张淳淇,谢献忠,易润华,等. 覆冰输电线路终端塔风致倒塌机理[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2024, 39(3):52-60. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.03.007

ZHANG C Q, XIE X Z, YI R H, et al. Wind-induced Collapse Mechanism of Terminal Tower of Iced Transmission Line [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 39(3):52-60. doi:10.13582/j.cnki. 1672-9102.2024.03.007

# 覆冰输电线路终端塔风致倒塌机理

### 张淳淇,谢献忠\*,易润华,林文欣

(湖南科技大学 土木工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘 要:以某倒塌事故终端塔塔-线体系为对象,建立其有限元动力学分析模型,基于谐波叠加法和 Davenport 目标谱模拟 风速时程,确定覆冰塔线上的风荷载,研究覆冰终端塔塔-线体系的风致倒塌过程、机理及其影响因素.通过瞬态分析模拟 覆冰终端塔塔-线体系的整个倒塌过程,揭示其风致倒塌机理.覆冰终端塔在8级大风荷载作用下,背风侧塔腿下部主材最 先失稳,并导致塔腿部位其他相邻构件应力增大,依次发生局部构件失稳或屈服失效,最终诱发输电塔整体结构失稳倒塌. 终端塔的整个导线张力都是非平衡张力,在塔腿部位会产生很大的倾覆应力.在失效构件等效应力的荷载占比中,导线张 力占比大于 50%,其次是作用在塔上的风荷载,占比大于 30%.通过参数影响分析得出,90°风向角是一种最危险的风荷载 工况,而最合理的线路走向则是沿终端塔底座截面两根正交的最大惯性主轴.

关键词:终端输电塔;塔-线体系;风致倒塌机理;数值仿真;参数分析

中图分类号:TM753 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2024)03-0052-09

## Wind-induced Collapse Mechanism of Terminal Tower of Iced Transmission Line

ZHANG Chunqi, XIE Xianzhong, YI Runhua, LIN Wenxin (School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract**: The finite element dynamic analysis model is developed by using the collapsed terminal tower-line system as the object. Based on the harmonic superposition method and Davenport target spectrum, the time history curve of wind speed is simulated to determine the wind load on the iced tower-line. The investigation focuses on the wind-induced collapse mechanism and influencing factors of iced terminal tower-line system. Transient analysis is used to simulate the whole collapse process of the iced terminal tower-line system in order to reveal its wind-induced collapse mechanism. Under the action of eight grade wind load, the lower primary material of tower leg on the leeward side is the first to become unstable failure, which increases the stress of adjacent components. The iced terminal tower then suffers from instability or yielding failure of the local components in sequence, eventually causing the entire structure to collapse. The entire conductor tension in the terminal tower is non-equilibrium, which produces significant overturning stress in the tower leg. On the load proportion of equivalent stress of the failed elements, conductor tension accounts for more than 50%, and wind loads acting on the tower for more than 30%. The analysis of parametric influences leads to the conclusion that

收稿日期:2023-07-18

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2023JJ30259)

<sup>\*</sup> 通信作者,E-mail: xianzhongx@163.com

the wind direction angle of 90 degrees is one of the most dangerous wind load circumstances, while the most reasonable line direction is along the two orthogonal maximum inertia spindles of the cross section of terminal tower base.

Keywords: terminal transmission tower; tower-line system; wind-induced collapse mechanism; numerical simulation; parametric analysis

电能是保障人民日常工作、生活的核心能源,作为输送电能主要载体的输电塔-线体系,其运行的稳定性和安全性至关重要.输电塔-线体系属于高耸大跨的小阻尼柔性结构,且长期分布于野外,在强风、冰冻等极端自然环境下容易发生线路舞动,甚至可能出现断线、倒塔等严重电力事故.

