

## 特高压输电塔 - 线体系的抗风性能分析 \*

谢丽宇<sup>1</sup> 唐珏<sup>1</sup> 薛松涛<sup>1,2</sup> 谢强<sup>3</sup>

(1. 同济大学 结构工程与防灾研究所 上海 200092; 2. 日本东北工业大学  
工学部建筑学科 仙台; 3. 同济大学 建筑工程系 上海 200092)

(1. Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Architecture, Tohoku Institute of Technology, Sendai, Japan;

3. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

[摘要] 本文建立了特高压输电塔线体系四线三塔的有限元模型, 考虑了材料和几何非线性, 采用增量动力分析方法对整个输电塔线体系进行抗风性能分析。对输电塔单塔和塔线体系进行了从弹性、非线性直至倒塌的全过程的性能分析, 获得了输电塔单塔和输电塔线体系的抗风性能曲线。通过输电塔单塔和塔线体系的对比分析可知, 导线对输电塔抗风性能的影响很大, 在设计中不能忽略。

[关键词] 特高压输电塔 - 线体系 抗风性能分析 增量动力分析方法 (IDA)

**ABSTRACT:** *In this paper, the finite element model of UHV transmission-tower-line system (TTLS) was simulated. The structural capacity of TTLS under wind loading was assessed by Incremental Dynamic Analysis method (IDA), considering the material and geometric nonlinearity in the dynamic analysis. Performance analysis of a stand-alone transmission tower and TTLS was conducted from linear elastic state to nonlinear state, and finally to collapse state. The structural capacity curves of a standalone tower and TTLS were obtained via IDA method, respectively. By comparison, it can be verified that the coupling effect between transmission lines and the towers plays a vital role in the dynamic response of TTLS. Consequently, the influence of transmission lines is non-negligible in the design of transmission towers.*

**KEYWORDS:** *UHV transmission-tower-line system Structural capacity analysis Incremental dynamic analysis (IDA)*

### 引言

输电塔 - 线系统是由高柔的输电塔和导线连接组成的一种复杂的空间耦合体系, 具有质量轻、阻尼小、跨距大等特点, 在强风作用下, 结构易产生较大的变形, 甚至是由于杆件的局部失稳导致结构的失效倒塌。因此, 在输电塔的设计过程中, 风荷载是一种重要的设计荷载, 起到控制、决定作用。另一方面, 输电导线与输电塔形成复杂的动力耦合体系, 导线在脉动风荷载作用下产生的动张力致使输电塔产生位移, 而输电塔本身在风荷载的作用下亦会产生位移, 这又使得导线内的张力发生进一步变化, 塔 - 线间的动力耦合作用使其结构在风荷载激励下具有显著的非线性特性。我国输电塔线体系结构设计通常采

用准静态设计方法<sup>[1]</sup>, 按照《架空送电线路杆塔结构设计技术规定》(DL/T5154-2002) 规定, 输电塔与导线分开进行设计, 将脉动风荷载以风振系数的形式等效为静力风荷载, 该设计方法通常仅考虑导线静力荷载的作用而忽略了导线与输电塔之间的动力耦合作用<sup>[2]</sup>, 准静态设计在进行此类结构性能分析时存在明显的局限性。因此, 考虑结构的非线性及塔线耦合效应, 进行特高压输电塔线体系整体的抗风性能评估, 对输电塔结构设计具有十分重要的工程指导意义。

国外学者 Banik 等<sup>[3]</sup> 通过非线性弹塑性推覆 (Nonlinear Pushover Analysis) 和增量动力方法 (Incremental Dynamic Analysis) 对 110kV、高度为 25.25m 的输电单塔在风荷载作用下的性能曲线进行了分析, 将这两种常用于结构抗震性能分析的方法应用于结构抗风性能分析的研究。但在其研究中, 忽略了导线、地线、绝缘子对输电塔

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51208377, 51278369); 教育部博士点基金新教师资助项目 (20110072120036)

