

# 强风下输电塔-线体系连续性失效反演研究

张国强<sup>1</sup>, 李治<sup>2</sup>, 董优<sup>3\*</sup>, 李丹煜<sup>1</sup>, 贺春<sup>4</sup>, 刘俊才<sup>3</sup>, 张钰<sup>3</sup>, 杨汶鑫<sup>3</sup>

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100055; 2. 国网天津市电力公司, 天津 300010; 3. 香港理工大学深圳研究院, 广东 深圳 518063; 4. 国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300022)

**摘要:** 输电线路作为典型的风敏感结构, 不仅分布范围广且极易遭受强风影响, 强风作用易引发输电线路受损甚至发生倒塌事故, 进而造成严重的经济损失。文中以强风致某输电塔倒塌实际案例为依托, 首先建立了输电塔-线体系有限元模型; 在风荷载模拟过程中, 充分考虑脉动风速的随机性与空间相干性影响, 进而生成了不同风速与风攻角下风荷载时程曲线。其次基于非线性动力分析方法, 对输电塔进行了强风下输电塔-线体系振动响应分析, 明确了输电塔位移、节间位移角及关键杆件的应力响应规律, 并捕捉了输电塔的连续性失效过程。结果表明: 受塔-线耦合效应的影响, 脉动风速随机性对输电塔的影响随着风攻角的增大而逐渐降低; 当风速为  $28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、风攻角为  $0^\circ$  作用时, 该输电塔第2、3节间的风振响应相对较大, 表明这两个节间为该输电塔的薄弱位置; 此外, 数值模拟得到的输电塔失效模式与实际失效模式基本相同, 输电塔薄弱区间的部分杆件屈曲引发局部区域应力重分布, 当更多杆件的应力超过屈服强度后, 最终诱发输电塔发生连续性倒塌, 本研究以为强风下输电线路的安全运行提供参考。

**关键词:** 输电塔-线体系; 连续性失效; 强风; 薄弱区间; 倒塌模式; 风荷载时程曲线; 振动响应分析

中图分类号: TM75

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)01-0128-11

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20240731002

## Investigation on Progressive Failure of Transmission Tower-Line System Under Strong Winds

ZHANG Guoqiang<sup>1</sup>, LI Zhi<sup>2</sup>, DONG You<sup>3\*</sup>, LI Danyu<sup>1</sup>, HE Chun<sup>4</sup>,  
LIU Juncai<sup>3</sup>, ZHANG Yu<sup>3</sup>, YANG Wenxin<sup>3</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100055, China; 2. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China; 3. Shenzhen Research Institute, The Hong Kong Polytechnic University, Shenzhen 518063, China; 4. Research Institute of Electric Power Science, State Grid Corporation of Tianjin, Tianjin 300022, China)

\*Corresponding author: you.dong@polyu.edu.hk

**Abstract:** Power transmission line is a typical wind-sensitive structure, which is widely distributed and very susceptible to strong winds, which results in damage or even collapse accidents, causing serious economic losses. Based on an actual collapse case of a transmission tower caused by strong wind, this paper firstly establishes a finite element model of the transmission tower-line system and simulates the wind load time histories for different wind speeds and wind attack angles with consideration of the randomness and the spatial coherence. Based on the nonlinear dynamic analysis

收稿日期: 2024-07-31

基金项目: 国家电网有限公司科技项目 (SGTJDK00PJJS2400071)

作者简介:

张国强 (1990—), 男, 博士, 工程师, 主要从事输电线路检测技术与性能分析方面的研究。

E-mail: zhangguoqiang@epri.sgcc.com.cn.

通信作者:

董优 (1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事结构防灾减灾方面的研究。E-mail: you.dong@polyu.edu.hk.

method, the wind-induced response analyses of the transmission tower-line system under strong winds are carried out in terms of displacement and inter-segment displacement ratio (ISDR), as well as the stress responses of key steel members. The progressive failure process of the transmission tower-line system is subsequently numerically captured. The results show that, due to the tower-line coupling effect, the influence of wind speed randomness decreases gradually with the increase of the wind attack angle. The wind vibration responses of Segments 2 and 3 are relatively larger when the wind speed is  $28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  and the wind attack angle is  $0^\circ$ , indicating that these two segments are the weak positions of the tower. In addition, the failure mode of the tower obtained from the numerical simulation is basically the same as that of the actual tower. The buckling of some members leads to stress redistribution in the local area, and more failed members trigger the progressive collapse of the transmission towers. This study is intended to provide an available guide for the safe operation of transmission lines under strong winds.

**Keywords:** transmission tower-line system; progressive failure; strong wind; weak segment; collapse mode; wind load time-history curve; wind-induced response analysis

作为现代社会能源供应体系的核心组成部分,输电线路承担着电力运输的核心使命,主要负责电能从发电厂到用户的传输功能,是确保民生用电稳定供应的关键基础设施。输电线路途经区域环境复杂多变,不可避免地遭受强风影响。输电塔-线体系作为典型的高耸大跨空间柔性结构体系,对环境风荷载具有显著敏感性;一旦强风作用下某一基输电塔发生倒塌事故,受塔-线耦合效应影响,极易引发输电线路故障,进而诱发大面积停电事件,这不仅会严重影响正常生产生活,还将造成难以估量的经济损失<sup>[1]</sup>。近年来,我国输电线路遭受风灾影响而发生损坏屡见不鲜<sup>[2]</sup>;例如,2021年江苏吴江区遭受局地强风影响,导致多基输电塔发生倒塌事故,局部电力设施受损;2023年天津市遭受强对流天气影响,导致多条输电线路受损并造成停电事故。因此,为保障强风下输电线路安全运行,有必要深入研究输电线路连续性倒塌机理。

针对我国风致输电线路风灾事故日益频发的现状,谢强等<sup>[3]</sup>总结了其原因并认为除了气候变化导致极端天气频发以外,塔-线耦合效应对输电塔风振响应的影响不清晰也是重要原因。同时,目前在对输电塔抗风设计与研究中难以考虑杆件受压失稳破坏的影响,理想弹塑性模型无法准确捕捉输电塔的极限抗风性能<sup>[4]</sup>。鉴于此,BI等<sup>[5-6]</sup>考虑了风速和风向的联合分布,研究强风下输电线路的易损性曲线。王成等<sup>[7]</sup>采用蒙特卡洛模拟方法研究了随机风荷载作用下输电塔结构的可靠度,结果表明短腿主材为输电塔结构整体的薄弱部位。FU等<sup>[8]</sup>研究了强风下输电线路的易损性,揭示了输电线对输电塔风振响应的影响规律。李军阔等<sup>[9]</sup>分析了强风下输电塔的破坏模式和倒塌机理,并针对此提出了一种无损加固方案,显著提升了输电塔的抗风能力。毕文哲等<sup>[10]</sup>针对下击暴流下输电线路的抗风性能,开展了力学性能数值模拟研究,结果表明主材屈曲是输电塔发生倒塌破坏的主要原因。李正良等<sup>[11]</sup>基于风洞试验与数值模拟研究了输电塔的风振系数,并与设计规范对比后建议对横担位置的风振系数进行修正。韩承永等<sup>[12]</sup>考虑下击暴流的

