

配电线路台风灾损机理研究进展

江思杰^{1,2} 易 弼² 张孔林³ 江修波¹

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福州 350108;

2. 福建省电力科学研究院, 福州 350007;

3. 福建省电力有限公司检修分公司, 福州 350011)

摘要 为了应对配电线路面临台风袭击时受灾严重的问题, 研究配电线路台风灾损机理具有重要意义。本文首先介绍了配电线路台风灾害特点和灾损主要形式, 然后从输电塔和混凝土电杆两个类别系统总结了配电线路荷载研究现状与成果, 接着指出了目前配电线路台风灾损机理研究中存在的问题与不足, 具体从配电线路台风灾损影响因子辨识的方面提出了当前迫切需要进行研究的内容, 最后展望了有待进一步深化研究的方向。

关键词: 配电线路; 风荷载; 灾损机理; 影响因子

Research Progress of Typhoon Damage Mechanism of Distribution Line

Jiang Sijie^{1,2} Yi Tao² Zhang Konglin³ Jiang Xiubo¹

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108;

2. Electric Power Reserch Institute of Fujian Electric Power Co., Ltd, Fuzhou 350007;

3. Fujian Electric Power Co., Ltd, Maintenance Branch, Fuzhou 350011)

Abstract In order to deal with the serious problems of the typhoon attack on the distribution lines, it is very important to study the mechanism of typhoon damage in distribution lines. This paper first introduces the characteristics of typhoon disaster and the main form of disaster. And then summarizes the current situation and achievements of distribution line load from the two categories of transmission tower and concrete pole. Then, it points out the problems and shortcomings in the study of typhoon disaster mechanism of distribution line. At present, the urgent need to study the current situation of typhoon disaster distribution factor identification is pointed out. Finally, the future direction of further research is expected.

Keywords: distribution line; wind load; disaster mechanism; influencing factor

台风灾害引起的线路故障已严重影响到电网, 尤其是配电网的安全稳定运行。配电网相比输电网架具有天然的结构和供电脆弱性, 随着城市化后配电网规模的不断增加, 其遭受极端自然灾害性天气破坏的概率或风险越来越大。以福建电网为例, 2016年“尼伯特”台风一度导致闽清、永泰两地全县95%低压用户停电, 仅闽清一地配电网直接经济损失就达2.2亿元, 整个闽清配电网几乎重建; 2016年“莫兰蒂”台风造成福建电网各电压等级设备受损严重, 其中10kV线路故障跳闸2000余条, 倒断杆4000余基。配电线路作为电力系统的重要组成部分, 处于电力输送的末端, 直接面向用户, 配电线路的安

全可靠是整个电力系统安全、稳定、经济运行的集中体现^[1]。然而强台风容易导致大范围的配电线路跳闸、杆塔倒/断、断线, 同时恶劣的天气也严重影响抢修工作的顺利开展。

传统的对台风灾害毫无应对能力的配电网已经不能完全适应新的发展需求, 亟需加强对台风灾害时空分布特性的及时把握, 以及深入探究台风灾害对配电线路安全运行的影响机理。台风灾害对配电线路的影响大, 涉及广, 时间长。在配电线路应对台风灾害方面, 对配电线路自身的结构特点、物理属性进行深入的分析和挖掘, 明确致灾机理与致灾规律, 可以更加有效地支持监测、预警关键技术研

发，从而最大限度地提高电网灾害应急处置能力与应急抢修水平。因此，针对台风灾害的配电线路灾损机理研究就显得尤为重要。

1 配电线路台风灾损分析

根据世界气象组织定义，台风指中心持续风速在 12~13 级（即 $32.7\sim41.4\text{m/s}$ ）的热带气旋。台风过境常伴随着大风和暴雨或特大暴雨等强对流天气，通常导致配电线路大量的群发性故障，分为瞬时故障和永久性灾损^[2]。最常出现大范围的配电线路跳闸，当台风风力超过线路或杆塔的设计标准时，可能引发断线、倒杆、断杆、杆倾斜等灾损事故^[3]。

