

DOI: 10.7511/jslx20221012002

# 基于概率密度演化的输电塔-线体系 抗风可靠性分析

谭淳元, 张文远, 刘章军\*

(武汉工程大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430074)

**摘要:**以三线两塔直线段输电塔-线体系为工程对象,应用有限元数值模拟,建立了基于概率密度演化的输电塔-线体系抗风可靠性分析方法。首先,应用谱表示-降维方法模拟结构脉动风场,生成风荷载的代表性样本集合。然后,结合概率密度演化理论,分析了输电塔-线体系考虑气弹效应的随机动力反应。最后,应用等价极值思想构建了风荷载作用下输电塔-线体系失效准则,进而对输电塔-线体系的抗风可靠性进行精细化分析。本文结合谱表示-降维方法与概率密度演化理论,实现了仅用较少数量的代表性样本来精细地分析结构的抗风可靠性,为工程实践提供参考。

**关键词:**输电塔-线体系;脉动风场;谱表示-降维方法;可靠性;概率密度演化

中图分类号:TU312;O213.2

文献标志码:A

文章编号:1007-4708(2024)03-0409-06

## 1 引言

架空输电网络是保障城市正常运行、生产和发展的重要生命线工程。输电塔-线体系具有典型的高耸结构柔性强与大跨结构跨径大等特点,其在强风作用下动力反应敏感且易发生倒塔事故<sup>[1,2]</sup>。为此,学者们采用不同方法开展了一系列关于输电塔-线体系在强风作用下的可靠度研究。姚陈果等<sup>[3]</sup>采用当量正态化法(JC 法)对覆冰输电塔进行可靠性分析;俞登科等<sup>[4,5]</sup>采用矩估计法与高阶自适应响应面法实现了特高压输电塔抗风可靠性分析;卞荣等<sup>[6]</sup>将反演分析结果与实测数据对比,以此为基础对输电塔-线体系风偏可靠性进行了分析。

近年来,作为一种能够精确评价随机动力作用下线性与非线性结构动力反应及可靠性的概率密度演化理论<sup>[7,8]</sup>发展迅速。其中,随机动力作用建模是概率密度演化理论应用于工程实践的基础,刘章军等<sup>[9,10]</sup>发展了随机脉动风场的随机函数降维方法,该方法仅用少数基本随机变量即可精确模拟脉动风场,这为与概率密度演化理论结合实现强风作用下复杂结构的精细化动力反应与可靠性分

析奠定了基础。

在上述背景下,本文采用 ANSYS 有限元软件建立了三线两塔直线段输电塔-线体系。进一步,采用谱表示-降维方法模拟了随机脉动风场,进行了该风场作用下的输电塔-线体系位移反应的概率密度演化分析。同时,结合等价极值思想,以基于塔顶位移的失效准则对输电塔-线体系的抗风可靠性进行了精细化分析。

## 2 输电塔-线体系有限元模型

考虑三线两塔直线段输电塔-线体系模型<sup>[11,12]</sup>,两座均为 500 kV-ZA153 型自立式输电杆塔,呼高 55 m,塔全高 60.2 m,档距为 400 m。结构钢材型号包括 Q235, Q345 和 Q420 三种,采用 L 型与 T 型角钢,输电导线型号为 ACSR-720/50 四分裂导线,弹性模量为 63.7 GPa,直径为 3.1 cm,横截面积为 31 cm<sup>2</sup>,密度为 3093.8 kg/m<sup>3</sup>,跨中垂度为 1/30 倍档距,初始张力为 4.5 MPa,导线间距为 13.93 m。采用 ANSYS 通用有限元分析软件建模,各部分构件均采用分段数为 1 的线单元建模,其中杆塔钢构件选择 BEAM189 单元建模,绝缘子

收稿日期:2022-10-12; 修改稿收到日期:2022-11-30.

基金项目:国家自然科学基金(51978543);湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划(T2020010)资助项目.

作者简介:刘章军\*(1973-),男,博士,教授(E-mail:liuzhangjun73@aliyun.com).

引用本文:谭淳元,张文远,刘章军. 基于概率密度演化的输电塔-线体系抗风可靠性分析[J]. 计算力学学报,2024,41(3):409-414.

