

# 输电塔风致倒塌破坏研究进展

周琦, 王振华<sup>✉</sup>

(浙江树人学院 城建学院, 浙江 杭州 310015)

**摘要:** [目的] 输电塔是电力系统中关键的基础设施, 输电塔风致倒塌将给电力系统带来重大损失。为了找出输电塔抗风致倒塌的解决方法, 有必要对输电塔风致倒塌破坏的原因、影响因素、倒塌过程等进行研究。[方法] 从事事故分析、真型试验、风洞试验、数值模拟四方面对输电塔风致倒塌研究成果进行了回顾, 分析和总结了相关研究成果, 并给出了后续研究的建议。[结果] 研究表明: 输电塔风致倒塌的原因有输电塔塔身存在薄弱杆件、规范中输电线路风荷载计算存在缺陷、规范未考虑的极端风荷载等。[结论] 建议围绕极端风荷载模型、横风向及扭转向风荷载的影响、单塔及塔线体系的精确模型、完善相关规范等方面开展研究。

**关键词:** 输电塔; 风致倒塌; 事故分析; 真型试验; 风洞试验; 数值模拟

**中图分类号:** TM7; TM75

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-8676(2024)

**OA:** <https://www.energychina.press/>

## Research Progress on Wind-Induced Collapse of Transmission Towers

ZHOU Qi, WANG Zhenhua<sup>✉</sup>

(School of Urban Construction, Zhejiang Shuren University, Hangzhou 310015, Zhejiang, China)

**Abstract:** [Introduction] Transmission towers are crucial infrastructure in power systems, and their wind-induced collapse can cause significant losses to power systems. To find solutions to prevent wind-induced collapse of transmission towers, it is necessary to investigate the causes, contributing factors, and processes of wind-induced collapse. [Method] Research results on wind-induced collapse of transmission towers were reviewed from the perspectives of accident analysis, full-scale tests, wind tunnel tests, and numerical simulations. The relevant research results were analyzed and summarized, and recommendations for subsequent research were provided. [Result] The investigation revealed that the factors contributing to the wind-induced collapse of transmission towers include the presence of weak members in the tower body, defects in the calculation of wind loads on transmission lines in the code, and extreme wind loads not considered in the code. [Conclusion] It is recommended to research extreme wind load models, the impact of crosswind and torsional wind loads, accurate models of single tower and tower line systems, and improvement of relevant regulations in the code.

**Key words:** transmission towers; wind-induced collapse; accident analysis; full-scale test; wind tunnel test; numerical simulation

## 0 引言

电力是国民经济发展的关键能源保障, 电力供应的可靠性直接影响着社会经济效率, 而负责电力传输的输电线路的安全性则决定了电力供应的可靠性。输电塔是电力传输系统中起着关键作用的基础设施, 而输电塔的风致倒塌破坏将给电力传输系统带来重大的损失和影响。比如, 我国沿海地区时常有输电塔因遭受台风灾害侵袭发生倒塌<sup>[1-5]</sup>。这将导致电网无法在短期内恢复供电, 进而影响抢险救

灾工作的开展和灾后生产、生活秩序的恢复, 对社会和经济发展造成重大影响。因此, 为了找出输电塔抗风致倒塌的解决方法, 有必要对输电塔风致倒塌破坏的原因、影响因素、倒塌过程等进行研究。对此, 国内外众多学者在输电塔倒塌破坏领域开展了大量的研究工作。文章从事事故分析、真型试验、风洞试验、数值模拟四部分分析和总结了输电塔风致倒塌破坏的相关研究成果, 并提出了相关研究建议, 为后续研究提供参考。

收稿日期: 2024-02-18 修回日期: 2024-03-11

基金项目: 2023 年国家级大学生创新创业训练计划项目(JXJ0223105), 浙江树人学院引进人才科研启动项目(2022R051)。

## 1 事故分析

输电塔作为电力输送的重要设施,承担着输电线路的支撑和稳定运行的重要功能。然而,输电塔风致倒塌破坏事故频频发生,给电力传输系统带来

了严重的影响和损失。这些事故不仅会导致输电线路破坏,造成大面积停电,还会给周边环境和人员带来潜在的安全风险。总结了几例比较典型的风致倒塌事故,如表 1 所示。

表 1 典型事故分析

Tab. 1 Typical accident analysis

年份	风型	省份	损毁情况	倒塔原因
2005 <sup>[6]</sup>	龙卷风	湖北	500 kV 输电线路中 8 基塔倒塌	—
2009 <sup>[7]</sup>	雷暴大风	江苏	500 kV 5 291 江晋线 5 基塔倒塌	—
2011 <sup>[11]</sup>	飓风或龙卷风	江苏	110 kV 园江线 2 基塔倒塌, 110 kV 江山线 2 基塔倒塌	现场出现飓风或龙卷风极端天气
2013 <sup>[3]</sup>	台风“天兔”	广东	220 kV 线路 2 基塔倒塌、110 kV 线路 4 基塔倒塌, 1 基塔塔身中部扭曲破坏	设计对台风瞬时风荷载考虑不足
2013 <sup>[8]</sup>	飓风	陕西	某 330 kV 输电线路 7 基塔倾倒, 1 基塔扭转	稀遇大风叠加微地形微气候的影响, 耐张段过长
2014 <sup>[4]</sup>	台风“威尔逊”	广东	13 基直线塔均发生倒塌	强台风风速远大于输电塔的设计风速
2015 <sup>[2]</sup>	台风“彩虹”	广东	220 kV 线路 45 基塔倒塌, 110 kV 线路 36 基塔倒塌	台风现场风速远超设计风速, 铁塔建造时的设计标准相对较低
2020 <sup>[5]</sup>	台风“黑格比”	浙江	大洞 3 572 线、象门 3 631 线 4 基塔倒塌	设计风速取值较小, 塔线体系中导、地线的低频耦合效应较大; 风振系数远远大于设计规范值

此外, 研究人员还对输电塔的设计规范开展了理论探讨。李敏生等<sup>[9]</sup>对比研究了我国在 1979、1990、2002 和 2012 四种版本中输电线路导地线风荷载计算方法, 指出 220 kV 及以下输电线路的风荷载计算不采用导地线风荷载调整系数的规定严重低估了导地线风荷载。章东鸿等<sup>[10]</sup>以理论知识为基础, 推导了导地线风振系数的相关计算公式, 并指出规范中导地线风荷载计算方法低估了导地线的阵风效应, 导致其计算结果偏不安全。王振华<sup>[11]</sup>研究了输电塔的体型系数和角度风荷载系数, 并将中国规范与美国、欧洲、日本、澳洲、IEC 规范进行对比, 发现中国规范低估了角钢塔体型系数。