入射方向性特征,系统研究了其对输电塔承载性能与失效模式的影响,结果表明下击暴流沿垂直于塔线方向入射时,为该体系的最不利攻角工况。虽然目前针对输电线路的风振响应已开展了大量研究,但近年来风致输电塔倒塌事故频发表明现有抗风设计仍需改善;核心原因之一在于,现有研究鲜有聚焦风致连续性倒塌预测方法的构建,进而导致输电塔的极限抗风性能尚不明确。

针对以上问题,本文以某实际输电线路风致倒塌破坏案例为依托,首先建立了输电线路有限元模型并生成了符合实际风场特性的随机风荷载时程曲线;其次基于非线性动力分析方法,研究了该输电线路的抗风性能和倒塌模式,明确了其薄弱位置和极限抗风能力,以期为输电线路的抗风设计提供参考。

## 1 有限元模型建立与风荷载模拟

### 1.1 有限元模型建立

本文以某35 kV输电铁塔为研究对象,在有限元软件ABAQUS中建立了输电铁塔-线体系有限元模型。该输电塔在2023年7月的局地强风作用下发生了倒塌破坏,临近气象站测得当时风速达到 $28.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;现场勘察结果显示,故障杆塔基础以上第一节塔身保持完整未发生倾倒,第二节及以上塔身段整体倾倒,塔头结构倒塌后完整横卧于地面。本文以此为背景研究强风下输电线路的连续性倒塌机理,为输电线路抗风能力评估与提升提供指导。该输电铁塔总高度为26.5 m,呼高为18 m,水平档距为293 m。输电铁塔的主材采用Q345型号的L90×7、L75×6与Q235型号的L56×5角钢制成,斜材采用Q235型号的L50×4、L40×3、L45×4角钢制成,横担采用Q235型号的L50×5、L63×5角钢制成。该输电铁塔沿高度方向设置3个横担,自下而上高度分别为18 m、20.5 m、23 m,均通过绝缘子串悬挂导线,导线型号为LGJ-300/40;地线布置于输电铁塔顶部,型号为GJ-50。图1和2分别为输电铁塔的尺寸信息和输电线路图。表1为导线和地线的具体信息。

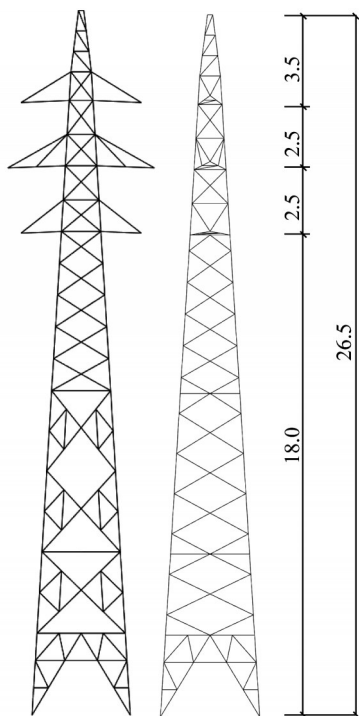


图1 输电塔尺寸信息(单位:m)

Fig. 1 Dimension information of transmission tower(unit: m)

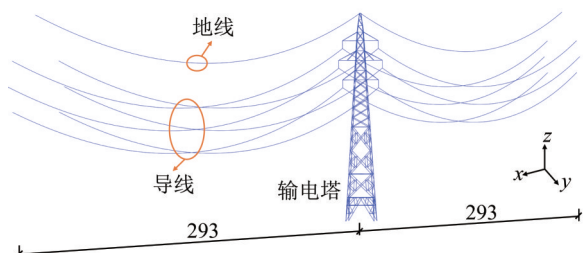


图2 输电塔-线体系有限元模型(单位:m)

Fig. 2 Finite element model of transmission tower-line system(unit: m)

表1 导线和地线材料参数

Table 1 Conductor and ground material parameters

属性	导线	地线
类型	LGJ300/40	GJ-50
直径/mm	23.9	9.0
弹性模量/GPa	73.0	49.6
截面积/mm <sup>2</sup>	339.0	184.3
单位长度质量/(kg·km <sup>-1</sup> )	1 131.0	423.7

图2为在有限元软件ABAQUS中建立的输电塔-线体系有限元模型。输电塔采用梁单元B31模拟,输电线路与绝缘子串均采用杆单元T3D2模拟,将输电线路按5 m长度间隔离散为79个单元,以保证计算效率和模拟精度。输电线路端部采用铰接约束,输电铁塔底部采用固定约束;

输电塔-线体系的纵向(顺线路方向)、横向(垂直线路方向)和竖向分别用 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 表示。值得注意的是,有限元软件中自带的钢材本构模型无法考虑钢构件受压屈曲和后屈曲行为,因此本文引入了一个非线性滞回模型<sup>[13]</sup>,其能够准确预测循环荷载作用下钢构件的复杂力学特性,包括受拉屈服和塑性硬化阶段、受压屈曲和后屈曲行为及刚度和强度退化行为。

在有限元软件ABAQUS中采用Lznczos算法对输电塔开展动力特性分析,得到以输电塔振动为主 $x$ 和 $y$ 方向的自振频率分别为1.381 Hz、1.394 Hz,随后采用公式(1)和(2)得到输电塔-线体系的阻尼系数<sup>[14]</sup>,其中输电塔与线的阻尼比分别取0.02、0.01。

$$\alpha = \xi \frac{2\omega_1\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \quad (1)$$

$$\beta = \xi \frac{2}{\omega_1 + \omega_2} \quad (2)$$

式中: $\alpha$ 和 $\beta$ 分别为瑞利阻尼系数; $\xi$ 为阻尼比; $\omega_1$ 和 $\omega_2$ 分别为输电塔-线体系的第1和第2阶固有频率。

## 1.2 风荷载模拟

地面摩擦阻力对大气流动影响显著,其影响程度随着高度增加而逐渐减弱;当超过一定高度时,空气将以梯度风速均匀流动,此高度被定义为大气边界层高度。实测数据表明,大气边界层高度内的风速通常可分解为平均风速和脉动风速<sup>[15]</sup>。平均风速沿高度变化规律可用对数律或指数律表示,针对输电塔等高耸结构的结构特性,相关学者<sup>[16]</sup>认为对数风剖面可表征大气底层的风速轮廓线,可表示为:

$$\bar{v}(z) = \frac{1}{k} u_* \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (3)$$

$$u_* = \frac{k\bar{v}(z_r)}{\ln(z/z_0)} \quad (4)$$

式中: $k$ 为Karman系数; $u_*$ 为摩阻速度; $z$ 和 $z_0$ 分别为任意点高度和地面粗糙长度; $z_r$ 为参考高度。

脉动风是由湍流引起的,其风速随空间和时间变化,具有显著的随机性。脉动风速通常被认为是零均值的平稳高斯随机过程,可采用功率谱密度函数表示其统计特征。目前常用的功率谱主要有Kaimal谱和Davenport谱<sup>[17]</sup>;然而,Davenport谱基于不同高度处紊流尺度恒定的简化假定,不适用于具有高耸特性的输电铁塔结构。因此,本文采用考虑高度变化的Kaimal谱描述脉动风速特征,其表达式为:

$$\frac{nS_v(n)}{u_*} = \frac{200x}{(1+50x)^{5/3}} \quad (5)$$

式中: $n$ 为频率; $x$ 为无量纲坐标。

为了研究输电塔-线体系在强风作用下的倒塌过程,

有必要采用时域分析方法。在当前工程结构抗风领域的相关研究中,应用最为广泛的脉动风速模拟方法包括谐波叠加法和线性滤波法。与谐波叠加法相比,线性滤波法的计算效率高且成本低,适用于输电塔-线体系不同测点的脉动风速模拟中。由于输电线路的纵向长度与竖向高度远大于横向长度,因此本文在脉动风速数值模拟过程中考虑了纵向和竖向的空间相关性,则脉动风速可表示为:

$$\tilde{v}(y, z; t) = \sum_{\zeta=1}^p \psi_{\zeta} \tilde{v}(t - \zeta \Delta t) + N(t) \quad (6)$$