TAN Chun-yuan, ZHANG Wen-yuan, LIU Zhang-jun. Reliability analysis of wind resistance of transmission tower-line system based on probability density evolution[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2024, 41(3): 409-414.

采用 MPC184 刚性连接单元建模, 导线采用设置为仅受拉的 LINK10 杆系单元建模。杆塔底部的四个节点设置为地面刚接, 两相导线头尾处与绝缘子连接点约束 X 方向及 Y 方向平动, 绝缘子另一端设置为刚接。塔线体系有限元模型如图 1 所示, 杆塔模型如图 2(a)所示, 杆塔上的离散风速模拟点如图 2(b)所示, 输电导线上的离散风速模拟点如图 3 所示。

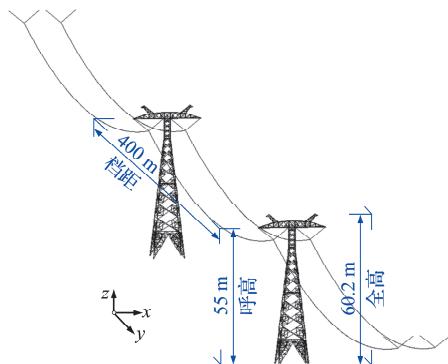


Fig. 1 Transmission tower-line system

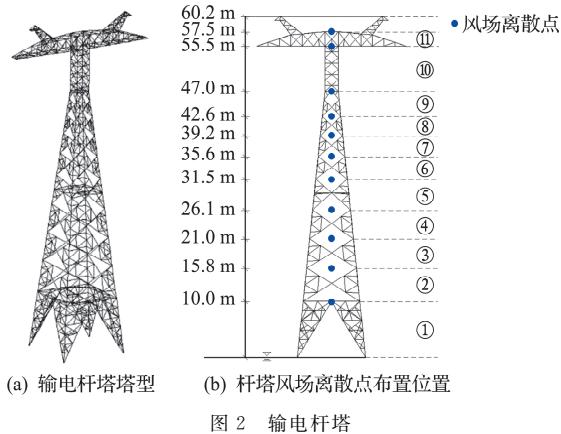


Fig. 2 Sketch map of transmission tower

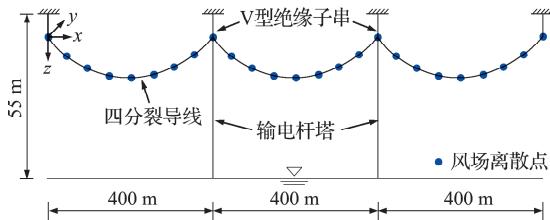


Fig. 3 Discrete points of conductor wind field

对杆塔进行模态分析并提取输电杆塔的前十阶自振频率以及振型列入表 1。其中前三阶均为塔体整体振动振型, 高阶振型则包含了塔身局部振动以及与整体振动耦合的振型, 且其局部振动均集中在塔身下部以及塔身与塔腿连接处。同时, 对导线进行模态分析并提取其前十阶自振频率与振型列入表 2。

表 1 杆塔模态信息

Tab. 1 Tower modal information

阶数	频率/Hz	振型
1	1.4790	一阶绕导线方向弯曲振型
2	1.5231	一阶绕横担方向弯曲振型
3	2.5559	一阶绕竖直方向扭转振型
4	2.9821	一阶塔身局部振型
5	4.0846	一阶绕导线方向弯曲与塔身局部耦合振型
6	4.1845	二阶塔身局部振型
7	4.2920	三阶塔身局部振型
8	4.3691	二阶绕导线方向弯曲与塔身局部耦合振型
9	5.2698	一阶绕横担方向弯曲与塔身局部耦合振型
10	5.3720	三阶绕导线方向弯曲与塔身局部耦合振型

表 2 输电导线模态信息

Tab. 2 Electric transmission line modal information

阶数	频率/Hz	振型	阶数	频率/Hz	振型
1	0.14887	面内一阶振型	6	0.45371	面内四阶振型
2	0.15154	面外一阶振型	7	0.45376	面外三阶振型
3	0.30160	面内二阶振型	8	0.60469	斜向一阶振型
4	0.30259	面外二阶振型	9	0.60628	面外四阶振型
5	0.39215	面内三阶振型	10	0.75585	面外五阶振型