针对输电塔-线体系风致倒塌问题,国内外学者开展了大量的研究工作.SHEHATA 等<sup>[1]</sup>基于 CFD 数 值模拟生成下击暴流风场,以弹性和静态的方式开展输电塔在下击暴流作用下的失效倒塌分析;李士锋 等<sup>[2]</sup>以菲律宾 Panay 岛上 138 kV 双回路 Panit-an-Nabas 线路为研究对象,模拟台风"海燕"过境时线路发 生连续性倒塔的过程,并探讨了线路发生大面积倒塔的主要原因;肖凯等<sup>[3]</sup>为研究广东省 2 条正在运营的 输电线路的抗风性能及现场监测方案,利用 ANSYS 软件对整个耐张段进行了非线性静力倒塌分析,研究 规范中提到的潜在最不利风攻角的影响;魏文晖<sup>[4]</sup>基于能量法对下击暴流作用下输电塔线体系进行了失 效倒塌分析,该方法可以快速准确地判断输电塔塔-线体系整体失稳倒塌的时刻;TIAN 等<sup>[5]</sup>模拟输电塔-线体系在随机风荷载作用下的倒塌过程,以确定临界风速和最不利风向角;徐震等<sup>[6]</sup>考虑结构参数的不 确定性进行输电塔-线体系倒塌研究,分析了风致倒塌过程对材料和几何不确定性参数的敏感性;LI等<sup>[7]</sup> 研究发现强风荷载作用下杆塔的倒塌通常是由支柱构件的屈曲引起;付兴等<sup>[8]</sup>为准确模拟输电塔构件的 屈曲特征,提出一种组合式屈曲单元,该方法可以有效预测输电塔的极限承载力、失效位置及倒塌过程;李 悦等<sup>[9]</sup>对强风作用下输电塔塔-线体系连续性倒塌进行了分析,研究表明目标塔的破坏包括近薄弱塔侧 的塔身破坏和塔头破坏 2 种形式,塔身下部斜材失稳与主材应力的持续增大是目标塔整体倒塌的最直接 原因,薄弱塔的倒塌过程持续时间是目标塔是否破坏的主要控制变量.

本文针对覆冰终端输电塔塔-线体系的风致倒塌机理开展研究,基于实际工程案例,考虑导线覆冰舞 动动张力的影响以及风荷载在塔上的竖向相关性,运用有限元瞬态分析方法准确模拟了终端塔的整个倒 塌过程,揭示了终端塔的风致倒塌机理及其影响因素,研究结果可为终端输电塔塔-线体系的抗风设计提 供指导.

1 终端输电塔塔-线体系有限元模型

#### 1.1 工程概况

如图 1 所示,某 35 kV 风力发电输电线路终端塔在覆冰厚 30 mm,平均风速 20 m/s(8 级大风)的极端 环境下发生倒塌事故.该终端塔为干字型耐张塔,总高 17.70 m,跟开 3.23 m,塔身主材均采用 Q345 等边角 钢,输电导线为 5 根 LGJ-150/8 型钢芯铝绞线,终跨跨距 411 m,其线路走向与横担呈 60°夹角.

#### 1.2 终端塔塔-线体系有限元模型

采用 ANSYS 有限元分析软件对终端塔塔-线体系进行建模,其有限元模型如图 2 所示.整个模型呈现为"塔-线-支座"结构形式,终端塔采用 BEAM188 空间梁单元和 LINK8 空间杆单元混合建模,主材采用 梁单元,辅材采用杆单元.输电导线采用 LINK10 空间索单元,支座采用 COMBIN14 弹簧阻尼单元,弹簧刚 度值取该挂点处输电塔的等效变形刚度.

通过迭代找形分析和预应力模态分析,得到塔-线体系中输电塔的固有频率和振型(见表1和图3). 相比于终端独塔,塔-线体系中终端塔频率略有降低,这表明输电导线虽然增加了结构的约束和刚度,但 也附加了质量,且质量因素对结构动力特性影响更大.