影响,而且只考虑了材料非线性,没有考虑几何非线性,其结果具有一定的局限性。而目前我国对于特高压输电塔-线体系的抗风性能分析的研究成果还很少。因此,本文考虑输电塔结构材料、几何非线性,采用增量动力分析方法对输电塔线体系进行抗风性能评估,并通过单塔、塔-线体系抗风性能的对比分析来研究导线对输电塔性能的影响程度。

## 1 输电线路有限元建模及模态分析

### 1.1 输电线路有限元建模

分析案例原型为某设计院设计的特高压输电线路,输电塔为鼓形塔,杆系结构,塔的总高100.6m,呼高54m,根开18.75m,输电线的水平档距为510m。本文应用ANSYS软件建立了输电塔-线体系三维有限元模型,为四线三塔有限元模型,包括了三个输电塔和四跨导(地)线,考虑了导线和输电塔之间的振动耦联效应。输电塔主材、斜材采用Q345无缝钢管,支撑采用Q235角钢。输电塔为杆系结构,建模单元属性采用ANSYS中的BEAM188梁单元,其最大

特点是支持梁截面形状显示,可以考虑剪切变形和翘曲,同时也支持大转动和大应变等非线性行为。考虑结构材料的非线性,采用理想弹塑性假定,材料的屈服强度准则采用Von Mises准则,强化规则采用双线性随动强化(Bilinear Kinematic, BKIN)模型。输电线的水平档距为510m,并分为4层,最上层为地线,下面3层为导线,每相导线是八分裂式,为简化计算,在建模时将每相8根导线按承受风荷载等效的原则,简化成一根导线来建模<sup>[4]</sup>。输电线属于悬索结构,采用LINK10单元模拟,由于在荷载作用下会产生较大的位移,因此需要考虑其几何非线性。确定悬索平衡方程的方法主要分为悬链线理论方法和抛物线理论方法,考虑本线路最大垂跨比约为4/85,远小于1/8,因此本文在建模时以抛物线理论来确定输电线的初始形状,可以满足工程的需求<sup>[5]</sup>。绝缘子也采用LINK10单元来模拟。建成的有限元模型如图1所示,其中,输电线在边界处采用固定约束,每座输电塔底部的4个节点也采用固定约束。该线路模型共有7352个单元,4717个节点。

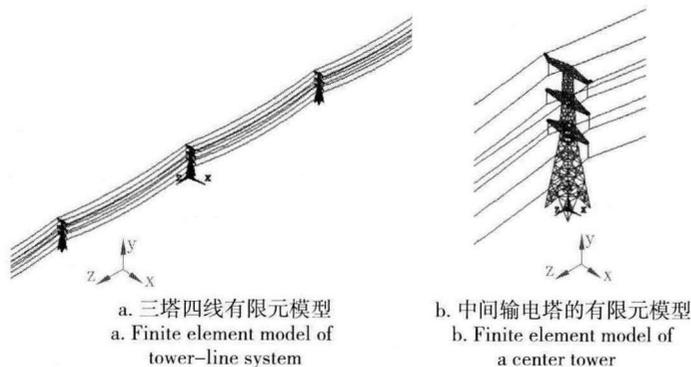


图1 输电塔-线体系有限元模型  
Fig.1 Finite element model of transmission-tower-and-line system

### 1.2 模态分析

在ANSYS中直接采用子空间迭代法对输电塔-线体系进行动力特性分析,提取了体系的前3000阶振型。其中体系的前532阶振型主要为导地线的振型,以输电塔为主的振型在533阶才出现明显的振动形态,为Z向第一阶振型,829阶为X向第一阶振型,860阶为扭转向第一阶振型,如图2所示。