### 3 输电塔-线体系风场的降维模拟

#### 3.1 谱表示-降维方法

本文采用谱表示-降维方法生成脉动风场的代表性时程集合。首先, 将一维多变量(1D- $n$ V)脉动风随机向量过程  $\mathbf{v}(t) = [v_1(t), v_2(t), \dots, v_n(t)]^T$  表示为 Fourier-Stieltjes 积分形式

$$\mathbf{v}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} d\mathbf{Z}(\omega) \quad (1)$$

式中  $\mathbf{Z}(\omega) = [Z_1(\omega), Z_2(\omega), \dots, Z_n(\omega)]^T$  为零均值的复正交增量随机向量过程。

根据正交性条件并将积分分离散化, 即可推导第  $i$  个分量的脉动风  $v_i(t)$  源谱表达式<sup>[9]</sup>

$$v_i(t) \approx 2 \sum_{k=1}^i \sum_{m=1}^N \sqrt{\Delta\omega} H_{ik}(\omega_m) [R_{km} \cos \omega_m t - I_{km} \sin \omega_m t] \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中  $H_{ik}(\omega)$  为随机向量过程的互功率谱密度矩阵经 Cholesky 分解所得下三角矩阵  $\mathbf{H}(\omega)$  的元素,  $\omega_m$  为索引频率,  $\omega_m = (m - 0.5)\Delta\omega$ ,  $\Delta\omega$  为频率步长,  $N$  为频率分割数,  $\{R_{km}, I_{km}\}$  为零均值的正交随机变量集, 满足正交性条件。

其次, 根据随机函数的降维思想, 将正交随机变量集  $\{R_{km}, I_{km}\}$  定义为基本随机变量的函数形式<sup>[9]</sup>

$$\begin{cases} R_{km} = \cos(s \times \Theta_1 + l \times \Theta_2) \\ I_{km} = \sin(s \times \Theta_1 + l \times \Theta_2) \end{cases} \quad (3)$$

式中  $k, s = 1, 2, \dots, n; m, l = 1, 2, \dots, N$ ; 基本随机

变量  $\Theta_1$  和  $\Theta_2$  为区间  $(0, 2\pi]$  上相互独立的均匀分布。此外,还需将指针  $(s, l)$  通过某种确定性的一一映射关系转换为指针  $(k, m)$ 。为此,定义  $(n \times N)$  阶矩阵的第  $\bar{c} = (l-1) \times n + s$  个元素和第  $c = (m-1) \times n + k$  个元素,其之间的一一映射关系可采用 Matlab 工具箱中的 `rand('state', 0)` 和 `randperm(n * N)` 函数来实现,即  $c = \text{temp}(\bar{c})$ 。这一映射关系正是降维方法的一个充分条件。

容易验证,式(3)定义的随机函数形式满足正交性条件。对于式(3)的基本随机变量  $(\Theta_1, \Theta_2)$ ,采用数论选点方法<sup>[13]</sup>选取其初始代表性点集。通过 2 个基本随机变量即可模拟一维多变量随机向量过程。

### 3.2 风场模型与模拟结果

针对本文结构风场,功率谱密度函数采用双边的 Kaimal 谱<sup>[14]</sup>,空间相干函数采用 Davenport 相干函数<sup>[15]</sup>。风场模拟所需参数列入表 3。

表 3 风场模拟参数取值

Tab. 3 Parameter values of wind field simulation

参数	取值	参数	取值
截断频率 $\omega_u/\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	$2\pi$	时间步长 $\Delta t/\text{s}$	0.5
频率离散点数 $N$	1000	地面粗糙长度 $k_0$	0.05
频率间隔 $\Delta\omega/\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	$2\pi/1000$	方向 $x$ 衰减系数	16
持时 $T/\text{s}$	500	方向 $z$ 衰减系数	10