图1 终端塔倒塌现场



图 2 终端塔塔-线体系有限元模型

振型描述	独塔频率/Hz	塔-线体系中终端塔频率/Hz
沿横担侧弯	8.818	8.318
垂直横担侧弯	8.952	8.689
扭转变形	21.894	15.498

表1 终端输电塔固有频率和振型



图 3 塔-线体系中终端输电塔的振型

#### 风荷载模型 2

#### 2.1 风速时程模拟

高度 z 处的瞬时风速由平均风速  $\overline{U}$  和脉动风速 u 叠加而成,即

$$U(z,t) = U(z) + u(z,t) .$$
 (1)

平均风速  $\overline{U}$  随高度 z 变化的平均风速剖面曲线采用指数律公式, 即<sup>[10]</sup>

$$\overline{U}(z) = \overline{U}_{10} \left(\frac{z}{10}\right)^{\alpha}.$$
(2)

式中: α 为地面粗糙度指数, 田野、乡村等 B 类地貌取 0.15.

脉动风的2个概率特性是脉动风速功率谱和空间相关性,本文目标功率谱采用我国工程中广泛使用 的 Davenport 顺风向脉动风速谱,即<sup>[11]</sup>

$$S_{u}(f) = \overline{U}_{10}^{2} \frac{4kx^{2}}{f(1+x^{2})^{\frac{4}{3}}}.$$
(3)

式中:  $x = \frac{1\ 200f}{\overline{U}_{10}}$ , 为离地 10 m 处的平均风速; f 为脉动风频率; k 为地面粗糙度系数.

输电塔结构的垂直高度远大于水平宽度,故只考虑脉动风的竖向相关性,其相干函数为<sup>[11]</sup>

$$\cosh(z_i, z_j, f) = \exp\left(-\frac{2fC_z |z_i - z_j|}{\overline{U}_i + \overline{U}_j}\right).$$

式中:  $coh(z_i, z_j, f)$  为高度  $z_i, z_j$  这 2 点的脉动风相干函数;  $C_z$  为高度衰减系数.

综合考虑输电塔构造因素的影响以及荷载施加的可操作性,将输电塔分段为图 4 所示的塔头、塔身、塔腿 I ~ Ⅲ三段风压区.不失一般性,假定塔头处的平均风速为 10 m/s,采用谐波叠加法和 Davenport 目标 谱模拟得出第 I 段风速时程曲线及其功率谱密度,如图 5 和图 6 所示.从图 6 可以看出:谐波叠加法模拟 的风速时程曲线准确度高,该时程曲线谱密度与经典 Davenport 谱密度高度吻合.



图4 输电塔风压段

图5 输电塔(1段)模拟风速时程曲线



#### 2.2 风荷载计算

风荷载须同时考虑平均风的静力作用和脉动风的动力作用,以等效节点荷载形式作用于对应区段的 单元节点.按现行规范,根据风速可计算输电塔风荷载<sup>[10]</sup>:

 $W_{\rm S} = W_0 \mu_z \mu_{\rm s} \beta_z A_{\rm f}.$ 

(5)

式中: $W_0$ 为基准风压标准值. $W_0 = V^2/1$  600(V为基准高度的风速); $A_f$ 为构件迎风面投影面积; $\mu_z$ 为高度 变化系数; $\mu_s$ 为输电塔风荷载体型系数; $\beta_z$ 为高度 z处的风振系数,这些系数均按规范要求取值.

导线覆冰后截面形状的变化改变了空气动力荷载的作用效果,这与覆冰导线的几何非线性和风攻角 α的影响密切相关.导线风攻角矢量关系如图 7 所示.



图7 导线风攻角矢量关系

考虑竖向运动对风攻角的影响,覆冰导线运动过程中的瞬时风攻角α根据式(6)确定<sup>[12]</sup>.