式中: $p$ 为自回归模型的阶数; $\psi_{\zeta}$ 为自回归系数; $\Delta t$ 为时间间隔; $N(t)$ 为服从均值为0且方差为1的正态分布随机

数。如图3所示,不同高度处的风速模拟结果显示,各高度风速均表现出显著的脉动特征;此外,模拟谱与目标谱的变化趋势基本一致,表明本文采用的风速模拟方法的合理性。

为了便于施加风荷载,将输电铁塔沿高度方向划分为6个节间,并计算每个节间的挡风面积和阻力系数;此外,将每条输电线划分为8个区段,通过荷载等效原则将每段输电线所受风荷载集中施加于该区段中点。基于国际电工委员会 IEC 60826:2017 规范<sup>[18]</sup>,得到输电塔和输电线不同加载点处的风荷载时程曲线。输电线路风荷载施加点和风攻角定义如图4所示。

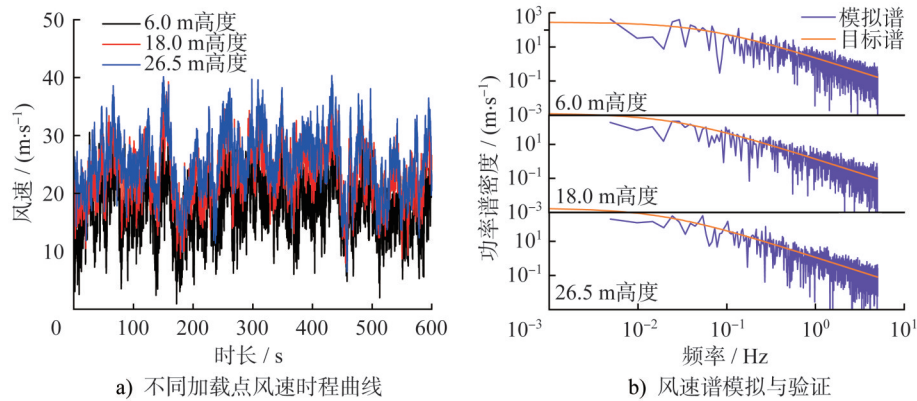


图3 风速模拟

Fig. 3 Wind speed simulation

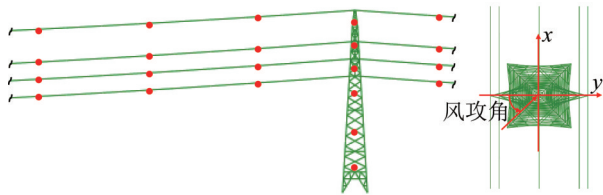


图4 输电线路风荷载施加点和风攻角定义

Fig. 4 Definition of wind load application points and wind attack angle

## 2 风致响应分析

为研究大风作用下输电线路从弹性工作阶段到失效破坏阶段的全过程,本文选取风速范围从  $26 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ~  $31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,同时选取了  $0^\circ$  (垂直线路方向)、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  (顺线路方向)的风攻角。值得注意的是,由于该输电塔实际倒塌风速约  $28.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,本文选取的  $26 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ~  $31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  范围能够合理地确定输电塔从弹性到失效的全过程。考虑到脉动风速具有随机性,每种工况生成了5组风荷载时程,记为 WS1~WS5。并采用了非线性动力分析方法,模拟分析了输电塔-线体系的风振响应,包括每个节间的位移和节间位移角及主材应力沿高度分布规律。此外,由于输电铁塔高宽比较大且无楼板系统支撑,导

致节间会产生较大的旋转变形,而节间位移角(简称 ISDR)能够消除该旋转变形的影响,有效呈现输电铁塔的薄弱位置。为得到不同区域的内力变化,选取沿高度分布的主材并提取其应力进行分析。输电铁塔风振分析中的节间划分和选取主材如图5所示,其中位移测点位于各节间的顶部,节间1~3的应力测杆分别为节间顶部和中部位置处的主材,节间4和5的应力测杆为该节间的全部主材。由于塔头位置处承受荷载较小,因此节间6中未布置应力测杆。

### 2.1 位移响应

图6~11给出了不同风速下输电铁塔沿高度的位移响应变化规律,每张图中包含了5条曲线,表示了脉动风速的随机性。可以看出:在风速为  $26 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $27 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,输电塔位移沿高度逐渐增大且在顶部达到最大;相比于其它风攻角,  $0^\circ$  风攻角时塔顶位移达到最大且均为  $210 \text{ mm}$  (根据《高耸结构设计标准》(GB 50135—2019)<sup>[19]</sup>,输电塔发生倒塌的顶部位移阈值可取  $H/50$ ,  $H$  为输电塔高度,则本文可取阈值为  $530 \text{ mm}$ ) 以内;当风攻角从  $0^\circ$  逐渐增大至  $90^\circ$  时,5条位移曲线的差异逐渐减小;这可能是因为  $0^\circ$  风攻角为垂直塔线方向,导线上的风

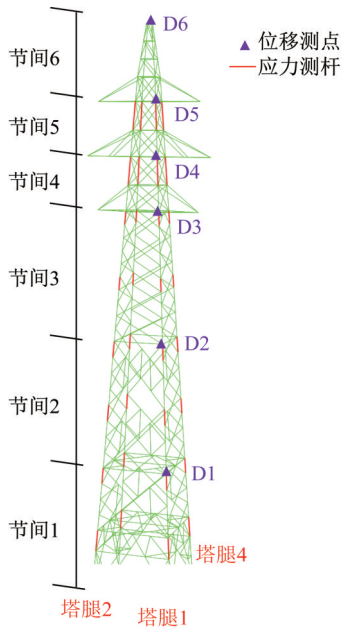


图5 节间划分和选取主材

Fig. 5 Dividing sections and selecting main materials

荷载作用效应最为显著。当风速增大至  $28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,输电塔各个测点位移逐渐增大;  $0^\circ$  风攻角下 WS3 工况的输电塔位移曲线呈发散趋势,表明输电塔-线体系发生了倒塌破坏;在其它风攻角的所有工况中,输电塔顶部位移均小于  $210 \text{ mm}$ ,表明输电塔仍具有良好的抗风能力。