采用谱表示-降维方法生成输电塔-线体系风场的 144 条代表性样本。为了进行对比分析,5 m/s ~30 m/s 对基本风速阶梯取值共设置六种工况。图 4 为两组基本风速 25 m/s 的代表性样本。

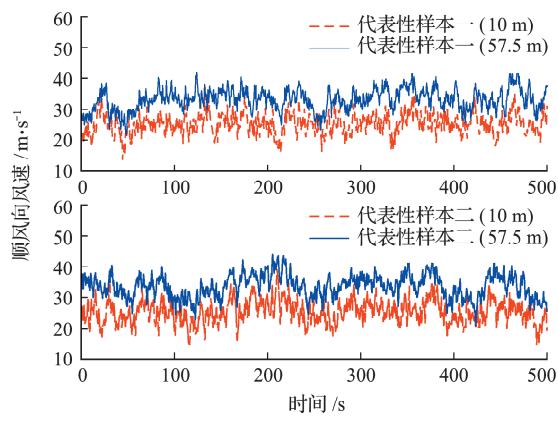


图 4 风速代表性样本  
Fig. 4 Representative samples of wind speed

## 4 风致响应分析

### 4.1 荷载布置与输电导线气动阻尼计算

对于输电塔-线体系模型上的风荷载,单塔的风压荷载离散为 11 处集中荷载,每跨导线间隔 1 米设

置 1 个风压荷载。其顺风向风荷载可表示为<sup>[16]</sup>

$$F_p(t) = \frac{1}{2} \rho \mu_p A_p [\bar{v}_p + v_p(t)]^2 \quad (4)$$

式中  $p$  为风荷载离散点编号,  $\rho$  为标准大气压下空气密度,  $\mu_p$  为风荷载体型系数,  $A_p$  为等效迎风面积,  $\bar{v}_p$  为点  $p$  处的平均风速,  $v_p(t)$  为点  $p$  处的脉动风速时程。

由于导线风致振动具有强非线性,在风荷载作用下的气弹效应影响不可忽略<sup>[19]</sup>。气动阻尼的取值通常在具体的结构实验中测定并计算得到。为在结构分析中近似考虑该效应,本文采用 ASCE No. 74 推荐的对输电导线气动阻尼比的计算公式<sup>[20]</sup>

$$\zeta_a = (0.000048 V_o C_d) / (f_\omega D) \quad (5)$$

式中  $C_d$  为阻力系数,  $V_o$  为有效高度平均风速,保守考虑可取导线跨中位置的平均风速,  $f_\omega$  为导线自振频率,  $D$  为导线的直径。

结合表 2 计算出导线前两阶振型的气动阻尼比,再与结构阻尼比叠加得到总阻尼比,在 ANSYS 有限元软件中对导线设置 Rayleigh 阻尼以考虑导线气动阻尼效应。

### 4.2 结构响应

采用完全瞬态分析法对各工况下结构进行计算,荷载总时程为 500 s,时间步长为 0.5 s,总共 1000 个荷载步。提取基本风速 25 m/s 下的 3 个代表性塔段位移响应均值时程如图 5 所示,塔段位移标准差时程如图 6 所示。

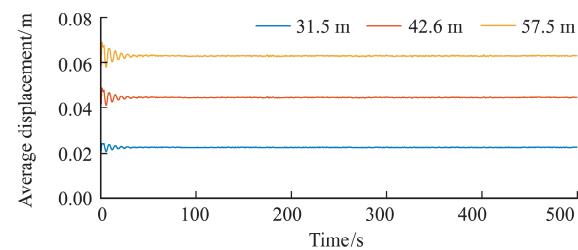


图 5 基本风速 25 m/s 下位移均值时程  
Fig. 5 Average displacement time-history under basic wind speed of 25 m/s

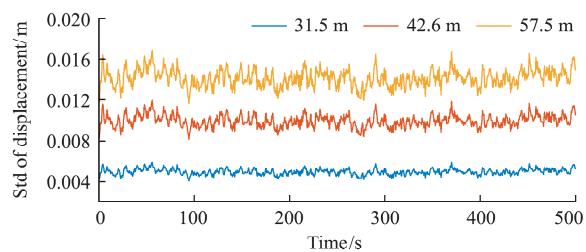


图 6 基本风速 25 m/s 下位移标准差时程  
Fig. 6 Displacement standard deviation time-history under basic wind speed of 25 m/s