根据以上事故分析、规范对比及理论研究, 可将事故发生的原因分为荷载因素和抗力因素, 荷载因素包括自然环境中的环境荷载, 突发性恶劣气象中的不确定性荷载等; 抗力因素包括铁塔自身存在薄弱点, 如铁塔部分杆件安全裕度不足等。除此之外, 还存在输电塔设计标准偏低、相关技术研究存在局限性、输电线路设计时考虑不足等影响因素。

## 2 真型试验

全尺寸真型试验是验证输电塔在特定荷载水平下力学性能的最可靠方法, 它能完全反映实际结构的受力特性, 实验结论可靠。但由于其成本过高, 加载难度较大, 试验周期长, 真正完成全过程模拟试验且取得理想结果的较少。

Fu 等<sup>[12]</sup>制作了 230 kV 全尺寸直线塔, 并对其设计了八种不同风荷载加载工况进行载荷试验, 试验结果表明: 塔架在工况八(90 寸极端风, 过载)的条件下发生过载, 约 115% 载荷水平下倒塌, 且初始失效位置塔腿的失效概率为 8.74%, 其进入塑性状态的概率达到 92.00%。Albermani 等<sup>[13]</sup>对 275 kV 双回路输电线路的新塔设计进行五种静态全横风荷载条件下塔架响应的非线性分析, 研究表明: 在荷载系数  $k = 0.96$  时, 铁塔下部塔腿部分支撑构件屈曲, 导致主材的屈曲, 进而致使输电塔倒塌。Gao 等<sup>[14]</sup>对某输电塔进行了 7 种加载工况下的全尺寸试验, 研究了铁塔的失效位置和关键部位的受力特点, 试验加载完成后发现, 位于塔腿与基础连接处的塔腿底部支撑构件, 其刚度发生了明显的突变。第 7 种工况

(45 况过载风)的结果表明, 试验塔受损的主要位置是塔腿上部第二段的主要构件。Liu 等<sup>[15]</sup>通过对比某输电塔的全尺寸试验的结果与现象学滞回模型 (PHM) 在 ABAQUS 中的模拟结果, 验证了 PHM 的准确性和可靠性, 同时, 试验塔在 0° 极端风荷载工况下的试验结果表明, 塔腿构件的屈曲破坏是输电塔倒塌的主要原因。

以上全尺寸真型试验的研究表明: 塔身下部塔腿部分支撑构件的屈曲破坏可能是引起输电塔倒塌的主要原因之一。通过总结上述四类风致倒塔的真型试验, 建议将塔腿构件列入输电塔薄弱点重点关注范围。在后续研究中, 可进一步探讨如何加强该部分的支撑作用。

### 3 风洞试验

从经济性、合理性和方便性考虑, 不便开展足尺模型研究。相比现场实测方法, 风洞试验在研究时采用缩尺模型, 在人员、物资和时间上均较为节省, 同时也可以人为地调节和改善试验条件, 因此具有较大的优势。此外, 考虑到塔线体系中导线对输电塔的影响, 学者们开展了对塔线模型的相关研究。郭勇等<sup>[16]</sup>以某大跨越输电塔工程为研究对象, 采用离散刚度法制作了塔线体系的气弹模型, 进行了单塔和塔线体系的气弹模型风洞试验, 对塔线体系的风振特性进行了研究, 试验结果表明: 塔线体系阻尼的增加将降低共振响应, 而迎风面积的增大将大幅提高背景响应。谢强等<sup>[17]</sup>按照气弹模型相似理论模拟了 1000 kV 同塔双回输电线路的五塔四线模型及其边界条件, 研究比较了单塔和塔线体系在均匀流场和紊流场的风致响应, 结果表明: 相比单塔, 塔线体系气动弹性模型的自振频率有所降低, 但阻尼大幅度增加, 且塔腿部位在紊流场的动力响应远大于均匀流场的静力响应。

除对导线影响作用的研究外, 横风向、扭矩向的风荷载对输电塔的影响也引起了学者们的注意。楼文娟等<sup>[18]</sup>按照相似准则制作了角钢输电塔的气弹模型, 研究了角钢塔在台风风场下的风振特性, 结果表明: 除了塔身整体双向弯曲振动外, 塔头还发生了明显的扭转振动, 各工况下横担端部测点的加速度响应约为相近高度塔身的 1.56~2.45 倍。张庆华等<sup>[19]</sup>采用高频天平测力风洞试验的方法, 对多回路高压

输电塔模型横担外伸长度等参数对体型系数的影响进行了研究, 结果表明: 在 30°~45° 风向角下横担结构的平均升力系数达到最大值, 且横担的脉动风荷载在顺、横、扭方向都较大。横担外伸长度最大模型的最大升力系数接近 -0.6, 横担外伸长度最小模型的最大升力系数仅为 -0.3。静风力主要以顺风向风力为主, 而顺、横风向和扭矩向脉动风力值均不能忽略, 但相关格构式输电塔结构规范中, 均未考虑横、扭风向风力对结构的影响。

综上, 风洞试验研究成果表明: 输电塔自振频率受导线的影响较小, 但塔线体系较单塔而言, 其阻尼大幅增加; 除受顺风向荷载影响外, 输电塔还受横风向、扭矩向风荷载影响, 但相关研究较为薄弱, 建议增加该方面的研究。此外, 楼文娟等<sup>[20]</sup>设计制作了 220 kV 角钢输电塔的 1:2.5 的刚性节段模型, 在均匀湍流场中进行测压风洞试验, 并将体型系数的试验值与国内规范相比较, 结果表明: 我国规范取值偏小, 建议进一步完善。

### 4 数值模拟

随着大数据和信息技术的发展, 数值模拟在输电塔设计及事故模拟中的应用越来越广泛, 成为了设计优化的有效工具。它不仅能够节约输电塔设计的时间和成本, 还能有效地模拟输电塔倒塌的过程, 便于探究风致倒塌的原因及应对措施。

#### 4.1 风荷载模型

在输电塔风致倒塌事故中, 风荷载是导致事故发生的主要因素。因此, 从根源出发, 模拟出实际事故中的风荷载模型, 是提高输电塔抗风能力以有效规避灾难发生的方法之一。

根据建筑结构表面的风压积分, 可以得到三种风力成分, 即顺风向风力、横风向风力和风扭矩。顺风向效应在多数结构抗风设计中起着控制作用。通常将建(构)筑物所处的大气边界层中的来流风分为平均风和脉动风。在工程实际应用中, 瞬时风速可看成平均风速和脉动风速的叠加。常用的风荷载计算方法有标准法(根据国家或地区的建筑风荷载标准进行计算)、风洞试验法和数值模拟法。数值模拟方法的优点相对较多, 受到学者们的高度重视, 并得到迅速发展。近年来, 已有大部分学者对风荷载模