随着风速继续增加,在  $0^\circ$  风攻角下更多工况的位移曲线呈发散趋势,表明输电塔基本丧失抗风能力,且发生了倒塌破坏。

### 2.2 节间位移角响应

图 12~17 给出了不同风速下输电塔-线体系的节间位移角变化规律,为便于分析,仅给出了  $0^\circ$  和  $90^\circ$  风攻角下的结果。基于相关文献[20],当某一节间的节间位移角达到 0.02 时,判定输电塔发生了倒塌破坏。从图中可以看出:当风速小于  $28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,输电塔的 ISDR 均小于 0.01,第 3 节间的 ISDR 较大;然而对于  $90^\circ$  风攻角,ISDR 随高度增加而逐渐增大,且不同工况的 ISDR 曲线差异较小,表明该风攻角下脉动风速随机性对输电塔-线体系的影响降低。当风速为  $28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  且沿  $0^\circ$  风攻角作用时,WS3 工况下第 2 和第 3 节间的 ISDR 超过了倒塌限值 0.02,表明输电塔发生倒塌破坏。当风速超过  $29 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,更多工况中 ISDR 超过倒塌限值,同时相比于其他节间,第 2 和第 3 节间的 ISDR 较大,表明这两个节间是该输电塔的薄弱位置。

### 2.3 主材应力响应

图 18~20 给出了不同风速下输电铁塔的主材应力变化规律,由于  $0^\circ$  风攻角下输电塔-线体系的响应最显著,因此仅给

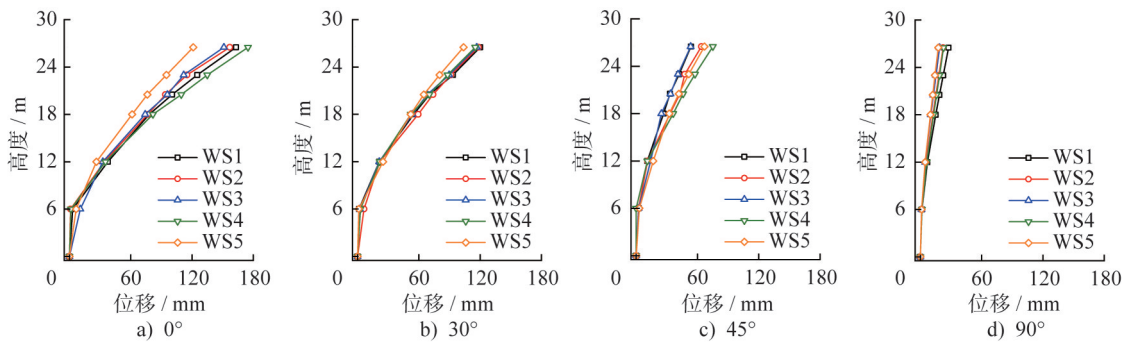


图6  $26 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  风速下输电塔位移响应

Fig. 6 Displacement responses of transmission tower under a wind speed of  $26 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

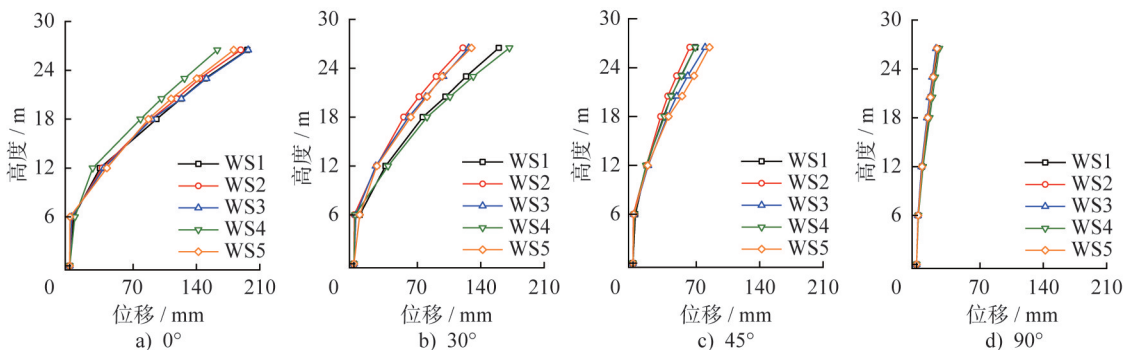


图7  $27 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  风速下输电塔位移响应

Fig. 7 Displacement responses of transmission tower under a wind speed of  $27 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

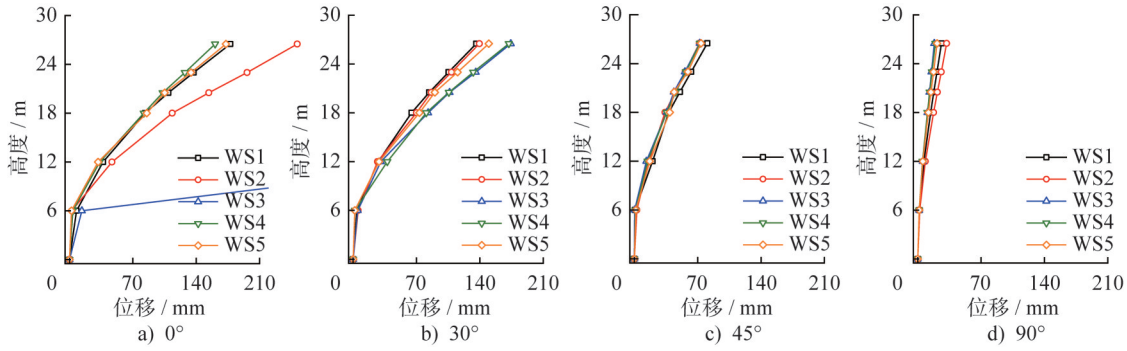


图 8  $28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  风速下输电塔位移响应

Fig. 8 Displacement responses of transmission tower under a wind speed of  $28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

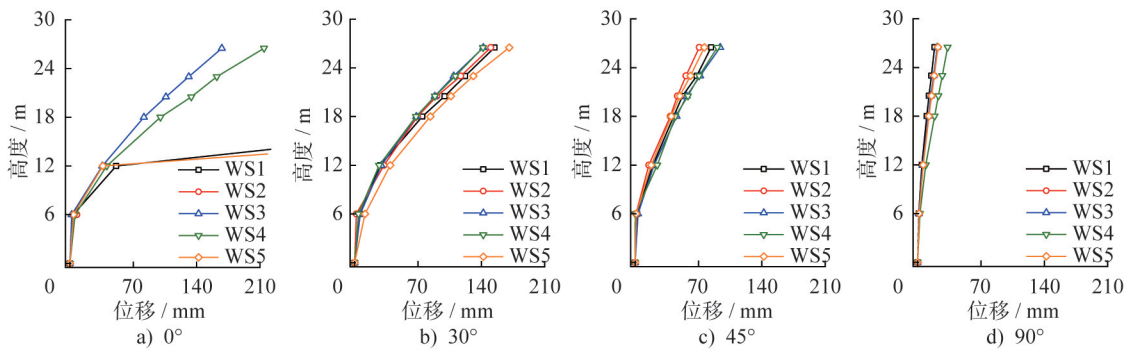


图 9  $29 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  风速下输电塔位移响应

Fig. 9 Displacement responses of transmission tower under a wind speed of  $29 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