进一步,结合概率密度演化理论进行结构动力响应分析。由于输电塔-线动力系统的随机源全部

来自风荷载激励,因此,系统响应的概率信息完全由风载概率信息确定。

定义系统位移响应随机过程  $X(\boldsymbol{\Theta}, t)$  如下

$$X = H(\boldsymbol{\Theta}, t), \dot{X} = \dot{H}(\boldsymbol{\Theta}, t) = h(\boldsymbol{\Theta}, t) \quad (6)$$

式中  $\dot{X}$  为  $X$  的变化率。随机动力系统广义概率密度演化方程<sup>[8]</sup>为

$$\frac{\partial p_{x\Theta}(x, \boldsymbol{\Theta}, t)}{\partial t} + h(\boldsymbol{\Theta}, t) \frac{\partial p_{x\Theta}(x, \boldsymbol{\Theta}, t)}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

式中  $p_{x\Theta}(x, \boldsymbol{\Theta}, t)$  为响应过程  $X$  与基本随机变量  $\boldsymbol{\Theta}$  的联合概率密度函数。

采用有限差分法进行数值求解,将每条代表性样本求得的  $p_{x\Theta}(x, \boldsymbol{\Theta}, t)$  累计求和,获得响应  $X$  的概率密度  $p_x(x, t)$  的数值解

$$p_x(x, t) = \sum_{r=1}^{n_{sel}} p_{x\Theta}(x, \boldsymbol{\Theta}_r, t) \quad (8)$$

以基本风速 25 m/s 工况为例,截取 50 s~100 s 内的概率密度演化如图 7(a) 所示;相应概率密度等值线如图 7(b) 所示。

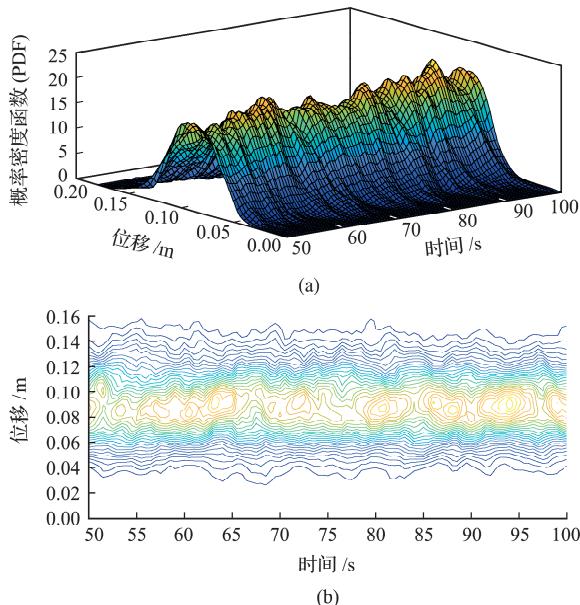


图 7 50 s~100 s 内塔顶位移概率密度演化

Fig. 7 Probability density evolution of tower top displacement within 50 s~100 s

## 5 抗风可靠性分析

在结构动力反应基础上,根据失效准则,结合等价极值思想<sup>[21]</sup>计算输电塔-线体系的抗风可靠度。根据规范<sup>[18]</sup>,在荷载长期效应组合(无冰、风速 5 m/s 及年平均气温)作用下,杆塔的计算挠曲度  $\phi$ (不包括基础倾斜和拉线点位移)不应超过 3h/1000,其中  $h$  为杆塔最长腿基础顶面起至计算点高度。以规范阈值作为参考,选取挠曲度阈值  $\phi_s$

来考虑失效情况。

杆塔不同塔段顶点的位移反应为  $X_p(t)$ , 对应计算挠曲度反应  $\Phi_p(t)$  为

$$\Phi_p(t) = (X_p(t))/H_p \quad (9)$$

则可靠指标可定义为

$$Z_p = \phi_s - \Phi_{p,\max} \quad (10)$$

根据首次超越失效准则,对输电杆塔结构第  $p$  个塔段处的抗风可靠度定义为

$$R_{T,p}(\phi_s) = \Pr\{Z_p > 0\} = \int_{-\phi_s}^{\phi_s} p_{\Phi_{p,\max}}(\phi) d\phi \quad (11)$$