型的模拟展开研究。张琳琳等<sup>[21]</sup>基于功率谱密度函数的谱表现方法,采用 Davenport 谱生成了目标风场的脉动风速时程,并叠加相应位置处的平均风速,得到了目标场地的风场。冯康等<sup>[22]</sup>利用考虑高度变化的 Kaimal 风速谱作为目标功率谱模拟输电塔的脉动风速时程,采用自回归模型的线性滤波法(AR 法)模拟水平方向 0°、45°和 90°的风速时程。王炎铭<sup>[23]</sup>利用 MATLAB 软件,采用谐波叠加法生成了脉动风速时程,并根据规范中规定的风速风载转换关系得到了风荷载时程。孟令星等<sup>[24]</sup>利用 Davenport 功率风速谱,采用谐波叠加法模拟 10 m 高处的平均风速为 30 m/s、40 m/s、50 m/s、55 m/s、60 m/s、65 m/s 时,输电塔各高度处的脉动风速时程。可见,我国 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》中所采用的 Davenport 谱被广泛应用于脉动风风荷载模拟中,除此之外,还有 Kaimal 风速谱、Harris 风速谱等。常见风速功率谱的特点整理如表 2 所示。

表 2 常见风速功率谱的特点

Tab. 2 Characteristics of common wind speed power spectra

风速功率谱	特点
Davenport谱	10 m高度处的风速谱,且湍流积分尺度取常数
Kaimal风速谱	考虑了近地表层中湍流积分尺度随高度发生的变化
Harris风速谱	风速谱不随高度发生变化

虽然有关风荷载模拟的研究较多,但有关超标准风荷载模拟的研究较少。张志强等<sup>[25]</sup>采用极值 III 型威布尔分布推算出了当地 50 年重现期内的极值风速,并利用石沅台风风谱模拟了风速脉动风,研究了输电线路在台风作用下的抗风性能。An 等<sup>[26]</sup>应用改进的遗传算法(IGA)求解台风风场模型。Snaiki 等<sup>[27]</sup>基于一个先进的物理学飓风模拟模型,提出了一个混合风险响应、数据驱动和物理信息的

表 3 超标准大风的定义及特征

Tab. 3 Definition and characteristics of above-standard high winds

风型	定义	特征
台风或飓风	发生在热带海洋上的一种强烈的大气涡旋	季节性强,主要在沿海地区,路径多样且复杂,破坏力强、影响范围广泛
龙卷风	发生于直系云系底部和下垫面之间的直立空管状或漏斗状旋转气流	向中心方向运动的气流,季节性明显、风速快、持续时间短、移动速度快、范围小、破坏力强,地理分布集中
下击暴流	由强下沉气流猛烈冲击地面形成的近地面短时破坏性强风	突发性强、范围小、生命周期短、出流强度大,越接近地面风速越大

框架,用于评估几种气候情景下飓风对脆弱地区 and 社区输电线路造成的损害。El Damatty 等<sup>[28]</sup>针对如何模拟 F2 级龙卷风对格构式直线塔结构临界作用的荷载工况展开研究,开发并验证了相应的模拟程序。Zhu<sup>[29]</sup>等提出了一种新的输电塔在下击暴流下的易损性分析框架,可预测风灾,改善输电塔抗风设计。朱晓虎等<sup>[30]</sup>指出,结构设计规范中尚无下击暴流强风荷载的设计方法。而杨风利等<sup>[31]</sup>采用 Vicroy 风速剖面模型,计算得到了内陆和沿海地区典型输电塔在下击暴流作用下的风荷载,为下击暴流设计规范的计算提供了参考。

另外,与风洞试验的研究方向相似,部分学者指出,风荷载模型的研究还需考虑其横风向特征等其他因素。王荣鹏等<sup>[32]</sup>研究了角钢输电塔在侧向横风作用下的动力响应问题,发现输电塔在侧向横风作用下将同时产生侧向和纵向的风致振动,其中侧向振动峰值要明显大于纵向振动峰值。吕洪坤等<sup>[6]</sup>总结得出,对有长横担结构等横向结构特征明显的输电塔进行风致响应分析,应考虑风速水平向空间相关性的影响。

综上,风荷载模型的研究众多,其中,脉动风模拟大多采用 Davenport 风谱,模拟方法常采用谐波叠加法或线性滤波法。但是,超标准风荷载的相关研究相对较少,且无相关设计规范。极端天气高发区的天气状况等因素也与普通地区不同,因此,极端天气多发地区输电塔的设计需根据当地的具体情况来定,后续的研究可针对超标准大风的风荷载模拟、设计方法等展开。关于具体的风荷载模型是否需要考虑除顺风向以外的其他因素,还需根据实际情况进一步探讨。为方便研究,总结了典型超标准大风的定义及特征<sup>[1, 30]</sup>,供后续研究参考,如表 3 所示。

## 4.2 输电塔模型

铁塔模型的模拟是研究输电塔风致倒塌内因不可或缺的一步。传统的有限元软件有 ANSYS、ABAQUS、NASTRAN、SAP 等, 除传统有限元方法之外, 普渡大学丁承先教授等提出了基于向量力学的有限元模拟方法。卢哲刚等<sup>[33]</sup>概述了向量式有限元的基本原理和有关计算步骤, 并比较归纳了向量式有限元与传统有限元方法的不同之处。姚旦等<sup>[34]</sup>以某大跨越格构式输电塔为例, 进行向量有限元的风致响应分析, 并将其所得结果与传统有限元计算所得结果进行比较, 研究表明: 向量式有限元法的计算效率比传统有限元高, 该计算例中计算时间相差约 20 倍, 建议可以使用向量式有限元求解输电塔的倒塌问题。

常用的两类模拟输电塔的有限元软件及其常用模拟单元、单元特点和可模拟部件如表 4 整理所示<sup>[5, 21, 24, 35-37]</sup>。针对模拟的单元, 陈建稳等<sup>[35]</sup>以某典型输电塔为背景, 采用数值分析方法, 进行了梁杆混合模型与梁模型的建模, 并对计算结果进行了对比分析, 研究表明: 同一工况下梁杆混合模型与刚架模型的轴力、应力结果相应之比集中在 1.002 ~ 1.020 区间内, 可见梁杆混合模型受力结果稍大于刚架模型, 混合模型结构设计偏于安全。吕洪坤等<sup>[6]</sup>基于该研究总结得出, 采用杆单元模拟输电塔结构的主斜材, 其精度较差; 对输电塔模型采用全梁单元, 其刚度偏大。因此, 在建立输电塔模型时, 可采用梁杆混合模型, 即对需要承受弯矩和扭矩的主、斜材使用梁单元进行模拟, 对只承受轴向作用的辅助材使用杆单元进行模拟, 可满足实际工程需要。大部分学者均采用该方法对输电塔模型进行模拟研究, 至于

