

基于自适应响应面法的输电塔线体系腐蚀疲劳可靠度研究

张春涛¹, 范文亮², 鲁黎³, 李正良², 刘潇¹

(1. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;
3. 中机中联工程有限公司, 重庆 400039)

摘要: 环境腐蚀和风振疲劳耦合作用下输电塔体的结构性能逐渐退化, 满足预定设计功能的概率减小。然而, 传统响应面法计算结构可靠度时均不能兼顾“效率”和“精度”。为此, 首先通过严格的数学推导给出了交叉项是否存在的判断准则, 将该判断准则与传统二次响应面法相结合建立了考虑部分交叉项的自适应响应面法。然后, 通过 Q345 等边角钢腐蚀疲劳试验结果给出了构件腐蚀疲劳 $t-P-S-N$ 曲线方程, 再与概率论相结合建立了随机疲劳曲线方程。最后, 通过工程算例采用建议自适应响应面法以风速、腐蚀时间和随机腐蚀疲劳 $S-N$ 曲线方程为随机变量对输电塔线体系进行了腐蚀疲劳可靠度研究, 结果表明: ① 交叉项判断准则能有效地保留相互影响随机变量之间的交叉项; ② 建议自适应响应面法在满足精度的同时能有效减少计算量; ③ 构件随机腐蚀疲劳 $S-N$ 曲线模型在结构可靠性分析中简单易行。

关键词: 自适应响应面法; 腐蚀疲劳; 结构可靠性; $S-N$ 曲线; 交叉项

中图分类号: TU312+.3; TU317+.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13465/j.cnki.jvs.2014.11.027

Corrosion fatigue reliability analysis of a transmission tower-line coupled system with adaptive response surface method

ZHANG Chun-tao¹, FAN Wen-liang², LU Li³, LI Zheng-liang², LIU Xiao¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;
2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;
3. China CMCU Engineering Corporation, Chongqing 400039, China)

Abstract: Under the coupling action of environment corrosion and wind-induced vibration fatigue, the structural performances of a transmission tower-line system are degenerated gradually during its service period, and its reliability also decreases. Using the traditional response surface method to calculate the reliability of a structure can not give consideration to both accuracy and efficiency. In order to overcome this problem, an adaptive response surface method and a $S-N$ curve model of Q345 L angle steel were used to study the reliability of a transmission tower-line system here. At first, a criterion for judging the existence of cross terms was derived mathematically. Combing this criterion with the traditional quadratic response surface method, an adoptive response surface method considering parts of cross terms was built. And then, according to the fatigue test results of Q345 L angle steel, a corrosion fatigue $t-P-S-N$ curve equation was presented. Meanwhile, combing this $t-P-S-N$ curve model with the probability theory, a random fatigue $t-P-S-N$ curve equation of Q345 L angle steel was obtained. At last, the corrosion fatigue reliability of the transmission tower-line system was studied based on the proposed $t-P-S-N$ model and the adaptive response surface method. The results showed that ① the criterion is accurate and effective; ② the proposed adoptive response surface method has both a good accuracy and a high efficiency for reliability analysis; ③ the random corrosion fatigue $S-N$ curve model of structural members is simple and easy to analyze structural reliability.

Key words: adaptive response surface method; corrosion fatigue; structural reliability; $S-N$ curve; cross terms

输电塔线体系作为大型复杂结构体系,同时具有高耸结构和大跨度结构的共同特点,对风荷载作用十分敏感^[1-2]。而且整个服役期内由于长期处于环境腐蚀和风致振动作用下,结构会产生腐蚀疲劳损伤累积,导致体系的抗力和性能逐步退化,从而降低结构抵抗

极端环境作用的能力,致使结构实现预定功能的概率减小^[3]。因此,随电力行业的发展环境腐蚀作用下输电塔线体系的风振疲劳可靠度问题不可忽略,为减少或避免由此带来的灾害,必须建立正确评估腐蚀疲劳耦合作用下输电塔线体系的可靠度分析方法。