式中  $R_{T,p}(\phi_s)$  为输电杆塔第  $p$  个塔段处的抗风可靠度,  $\Phi_{p,\max} = \max_{t \in [0, T]} \{\Phi_p(t)\}$  为第  $p$  个塔段处的计算挠曲度在时间  $[0, T]$  内的等价极值,  $p_{\Phi_{p,\max}}(\phi)$  为  $\Phi_{p,\max}$  的概率密度函数。

由此,结构的整体可靠度定义为

$$R_T(\phi_s) = \Pr\{Z > 0\} = \Pr\{\Phi_{\max} < \phi_s\} \quad (12)$$

式中  $\Phi_{\max} = \max_{p=1,2,\dots,n} \{\Phi_{p,\max}\}$  为各离散点计算挠曲度极值  $\Phi_{p,\max}$  的最大值。

本文分别计算了  $\phi_s$  为 3h/1000(规范)、4h/1000 和 5h/1000 三种情况下的结构可靠度。提取各工况下杆塔各塔段水平位移反应并进行概率信息统计。在此,仅对基本风速 25 m/s 与 30 m/s 工况进行讨论。抗风可靠度的计算结果列入表 4 和表 5。

表 4 基本风速 25 m/s 下抗风可靠度计算结果  
Tab. 4 Reliability calculation results under basic wind speed of 25 m/s

塔段高度 /m	水平位移反应/m			可靠度		
	均值	标准差	均方根	3h/1000	4h/1000	5h/1000
42.6	0.0399	0.0108	0.0458	1.000	1.000	1.000
47.0	0.0505	0.0139	0.0580	1.000	1.000	1.000
55.0	0.0731	0.0200	0.0843	0.947	1.000	1.000
57.5	0.0800	0.0219	0.0917	0.890	1.000	1.000
60.2	0.0870	0.0235	0.0990	0.823	1.000	1.000
整体可靠度				0.823	1.000	1.000

表 5 基本风速 30 m/s 下抗风可靠度计算结果  
Tab. 5 Reliability calculation results under basic wind speed of 30 m/s

塔段高度 /m	水平位移反应/m			可靠度		
	均值	标准差	均方根	3h/1000	4h/1000	5h/1000
42.6	0.0564	0.0112	0.0643	1.000	1.000	1.000
47.0	0.0710	0.0140	0.0816	0.983	1.000	1.000
55.0	0.1033	0.0205	0.1185	0.334	0.998	1.000
57.5	0.1126	0.0223	0.1289	0.187	0.992	1.000
60.2	0.1227	0.0243	0.1392	0.106	0.982	1.000
整体可靠度				0.106	0.982	1.000

计算结果显示,以 $3h/1000$ 作为挠曲度失效阈值时,基本风速 $25\text{ m/s}$ 与 $30\text{ m/s}$ 工况下塔线体系整体的可靠性分别为 $0.823$ 与 $0.106$ ;以 $4h/1000$ 作为挠曲度失效阈值时,基本风速 $30\text{ m/s}$ 的工况下塔线体系的整体可靠度为 $0.982$ 。提取基本风速为 $25\text{ m/s}$ 和 $30\text{ m/s}$ 工况下各塔段与整个结构的抗风可靠度如图8和图9所示。

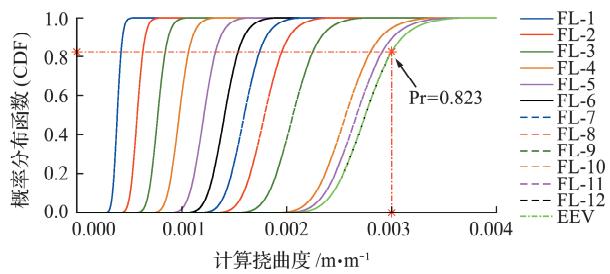


图8 基本风速 $25\text{ m/s}$ 时结构抗风可靠度  
Fig. 8 Wind resistance reliability under basic wind speed of  $25\text{ m/s}$