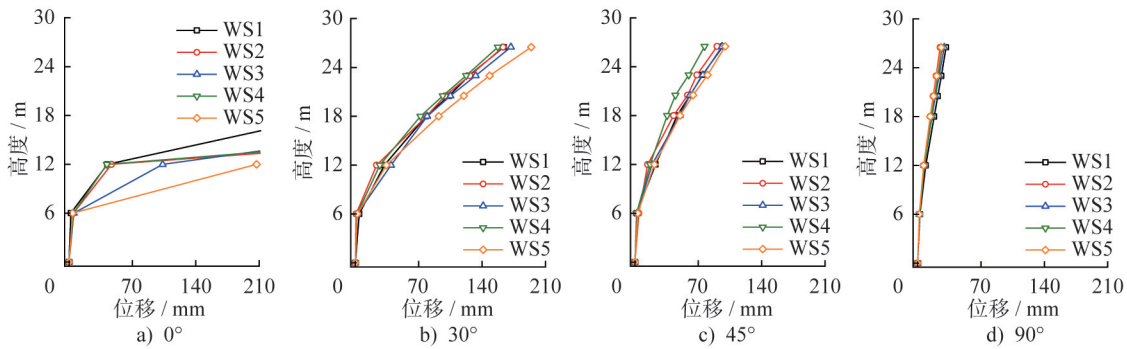


图 10  $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  风速下输电塔位移响应

Fig. 10 Displacement responses of transmission tower under a wind speed of  $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

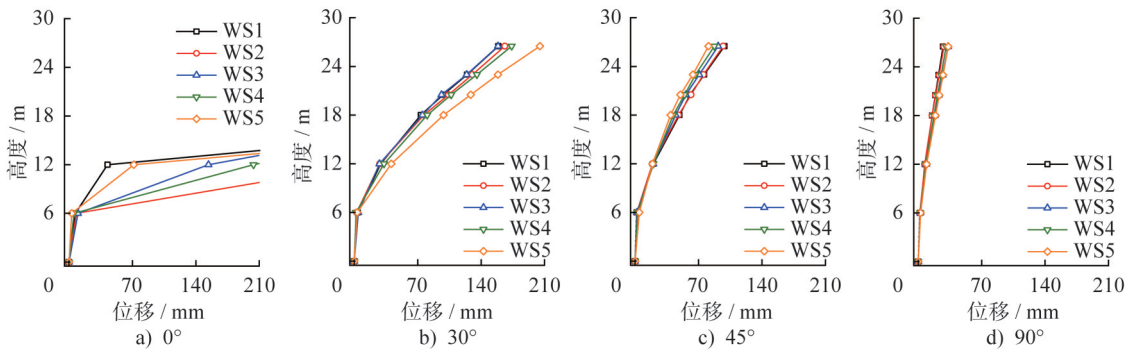


图 11  $31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  风速下输电塔位移响应

Fig. 11 Displacement responses of transmission tower under a wind speed of  $31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

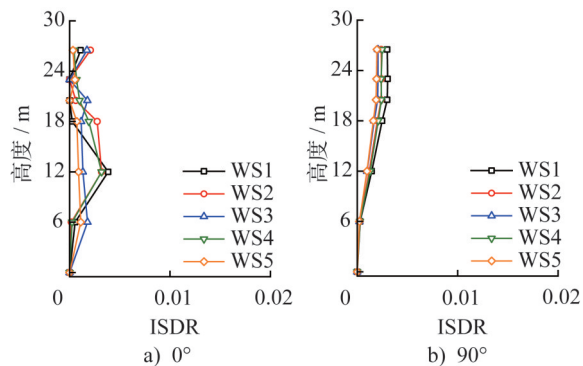


图 12 26 m·s<sup>-1</sup>下输电塔 ISDR 响应

Fig. 12 ISDR responses of transmission tower under a wind speed of 26 m·s<sup>-1</sup>

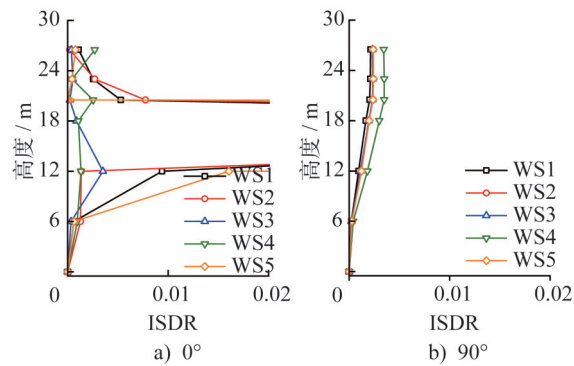


图 15 29 m·s<sup>-1</sup>下输电塔 ISDR 响应

Fig. 15 ISDR responses of transmission tower under a wind speed of 29 m·s<sup>-1</sup>

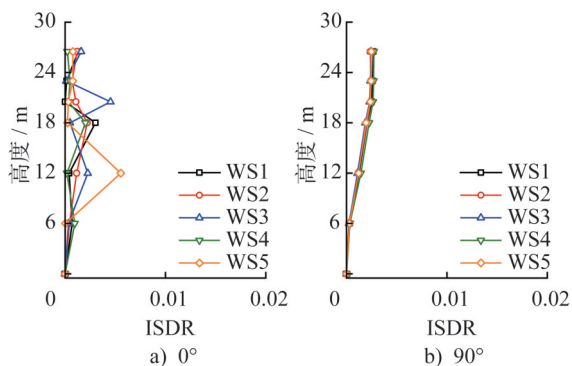


图 13 27 m·s<sup>-1</sup>下输电塔 ISDR 响应

Fig. 13 ISDR responses of transmission tower under a wind speed of 27 m·s<sup>-1</sup>

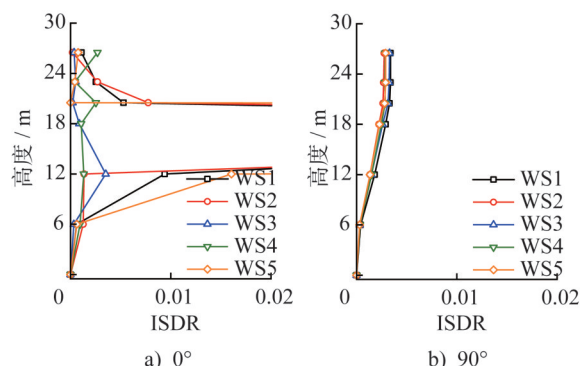


图 16 30 m·s<sup>-1</sup>下输电塔 ISDR 响应

Fig. 16 ISDR responses of transmission tower under a wind speed of 30 m·s<sup>-1</sup>

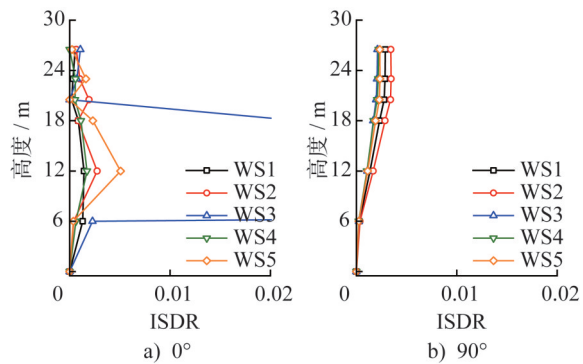


图 14 28 m·s<sup>-1</sup>下输电塔 ISDR 响应

Fig. 14 ISDR responses of transmission tower under a wind speed of 28 m·s<sup>-1</sup>