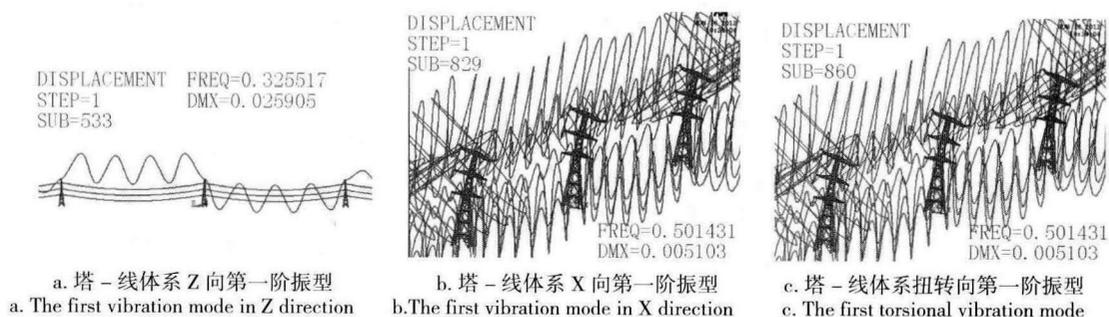


图2 输电塔线体系整体振型  
Fig.2 Vibration modes of transmission-tower-and-line system

为了研究输电导线对塔线体系动力特性的影响，将塔线体系中输电塔的各方向上的一阶自振频率与单塔相应的一阶自振频率进行比较，如表 1 所示，结果表明因塔线耦合效应的影响，塔线体系各方向上的一阶自振频率都有显著的下降。塔-线耦联体系作为一个整体振动时，输电塔结构的动力特性与单杆输电塔结构的自振频率有较大差别，说明塔线耦联体系的整体刚度矩阵和质量矩阵相比于单杆输电塔结构的刚度矩阵和质量矩阵有较大改变，输电线路结构设计时，需要考虑塔线耦联作用对输电塔结构动力特性的影响。

表 1 塔-线体系中输电塔自振频率与单塔自振频率的比较  
Tab.1 Comparison of the resonant frequencies of tower-line-system and standalone tower

模态	塔-线体系中输电塔自振频率 (Hz)	单塔自振频率 (Hz)	相对偏差 (%)	塔-线体系整体振动中输电塔的振型描述
1	0.3255	1.2071	73.03	Z 轴向弯曲振动
2	0.5014	1.1837	57.64	X 轴向弯曲振动
3	0.5091	1.7450	70.83	扭转向振动

2 风荷载的模拟及加载方法

Simiu 和 Scanlan<sup>[6]</sup> 对风的基本特性做了详细介绍，某一高度处的风速可以用脉动风速和平均风速之和表示。其中，平均风速用平均风剖面描述，本文采用对数率计算平均风速，如式 (1) 所示：

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

式中： $\bar{v}^*$  为摩擦风速， $\bar{v}^* = k\bar{v}(10)/\ln(10/z_0)$ ； $\bar{v}(z)$  为高度  $z$  处的平均风速； $k$  为卡曼常数， $k \approx 0.40$ ； $z_0$  为地面粗糙长度 (m)； $z$  为有效高度。

顺风向风速谱选取 Kaimal 谱，如式 (2) 所示：

$$\frac{nS_v(n)}{\bar{v}^{*2}} = \frac{200x}{(1+50x)^{5/3}} \quad (2)$$

式中： $x = nz/\bar{v}(z)$ ； $n$  为频率 (Hz)；其他符号同前。

脉动风的空间相干函数按照达文波特提出的指数形式：

$$\text{Coh}(r, n) = e^{-c} \quad (3)$$

式中： $c = \{n[c_x^2(x-x')^2 + c_z^2(z-z')^2]\} / \bar{v}_{10}$ ；建议

取值  $c_x=16$ ,  $c_z=10$ ；其他符号同前。

采用谐波叠加法<sup>[7]</sup>模拟脉动风速场。脉动风场模拟相关的参数如下：地面粗糙长度  $z_0=0.24\text{mm}$ ；时程总长  $t=300\text{s}$ ，时间步长  $\Delta t=0.1\text{s}$ ，截止频率  $\omega_c=2\text{Hz}$ ，频率范围等分数  $N=1024$ 。模拟过程中，在输电塔身上只考虑脉动风的竖向相关性，因此将输电塔从下到上分为 9 段，如图 3 所示，每段最高点处设置一个模拟点，则该输电塔共设置 9 个模拟点，其高度取输电塔