1.1 灾害特点

台风对配电线路带来的损害主要是台风灾害（风灾）以及降雨带来的地质灾害。风灾与地质灾害主要是对杆塔、架空线路造成损害。

1) 风灾。台风导致杆塔两侧横向水平力在顺线路方向差距过大时，容易引发杆塔倾倒。特别是杆塔处于台风登陆点附近海岸处、海拔较高的上风口处、台风移动路径以及旋转的上风处时倾倒现象明显，当台风与线路方向接近垂直时杆塔灾损最为严重。

2) 地质灾害。杆塔基础受损或因杆塔本身受冲击时易发生倾倒。处于低洼地带的杆塔，由于雨水无法及时排出杆塔基础被长时间浸泡；阻塞导致大量积水区域，杆塔本身受到水流的冲击作用；泥石流或山体滑坡直接导致杆塔被直接破坏^[4]。

1.2 灾损主要形式

线路跳闸是台风对配电线路损毁影响的主要表现之一。台风造成配电线路跳闸故障经常发生，特别是 10kV 线路跳闸经常达数 10 条次，乃至上百条次^[5]。

杆塔主要以杆塔倾斜、倒杆、断杆为主。杆塔受灾受到多种因素影响，包括风速、杆塔自身的特性和地形等^[6]。杆塔和导线所承受的垂直风荷载超过其设计极限时会出现横倾；杆塔在沿线路方向产生的不平衡力时会导致纵倾；塔基上拔或下沉。杆塔倾倒往往导致断线，而断线引起的张力不平衡也会影响杆塔。

导线以断线为主，当承受的荷载超过其设计极限时会造成断股或断线的现象；大风引起的异物挂线，可能出现短路甚至击断线路。 10kV 导线弧垂较少，几乎不发生风偏放电，同时微风造成的线路摆动较小，电线疲劳损伤较小，导线与金具不易在大

风的作用下长期磨损。

设备在台风中的损失相对较小，大部分由于杆塔倾倒或者拉扯引起。如在强风中线路阻波器的拉扯下会导致绝缘子、避雷器以及闸刀的瓷套等设备损坏；特别应该提高变压器抗短路的能力以应对频发的 10kV 低压侧倒断杆事故。

2 配电线路荷载研究现状

按电压等级划分，可将配电网分为高压、中压、低压；按地域划分，可将其分为城市和农村。混凝土电杆是配电线路的重要组成部分，但随着经济的不断发展，负荷的逐渐提高，配电线路包含的电压等级也越来越高，一些直接供电到用户的线路已经为 110kV 或 220kV 。铁塔在配电线路中的应用范围也越来越广，已有对输电塔线结构的研究成果，对于配电线路荷载研究具有重要的借鉴意义。

2.1 输电塔

输电线路的安全性和可靠性一直受到全社会的关注，国内外学者针对输电塔线结构的风振响应开展了广泛深入的研究，形成了较为完善的理论体系和设计规范。

1) 风荷载与风场模拟

荷载指的是使结构或构件产生内力和变形的外力及其他因素，主要包括恒载、地震和环境荷载（指风、雨和覆冰等的随机作用）^[7]。

风荷载是当前电力设计中考虑的主要环境荷载，也是台风造成线路灾损的主要外力作用，影响风荷载作用的主要因素是风速和风向。风荷载一般可分为平均风荷载和脉动风荷载。可将平均风荷载对结构的作用当做静力荷载；将脉动风荷载会使结构产生动力响应当做动荷载^[8]。脉动风荷载的湍流尺度、湍流强度以及相干函数等物理特征会对线路动荷载效应产生影响。

台风风场具有高湍流度、强离散性和强变异性等特征，相比常规风场会产生较为复杂的风振效应。分析不同风场对结构的风振效应首先需要得到风速时程曲线，即根据脉动风速的风功率谱，生成一系列随机序列的时程样本。可以采用谐波叠加、线性回归滤波和小波分析等方法对脉动风速进行数值模拟。如果已知风场的脉动风的功率谱密度函数，就可以得到相应的风速时程曲线^[9]。