采用何种软件的何种单元能最大程度地模拟出实际的输电塔模型, 还有待进一步的研究确认。

除此之外, 针对铁塔某部分受力性能的研究, 在模拟时可采用实体单元。例如, 输电塔结构加固的有限元模型可采用多尺度模型, 即对重点关注的杆件采用更精细的实体单元建模, 其余杆件仍保留原来的梁、杆单元。李军阔等<sup>[38]</sup>针对输电塔的失效模式, 提出了一种输电塔无损加固方案, 并采用多尺度模型对加固前后主材的轴压承载力进行了数值模拟。

在数值模拟中, 主、斜材以及辅助材与主、斜材之间的连接均为刚性连接, 辅材间的连接为铰接。但在实际模型中, 输电塔和钢结构的节点连接均属于半刚性连接范畴<sup>[35]</sup>。陈廷君等<sup>[39]</sup>对比了杆塔主要杆件受力的理论计算结果与试验实测值, 研究表明, 应力值较小时, 部分测点实测值与理论计算相对误差较大, 由此分析得出, 理论计算时节点统一视为铰接, 导致实际传力与理论计算有一定的差异, 实测应变和计算值存在差异。因此, 钱程等<sup>[40]</sup>围绕单元之间的半刚性模拟方式对输电塔风致响应模拟计算的影响展开研究, 发现对于最大弯矩和最大扭矩, 在铰接体系时为 0, 对于刚接体系时最大, 研究表明: 节点转动刚度对输电塔弯矩和扭矩的影响较大。因此, 在输电塔的有限元建模中, 建议对节点进行半刚性连接的建模, 以提高计算精度。

综上, 除了采用传统有限元方法模拟输电塔, 还可以采用向量式有限元方法, 其计算效率优于传统有限元; 模拟输电塔时, 建议采用梁杆混合模型进行模拟, 并考虑单元节点的半刚性连接。有关输电塔模型模拟优化的文献较少, 如何模拟出与实际输电

表 4 输电塔模拟相关信息

Tab. 4 Simulation related information of transmission towers

有限元软件	常用单元	单元特点	模拟的部件
ANSYS	BEAM188	三维薄壁梁单元, 考虑了剪切变形的影响, 适合进行线性、大变形和非线性分析	主材、斜材
	BEAM24	三维薄壁梁单元, 可以模拟具有任意截面的梁单元, 具有分析弹性、塑性、蠕变等功能	输电塔各杆件
	LINK180	轴向仅受拉或仅受压杆单元, 不包括弯曲刚度, 具有应力刚化、大变形功能	斜材、辅助材
	LINK10	带预拉力的三维直线杆单元, 不承受弯矩和压力, 只承受拉力, 可以模拟几何大变形	导线、地线
	LINK8	二力杆单元	绝缘子
	MPC184	刚性单元	绝缘子
ABAQUS	B31	一阶、剪切变形梁单元, 允许横向剪切变形, 既可分析厚梁, 又可分析细长梁	输电塔各杆件
	T3D2	杆单元, 只能承受拉伸和压缩荷载的杆, 不能承受弯曲	导线、绝缘子

塔更相符合的模型,还有待进一步探讨研究。

### 4.3 结构风振响应及动力分析

现行规范下,输电塔在设计时规定的风振系数,除了能满足弹性阶段输电塔构件在脉动风作用下的应力响应,还能准确评估输电塔的位移响应。但是,规范采用风振系数的拟静力方法不能全面反映脉动风对输电塔的动力响应<sup>[41]</sup>。因此,学者们对输电线路开展了动力分析,包括单塔模型和塔线体系模型。

#### 1) 单塔模型

传统研究中,研究人员多采用单塔模型分析输电塔风振特性。姚旦等<sup>[34]</sup>采用向量式有限元建立单塔模型,研究其在突加脉动风荷载作用下的倒塌过程,研究表明:倒塌原因为输电塔背风面中下部斜材受压失稳变形。Li 等<sup>[42]</sup>采用增量动力分析和显式时间积分算法对单塔模型进行连续倒塌分析,研究表明:输电塔倒塌是从腰部附近的水平支撑构件开始。宋子良等<sup>[43]</sup>利用有限元软件 ABAQUS 对 35 kV 输电塔模型在风速为 40 m/s,施加 90°风向角的荷载条件下进行数值模拟,研究表明:塔脚与塔身连接处背风面主材易发生失稳破坏。单塔模型风致倒塌的原因主要是自身杆件失稳破坏,且不排除输电塔设计时考虑不足等情况。Patil 等<sup>[44]</sup>采用东北 NASTRAN 有限元软件对 400 kV S/C 卧式结构杆塔进行了建模和分析,研究表明:系统中部分区域存在几何不稳定性,且存在塔架设计时考虑不周的可能。宋雪祺等<sup>[45]</sup>采用谱分析方法分析了高阶振型对四个典型大跨越输电塔位移和基底剪力的影响,研究表明:塔的扭转振型对塔架位移响应贡献很小,对于特高压大跨越塔,高阶振型对于塔的基底剪力影响较大,风振响应计算时应至少考虑二阶弯曲振型的贡献。张庆华等<sup>[46]</sup>以 500 kV 单回路酒杯型输电塔为例,将规范计算所得风荷载与风洞测力试验所测风荷载进行比较,并计算结构的风致响应,对比分析得出,随着线路安全等级的提高,等效静力风荷载可能偏于不安全。Vettoretto 等<sup>[47]</sup>对单塔模型进行的线性分析和非线性缺陷分析,结果表明:经受过大的风力就可能引起输电塔的倒塌,认为在输电塔建造时未充分考虑当地条件的精确荷载假设。

#### 2) 塔线体系模型

以上研究均以单塔模型为主,忽略了输电线的

作用。在输电线路设计过程中,风荷载一般按静力风考虑,但脉动风作用下铁塔与导线之间的动力耦合作用无法被完全忽视。因此,研究一定风荷载作用下塔线体系的风振响应十分重要。学者针对不同的风荷载模型与塔线体系模型的组合开展了大量研究。

