.
LIU Zhuli, HUO Xiangyu, WU Chuan, et al. Study on the galloping characteristics of eight-bundle conductor with strain insulator strings[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(5):1085-1095(in Chinese).
- [116] HUANG G S, WU M L, QIAO Z, et al. Characteristics and simulation of icing thickness of overhead transmission lines across various micro-terrains[J]. Energies, 2024, 17(16):4024.
- [117] ZHAO G F, LU Z B, WANG X, et al. Full scale experiment for vibration analysis of ice-coated bundled-conductor transmission lines[J]. KSCE journal of civil engineering, 2022, 26(1):336-352.
- [118] LOU W J, ZHANG Y L, GU Y, et al. An improved rigid rod method for wind-induced swing response prediction of heavily iced transmission lines[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2023, 235:105358.
- [119] LOU W J, ZHANG Y L, XU H W, et al. Jump height of an iced transmission conductor considering joint action of ice-shedding and wind[J]. Cold regions science and technology, 2022, 199:103576.
- [120] 宋宇飞, 曹琰波, 范文, 等. 基于贝叶斯方法的降雨诱发滑坡概率型预警模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(3):558-574.
SONG Yufei, CAO Yanbo, FAN Wen, et al. Probabilistic early warning model for rainfall-induced landslides based on Bayesian approach[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,

- 2023,42(3):558-574(in Chinese).
- [121] XIE Y Z,ZHANG J. Design and optimization of seismic isolation and damping devices for highway bridges based on probabilistic repair cost ratio[J]. Journal of structural engineering,2018,144(8):04018125.
- [122] 周洲,吕大刚,于晓辉. 基于文献调研的我国建筑结构地震倒塌风险概率评估[J]. 建筑结构学报,2020,41(8):1-18.
ZHOU Zhou,LÜ Dagang,YU Xiaohui. Probabilistic assessment of seismic collapse risk for building structures in China based on literature investigation[J]. Journal of building structures,2020,41(8):1-18(in Chinese).
- [123] 丁佳伟,吕大刚,曹正罡. 考虑地震动空间相关性的区域群体建筑直接经济损失评估[J/OL]. 工程力学. (2024-04-01)[2024-06-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.03.20240401.1330.002.html>.
DING Jiawei,LÜ Dagang,CAO Zhenggang. Direct economic loss estimation for regional portfolio buildings considering spatial correlation of ground motions[J/OL]. Engineering mechanics. (2024-04-01)[2024-06-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.03.20240401.1330.002.html>(in Chinese).
- [124] 陆进保. 主余震作用下混凝土桥梁地震灾害损失评估方法[J]. 华南地震,2018,38(2):29-34.
LU Jinbao. Seismic disaster loss assessment method of concrete bridge under main aftershock[J]. South China journal of seismology,2018,38(2):29-34(in Chinese).
- [125] 贺海磊,郭剑波,谢强. 电气设备的地震灾害易损性分析[J]. 电网技术,2011,35(4):25-28.
HE Hailei,GUO Jianbo,XIE Qiang. Vulnerability analysis of power equipments caused by earthquake disaster[J]. Power system technology,2011,35(4):25-28(in Chinese).
- [126] 谢丽宇,唐珏,谢强,等. 基于性能的输电塔地震易损性分析[J]. 特种结构,2014,31(1):104-108.
XIE Liyu,TANG Jue,XIE Qiang,et al. Seismic fragility assessment of transmission towers via performance-based analysis[J]. Special structures,2014,31(1):104-108(in Chinese).
- [127] 张琳琳,李杰. 风荷载作用下输电塔结构动力可靠度分析[J]. 福州大学学报(自然科学版),2005,33(增刊1):36-41.
ZHANG Linlin,LI Jie. Dynamic reliability analysis of wind-induced transmission tower[J]. Journal of Fuzhou University(natural science edition),2005,33(S1):36-41(in Chinese).
- [128] 付兴,徐志凯,李宏男,等. 台风精细化风雨联合概率分布模型及输电线路失效概率评估[J]. 振动与冲击,2023,42(18):1-10.
FU Xing,XU Zhikai,LI Hongnan,et al. Refined joint probability distribution model of wind and rain under typhoon and the failure probability estimation of transmission lines[J]. Journal of vibration and shock,2023,42(18):1-10(in Chinese).