(4)

$$\begin{cases} \alpha = \theta - \Delta \theta; \\ \Delta \theta = \dot{u}_y / U_r. \end{cases}$$
(6)

式中: $\theta$  为导线截面的初始攻角; $\Delta \theta$  为导线横截面的竖向运动对风攻角的影响; $u_y$  为导线竖向运动速度; $U_r$  为导线横截面的相对风速.

风荷载作用下覆冰导线的气动升力与气动阻力为[13]

$$\begin{cases} F_{\rm L} = \frac{1}{2} \rho U^2 D L C_{\rm L}; \\ F_{\rm D} = \frac{1}{2} \rho U^2 D L C_{\rm D}. \end{cases}$$

$$(7)$$

式中: ρ为空气密度; U为来流风速; D为无覆冰导线的直径; L为单元长度; C<sub>L</sub>, C<sub>D</sub>为覆冰导线的气动升力、气动阻力系数,本文采用新月型覆冰导线气动力系数,该系数与风攻角密切相关.

3 参数影响分析

#### 3.1 风向角对终端塔最大等效应力的影响

风向角示意图如图 8 所示,规定输 电塔横担所指方向为 0°风向角,顺时针 方向为正.本文根据现场终端塔倒塌方 向,依次取-30°,0°,30°,60°,90°这 5 种 不同风向角进行计算分析.荷载工况采用 2 种设计荷载工况,即风速 30 m/s、无覆 冰(工况 I)以及风速 10 m/s、10 mm 覆 冰(工况 II),对输电塔等效应力进行分 析,确定最不利风向角.



对终端塔塔-线体系进行瞬态响应分析,计算结果如表2和图9所示.结果表明:输电塔在各种工况下的 最大等效应力均位于输电塔背风侧沿输电导线方向塔腿中部的主材外侧.2种设计工况下的最大等效应力随 风向角的变化规律趋于一致,0°与90°风向角时,终端塔迎风面积较大,且风向与主要迎风面垂直.此时,风荷 载所产生的等效应力较大,且与导线舞动动张力所产生的等效应力叠加,其中最不利风向角均发生在90°.

风向角/(°) —	风速 30 m/s、无覆冰(工况 I)		风速 10 m/s、10 mm 覆冰(工况 II)		
	最大等效应力/MPa	发生时刻/s	最大等效应力/MPa	发生时刻/s	
-30	235	42.61	219	42.60	
0	259	42.50	236	42.49	
30	241	42.49	216	42.48	
60	240	42.48	207	42.48	
90	280	42.49	248	42.48	





图9 最大等效应力随风向角变化曲线

#### 3.2 线路走向角对终端塔最大等效应力的影响

线路走向角示意图如图 10 所示,输电塔底座截面最大惯性主轴位于图 10 所示的 2 条正交轴.分别取 45°,60°,75°,90°这 4 种不同线路走向角,研究导线张力对输电塔等效应力的影响,确定最合理的线路 走向.

计算结果表明:45°,60°,75°,90°这4种线路走向角的最大等效应力均发生在输电塔塔腿处.最大等效应力随线路走向角变化曲线如图 11 所示,在45°~90°内,线路走向角越大,等效应力最小.最合理的线路走向是沿终端塔底座截面两根正交的最大惯性主轴,即90°线路走向角,此时,输电塔底座的抗弯轴惯性矩最大,导线张力在塔腿部位所产生的等效应力最小,结构更安全.显然本文所研究的实际工程的线路走向角(60°)并不合理.



4 终端塔倒塌过程模拟与机理分析

#### 4.1 构件失效判定

输电塔的局部构件失稳或屈服失效,最终诱发了输电塔的整体结构失稳,发生倒塌事故.依据现行钢 结构设计标准,受拉构件的受力极限采用强度控制,受压构件的受力极限采用稳定控制,即

$$\begin{cases} \frac{N}{A} \ge f(受拉构件失效); \\ \frac{N}{\omega A} \ge f(受压构件失效). \end{cases}$$
(8)

式中:N为杆件的轴力;A为杆件截面面积;f为钢材的强度设计值; φ为轴心受压构件稳定系数.