金传领等<sup>[48]</sup>以江苏东台 35 kV 倒塌输电塔为研究对象,建立了单塔及塔线体系模型,并分别进行模态分析、瞬态响应分析及屈曲分析,结果表明:塔线体系的最大拉应力、最大压应力、最大位移较单塔而言,分别增加了 23.01%、37.84% 和 44.02%,即导线对输电塔在台风荷载下的位移响应影响最大。李小芳等<sup>[4]</sup>利用 ANSYS 对 ZM4 输电塔线体系模型施加了垂直线路 90°的风荷载,研究表明:塔身中下部斜材为其薄弱环节,同时认为导线在强台风荷载作用下的剧烈摆动导致输电塔与导线间的耦合作用增大,对输电塔结构抗风能力造成了很大影响。毕文哲等<sup>[37]</sup>研究的是下击暴流作用下的一塔两线模型,并得出了输电线的强烈舞动引起大量斜材和少量主材相继发生屈曲是输电塔倒塌的主要原因的结论。伍川等<sup>[49]</sup>利用 ANSYS 有限元软件建立了塔线体系的三维精细化模型,通过施加不同工况的风荷载,对输电塔进行有限元分析,结果表明:输电塔的薄弱杆件位于塔身和塔腿的部分单元。朱云祥等<sup>[5]</sup>分析了 0°和 90°风向角下单塔和塔线体系输电塔的风振效应,研究得出单塔和塔线体系的输电塔的风振系数均远远大于设计规范值,90°风向角下塔线体系输电塔顶的位移风振系数达到 3.025,远超规范推荐的 1.456。在后续研究中要进一步重视塔线体系中导、地线的耦合效应分析。张志强等<sup>[25]</sup>利用石沉台风风谱模拟脉动风作用,同时采用推算的 15 年重现期风速,进行静风等效作用求解,将两个风荷载分别加到所建的一塔两线模型上,对比两者结果得出:输电塔采用静风等效作用进行设计很可能导致构件受压失稳。因此,输电塔在设计时需考虑脉动风的放大作用。张琳琳等<sup>[21]</sup>采用 ANSYS 建立了三塔两线模型,利用 Davenport 谱生成目标风场,对模型进行抗风动力响应分析,结果表明:塔线体系中输电塔顺风向最大位移及最大轴向压应力较规范拟静力分析均明显增加,即中国现行输电塔抗风设计方法有待进一步改进。贺博等<sup>[36]</sup>对比了塔线体系模型在 0°、45°、60°和 90°风向角理论与数值静力响应分析的结果,

研究表明: 相比规范拟静力结果, 铁塔位移增大 3%, 最大轴向压应力增加约 4%, 计算结果较实际规范有所增加, 认为现行铁塔的抗风设计规范存在一定的局限性。张庆华等<sup>[50]</sup> 基于高频测力天平风洞试验的结果, 采用模态叠加法, 计算了 500 kV 单回路酒杯型输电塔的风致响应。结果表明: 输电塔结构顺风向和横风向脉动位移响应、加速度和基底弯矩值都较大, 横风向响应值甚至大于顺风向。Deng 等<sup>[51]</sup> 将格构式悬垂塔的缩尺模型简化为等效质量-梁-索系统, 并在塔架和导线上施加准稳态空间风力, 实现了数值模拟, 结果表明: 对于不带导线的塔, 动态加速度在均方根值或频谱含量方面均不会随入射角发生显著变化; 对于带导线的塔, 导线上的纵向力与横向力有很大不同, 由于导线的额外作用, 塔架的动态加速度在不同轴线和不同风力作用下表现出不同的特征。

综上, 在脉动风作用下导线与输电塔之间的动力耦合作用明显, 导线对塔架的风振响应及动态加速度的影响较大, 因此, 在进行倒塌模拟研究时, 建议采用塔线体系进行模拟研究。

## 5 结论

总的来说, 人们对输电塔风致倒塌破坏的原因、影响因素、倒塌过程等进行了大量的试验研究和数值模拟, 并取得了丰硕的研究成果, 得到了不少有助于实际工程发展的研究结论, 总结如下:

1) 风致倒塌事故发生的原因分为荷载因素和抗力因素, 荷载因素包括自然环境中的环境荷载, 突发性恶劣气象中的不确定性荷载等; 抗力因素包括铁塔自身存在薄弱构件等。除此之外, 还存在输电塔设计标准较低、相关技术研究存在局限性、输电线路设计时考虑不足等影响因素。

2) 全尺寸真型试验是反映输电塔在特定荷载水平下力学性能的最可靠方法, 在条件允许的情况下, 可采用全尺寸真型试验的方法进行研究。塔身下部塔腿部分的构件屈曲可能是引起输电塔倒塌的主要原因之一, 建议将塔腿构件列入输电塔薄弱点重点关注范围。在后续研究中, 可进一步探讨如何对塔腿构件进行加强。

3) 除受顺风向荷载影响外, 输电塔还受横风向、扭矩向风荷载影响, 但相关研究较少, 需对这方面进

行深入研究。

4) 对风荷载模型的研究较多, 但有关超标准大风风荷载模拟的研究较少, 且无相关设计规范。极端天气多发地区输电塔的设计需根据当地的具体情况来定, 建议后续可针对极端天气的风荷载模拟、设计计算方法等开展研究。

5) 除传统有限元模拟方法外, 可采用向量式有限元方法进行模拟。建议采用梁杆混合模型, 节点采用半刚性连接, 更贴合工程实际。但针对采用何种软件的何种单元能最大程度地模拟出实际的单塔或塔线模型, 还有待进一步的深入研究。

6) 在结构风振响应及动力分析方面, 导线对于输电塔的动力作用不容忽视。在单塔及塔线体系模型模拟方面, 采用塔线体系进行研究更贴合实际。目前脉动风作用下的塔线体系风振动力响应研究较多, 有关极端天气下风致倒塌的模拟研究相对匮乏。此外, 单塔模型的高阶振型影响, 以及塔线模型的风向角影响是不容忽视的因素, 有待进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 陈国建. 南通地区输电线路风灾倒塌分析与防范对策 [J]. *江苏电机工程*, 2012, 31(2): 18-21. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0665.2012.02.006.  
CHEN G J. Analysis and countermeasures of Nantong area electric transmission line and tower falling caused by wind damage [J]. *Jiangsu electrical engineering*, 2012, 31(2): 18-21. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0665.2012.02.006.
- [2] 江巴彦, 潘春平, 庄志伟, 等. 广东沿海输电线路台风倒塔事故的分析探讨 [J]. *南方能源建设*, 2016, 3(增刊 1): 82-87. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.S1.018.  
JIANG S Y, PAN C P, ZHUANG Z W, et al. Analysis of collapse accident of transmission line tower causing by typhoon attacking in the coastal district of Guangdong province [J]. *Southern energy construction*, 2016, 3(Suppl.1): 82-87. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.S1.018.
- [3] 厉天威, 江巴彦, 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, 52(6): 23-28. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2016.06.004.  
LI T W, JIANG S Y, ZHAO J H, et al. Wind accident analysis of southern grid coastal region transmission line [J]. *High voltage apparatus*, 2016, 52(6): 23-28. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2016.06.004.
- [4] 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. DOI: 10.13535/j.cnki.11-4406/n.2016.12.013.  
LI X F, YANG W J, XIE W P, et al. Research on the damage characteristics of power transmission towers in areas with frequent strong typhoons [J]. *Chinese high-tech enterprises*,