2) 力学模型与仿真分析

合理的力学模型是研究输电塔动力特性的关

键，主要理论分析方法是时域方法和频域方法。频域法是通过描绘频域内传递函数激励和响应之间的关系，时域法是一种直接积分法，不仅对结构的动力特性，而且几何非线性也可以较为全面体现。由于导线的非线性，所以当前多采用时域分析方法。

文献[10]介绍了索振动特性的分析方法，并分析了索两端固定时的情况，提出了连续体模型。文献[11]通过大量试验提出了两种合理可行的简化计算模型，可以用于分析平面内塔线动力特性。文献[12]将输电塔简化为梁和杆，提出了一种较简便的确定输电塔及输电线阻尼的方法。文献[13]简化了结构中各个梁单元，采取数值模拟的方式计算非线性。

文献[14]使用有限元分析进行了大量强风作用下体系的响应仿真。文献[15]提出了塔线体系风力数值模拟计算方法，为后期的输电线路工程结构的可靠性研究提供了理论基础。文献[16]建立了输电线路体系耦合振动方程，提出了分析塔线关联性的研究思路。文献[17]对输电杆塔杆件的材料、几何非线性和初始缺陷等进行了深入地研究分析，取得了开拓性的进展和大量的研究成果。

随着对常规风场作用下的风振效应研究地不断深入，特别针对台风风场也开展了一系列的研究。文献[18]以广东湛江的气象条件为基础生成风速时程曲线，分析了当地某220kV输电线路的风致动力响应情况，比较了铁塔动力响应与拟静力的计算结果，发现相比拟静力的结果，铁塔动力响应顺线路位移和垂直线路位移均较大，表明当前设计规范的设计安全裕度还需进一步提高。文献[19]分析了杆塔在台风“卡努”5个不同时刻风场下的受力情况，结果表明其变化规律与平均风速一致；在同一设计风速的条件下，对比两类风场的风荷载和受力情况，表明台风风场的风剖面指数差异产生了较为显著地影响，建议台风多发地区的杆塔设计要求应高于常规风满应力设计。因此，设计台风多发地区的输电塔必须考虑台风高湍流引起的动力风荷载增大效应。

3) 现场实测与风洞试验

现场实测可以获得大量的一手数据，为风洞试验提供必要的参数依据。文献[20]对高耸格构式塔架的风荷载进行了现场实测，数据表明响应在横和顺两个风向的量级相同，验证了输电线和输电塔之间存在明显的耦合。文献[21]进行实测认为风攻角的不同和输电塔线之间的耦合作用会对结构在大风

中的动力响应产生影响，表现为内力和位移的变化与风速的变化呈一定的相关性。文献[22]根据随机振动理论，研究了以江阴800kV输电塔为背景的脉动实测，由结果分析得到一系列相关参数，为以后的试验和进一步的理论研究奠定了坚实的基础。

风的随机性以及线路结构自身的复杂性，使得其风效应十分复杂，无法纯粹通过理论分析对这些问题得到很好的解释，所以在风洞试验中进行测试研究依然是当前被接受的合理有效的方法。风洞试验模型一般有刚性和气动弹性两类，测取结构表面承受风荷载时产生的压力使用刚性模型；测取结构在大风中的动力响应使用气动弹性模型。文献[23]研究了在试验模型设计时无法兼顾相似定律与风洞尺寸的问题，采用修正模型试验进行了一系列的开拓性研究分析。

我国学者以现实应用中的输电线路为研究对象开展了风洞试验研究，主要集中在高压输电塔的动力响应研究方面。文献[24]制作了以椒江大跨越塔架为研究对象的气弹模型，进行了横风向荷载的风洞试验研究，并与国外的现场测试数据比对，验证了横风向的风振效应与顺风向大致相同，给出了可以对横风向风振效应简化计算的公式。文献[25]设计制作了钢管塔全塔气动弹性模型，对风荷载及风振响应进行了试验研究，得到了相应的设计参数。文献[26]以昌西至南昌500kV输电工程为背景，设计并制作了输电塔线体系的完全气弹模型，严密把握了结构的气动、质量和刚度等重要参数。