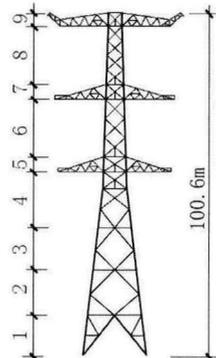


图 3 输电塔分段示意图  
Fig.3 Segmentation of transmission tower

每段的最高点，离地面的高度及迎风面积如表 2 所示。在导线上每 5.1m 设置一个模拟点，只考虑脉动风沿水平方向的相关性，忽略导线各点的高度差异对风速时程的影响。每个绝缘子上的模拟点设置在与输电塔的连接点处。不考虑输电塔之间的相干性影响，模拟脉动风场的方向为垂直线路的方向。

表 2 输电塔垂直线路方向各段高度及承受风压面积  
Tab.2 The height and wind-bearing area of each segment in vertical direction

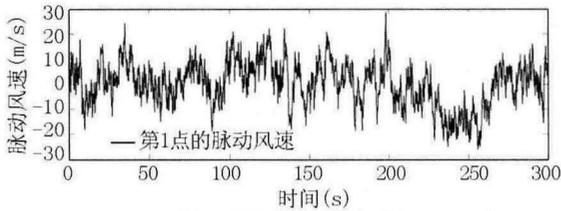
段数	高度 (m)	面积 (m <sup>2</sup> )	段数	高度 (m)	面积 (m <sup>2</sup> )
1	6	25.415370	6	66.883	22.361749
2	18	24.554896	7	77.458	29.039637
3	31	20.219337	8	90.288	19.451625
4	46.28	29.038566	9	98.663	41.991560

根据上述方法，在不同 10m 高处平均风速下，对输电塔-线体系中输电塔的 9 个分段点以及输电线上的模拟点的脉动风场进行模拟，限于篇幅，这里只列出 10m 高处平均风速为 15m/s 时输电塔上几个分段点处的模拟结果，如图 4 所示。为了验证模拟方法的有效性和可靠性，比较了模拟脉动风场的功率谱与目标风速谱，考察两者之间的吻合程度，结果如图 5 所示。可见，模拟脉动风功率谱的谱线趋势与目标谱线一致，谱线的总体均值与目标谱比较吻合，这表明模拟方法所取的参数是合理的。

完成脉动风场的模拟后,不考虑结构与线路之间的气动弹性作用,可根据准定常假定计算作用在结构上的总的动力风荷载  $F(t,z)^{[5]}$ ,如式(4)表示:

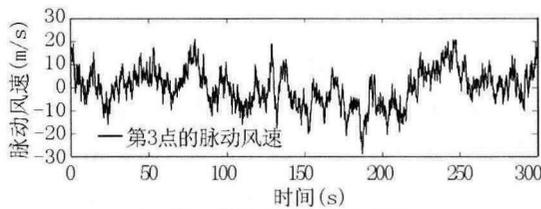
$$F(t,z) = \frac{1}{2} \rho (U(z) + u(z,t))^2 A_s C(z) \quad (4)$$

其中:  $U(z)$ 、 $u(z,t)$  分别为高度  $z$  处的平均风速和脉动风速;  $A_s$  为迎风面积,输电塔迎风面积如表 2 所示;  $C(z)$  为结构的风荷载体型系数,其值按我国荷载规范计算,本文取 1.3。



a. 第 1 分段点脉动风速时程

a. Time history of fluctuating wind speed at the first segment point



b. 第 3 分段点脉动风速时程

b. Time history of fluctuating wind speed at the third segment point

图 4 15m/s 平均风速下输电塔几个模拟点脉动风速时程  
Fig.4 Simulation of fluctuating wind speed under 15m/s average wind speed