输电塔线体系的可靠度是在空间桁架和大跨度结构体系的研究基础上发展起来的,受到了广泛关注。Natarajan^[4]以风荷载为随机变量对输电塔的可靠度展开了研究,但是仅对风荷载进行研究还并不能真实反映结构的随机可靠性能;为此,Natarajan等^[5]同时选取风荷载和结构构件抗力为随机变量对输电塔体系的可靠度进行了研究;石少卿等^[6]在Natarajan的研究基础上,分析了塔架结构体系在极值型风荷载作用下的可靠性;高险峰等^[7]在风洞试验的基础上,对高度为345.5 m的江阴长江大跨越500 kV输电塔进行了可靠性研究;与此同时,李杰等^[8]亦采用概率密度演化方法对输电塔线体系的动力可靠度进行了研究;李宏男等^[9]对杆型输电塔体结构的疲劳可靠性展开了研究;李茂华等^[10]通过一次二阶矩方法对1 000 kV输电塔体结构的可靠性能进行了分析。

显然,上述学者对输电塔线体系可靠度的研究已取得了许多显著的成果。然而,上述研究一方面仅是对输电塔的风致动力可靠度进行了研究,而风振疲劳可靠度却由于构件S-N曲线模型的匮乏研究尚少;另一方面,研究中采用的基本理论又多是以一次二阶矩方法为基础展开的,计算量大,效率低下。于是,本文将原理简单、实现容易的响应面法拓展至体系可靠度分析领域。但是目前常用的响应面形式有含交叉项的完全二次多项式和不含交叉项的二次多项式。含交叉项的二次多项式虽然计算精度高,但是待定系数多,需要的抽样点亦多,计算效率低;不含交叉项的响应面法虽然待定系数少,应用方便,只需较少的结构分析即可,但是计算结果精度低。同时,不含交叉项亦意味着各轴之间并未被充分覆盖^[11],这对于随机变量存在相互影响的情形(比如强非线性情形、荷载和结构参数均为随机变量的情形等)显然是不合理的。于是,Faravelli^[12]通过引入误差修正项,Rajashkeher等^[13]引入交叉项和迭代选点,Zheng等^[14],Yu等^[15]通过逐步引入二次项和交叉项对响应面法表达式进行了改进,虽然提高了计算精度,更具有合理性,但亦增加了计算难度,降低了计算效率,实现起来更为复杂。

为此,本文首先综合考虑精度和效率给出了响应面中交叉项是否存在的判断准则,并构造了相应的实现算法,从而建立了可以确定较为合理的含交叉项的二次响应面形式的自适应响应面法。同时,通过Q345等边角钢构件的腐蚀疲劳试验结果和概率论建立了构

件腐蚀疲劳随机S-N曲线模型。最后,根据建议自适应响应面法和构件腐蚀疲劳试验结果对输电塔线体系进行腐蚀疲劳可靠性研究。

1 考虑交叉项的自适应响应面法

1.1 交叉项的判断准则

响应面法的完全二次多项式为

$$\bar{g}(X) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j \geq i}^n a_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

式中, a_0 , a_i , a_{ij} 为待定参数,共 $0.5n^2 + 1.5n + 1$ 个。若以 x_i 为基本变量,式(1)亦可表示为

$$\begin{aligned} \bar{g}(X) = & \left(a_0 + \sum_{l=1}^n a_l x_l + \sum_{l=1}^n \sum_{\substack{m \geq l \\ m \neq i}}^n a_{lm} x_l x_m \right) + \\ & \left(a_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n a_{ik} x_k \right) x_i + a_{ii} x_i^2 \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)可简化为

$$\bar{g}(X) = f_0 + f_1 x_i + a_{ii} x_i^2 \quad (3)$$

式中, f_0 为包含 $n-1$ 个变量的二次多项式, f_1 为包含 $n-1$ 个变量的一次多项式。显然,若 f_0 和 f_1 又以 $x_j (j \neq i)$ 为基本变量进行改写,并分别记为 $\varphi_0(x_j)$ 和 $\varphi_1(x_j)$,式(3)可进一步改写为

$$\bar{g}(X) = \varphi_0(x_j) + \varphi_1(x_j) x_i + a_{ii} x_i^2 \quad (4)$$

显然,式中 $\varphi_0(x_j)$ 和 $\varphi_1(x_j)$ 均为多项式且系数仅包含 $n-2$ 个变量,若这 $n-2$ 个变量均取为常数,则两者即为 x_j 的一元多项式。