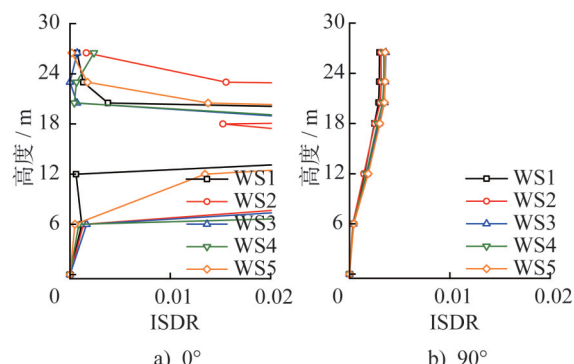


图 17 31 m·s<sup>-1</sup>下输电塔 ISDR 响应

Fig. 17 ISDR responses of transmission tower under a wind speed of 31 m·s<sup>-1</sup>

出了该风攻角下的应力响应。由图可以看出:由于平均风与脉动风的影响,输电塔偏向一侧并持续振动,导致塔腿1和塔腿4的主材承受压力,而塔腿2和塔腿3的主材承受拉力;此外,第3节间处的主材应力最大,并随着高度增加而逐渐减小。当风速为 26 m·s<sup>-1</sup>时,不同工况下塔腿1~4的主材应力最大值分别为-193.5 MPa、202.2 MPa、162.5 MPa、-232.9 MPa;当风速为 27 m·s<sup>-1</sup>时,塔腿1~4

的主材应力最大值分别为-224.1 MPa、230.0 MPa、211.8 MPa、-244.8 MPa,均未超过相应杆件的屈服承载力 303.7 MPa(该杆件截面尺寸为 L75 mm×6 mm,长度为 753 mm,经过材性试验得到该杆件的屈服强度为 395 MPa),表明输电塔处于弹性工作状态。当风速达到 28 m·s<sup>-1</sup>时,WS1、WS2、WS4 和 WS5 工况中输电塔的 ISDR 仍呈现相似趋势,且主材应力均小于 270 MPa;

WS3工况下,输电塔主材应力曲线发生改变,这是因为输电塔部分杆件失效,引发结构内部应力重分布,导致更

多主材应力超出其屈服强度限制,进而引发输电塔发生连续性倒塌破坏。

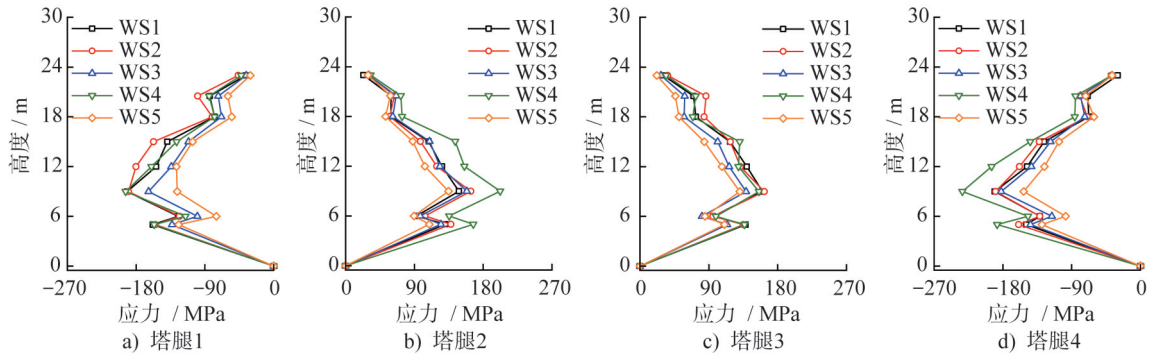


图 18 26 m·s<sup>-1</sup>下输电塔主材应力响应

Fig. 18 Stress responses of transmission tower main materials under a wind speed of 26 m·s<sup>-1</sup>

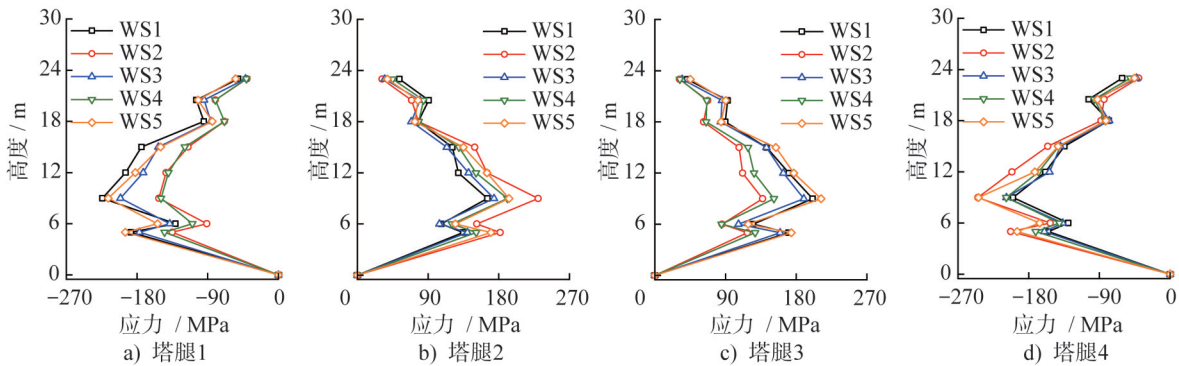


图 19 27 m·s<sup>-1</sup>下输电塔主材应力响应

Fig. 19 Stress responses of transmission tower main materials under a wind speed of 27 m·s<sup>-1</sup>

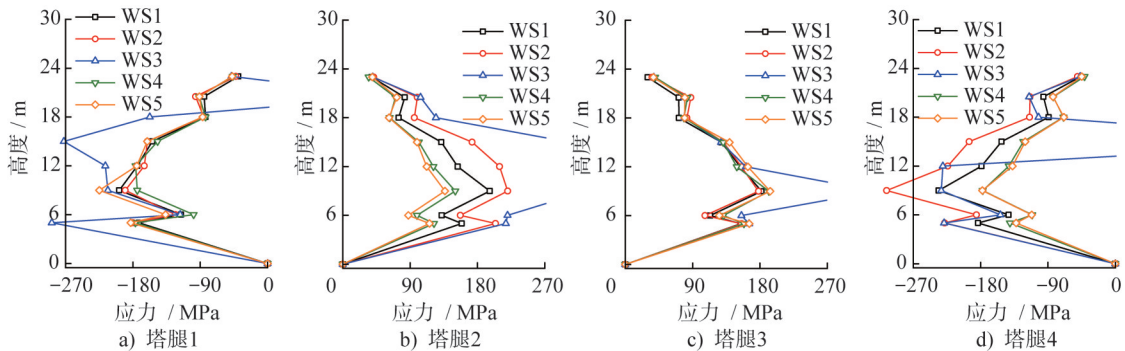


图 20 28 m·s<sup>-1</sup>下输电塔主材应力响应

Fig. 20 Stress responses of transmission tower main materials under a wind speed of 28 m·s<sup>-1</sup>