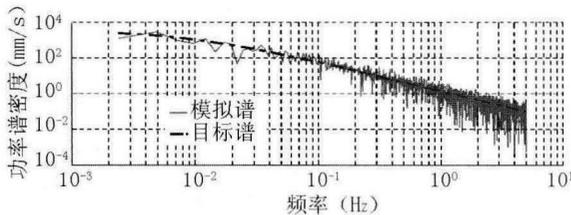


图 5 输电塔第 3 个分段点的目标谱与模拟谱

Fig. 5 Comparison of spectrum at the third segment point

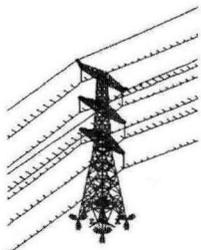


图 6 输电塔线体系风荷载加载示意

Fig.6 Wind loading diagram of transmission-tower-line system

通过上述方法计算出输电塔上及输电线上模拟点的风荷载后,将荷载加载到有限元模型的各个节点上。李庆伟<sup>[8]</sup>研究了输电塔-线体系的三塔两线模型在沿着线路方向攻角和垂直于线路方向攻角

两个风荷载作用工况下的结构风致响应。研究表明,垂直于线路方向攻角是输电塔-线体系的最不利工况。因此本文只考虑风荷载垂直于线路方向的工况,风荷载加载如图 6 所示。

### 3 IDA 分析方法及抗风性能分析

目前国内外对结构的抗震性能分析常用的方法有:非线性弹塑性推覆方法 (NSP) 和增量动力分析法 (IDA),但将该两种方法应用于结构抗风性能分析的研究还不多见。Banik 等<sup>[3]</sup>将这两种方法稍加修改引入到结构风工程中,对输电塔结构在风荷载作用下的性能进行了评估,获得了输电单塔的抗风性能曲线。

由于 NSP 方法本身的理论基础并不严谨,结构沿高度的变形由单一的形状向量表示,该基本假设常常不符合实际情况。增量动力法 (Incremental Dynamic Analysis, 简称 IDA) 克服了上述缺点,采用逐步增加结构所受的荷载,模拟结构从弹性动力响应阶段到屈服及非线性动力响应阶段,直至整体发生失稳破坏的结构分析全过程,达到评估结构性能的目的。根据输电塔-线体系所受的风荷载情况,本文采用增量动力法对输电塔线体系抗风性能进行分析,除了考虑结构的材料非线性外,同时考虑线路的几何非线性,其步骤如下:

1. 通过脉动风荷载的模拟方法,获得输电塔-线体系上模拟点的风荷载时程,并加载于塔线体系节点上;

2. 确定地面粗糙长度的取值(这里按照实际线路设计情况取 0.24m),取 10m 高度处的平均风速  $U_{10}$  作为风荷载强度参数,采用增量动力法逐步增加平均风速,获取输电塔线体系中间塔的顶点最大位移角  $RDA_{max}$ ,将  $RDA_{max}$  作为输电塔线体系的特征响应参数;

3. 在逐步增加平均风荷载过程中,结合 Budiansky-Roth 准则来判断输电塔-线体系是否发生整体失稳;

4. 最后获得输电塔-线体系的抗风能力曲线,纵坐标为 10m 高度处的平均风速  $U_{10}$ ,横坐标为塔线体系中间塔的顶点最大位移角  $RDA_{max}$ 。

$U_{10}=30\text{m/s}$  时,中间塔和输电塔单塔在 X 方向(垂直于塔线体系的线路方向)的顶点位移时程如图 7 所示。根据上述分析步骤,得到各个风荷载强度下输电塔顶点的最大位移角(最大位移与总高度的比值),由此获得输电塔-线体系中中间输电塔的抗风性能曲线,如图 8 所示。根据 Budiansky-Roth 准则,  $U_{10}=50\text{m/s}$  时塔顶位移角在很小的荷载增量时却发生急剧变化,计算结果不收敛,由此判断此时塔-线体系已经发生了失稳破坏,但同等强度的风荷载作用下单塔结构的顶点的最大位移角仍然很小,近似在弹性范围内。由此可见,塔线耦合效应对输电塔的动力响应有显著的影响,与不考虑导线影响的输电单塔相比,结构的位移响应有着十分显著的增加。