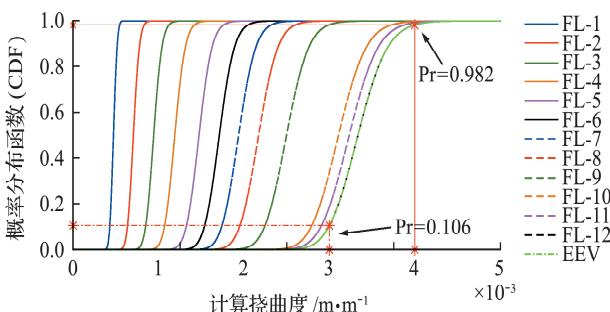


图9 基本风速 $30\text{ m/s}$ 时结构抗风可靠度  
Fig. 9 Wind resistance reliability under basic wind speed of  $30\text{ m/s}$

## 6 结论

本文针对输电塔-线体系,采用谱表示-降维方法模拟生成了具有赋得概率的脉动风场代表性样本集合。在考虑输电导线气动阻尼的情况下,结合概率密度演化理论实现了输电塔-线体系的动力反应精细化分析与抗风可靠度评价。在可靠度计算过程中,随机性在物理系统中的传播规律明确,应用等价极值思想简化了可靠度分析,有效解决了失效组合爆炸的情况。同时本文通过小容量的代表性样本集来计算结构抗风可靠度,相较于基于传统Monte Carlo随机抽样的可靠度计算方法,其在保证精度的同时效率提升显著,为工程实践与相关研究提供参考。

## 参考文献(References):

- [1] 李宏男,白海峰.高压输电塔-线体系抗灾研究的现状与发展趋势[J].土木工程学报,2007,40(2):39-46.  
(LI Hong-nan, BAI Hai-feng. State-of-the-art review
- [2] 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.(XIE Qiang, LI Jie. Current situation of natural disaster in electric power system and counter measures [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2006, 15(4):126-131. (in Chinese))
- [3] 姚陈果,李宇,周泽宏,等.基于极限承载力分析的输电塔可靠性评估[J].高电压技术,2013,39(11):2609-2614.(YAO Chen-guo, LI Yu, ZHOU Ze-hong, et al. Reliability evaluation for iced tower based on ultimate bearing capacity analysis [J]. *High Voltage Engineering*, 2013, 39(11):2609-2614. (in Chinese))
- [4] 俞登科,李正良,李茂华,等.基于矩方法的特高压输电塔抗风可靠度分析[J].工程力学,2013,30(5):311-316.(YU Deng-ke, LI Zheng-liang, LI Mao-hua, et al. Wind-resistant reliability analysis of UHV transmission tower based on moment methods [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30 (5): 311-316. (in Chinese))
- [5] 俞登科,李正良,韩枫,等.基于性能目标的特高压输电塔抗风可靠度分析[J].防灾减灾工程学报,2013,33(6):657-662.(YU Deng-ke, LI Zheng-liang, HAN Feng, et al. Reliability analysis on ultra-high voltage transmission tower under wind based on performance [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2013, 33 (6): 657-662. (in Chinese))
- [6] 卞荣,徐卿,俞恩科,等.台风作用下输电塔-线体系多元状态监测及风偏可靠度分析[J].振动与冲击,2020,39(3):52-59.(BIAN Rong, XU Qing, YU Enke, et al. Multi-variate state monitoring and wind bias reliability analysis of a transmission tower-line system under action of typhoon [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(3):52-59. (in Chinese))
- [7] Li J, Chen J B. *Stochastic Dynamics of Structures* [M]. John Wiley & Sons, 2009.
- [8] 李杰,陈建兵.随动动力系统中的概率密度演化方程及其研究进展[J].力学进展,2010,40(2):170-188.(LI Jie, CHEN Jian-bing. Advances in the research on probability density evolution equations of stochastic dynamical systems [J]. *Advances in Mechanics*, 2010, 40(2):170-188. (in Chinese))
- [9] Liu Z J, Liu Z H. Random function representation of stationary stochastic vector processes for probability density evolution analysis of wind-induced structures [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 106:511-525.
- [10] Liu Z H, Liu Z J, He C G, et al. Dimension-reduced probabilistic approach of 3D wind field for wind-in-