高频测力天平技术 (high frequency forcebalance, HFFB) 是一种有效应用于对结构进行风洞试验研究的方法，通过测量得到结构模型的基底剪力、弯矩和扭矩，就能计算出结构上相应的风荷载作用力。我国学者在风洞试验中也经常采用高频测力天平技术，文献[27]得到了输电塔、通信塔和电视塔3种典型格构式塔架的风荷载体型系数。文献[28]基于大量数据发现了平均风荷载与风向角之间的变化关系，表明当风向角为 $20^\circ \sim 30^\circ$ 时此时位移的响应最为明显。文献[29]根据钢管塔的塔身和横担的荷载试验分析，研究了模型整体平均风荷载和体型系数，得出当风向角为 15° 、 75° 时会对钢管塔产生最大的影响。

4) 微地形风速修正

在风速修正中一般将微地形分为山峰和山坡；山间盆地、谷地等闭塞地形；与风向一致的谷口、

山口。微地形使得线路风荷载效应显著增大，相应的设计规范都对微地形下的设计方法进行了规定。**GB 50009—2001《建筑结构荷载规范》**规定山区建筑物的风压高度变化系数采用修正系数进行修正。**DL/T 5158—2002《电力工程气象勘测技术规程》**给出了修正系数的取值范围。**GB 50545—2010《110~750kV 架空输电线路设计规范》**规定在没有可靠资料时，山区送电线路的最大设计风速的调整系数都取 1.1。

针对现有的线路设计规程中微地形区域的线路杆塔结构风荷载设计较为简单或模糊的问题，我国学者开展了进一步研究。文献[30]采用 CFD 方法对垭口微地形下线路空气动力学过程进行数值计算并确定了其修正系数。文献[31]针对平地和不同微地形，计算了典型杆塔相应的风荷载效应，结果说明山丘和垭口的效应增强最为明显，悬崖次之，相比平地时整体荷载增大了 10%~30%，对于山丘和垭口当前设计规范值明显偏小；平坦地形下线条风荷载效应占总体风荷载效应的 60% 以上，也应适当增加塔身的抗风强度。

5) 降雨叠加效应

架空线路暴露在大气环境中，不可避免地受到极端天气因素的影响，如强台风环境时强风、暴雨会造成影响范围内线路大面积故障，在风雨荷载的作用下发生大量永久性事故。在目前输电线路设计中，均已冰、风为主要荷载，大多忽略了雨荷载对线路的影响，但事实表明风雨荷载对线路正常运行产生了极大的威胁^[32]。

文献[33-34]在风洞中模拟降雨对电缆动力响应影响试验，在降雨量不同的条件下研究了特定截面导线的气动阻力，结果表明雨量的增强使得其垂直方向上的阻力系数也会显著增强。但试验仅局限于电缆，缺乏对雨量影响机理的进一步分析，也没考虑风的作用。文献[35-36]基于降雨的基本概念，研究了雨滴的冲击作用，给出了可以计算降雨分布力的方法。基于 Kaimal 谱生成脉动风速，采用谐波叠加法提出一种用于模拟风雨激励的方法；对单风和风雨同时激励两种情况进行了有限元仿真计算，结果表明，相比较单风情况下，风雨同时激励的效应明显增强，雨荷载产生的荷载效应不能忽略。文献[37]进一步研究了强风雨荷载对输电线路可靠性的影响，根据结构可靠性的概念，得到了输电线路强度和荷载的随机特性，并得出强度和荷载间的联合