为判别响应面中是否存在 x_i 和 x_j 的交叉项,首先令 $x_l (l \neq i, j)$ 为已知量,然后对 x_j 取两个不同的值 $x_j^{(1)}$ 和 $x_j^{(2)}$,将其代入式(4)并计算响应面函数的差值。然后,将变量 x_i 的取值 $x_i^{(1)}$ 和 $x_i^{(2)}$ 代入 $x_j^{(1)}$ 和 $x_j^{(2)}$ 的差值表达式,可得

$$\Delta(\Delta \bar{g}) = [\varphi_1(x_j^{(2)}) - \varphi_1(x_j^{(1)})] \cdot (x_i^{(2)} - x_i^{(1)}) \quad (5)$$

显然

$$\begin{aligned} \Delta(\Delta \bar{g}) = 0 & \Leftrightarrow [\varphi_1(x_j^{(2)}) - \varphi_1(x_j^{(1)})] = 0 \\ \Leftrightarrow \left(a_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i, j}}^n a_{ik} x_k + a_{ij} x_j^{(2)} \right) - \left(a_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i, j}}^n a_{ik} x_k + a_{ij} x_j^{(1)} \right) & = 0 \\ \Leftrightarrow a_{ij} (x_j^{(2)} - x_j^{(1)}) = 0 & \Leftrightarrow a_{ij} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

1.2 自适应响应面法

根据1.1的交叉项判断准则,基于式(1)可以获得自适应响应面的表达式

$$\bar{g}(X) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j > i}^n a_{ij} I[x_i x_j] x_i x_j \quad (7)$$

式中, $I[x_i x_j]$ 为 $x_i x_j$ 的示性函数,即

$$I[x_i x_j] = \begin{cases} 1, & x_i x_j \text{ 存在} \\ 0, & x_i x_j \text{ 不存在} \end{cases}$$

根据交叉项的判断准则,可给出自适应响应面法的实现步骤如下:

(1) 若 $X_i \sim N(\mu_i, \sigma_i)$, 分别取 $x_i = \mu_i$ 和 $x_i = \mu_i + k\sigma_i$ (k 为给定常数), 其余变量均取均值; 若 X_i 为非正态变量, 则 x_i 可取与上述取值具有相同超越概率的值。对 $i = 1, \dots, n$ 重复上述步骤可给出 $n + 1$ 个样本点;

(2) 取 $x_i = \mu_i + k\sigma_i$ ($i = 1, \dots, n$) 和 $x_j = \mu_j + k\sigma_j$ ($j > i$), 其余 $n - 2$ 个变量取均值, 共确定 $(n^2 - n)/2$ 个样本点;

(3) 根据上述样本点计算每组随机变量的对应函数值, 对任意两随机变量可得到 $\Delta g = g(x_1, \dots, x_i + k\sigma_i, \dots, x_n) - g(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$ 和 $\Delta g = g(x_1, \dots, x_{i+k}\sigma_i, \dots, x_j + k\sigma_j, \dots, x_n) - g(x_1, \dots, x_i, \dots, x_j + k\sigma_j, \dots, x_n)$ 。根据交叉项的判断准则, 若两差值不等, 则变量 x_i 和 x_j 之间存在相互影响, 多项式中含有交叉项 $x_i x_j$, 即式(7)中 $I[x_i x_j] = 1$; 若两差值相等, 则多项式中不存在交叉项 $x_i x_j$, 式(7)中 $I[x_i x_j] = 0$ 。

(4) 再增加 n 个样本点, 即 $x_i = \mu_i - k\sigma_i$, 其余变量取均值。只要 k 选择合理, 可保证极限状态曲面穿过样本点区域, 从而具有较高的精度, 参考文献[5]的研究, 可取 $k = 3$;