- duced response analysis of transmission tower [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2019, **190**: 309-321.
- [11] 汪大海,申琪,章东鸿,等.输电杆塔风荷载风振系数的数值计算与规范比较[J].建筑结构,2018, **48**(13):49-56,62. (WANG Da-hai, SHEN Qi, ZHANG Dong-hong, et al. Numerical calculation and specifications comparison of wind-induced vibration coefficient for wind load of transmission tower [J]. *Building Structure*, 2018, **48**(13):49-56,62. (in Chinese))
- [12] 杨文刚,蒋超.梁柱简化模型在自立塔塔线体系动态响应中的适用性研究[J].计算力学学报,2020, **37**(6):700-708. (YANG Wen-gang, JIANG Chao. Applicability of simplified beam model of the dynamic response of the tower line system [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2020, **37**(6):700-708. (in Chinese))
- [13] Li J, Chen J B. The number theoretical method in response analysis of nonlinear stochastic structures[J]. *Computational Mechanics*, 2007, **39**(6):693-708.
- [14] Kaimal J C, Wyngaard J C, Izumi Y, et al. Spectral characteristics of surface-layer turbulence[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1972, **98**(417):563-589.
- [15] Davenport A G. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1961, **87**(372):194-211.
- [16] 武岳,孙瑛,郑朝荣,等.风工程与结构抗风设计(第二版)[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2019. (WU Yue, SUN Ying, ZHENG Chao-rong, et al. *Wind Engineering and Wind-Resistant Design of Structure* (2<sup>nd</sup> Edition) [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2019. (in Chinese))
- [17] GB 50009-2012. 建筑结构荷载规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012. (GB 50009-2012. Load Code for the Design of Building Structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese))
- [18] GB 50545-2010. 110 kV~750 kV架空输电线路设计规范[S].北京:中国计划出版社,2010. (GB 50545-2010. Code for Design of 110 kV~750 kV Overhead Transmission Line [S]. Beijing: China Planning Press, 2010. (in Chinese))
- [19] 王述良,梁枢果,邹良浩,等.输电导线气动阻尼效应的风洞试验研究[J].振动与冲击,2016, **35**(20):30-36, 53. (WANG Shu-liang, LIANG Shu-guo, ZOU Liang-hao, et al. Aerodynamic damping effects of a transmission conductor by wind tunnel tests [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, **35**(20):30-36, 53. (in Chinese))
- [20] ASCE MOP 74. Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading (4<sup>th</sup> Edition) [S]. American Society of Civil Engineers, 2020.
- [21] 陈建兵,李杰.结构反应的内蕴相关性与可靠度分析[J].计算力学学报,2008, **25**(4):521-528. (CHEN Jian-bing, LI Jie. The inherent correlation of the structural response and reliability evaluation [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2008, **25**(4):521-528. (in Chinese))

## Reliability analysis of wind resistance of transmission tower-line system based on probability density evolution

TAN Chun-yuan, ZHANG Wen-yuan, LIU Zhang-jun\*

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In this study, the three-line and two-tower straight section transmission tower-line system is taken as the engineering object of study, and the finite element simulation is applied to establish the wind resistance reliability analysis method of the transmission tower-line system based on probability density evolution. Firstly, the DR-SRM is used to simulate the fluctuating wind field of structures, and a representative sample set of wind load is generated. Then, combined with PDEM theory, the stochastic dynamic response of the transmission tower line system considering aeroelastic effect is analyzed. Finally, the equivalent extreme value idea is applied to construct the failure criteria of the transmission tower line system under wind load, and then the wind resistance reliability of the transmission tower line system is analyzed in detail. In this paper, by combining DR-SRM and PDEM theory, the wind resistance reliability of structures can be precisely analyzed with only a small number of representative samples, which provides a reference for engineering practice.

**Key words:** tower-line system; fluctuating wind field; dimension reduction spectral representation method; reliability; probability density evolution