概率密度函数，进而建立了线路可靠性模型。

文献[38]特别开展了良态风及台风两种风场下风雨耦合对结构影响的研究，根据风谱生成了两种风雨荷载时程曲线，分析了对应输电塔顶点加速度均方根，得出了台风风谱下大于良态风风谱下的均方根，台风风场的高端流特性及降雨的作用要得到重视。

2.2 混凝土电杆

我国对混凝土电杆的荷载分析研究大都采用了试验和经验结合的方法，尤其对电杆的荷载效应研究颇多，对于借用软件分析电杆数据的方法尚处于起步阶段。

导线荷载是指作用在导线上的风以及自身质量引起的重力和水平风荷载。电杆荷载不仅包括电杆杆身上受到的风荷载，也包括杆上导线受到的水平风荷载作用于两端连接点处的导线张力^[39]。由台风引起的倒杆、断杆通常发生在电杆杆根，主要原因是杆根截面弯矩过大。

通过理论验算得出电杆的研究数据的大小，然后在试验中计算得出实际值，最后分析比较得出最终具有工程实用价值的结论，得到了一系列行业设计规程，包括《66kV 及以下架空电力线路设计规范》、《10kV 及以下架空配电线路设计技术规程》及《城市配电网规划设计规范》等。

文献[39]基于结构可靠性的概念研究了外部荷载作用下电杆倾倒的问题，总结了海南电网 10kV 线路多年运行的经验，发现电杆的分散性较大，验证了混凝土电杆的破坏弯矩符合正态分布，并结合海南的气象条件计算了 10kV 电杆的可靠性指标。文献[40-44]结合我国沿海台风多发区域电杆灾损的基本现状，对电杆受灾的主要原因进行了定性分析，包括：设计标准过低，风力超出设计标准，设施过于老旧、施工质量未达标、电杆质量不佳等；并对提高电杆的防台风能力提出了建议：提高设计标准，加强防串倒措施，加装防风拉线，监控电杆制造与施工质量，设立专项技改资金等。

3 存在的问题及相应的解决对策

3.1 存在的问题

当前输电塔线动力特性的力学模型研究已近较为完备，基本满足了有限元软件仿真模拟的需求。现场实测可以为理论研究和风洞试验提供重要的参考依据，但由于测试费用不菲、现场环境恶劣，现场实测无法经常性开展。当前风洞试验的研究中已

经充分运用了气动弹性模型和高频测力天平技术，但由于试验条件目前受到一定的限制，尚不能达到理想的要求。设计规范多以风速为参考标准，未明确对台风做出规定，特别是规范中关于微地形的风速修正仍需调整修正。已经将降雨的叠加激励作用考虑在内，但其作用机理缺乏更深入地研究。

混凝土电杆荷载的理论计算已形成相关规范，软件仿真方面尚处于起步阶段。针对台风造成的电杆灾损进行了较为全面地定性分析，混凝土电杆实际情况复杂多变，风洞模型试验难以进行全面模拟，研究手段缺乏，难以满足当前实际需要。

配电线路台风灾损涉及到电气学、力学、气象学、地理学、空气动力学、材料学等，当前研究成果主要是对线路荷载效应进行定性研究，缺乏对其他影响因子作用的评估和定量评价。在配电线路设计规程中，对于影响因子辨识的研究较为薄弱，相关的依据和标准缺乏，现场条件影响因子千变万化，某些局部防风灾治理经验难以全面推广，防风设计存在一定困难。

3.2 相应的解决对策

1) 收集历次台风下配电线路的灾损相关信息，基于大量数据梳理归纳出强台风环境下配电线路的典型灾损场景。

2) 根据关键参数建立以配电杆塔、配电架空线路段为基本单位的灾损机理力学分析模型。研究风（雨）荷载、地形地貌、次生灾害、施工情况、设备自身材质、使用年限等因素对设备的影响，筛选得到相关的影响因子。

3) 构建结合线路台风故障与其对应的微地形因子、气象因子及设备信息的典型场景，以已有的力学分析模型为基础，进行逐步回归分析，建立配电线路灾损回归模型，完成影响因子的识别研究，分析线路台风故障与显著影响因子的定量关系，解析影响因子对线路台风故障敏感性等级，根据各影响因子不同的权重，进而掌握配电线路灾损机理。