- 2016(12): 28-30. DOI: 10.13535/j.cnki.11-4406/n.2016.12.013.
- [5] 朱云祥, 张若愚, 曹枚根, 等. 海岛大跨越输电塔线体系风振响应及风振系数 [J]. *高压电器*, 2022, 58(1): 111-121. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2022.01.015.  
ZHU Y X, ZHANG R Y, CAO M G, et al. Wind induced vibration response and coefficient of large crossing transmission tower line system between islands [J]. *High voltage apparatus*, 2022, 58(1): 111-121. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2022.01.015.
- [6] 吕洪坤, 刘孟龙, 池伟, 等. 输电塔风致响应数值模拟研究进展 [J]. *钢结构*, 2020, 35(4): 1-10. DOI: 10.13206/j.gjgS20051202.  
LÜ H K, LIU M L, CHI W, et al. Progress in numerical simulation study of wind-induced response of transmission towers [J]. *Steel construction*, 2020, 35(4): 1-10. DOI: 10.13206/j.gjgS20051202.
- [7] 朱晓颖. 图: 江苏巨风导致镇江输电塔倒伏受损 [EB/OL]. (2009-06-15) [2024-02-18]. <http://www.chinanews.com/tp/news/2009/06-15/1734388.shtml>.  
ZHU X Y. Pictured: strong winds in Jiangsu caused lodging damage to the Zhenjiang transmission tower [EB/OL]. (2009-06-15) [2024-02-18]. <http://www.chinanews.com/tp/news/2009/06-15/1734388.shtml>.
- [8] 晁锐. 某 330 kV 高压输电线路风灾事故原因分析 [J]. *电力勘测设计*, 2016(3): 43-47. DOI: 10.3969/j.issn.1671-9913.2016.03.012.  
CHAO R. Analysis on wind disaster of a 330 kV high voltage transmission line [J]. *Electric power survey & design*, 2016(3): 43-47. DOI: 10.3969/j.issn.1671-9913.2016.03.012.
- [9] 李敏生, 王振华. 中国输电线路规范的风荷载计算比较 [J]. *南方能源建设*, 2018, 5(3): 89-93. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.03.014.  
LI M S, WANG Z H. Comparison of wind load calculation for China transmission codes [J]. *Southern energy construction*, 2018, 5(3): 89-93. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.03.014.
- [10] 章东鸿, 王振华. 输电线路导线阵风响应计算与比较 [J]. *中国电力*, 2016, 49(7): 27-31. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.2016.07.027.05.  
ZHANG D H, WANG Z H. Computation and comparison for gust response of wires of transmission line [J]. *Electric power*, 2016, 49(7): 27-31. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.2016.07.027.05.
- [11] 王振华. 输电塔体型系数与角度风荷载系数对比研究 [J]. *电力勘测设计*, 2021(2): 17-23. DOI: 10.13500/j.dlksj.issn1671-9913.2021.02.005.  
WANG Z H. Comparative study on shape coefficient and yawed wind load coefficient of transmission tower [J]. *Electric power survey & design*, 2021(2): 17-23. DOI: 10.13500/j.dlksj.issn1671-9913.2021.02.005.
- [12] FU X, WANG J, LI H N, et al. Full-scale test and its numerical simulation of a transmission tower under extreme wind loads [J]. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 2019, 190: 119-133. DOI: 10.1016/j.jweia.2019.04.011.
- [13] ALBERMANI F, KITIPORNCHAI S, CHAN R W K. Failure analysis of transmission towers [J]. *Engineering failure analysis*, 2009, 16(6): 1922-1928. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2008.10.001.
- [14] GAO X Y, YI R, ZHANG L Q, et al. Failure analysis of transmission tower in full-scale tests [J]. *Buildings*, 2022, 12(4): 389. DOI: 10.3390/buildings12040389.
- [15] LIU J C, YANG M, TIAN L, et al. Progressive failure and seismic fragility analysis for transmission towers considering buckling effect [J]. *Journal of constructional steel research*, 2023, 208: 108029. DOI: 10.1016/j.jcsr.2023.108029.
- [16] 郭勇, 孙炳楠, 叶尹, 等. 大跨越输电塔线体系气弹模型风洞试验 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2007, 41(9): 1482-1486. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2007.09.010.  
GUO Y, SUN B N, YE Y, et al. Wind tunnel test on aeroelastic model of long span transmission line system [J]. *Journal of Zhejiang University (engineering science)*, 2007, 41(9): 1482-1486. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2007.09.010.
- [17] 谢强, 严承涌. 1000 kV 特高压交流同塔双回输电塔线耦联体系风洞试验 [J]. *高电压技术*, 2010, 36(4): 900-906. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2010.04.016.  
XIE Q, YAN C Y. Wind tunnel test on 1000 kV UHV AC double circuit transmission tower-conductor coupling system [J]. *High voltage engineering*, 2010, 36(4): 900-906. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2010.04.016.
- [18] 楼文娟, 蒋莹, 金晓华, 等. 台风风场下角钢塔风振特性风洞试验研究 [J]. *振动工程学报*, 2013, 26(2): 207-213. DOI: 10.3969/j.issn.1004-4523.2013.02.008.  
LOU W J, JIANG Y, JIN X H, et al. Wind tunnel test research on wind-induced vibration characteristics of angle steel tower in typhoon field [J]. *Journal of vibration engineering*, 2013, 26(2): 207-213. DOI: 10.3969/j.issn.1004-4523.2013.02.008.
- [19] 张庆华, 马文勇. 多回路高压输电塔典型横担结构风力系数风洞试验研究 [J]. *振动与冲击*, 2016, 35(16): 158-163. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2016.16.025.  
ZHANG Q H, MA W Y. Experimental study of wind force coefficients on typical crossarms of a multi-circuit high-voltage transmission tower [J]. *Journal of vibration and shock*, 2016, 35(16): 158-163. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2016.16.025.
- [20] 楼文娟, 王东, 沈国辉, 等. 角钢输电塔杆件风压及体型系数的风洞试验研究 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(4): 114-118, 132. DOI: 10.13245/j.hust.2013.04.023.  
LOU W J, WANG D, SHEN G H, et al. Wind tunnel tests for wind load distribution and shape coefficient of angle-made-transmission towers [J]. *Journal of Huazhong University of science and technology (natural science edition)*, 2013, 41(4): 114-118, 132. DOI: 10.13245/j.hust.2013.04.023.
- [21] 张琳琳, 谢强, 李杰. 输电线路多塔耦联体系的风致动力响应分析 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2006, 26(3): 261-267. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2132.2006.03.004.  
ZHANG L L, XIE Q, LI J. Dynamic wind-induced response analysis of multi-tower-line coupled system of transmission line [J]. *Journal of disaster prevention and mitigation engineering*, 2006, 26(3): 261-267. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2132.2006.03.004.
- [22] 冯康, 赵海玲. 输电塔风振响应数值分析 [J]. *科技视界*,