#### 4.2 倒塌过程模拟与分析

终端塔倒塌事故发生现场的温度为-8 ℃,覆冰厚达 30 mm,平均风速为 20 m/s(8 级大风荷载),风向 角为 0°.参照现场实际环境条件,并考虑覆冰导线舞动动张力的影响,对输电塔-线体系进行瞬态响应分 析模拟倒塌过程,揭示终端塔塔-线体系倒塌破坏机理及其影响因素.

输电塔构件失效时序及失效类型如表 3 所示,背风侧构件失效均为受压失稳,迎风侧构件失效均为受 拉屈服.位于背风侧塔腿下部主材的 47 号构件最先失效,其最大等效应力时程曲线及危险瞬时的应力云 图如图 12 和图 13 所示.47 号构件的最大等效应力在 42.49 s 达到峰值 332 MPa,超过设定的稳定极限,发 生局部构件失稳.塔腿局部构件的失效导致其他构件等效应力增大,在风荷载的持续作用下,局部构件依 次发生失稳或屈服,最终导致输电塔整体结构发生倒塌事故.

如图 14 所示,在 0°风向角作用下终端输电塔沿横担方向倒塌,塔腿与塔身连接部位破坏最为严重, 模拟分析结果与终端输电塔的实际倒塌破坏情况吻合. 表3 输电塔失效构件时序分布及失效类型

失效构件单元号	失效时刻/s	构件部位	失效类型	
47	42.49	背风侧塔腿下部主材	受压失稳	
126	42.64	背风侧塔腿下部斜材	受压失稳	
6	42.76	迎风侧塔腿上部主材	受拉屈服	
51,52	42.92	背风侧塔腿上部主材	受压失稳	
140	43.04	迎风侧塔腿上部斜材	受拉屈服	
144	43.14	背风侧塔腿上部斜材	受压失稳	
7,19	43.20	迎风侧塔腿上部主材	受拉屈服	
134	43.76	迎风侧塔腿上部斜材	受拉屈服	
147,149	43.84	背风侧塔腿上部斜材	受压失稳	
158	43.86	迎风侧塔腿上部斜材	受拉屈服	
34,37	43.90	背风侧塔腿上部主材	受压失稳	
8,22	43.93	迎风侧塔身主材	受拉屈服	
172	43.95	迎风侧塔身斜材	受拉屈服	
53	43.95	背风侧塔身主材	受压失稳	



图 12 最先失效构件的等效应力时程曲线



图 13 输电塔构件等效应力云图

#### 4.3 等效应力的荷载占比分析

终端塔发生应力失效倒塌的荷载因素主要包括输电塔重力荷载(含雪荷载)、输电塔风荷载以及导线 张力(含舞动动张力)3部分,但它们的影响程度各不相同.

表4给出了终端塔前5根失效构件(见图15)在失效时刻的最大等效应力的荷载占比分析,结果表明:导线张力的影响最大,占比在51.7%~64.9%;输电塔风荷载的影响次之,占比在34%~47%;重力荷载的影响最小,占比低于1.3%.对于单边挂线的终端塔而言,整个导线张力都是非平衡张力,在塔腿部位会产生很大的倾覆应力,所以导线张力是引起终端塔发生倒塌事故的第一荷载因素.

在舞动过程中,输电导线 A 的张力时程曲线如图 16 所示,最大动张力在 42.49 s 达到峰值 22.06 kN,

图 14 输电塔倒塌过程模拟

与未覆冰输电导线的初始张力(17 kN)相比增大了 29.7%,与覆冰输电导线的静张力(20.14 kN)相比增大 了 9.5%.因此,对于承受不平衡导线张力的终端输电塔而言,在其抗倒塌设计过程中必须考虑导线覆冰与 舞动的影响.