4 研究发展趋势

传统的对台风灾害毫无应对能力的配电网已经不能完全适应新的发展需求，亟需最大限度地提高配电网抵抗台风灾害性破坏的能力。配电线路台风灾损机理作为一个重要的基础研究领域，在应用方面有大量空间有待拓展。其发展的趋势包括以下几个方面。

1) 监测与预警

在配电网应对台风灾害方面，既要对传统的、面向社会大众的台风预警信息服务进行针对性的研究深化，也要依据致灾机理与致灾规律，从而更加有效地指导监测、预警关键技术研发，最大限度地提高电网灾害应急处置能力与应急抢修水平。研究配电网台风灾害监测预警体系，为时空无缝隙的气象灾害监测网络提供了坚实可靠的系统级解决方案，为提升强台风环境监测、预警及智能化应用提供必要的设计依据与科学经验。

2) 抢修抢建

基于致灾机理，结合监测与预警的成果，加强台风即将来临和发生后的实时性的致灾因素跟踪，有针对性的整合人员和物资设备，深化抢修服务的技术支持能力。做好实时和全面的灾情评估，防范次生灾害造成的不良影响，及时掌握配网受损情况，成立指挥机构，针对不同阶段制定好切实的防灾减灾应急措施，组织好抢险救灾队伍，利用好抢修物资，争取系统的做好各项工作，尽量降低受损程度，及时恢复正常供电。

3) 规划设计

当前配电网规划设中用可靠性来衡量满足用户供电需求的能力，但台风灾害发生概率较小影响却很大，现有配电网以可靠性为优化目标的规划已不能满足应对台风灾害的需要。极端自然灾害造成电网大规模故障的事件频发，使得韧性的概念被越来越多的电力系统研究者关注。配电网韧性是用于评估极端天气灾害中配电网对关键负荷的支撑和恢复能力^[45]。计算指标作为评价规划方案优劣的标准和进行优化的目标，在配电网韧性规划中非常重要。由于规划的目的是提高配电网自身的灾害应对能力，所以基于致灾机理，根据灾损形成影响因子的权重大小，可以针对性的选取配电网韧性指标，实现配电网韧性规划。

5 结论

配电网是电力系统的重要组成部分，配电线路台风灾损问题是影响配电网安全稳定运行的重要因素，因此，配电线路台风灾损机理研究是亟待解决的重要课题。本文全面分析了配电线路台风灾损机理研究成果及存在的问题，并提出了相应的对策及今后的研究重点，对未来发展趋势进行了展望，为增强配电线路抵抗台风灾害性破坏的能力及完善配