### 3 倒塌模拟分析

图 21 和 22 给出了 26 m·s<sup>-1</sup> 和 27 m·s<sup>-1</sup> 风速、0° 风攻角下 WS3 工况中输电塔顶部位移时程曲线。由图可以看出: y 方向位移均大于 x 方向位移, 而由于输电线的非线性振动, x 方向的位移时程呈现出明显的振荡。同时, 两个风速下输电塔的顶部位移均在 210 mm 以内, 表明输电塔状态良好。

图 23 给出了 28 m·s<sup>-1</sup> 风速、0° 风攻角下 WS3 工况中输电塔不同测点的位移时程响应。由图可以看出: 在 0~44 s 之间, 沿 y 方向的各个测点位移均在 200 mm 以内, 且塔顶处 (D6) 始终最大; 对于 x 方向, 由于输电线的耦合效应, 输电塔各个测点的位移在 -100~100 mm 之间波动。当时间达到 46 s 时, 除了 D1 测点外, 其他测点的位移曲线均呈现发散趋势, 表明此时输电塔第一节间仍完好, 而

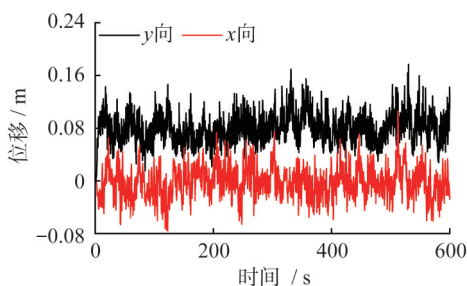


图 21 26 m·s<sup>-1</sup> 风速下塔顶位移时程

Fig. 21 Time history of tower top displacement under a wind speed of 26 m·s<sup>-1</sup>

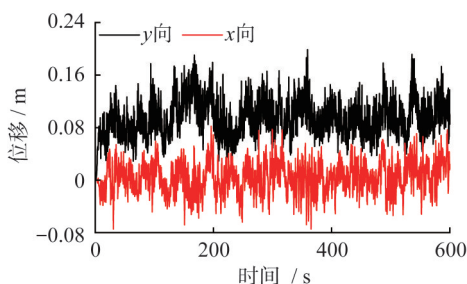


图 22 27 m·s<sup>-1</sup> 风速下塔顶位移时程

Fig. 22 Time history of tower top displacement under a wind speed of 27 m·s<sup>-1</sup>

其它节间已经呈现较大变形;仅 3 s 后(即 49 s)输电塔位移迅速增加,表明输电塔发生倒塌破坏。

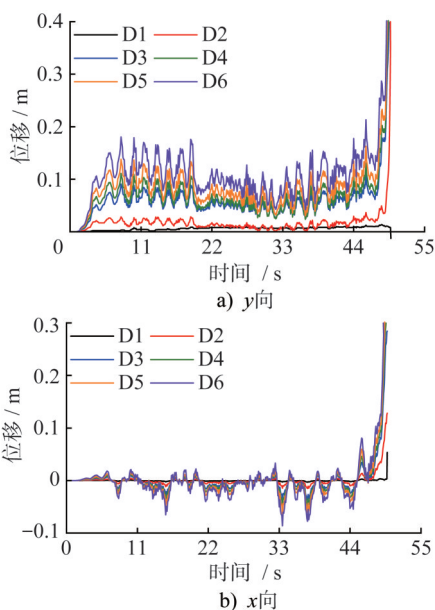
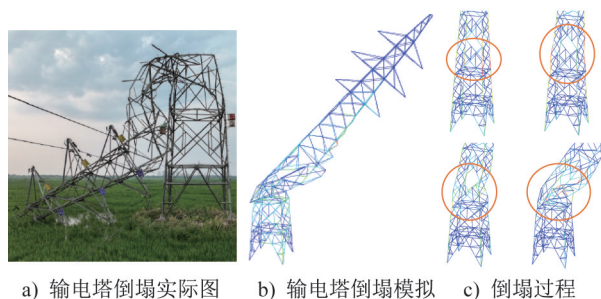


图 23 28 m·s<sup>-1</sup> 风速下 WS3 工况中输电塔顶部位移响应  
Fig. 23 Tower top displacements in WS3 load case under a wind speed of 28 m·s<sup>-1</sup>

图 24a)给出了实际工程中输电塔的倒塌模式。如前所述,该输电线路在 2023 年 7 月的局地强风作用下发生

了倒塌破坏,工程人员迅速赶到现场并记录照片,为了重现该输电塔倒塌过程和应力分布规律,本文在数值模拟中系统引入材料非线性与几何非线性效应,开展了强风下输电塔倒塌数值反演,如图 24b)、c)所示。由图可以看出:输电塔的第 1 节间仍完好,而第 2 和第 3 节间发生了较大变形并发生垮塌。由图 24c)可以看出:在风荷载激励前期,输电塔第 2 和第 3 节间的主材杆件受力较大,而输电塔变形较小;随着风荷载持续施加,输电塔的这两个节间出现了明显变形,第 2 节间的主材发生屈曲变形从而失效,相邻杆件发生内力重分布且内力增加显著,导致更多相邻杆件发生变形且失效,最终输电塔发生倒塌破坏。另一方面,本文模拟得到的输电塔倒塌模式与实际情况一致,验证了本文所采用模拟方法的合理性。



a) 输电塔倒塌实际图 b) 输电塔倒塌模拟 c) 倒塌过程

图 24 输电塔倒塌对比

Fig. 24 Comparison of transmission tower collapse

为了说明脉动风速的随机性,图 25 给出了不同风速下输电塔潜在的倒塌模式。由图可以看出:不同工况下输电塔的倒塌模式有较大差异,但是失效杆件主要分布在第 2 和第 3 节间,这主要是由于该区域的主材首先发生失稳破坏,引发内力重分布后导致相邻杆件应力迅速增加而发生失效,最终输电塔丧失基本抗风能力而发生倒塌破坏,因此,第 2 和第 3 节间塔身段在抗风设计与加固工程中应得到充分重视。

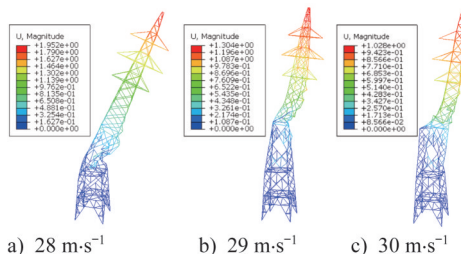


图 25 输电塔潜在倒塌模式(单位:m)

Fig. 25 Potential collapse modes of the transmission tower (unit: m)

#### 4 结论

本文依托某实际输电线路风致倒塌破坏案例,基于

非线性动力分析方法,研究了该输电线路的抗风性能和倒塌模式,明确了输电塔的薄弱位置和极限抗风能力。通过上述研究,主要得到以下结论:

(1) 在  $26 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $27 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  风速下,输电塔位移沿高度逐渐增大且在顶部达到最大,同时  $0^\circ$  风攻角时输电塔风振响应最显著。由于塔-线耦合效应的影响,脉动风速随机性对输电塔的影响随着风攻角增加而逐渐降低。

(2)  $0^\circ$  风攻角下,输电塔的第2和3节间的节间位移角 ISDR 相对较大,表明这两个节间是输电塔的薄弱位置;同时,  $28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  风速作用下输电塔的 ISDR 超过了倒塌限值 0.02,表明输电塔发生倒塌破坏。

(3) 当风速小于  $28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,塔腿 1~4 的主材应力在  $244.8 \text{ MPa}$  以内且均未超过相应杆件的屈曲承载力,表明输电塔处于弹性状态。由于输电塔部分杆件失效,引发输电塔应力重分布且更多主材应力超限,进而导致输电塔发生连续性倒塌。

(4) 与实际输电塔倒塌破坏模式对比,本文模拟得到的输电塔倒塌模式与实际情况一致,验证了本文开展输电塔风致连续性失效仿真的合理性;同时得出了在不同工况下,第2和第3节间总是该输电塔的薄弱位置,应该在抗风评估中给予重视。

## 参考文献:

- [ 1 ] MENG X R, TIAN L, LI C, et al. Copula-based wind-induced failure prediction of overhead transmission line considering multiple temperature factors [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 247: 110138. DOI: 10.1016/j.ress.2024.110138.
- [ 2 ] 谭彪. 强季风和龙卷风作用下输电塔线体系非线性效应和全过程失效研究[D]. 上海: 同济大学, 2022.  
TAN Biao. Study of nonlinear effects and entire-process failure of transmission lines under strong monsoon and tornado [D]. Shanghai: Tongji University, 2022. (in Chinese)
- [ 3 ] 谢强, 李杰. 电力系统自然灾害的现状与对策[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(4): 126-131. DOI: 10.3969/j.issn.1004-4574.2006.04.023.  
XIE Qiang, LI Jie. Current situation of natural disaster in electric power system and countermeasures [J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(4): 126-131. DOI: 10.3969/j.issn.1004-4574.2006.04.023. (in Chinese)
- [ 4 ] 张华恺, 菅明健, 张都清, 等. 强对流天气下输电塔-线体系倒塌破坏与风雨组合系数研究[J]. 自然灾害学报, 2024, 33(3): 111-121. DOI: 10.13577/j.jnd.2024.0310.  
ZHANG Huakai, JIAN Mingjian, ZHANG Douqing, et al. Study on the collapse of a transmission tower-line system under severe convective weather and the combined coefficients of wind and rain [J]. Journal of Natural Disasters, 2024, 33(3): 111-121. DOI: 10.13577/j.jnd.2024.0310. (in Chinese)
- [ 5 ] BI W Z, TIAN L, LI C, et al. Wind-induced failure analysis of a transmission tower-line system with long-term measured data and orientation effect [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 229: 108875. DOI: 10.1016/j.ress.2022.108875.
- [ 6 ] BI W Z, TIAN L, LI C, et al. A Kriging-based probabilistic framework for multi-hazard performance assessment of transmission tower-line systems under coupled wind and rain loads [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 240: 109615. DOI: 10.1016/j.ress.2023.109615.
- [ 7 ] 王成, 刘翔云, 王涛, 等. 随机风荷载下陡峭山区长短腿输电塔多构件可靠度评估[J]. 建筑钢结构进展, 2024, 26(5): 57-65, 100. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.05.007.  
WANG Cheng, LIU Xiangyun, WANG Tao, et al. Multi-component reliability analysis of unequal leg transmission tower in steep mountainous areas under random wind loads [J]. Progress in Steel Building Structures, 2024, 26(5): 57-65, 100. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.05.007. (in Chinese)
- [ 8 ] FU X, LI H N, LI G, et al. Fragility analysis of a transmission tower under combined wind and rain loads [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 199: 104098. DOI: 10.1016/j.jweia.2020.104098.
- [ 9 ] 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.  
LI Junkuo, GAO Fan, LIU Chuncheng, 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. (in Chinese)
- [ 10 ] 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.  
BI Wenzhe, TIAN Li. 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. (in Chinese)
- [ 11 ] 李正良, 罗熙越, 蔡青青. 考虑塔-线耦合作用的输电塔体系风振系数研究[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(3): 119-128. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.03.013.  
LI Zhengliang, LUO Xiyue, CAI Qingqing. A study on the wind vibration coefficient of transmission tower system considering tower-line coupling effect [J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(3): 119-128. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.03.013. (in Chinese)
- [ 12 ] 韩承永, 吴磊, 胡晨, 等. 下击暴流作用下羊角型输电塔的风振动力响应与倒塌破坏分析[J]. 建筑钢结构进展, 2024, 26(8): 78-86. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.08.009.  
HAN Chengyong, WU Lei, HU Chen, et al. Wind-induced dynamic response and collapse failure of sheep-horn transmission tower under downburst effect [J]. Progress in

- Steel Building Structures, 2024, 26 (8) : 78-86. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.08.009. (in Chinese)
- [13] 刘俊才, 田利, 毕文哲, 等. 考虑失稳效应的角钢非线性滞回模型研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(23): 19-26, 35. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2022.23.003.
- LIU Juncai, TIAN Li, BI Wenzhe, et al. Nonlinear hysteretic model of angle steel considering instability effect [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41 (23) : 19-26, 35. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2022.23.003. (in Chinese)
- [14] LI C, PAN H Y, TIAN L. Seismic performance analyses of pile-supported transmission tower-line systems subjected to depth-varying spatial ground motions [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2023, 27 (9) : 2381-2405. DOI: 10.1080/13632469.2022.2113000.
- [15] 杨风利, 张宏杰, 范荣全, 等. 高海拔输电线路风荷载特性及铁塔杆件内力分析[J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(9): 86-94. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.09.009.
- YANG Fengli, ZHANG Hongjie, FAN Rongquan, et al. Wind load characteristics and internal force analysis on tower members of transmission lines in high-altitude regions [J]. Progress in Steel Building Structures, 2022, 24 (9) : 86-94. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.09.009. (in Chinese)
- [16] 罗靖宇. 风荷载作用下大跨越输电塔-线体系疲劳性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
- LUO Jingyu. Research on fatigue performance of long-span transmission tower-line system under wind load [D]. Jinan: Shandong University, 2023. (in Chinese)
- [17] 郝锦琦. 输电线路风偏特性及防风偏绝缘子防风偏性能研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2023.
- HAO Jinqi. Research on wind deflection characteristics of transmission lines and wind deflection prevention performance of insulators [D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2023. (in Chinese)
- [18] IEC 60826: 2017 Design criteria of overhead transmission lines[S].
- [19] GB 50135—2019 高耸结构设计标准[S].
- GB 50135—2019 Standard for design of high-rising structures [S]. (in Chinese)
- [20] TIAN L, YANG M, LIU S Y, et al. Collapse failure analysis and fragility analysis of a transmission tower-line system subjected to the multidimensional ground motion of different input directions [J]. Structures, 2023, 48: 1018-1028. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.01.042.