图 15 终端塔前 5 根失效构件

表4 失效构件等效应力的荷载占比分析

失效构件编号	重力荷载(含雪)		输电塔风荷载		导线张力(含舞动动张力)	
	等效应力/MPa	占比/%	等效应力/MPa	占比/%	等效应力/MPa	占比/%
1	4	1.2	127	39.1	194	59.7
2	4	1.1	119	34.0	227	64.9
3	5	1.3	181	47.0	199	51.7
4	3	0.9	114	34.7	212	64.4
5	3	0.9	138	41.7	190	57.4



图 16 输电导线 A 的张力时程曲线

### 5 结论

1) 覆冰终端输电塔在8级大风荷载作用下,背风侧塔腿下部主材最先失稳,并导致塔腿部位其他相 邻构件应力增大,依次发生局部构件失稳或屈服失效,最终诱发输电塔整体结构失稳,发生倒塌事故.

2) 覆冰终端塔发生倒塌事故的主要影响因素是导线张力和风荷载,在失效构件等效应力的荷载占比 中,导线张力占比大于 50%,风荷载占比大于 30%.由于终端塔是单边挂线,所以整个导线张力都是非平衡 张力,在塔腿部位会产生很大的倾覆应力.

3) 覆冰导线舞动过程中的最大动张力与未覆冰导线的初始张力相比增加了近 30%, 与覆冰导线的静 张力相比增加了近 10%.因此, 对于承受不平衡导线张力的终端输电塔而言, 在其抗倒塌设计过程中必须 考虑导线覆冰与舞动的影响.

4)90°风向角是一种最危险的工况,此时终端塔迎风面积最大,风荷载所产生的等效应力最大,且与 导线张力所产生的等效应力叠加.最合理的线路走向是沿终端塔底座截面两根正交的最大惯性主轴,此时 导线张力在塔腿部位所产生的等效应力最小,结构更安全.

#### 参考文献:

- SHEHATA A Y, DAMATTY A A E. Failure analysis of a transmission tower during a microburst[J]. Wind and Structures, 2008, 11(3): 193-208.
- [2] 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.
- [3] 肖凯, 付兴, 雷旭, 等. 输电线路风致倒塌失效分析及监测方案[J]. 建筑科学与工程学报, 2019, 36(4): 71-79.
- [4] 魏文晖,周翔,邓晨,等.基于能量法的下击暴流作用下输电塔线体系失效倒塌研究[J].建筑科学与工程学报,2020, 37(6):73-80.
- [5] TIAN L, ZHANG X, FU X. Fragility analysis of a long-span transmission tower-line system under wind loads [J]. Advances in Structural Engineering, 2020, 23(10): 2110-2120.
- [6] 徐震,张涛,葛向东,等.风荷载作用下输电塔-线体系不确定性分析[J].山东大学学报(工学版),2021,51(4): 99-105.
- [7] 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.
- [8] 付兴, 钟玺峰, 李宏男, 等. 一种组合式屈曲单元及其在输电塔结构倒塌仿真分析中的应用[J]. 工程力学, 2022, 39 (08): 80-87.
- [9] 李悦, 谢强, 张欣, 等. 强风作用下输电塔线体系连续性倒塌分析[J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(2): 423-430.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [11] (美)希缪(Simiu, Emil), (美)斯坎伦(Scanlan, Robert H.). 风对结构的作用:风工程导论[M]. 刘尚培,项海帆,谢 雾明,译. 2 版. 上海:同济大学出版社, 1992.
- [12] 刘小会, 严波, 张宏雁, 等. 分裂导线舞动非线性有限元分析方法[J]. 振动与冲击, 2010, 29(6): 129-133, 240-241.
- [13] 楼文娟, 王礼祺, 陈卓夫. 雾凇覆冰和雨凇覆冰导线气动力特性试验研究[J]. 振动测试与诊断, 2022, 42(4): 684-689.