电线路设计的标准具有重要意义。

参考文献

- [1] 郁嘉嘉, 曾海涛, 黄少先. 应用线路避雷器提高 10kV 配电线路防雷性能的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9): 109-112, 115.
- [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, 118.
- [3] 厉天威, 江已彦, 赵建华, 等. 南方电网沿海地区输电线路风灾事故分析[J]. 高压电器, 2016(6): 23-28.
- [4] 林建勤. 建立科学高效的电网防台风暴雨应急机制 [J]. 供用电, 2007, 24(4): 9-11, 14.
- [5] 陈鹏云, 张露, 王成智, 等. 台风对我国电网损毁性影响评估技术研究[C]//国家综合防灾减灾与可持续发展论坛论文集, 北京, 2010.
- [6] 吴勇军, 薛禹胜, 谢云云, 等. 台风及暴雨对电网故障率的时空影响[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(2): 20-29, 83.
- [7] 熊铁华, 梁枢果, 邹良浩. 考虑断线时输电铁塔的失效模式及其极限荷载[J]. 土木工程学报, 2009(11): 86-90.
- [8] 白海峰. 输电塔线体系环境荷载致振响应研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [9] 刘锡良, 周颖. 风荷载的几种模拟方法[J]. 工业建筑, 2005, 35(5): 81-84.
- [10] Irvine HM. The linear theory of free vibrations of a suspended cable[J]. Proceedings of the Royal Society a, 1974, 341(1626): 299-315.
- [11] Ozono S, Maeda J. In-plane dynamic interaction between a Tower and conductors at lower frequencies[J]. Engineering Structures, 1992, 14(4): 210-216.
- [12] Yasui H, Marukawa H, Momomura Y, et al. Analytical study on wind-induced vibration of power transmission towers[J]. Journal of Wind Engineering&Industrial Aerodynamics, 1999, 83(1/3): 431-441.
- [13] Albermani F, Kitipornchai S, Chan R W K. Failure analysis of transmission towers[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16 (6): 1922-1928.
- [14] Shehata A Y, El Damatty A A, Savory E. Finite element modeling of transmission line under downburst wind loading[J]. Finite Elements in Analysis & Design, 2005, 42(1): 71-89.
- [15] 梁波, 徐建良. 架空输电铁塔动力风响应的数值模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002, 30(5): 583-587.
- [16] 马星. 输电塔线耦合体系风振响应研究[C]//第十届全国结构风工程学术会议论文集, 桂林, 2001.
- [17] 吕志政, 欧阳可庆, 王肇民. 拉绳塔的非线性分析 [J]. 同济大学学报, 1983(1): 15-30, 122.
- [18] 贺博, 修娅萍, 赵恒, 等. 强台风下高压输电线路塔一线耦联体系的力学行为仿真分析二: 动力响应分析[J]. 高压电器, 2016(4): 42-47.
- [19] 张宏杰, 杨靖波, 杨风利, 等. 台风风场参数对输电杆塔力学特性的影响[J]. 中国电力, 2016, 48(2): 41-47.
- [20] Momomura Y, Marukawa H, Okamura T, et al. Full-scale measurements of wind-induced vibration of a transmission line system in a mountainous area[J]. Journal of Wind Engineering&Industrial Aerodynamics, 1997, 72(1): 241-252.
- [21] Okamura T, Ohkuma T, Hongo E, et al. Wind response analysis of a transmission Tower in a mountainous area[J]. Journal of Wind Engineering&Industrial Aerodynamics, 2003, 91(1): 53-63.
- [22] 何敏娟, 杨必峰. 江阴 500kV 拉线式输电塔脉动实测[J]. 结构工程师, 2003(4): 74-79.
- [23] Loredo-Souza A M, Davenport A G. A novel approach for wind tunnel modelling of transmission lines[J]. Journal of Wind Engineering&Industrial Aerodynamics, 2001, 89(11): 1017-1029.
- [24] 楼文娟, 孙炳楠, 叶尹. 高耸塔架横风向动力风效应[J]. 土木工程学报, 1999, 32(6): 67-71.
- [25] 程志军, 付国宏, 楼文娟, 等. 高耸格构式塔架风荷载试验研究[J]. 实验力学, 2000, 15(1): 51-55.
- [26] 韩银全, 梁枢果, 邹良浩, 等. 输电塔线体系完全气弹模型设计[C]//第十三届全国结构风工程学术会议论文集, 大连, 2007.
- [27] 邹良浩, 梁枢果, 邹垚, 等. 格构式塔架风载体型系数的风洞试验研究[J]. 特种结构, 2008, 25(5): 41-43, 68.
- [28] 张庆华, 顾明, 黄鹏. 典型输电塔塔头风力特性试验研究[J]. 振动工程学报, 2008, 21(5): 452-457.
- [29] 邓洪洲, 张建明, 帅群, 等. 输电钢管塔体型系数风洞试验研究[J]. 电网技术, 2010(9): 190-194.
- [30] 王璋奇, 陈海波, 周邢银. 填口型微地形对输电线风载荷影响的分析[J]. 华北电力大学学报, 2008, 35(4): 23-26.

(下转第 17 页)