- [129] 李宏男,张文圣,付兴. 基于大数据深度学习的输电塔结构抗风易损性评估[J]. 土木工程学报,2022,55(9):54-64.
LI Hongnan,ZHANG Wensheng,FU Xing. Fragility assessment of a transmission tower subjected to wind load based on big data and deep learning[J]. China civil engineering journal,2022,55(9):54-64(in Chinese).
- [130] PAN H Y,TIAN L,FU X,et al. Sensitivities of the seismic response and fragility estimate of a transmission tower to structural and ground motion uncertainties[J]. Journal of constructional steel research,2020,167:105941.
- [131] 龚俊. 特高压变电构架的架塔线耦合及地震入射方向效应研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [132] 谭淳元. 随机风场作用下输电塔线体系的动力反应及可靠度分析[D]. 武汉:武汉工程大学,2023.
- [133] LI M H,LI Z L,YU D K. The system reliability analysis of 1 000 kV UHV transmission tower based on moment method[J]. Energy procedia,2012,16:166-171.
- [134] RONG K J,TIAN L,LUO J Y,et al. Study on wind-induced fatigue performance of large-span transmission tower-line system considering the combined distribution probability of wind direction and speed[J]. Engineering failure analysis,2024,156:107785.
- [135] AGNEW F. Guidelines for electrical transmission line structural loading[M]. Reston,VA,USA:ASCE,2009.
- [136] ELLINGWOOD B R,TEKIE P B. Wind load statistics for probability-based structural design[J]. Journal of structural engineering,1999,125(4):453-463.
- [137] 王兆坤. 洪涝灾害下电力损失及停电经济影响的综合评估研究[D]. 长沙:湖南大学,2012.
- [138] ZHOU G,SHI J X,CHEN B J,et al. Risk assessment of power supply security considering optimal load shedding in extreme precipitation scenarios[J]. Energies,2023,16(18):6660.
- [139] ESPADA R Jr,APAN A,MCDUGALL K. Using spatial modelling to develop flood risk and climate adaptation capacity metrics for assessing urban community and critical electricity infrastructure vulnerability[C]//Proceedings of the 20th International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM2013). Australia:Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand,2013:2304-2310.
- [140] CHEN M W,CHAN T O,WANG X W,et al. A risk analysis framework for transmission towers under potential pluvial flood-LIDAR survey and geometric modelling[J]. International journal of disaster risk reduction,2020,50:101862.
- [141] 李伟. 滑坡灾害下架空输电线路易损性评估研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.
- [142] 刘书豪. 降雨条件下的输电线路滑坡风险评估与预警技术研究[D]. 武汉:中国地质大学,2021.
- [143] 韩波. 滑坡灾害下电网易损性评估模型研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.
- [144] GE Y F,CHEN H Z,ZHAO B B,et al. A comparison of five methods in landslide susceptibility assessment;a case study from the 330 kV transmission line in Gansu Region,China[J]. Environmental earth sciences,2018,77(19):662.
- [145] FADEL MIGUEL L F,ALMINHANA F,BRITO J W S,et al. Multi-hazard assessment of transmission line systems subjected to independent non-concurrent turbulent winds and ground acceleration

- tions[J]. Structural safety, 2023, 105:102376.
- [146] SALMAN A M, LI Y. A probabilistic framework for multi-hazard risk mitigation for electric power transmission systems subjected to seismic and Hurricane hazards[J]. Structure and infrastructure engineering, 2018, 14(11):1499-1519.
- [147] 李嘉祥, 王文瑞, 付兴, 等. 输电铁塔在冰风耦合作用下失效概率分析[J]. 振动与冲击, 2024, 43(3):136-146.
LI Jiaxiang, WANG Wenrui, FU Xing, et al. Failure probability analysis of transmission towers under ice-wind interaction[J]. Journal of vibration and shock, 2024, 43(3):136-146 (in Chinese).
- [148] XIAO M Y, ZHOU W X, BITSUAMLAK G, et al. Fragility of transmission tower-line system subjected to concurrent wind and ice accretion[J]. Journal of constructional steel research, 2024, 222:108925.
- [149] LI J X, ZUO Y S, WANG L P, et al. Fragility analysis of a transmission tower-line system subjected to wind and ice loads considering fatigue damage[J]. International journal of structural stability and dynamics, 2025, 25(7):2550074.