- 2016(23): 319-320. DOI: [10.3969/j.issn.2095-2457.2016.23.260](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-2457.2016.23.260).  
FENG K, ZHAO H L. Numerical analysis of wind induced vibration response of transmission towers [J]. *Science & technology vision*, 2016(23): 319-320. DOI: [10.3969/j.issn.2095-2457.2016.23.260](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-2457.2016.23.260).
- [23] 王炎铭. 宁波地区输电塔风致动力响应分析 [J]. *安徽建筑*, 2021, 28(3): 66-67. DOI: [10.16330/j.cnki.1007-7359.2021.03.031](https://doi.org/10.16330/j.cnki.1007-7359.2021.03.031).  
WANG Y M. Wind induced dynamic response analysis of transmission towers in Ningbo area [J]. *Anhui architecture*, 2021, 28(3): 66-67. DOI: [10.16330/j.cnki.1007-7359.2021.03.031](https://doi.org/10.16330/j.cnki.1007-7359.2021.03.031).
- [24] 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. DOI: [10.13905/j.cnki.dwjz.2016.07.028](https://doi.org/10.13905/j.cnki.dwjz.2016.07.028).  
MENG L X, YU Q Q, ZENG Y J, 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. DOI: [10.13905/j.cnki.dwjz.2016.07.028](https://doi.org/10.13905/j.cnki.dwjz.2016.07.028).
- [25] 张志强, 安利强, 庞松岭, 等. 基于塔线体系模型的沿海输电铁塔抗风性能研究 [J]. *电力科学与工程*, 2016, 32(11): 74-78. DOI: [10.3969/j.issn.1672-0792.2016.11.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-0792.2016.11.013).  
ZHANG Z Q, AN L Q, PANG S L, et al. The study of wind resistance performance in coastal region tower based on transmission line system model [J]. *Electric power science and engineering*, 2016, 32(11): 74-78. DOI: [10.3969/j.issn.1672-0792.2016.11.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-0792.2016.11.013).
- [26] AN L Q, GUAN Y Y, ZHU Z J, et al. Structural failure analysis of a river-crossing transmission line impacted by the super typhoon rammasan [J]. *Engineering failure analysis*, 2019, 104: 911-931. DOI: [10.1016/j.engfailanal.2019.06.069](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.06.069).
- [27] SNAIKI R, PARIDA S S. A data-driven physics-informed stochastic framework for hurricane-induced risk estimation of transmission tower-line systems under a changing climate [J]. *Engineering structures*, 2023, 280: 115673. DOI: [10.1016/j.engstruct.2023.115673](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115673).
- [28] EL DAMATY A A, HAMADA A. F2 tornado velocity profiles critical for transmission line structures [J]. *Engineering structures*, 2016, 106: 436-449. DOI: [10.1016/j.engstruct.2015.10.020](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.10.020).
- [29] ZHU C, YANG Q S, WANG D H, et al. Fragility analysis of transmission towers subjected to downburst winds [J]. *Applied sciences*, 2023, 13(16): 9167. DOI: [10.3390/app13169167](https://doi.org/10.3390/app13169167).
- [30] 朱晓虎, 胡晨, 周方圆, 等. 下击暴流作用下输电塔体系的风振响应与优化设计研究进展 [J]. *工程与建设*, 2022, 36(5): 1241-1244, 1294. DOI: [10.3969/j.issn.1673-5781.2022.05.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5781.2022.05.008).  
ZHU X H, HU C, ZHOU F Y, et al. Research progress on dynamic response and optional design of transmission tower system under downburst [J]. *Engineering and construction*, 2022, 36(5): 1241-1244, 1294. DOI: [10.3969/j.issn.1673-5781.2022.05.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5781.2022.05.008).
- [31] 杨风利, 张宏杰, 杨靖波, 等. 下击暴流作用下输电铁塔荷载取值及承载性能分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(24): 4179-4186. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.24.023](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.24.023).  
YANG F L, ZHANG H J, YANG J B, et al. Bearing capacity analysis and load values of transmission towers under thunderstorm downburst [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(24): 4179-4186. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.24.023](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.24.023).
- [32] 王荣鹏, 王干军, 吴毅江. 侧向横风作用下角钢输电塔的动力响应研究 [J]. *南方能源建设*, 2015, 2(1): 88-91. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.01.017](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.01.017).  
WANG R P, WANG G J, WU Y J. Research on dynamic responses of a transmission tower with angle section members under lateral wind loadings [J]. *Energy construction*, 2015, 2(1): 88-91. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.01.017](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.01.017).
- [33] 卢哲刚, 姚谏. 向量式有限元——一种新型的数值方法 [J]. *空间结构*, 2012, 18(1): 85-91. DOI: [10.13849/j.issn.1006-6578.2012.01.015](https://doi.org/10.13849/j.issn.1006-6578.2012.01.015).  
LU Z G, YAO J. Vector form intrinsic finite element: a new numerical method [J]. *Spatial structures*, 2012, 18(1): 85-91. DOI: [10.13849/j.issn.1006-6578.2012.01.015](https://doi.org/10.13849/j.issn.1006-6578.2012.01.015).
- [34] 姚旦, 沈国辉, 潘峰, 等. 基于向量式有限元的输电塔风致动力响应研究 [J]. *工程力学*, 2015, 32(11): 63-70. DOI: [10.6052/j.issn.1000-4750.2013.08.0795](https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2013.08.0795).  
YAO D, SHEN G H, PAN F, et al. Wind-induced dynamic response of transmission tower using vector-form intrinsic finite element method [J]. *Engineering mechanics*, 2015, 32(11): 63-70. DOI: [10.6052/j.issn.1000-4750.2013.08.0795](https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2013.08.0795).
- [35] 陈建稳, 袁广林, 刘涛, 等. 数值模型对输电铁塔内力和变形的影响分析 [J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2009, 28(1): 40-45. DOI: [10.3969/j.issn.1672-3767.2009.01.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-3767.2009.01.008).  
CHEN J W, YUAN G L, LIU T, et al. The influence analysis of numerical model on internal force and structural deformation of power transmission tower [J]. *Journal of Shandong University of science and technology (natural science)*, 2009, 28(1): 40-45. DOI: [10.3969/j.issn.1672-3767.2009.01.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-3767.2009.01.008).
- [36] 贺博, 修娅萍, 赵恒, 等. 强台风下高压输电线路塔—线耦联体系的力学行为仿真分析——静力响应分析 [J]. *高压电器*, 2016, 52(4): 36-41. DOI: [10.13296/j.1001-1609.hva.2016.04.005](https://doi.org/10.13296/j.1001-1609.hva.2016.04.005).  
HE B, XIU Y P, ZHAO H, et al. Simulation analysis of mechanical behavior of high voltage tower-line coupled system under strong typhoons part I: static response analysis [J]. *High voltage apparatus*, 2016, 52(4): 36-41. DOI: [10.13296/j.1001-1609.hva.2016.04.005](https://doi.org/10.13296/j.1001-1609.hva.2016.04.005).
- [37] 毕文哲, 田利. 下击暴流作用下输电塔-线体系倒塌破坏研究 [J]. *工程力学*, 2022, 39(增刊1): 78-83. DOI: [10.6052/j.issn.1000-4750.2021.05.S012](https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2021.05.S012).  
BI W Z, TIAN L. Study on the collapse failure of transmission tower-line system under downburst [J]. *Engineering mechanics*, 2022, 39(Suppl.1): 78-83. DOI: [10.6052/j.issn.1000-4750.2021.05.S012](https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2021.05.S012).
- [38] 李军阔, 郜帆, 刘春城, 等. 输电塔倒塌失效模式和主材角钢加固方法研究 [J]. *自然灾害学报*, 2023, 32(5): 139-148. DOI: [10.13577/j.jnd.2023.0514](https://doi.org/10.13577/j.jnd.2023.0514).  
LI J K, GAO F, LIU C C, et al. Study on failure modes and retrofitting method for leg members of transmission tower [J]. *Journal of natural disasters*, 2023, 32(5): 139-148. DOI: [10.13577/j.jnd.2023.0514](https://doi.org/10.13577/j.jnd.2023.0514).
- [39] 陈廷君, 聂卫平.  $\pm 500$  kV 双回路直流耐张塔真型试验分析