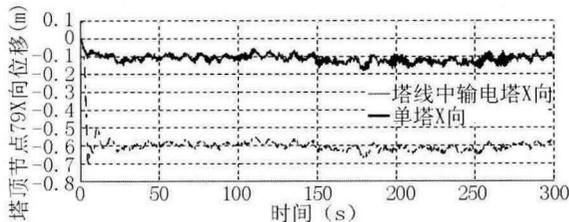


图 7 中间塔顶点的 X 向位移的时程

Fig.7 Displacement time history of mid-tower in X direction

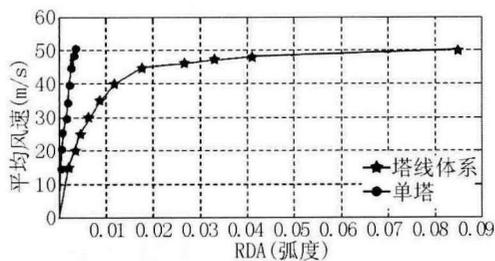


图 8 输电塔-线体系及输电塔单塔的抗风能力曲线  
Fig.8 Wind capacity curve of transmission-tower-line system and standalone tower

#### 4 结论

本文建立了高电压输电塔线体系的三塔四线有限元模型,分析了体系的动力特性并与单塔的动力特性进行了比较,考虑导线影响的输电塔-线体系的动力特性与单塔相差较大。本文还将增量动力法应用于结构风工程,对输电塔-线体系进行抗风性能分析,最终获得了输电塔-线体系的抗风能力曲线,并且与单塔的抗风能力曲线进行了比较,结果表明,由于塔线耦合、几

何非线性的影响,体系中的输电塔在风振响应中发生较大变形,并最终发生动力失稳倒塌,而且同等风荷载强度下,输电塔单塔的变形很小,仍然在弹性变形范围内。由此可见,在输电线路结构设计时,需要考虑塔线耦联作用对输电塔结构动力特性的影响,而不能忽略导线的影响。

#### 参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部 110kV~750kV 架空输电线路设计规范 (GB50545-2010/2010). 北京: 中国计划出版社  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB50545-2010 Code for design of 110kV~750kV overhead transmission line. 2010, China Planning Press: Beijing. (in Chinese)
- [2] 李宏男, 白海峰. 输电塔线体系的风(雨)致振动响应与稳定性研究. 土木工程学报, 2008, 41(11): 31-38  
Li Hongnan, Bai Haifeng. Dynamic behavior and stability of transmission tower-line system under wind (rain) forces. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(11): 31-38. (in Chinese)
- [3] Banik, S.S., H.P. Hong and G.A. Kopp, Assessment of capacity curves for transmission line towers under wind loading. Wind and Structures, An International Journal, 2010, 13(1): p. 1-20
- [4] 张琳琳, 李杰. 风荷载作用下输电塔结构动力可靠度分析. 福州大学学报(自然科学版), 2005, 33(z1): 36-41  
Zhang Linlin, Li Jie. Dynamic reliability analysis of wind-induced transmission tower. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2005, 33(z1): 36-41. (in Chinese)
- [5] 赵桂峰. 高压输电塔-线耦联体系风致非线性振动研究. 同济大学, 2009  
Zhao Guifeng. Wind-induced nonlinear vibrations of high-voltage transmission tower-line coupling system. 2009, Tongji University. (in Chinese)
- [6] Simiu, E. and R.H. Scanlan, Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design. 1996: John Wiley & Sons
- [7] 白海峰, 李宏男. 大跨越输电塔线体系随机脉动风场模拟研究. 工程力学, 2007, 24(7): 146-151  
Bai haifeng, Li Hongnan. Simulation study of stochastic fluctuating wind field on large span electricity transmission tower-line system. Engineering Mechanics, 2007, 24(7): 146-151. (in Chinese)
- [8] 李庆伟. 输电塔-线体系的风致动力稳定性分析. 大连理工大学, 2008  
Li Qingwei. Dynamic instability analysis of transmission tower-line system subjected to wind load. 2008, Dalian University of Technology. (in Chinese)