- [150] DAVALOS D, CHOWDHURY J, HANGAN H. Joint wind and ice hazard for transmission lines in mountainous terrain[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2023, 232:105276.
- [151] HUANG G Z, WU G N, GUO Y J, et al. Risk assessment models of power transmission lines undergoing heavy ice at mountain zones based on numerical model and machine learning[J]. Journal of cleaner production, 2023, 415:137623.
- [152] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual review of ecology, evolution, and systematics, 1973, 4:1-23.
- [153] U. S. Department of Energy. 2009 smart grid system report[EB/OL]. (2009-07-02) [2024-07-12]. <https://www.energy.gov/oe/articles/2009-smart-grid-system-report-july-2009>.
- [154] Department of Homeland Security. National infrastructure protection plan: partnering to enhance protection and resiliency[EB/OL]. [2024-07-15]. https://www.dhs.gov/xlibrary/assets/NIPP_Plan.pdf.
- [155] SECURITY U S D O H. Energy sector-specific plan an annex to the National Infrastructure Protection Plan[Z]. Security U S D O H. Washington, D. C., 2010:1-57.
- [156] CHAUDRY M, EKINS P, RAMACHANDRAN K, et al. Building a resilient UK energy system; REF UKERC/RR/HQ/2011/001[R]. UK Energy Research Centre, 2011.
- [157] OUYANG M, DUEÑAS-OSORIO L. Multi-dimensional hurricane resilience assessment of electric power systems[J]. Structural safety, 2014, 48:15-24.
- [158] 别朝红, 林雁翎, 邱爱慈. 弹性电网及其恢复力的基本概念与研究展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22):1-9.
BIE Zhao hong, LIN Yanling, QIU Aici. Concept and research prospects of power system resilience[J]. Automation of electric power systems, 2015, 39(22):1-9 (in Chinese).
- [159] 别朝红, 林超凡, 李更丰, 等. 能源转型下弹性电力系统的发展与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9):2735-2744.
BIE Zhao hong, LIN Chaofan, LI Gengfeng, et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9):2735-2744 (in Chinese).
- [160] CARLSON J L, HAFFENDEN R A, BASSETT G W, et al. Resilience: theory and application[EB/OL]. (2012-02-03) [2024-05-20]. <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc846709/>.
- [161] 黄海静, 高阳, 孙英涛, 等. 电力系统安全韧性评价标准化研究[J]. 标准科学, 2022(1):98-101.
HUANG Haijing, GAO Yang, SUN Yingtao, et al. Research on standardization of power system resilience assessment[J]. Standard science, 2022(1):98-101 (in Chinese).
- [162] CIMELLARO G P, REINHORN A M, BRUNEAU M. Seismic resilience of a hospital system[J]. Structure and infrastructure engineering, 2010, 6(1/2):127-144.
- [163] CIMELLARO G P, REINHORN A M, BRUNEAU M. Framework for analytical quantification of disaster resilience[J]. Engineering structures, 2010, 32(11):3639-3649.
- [164] CIMELLARO G P, TINEBRA A, RENSCHLER C, et al. New resilience index for urban water distribution networks[J]. Journal of structural engineering, 2016, 142(8):C4015014.
- [165] CIMELLARO G P, VILLA O, BRUNEAU M. Resilience-based design of natural gas distribution networks[J]. Journal of infrastructure systems, 2015, 21(1):05014005.
- [166] CHANDA S, SRIVASTAVA A K. Defining and enabling resiliency of electric distribution systems with multiple microgrids[J]. IEEE transactions on smart grid, 2016, 7(6):2859-2868.
- [167] KOPSIDAS K, LIU S R. Power network reliability framework for integrating cable design and ageing[J]. IEEE transactions on power systems, 2018, 33(2):1521-1532.
- [168] ESKANDARPOUR R, KHODAEI A. Machine learning based power grid outage prediction in response to extreme events[J]. IEEE transactions on power systems, 2017, 32(4):3315-3316.
- [169] GHOLAMI A, SHEKARI T, AMINIFAR F, et al. Microgrid scheduling with uncertainty: the quest for resilience[J]. IEEE transactions on smart grid, 2016, 7(6):2849-2858.
- [170] ANG C C. Optimized recovery of damaged electrical power grids[J]. Engineering, environmental science, 2006, 3:110722348.
- [171] 张俊杰. 输电线路及电网系统抗震韧性评价方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2023.

(编辑 李坤璐)