- [J]. 南方能源建设, 2015, 2(增刊 1): 55-59. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.S1.012.
- CHEN T J, NIE W P. Full-scale test analysis for strain tower applied in UHV DC double-circuit transmission line [J]. *Southern energy construction*, 2015, 2(Suppl.1): 55-59. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.S1.012.
- [40] 钱程, 沈国辉, 郭勇, 等. 节点半刚性对输电塔风致响应的影响 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2017, 51(6): 1082-1089. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2017.06.004.
- QIAN C, SHEN G H, GUO Y, et al. Influence of semi-rigid connections on wind-induced responses of transmission towers [J]. *Journal of Zhejiang University (engineering science)*, 2017, 51(6): 1082-1089. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2017.06.004.
- [41] LI J K, GAO F, WANG L H, et al. Collapse mechanism of transmission tower subjected to strong wind load and dynamic response of tower-line system [J]. *Energies*, 2022, 15(11): 3925. DOI: 10.3390/en15113925.
- [42] LI Y Q, CHEN Y, SHEN G H, et al. Member capacity-based progressive collapse analysis of transmission towers under wind load [J]. *Wind and structures*, 2021, 33(4): 317-329. DOI: 10.12989/was.2021.33.4.317.
- [43] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6944.2021.08.048.
- SONG Z L, NAN Y, ZHANG S J. Analysis on the damage of high voltage transmission tower under strong wind [J]. *Wireless internet technology*, 2021, 18(8): 100-101. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6944.2021.08.048.
- [44] PATIL H, DOSHI G, NAPA P R, et al. Failure analysis of transmission line tower: a case study [J]. *The IUP journal of structural engineering*, 2010, 3(1): 20-27.
- [45] 宋雪祺, 邓洪洲, 杨子焯, 等. 基于谱分析法考虑高阶振型大跨越输电塔风振响应分析 [J]. *结构工程师*, 2020, 36(4): 90-97. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2020.04.013.
- SONG X Q, DENG H Z, YANG Z Y, et al. Analysis on wind-induced responses of long-span transmission tower based on spectral analysis method considering higher vibration modes [J]. *Structural engineers*, 2020, 36(4): 90-97. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2020.04.013.
- [46] 张庆华, 顾明. 典型格构式结构风荷载及风致响应规范比较 [J]. *振动与冲击*, 2015, 34(6): 140-145. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2015.06.027.
- ZHANG Q H, GU M. Comparison among wind loads and wind-induced responses of typical lattice structures obtained using various codes [J]. *Journal of vibration and shock*, 2015, 34(6): 140-145. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2015.06.027.
- [47] VETTORETTO G, LI Z C, AFFOLTER C. Evaluation of the ultimate collapse load of a high-voltage transmission tower under excessive wind loads [J]. *Buildings*, 2023, 13(2): 513. DOI: 10.3390/buildings13020513.
- [48] 金传领, 万瑜, 华坤, 等. 台风荷载作用下输电塔动力响应及塔失效模式分析 [C]//2021 年工业建筑学术交流会议. 北京: 中冶建筑研究总院有限公司, 2021.
- JIN C L, WAN Y, HUA K, et al. Dynamic response and failure mode analysis of transmission tower under typhoon load [C]//2021 Industrial Architecture Academic Exchange Conference. Beijing: MCC Construction Research Institute Co., Ltd., 2021.
- [49] 伍川, 杨晓辉, 赵鹏飞, 等. 基于塔线体系的风荷载作用下输电铁塔薄弱杆件分析 [J]. *中国工程机械学报*, 2022, 20(6): 504-509. DOI: 10.15999/j.cnki.311926.2022.06.004.
- WU C, YANG X H, ZHAO P F, et al. Analysis on weak element of transmission tower under wind load based on tower line system [J]. *Chinese journal of construction machinery*, 2022, 20(6): 504-509. DOI: 10.15999/j.cnki.311926.2022.06.004.
- [50] 张庆华, 顾明. 基于高频天平测力试验的 500 kV 单回路输电塔风致响应研究 [J]. *振动与冲击*, 2014, 33(4): 156-160, 172. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2014.04.027.
- ZHANG Q H, GU M. Wind-induced response of a 500 kV single-circuit transmission tower based on high-frequency force-balance technique [J]. *Journal of vibration and shock*, 2014, 33(4): 156-160, 172. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2014.04.027.
- [51] DENG H Z, XU H J, DUAN C Y, et al. Experimental and numerical study on the responses of a transmission tower to skew incident winds [J]. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 2016, 157: 171-188. DOI: 10.1016/j.jweia.2016.05.010.

#### 作者简介:



周琦

周琦 (第一作者)

2003-, 女, 浙江树人学院土木工程专业, 本科。

王振华 (通信作者)

1982-, 男, 浙江树人学院正高级工程师, 浙江大学土木工程博士, 主要从事输电塔结构、空间结构的的教学、科研和工程实践工作(e-mail) wangzh@zjsru.edu.cn。

(编辑 徐嘉铨)