(5) 利用上述样本点可方便的拟合出自适应响应面。为改善以均值点为中心选点的不足, 文中亦借鉴 Bucher & Bourgund 的迭代改进思想, 即先由上述响应面确定验算点 X^* , 再由下式确定新的选点中心 X_M

$$X_M = \mu + (X^* - \mu) \frac{G(\mu)}{G(\mu) - G(X^*)} \quad (8)$$

式中, μ 代表均值点。然后, 以 X_M 为中心, 类似于步骤(1)和(4)可确定新的 $2n$ 个样本点。

(6) 根据上述样本点可给出最终的响应面, 最后可对此响应面利用 Monte Carlo 法等计算可靠度。

2 腐蚀疲劳随机 S-N 曲线方程的建立

2.1 试验概况

本次试验通过 MTS 电液伺服加载系统(如图 1 所示)对 70 mm × 5 mm 的 Q345 等边角钢进行了腐蚀疲劳试验, 加载频率为 4 Hz。根据角钢构件在输电塔体中的连接构造要求对试件进行开孔加工, 孔洞直径为 20 mm, 试件最终加工状态如图 2 所示。

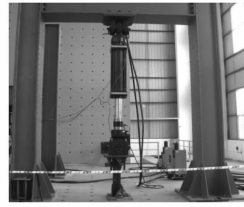


图 1 MTS 电液伺服加载系统
Fig. 1 The MTS computer-actuator on-line system

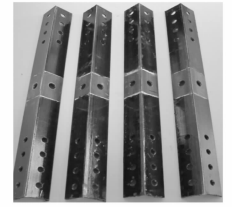


图 2 Q345 等边角钢试件
Fig. 2 Specimens of Q345 equal angles

试验中首先利用浓硫酸、硝酸、盐酸和蒸馏水按照一定比例配置成 PH 值为 2 的酸性溶液^[3]。然后, 采用"浸泡 - 晾晒"间浸式腐蚀方式腐蚀试件, 即首先将试件在酸性溶液中浸泡 2 h, 然后取出试件再在空气中晾晒 2 h, 如此"浸泡 - 晾晒"往复循环 3 次, 共计 12 h 为一次完整腐蚀。腐蚀疲劳试验中采用"腐蚀 - 疲劳"交替循环加载方式, 即先采用上述腐蚀方式将试件腐蚀 12 h 后, 再进行疲劳振动。按此思路, 为了研究 Q345 等边角钢疲劳性能随腐蚀时间的变化规律, 分别对四组试件进行试验, 其中一组为纯疲劳试验; 其余三组为腐蚀疲劳试验, 分别"腐蚀 - 疲劳"交替循环 2 次、3 次和 4 次, 腐蚀时间 t_1 、 t_2 和 t_3 分别为 24 h、36 h 和 48 h。同时, 各组试件的等幅疲劳荷载水平均相同, 共 6 级。每级荷载水平均采用一个角钢构件进行单点试验。

2.2 试验结果

各组试件经不同"腐蚀 - 疲劳"循环次数后的疲劳寿命如表 1 所示。

表 1 不同腐蚀时间的疲劳寿命试验结果

Tab. 1 Fatigue life of specimens within different corrosion time

S_{max}/MPa	N/cycle			
	$t_0 = 0\text{h}$	$t_1 = 24\text{h}$	$t_2 = 36\text{h}$	$t_3 = 48\text{h}$
308.39	2 051	1 744	1 276	1 531
264.91	5 423	5 423	5 594	5 490
221.43	13 789	15 831	12 199	11 964
199.70	27 452	23 037	19 433	19 331
177.96	60 707	57 985	45 743	39 953
156.22	107 389	102 267	83 764	75 372

根据文献[3]建议的单点 - 似然法实现算法, 由表 1 的试验数据可以确定出任意可靠度 P 时试件随腐蚀时间变化的腐蚀疲劳 $t - P - S - N$ 曲线方程, $P = 99\%$ 时, 曲面方程为

$$N_{0.99} = f(S_{max}, t) = (S_{max} - 68.589 \times e^{-0.004743046t - (9.523 - 5.074 \times e^{(\frac{t}{1151.483})})} \times S_{max}^{(-0.13237 + 8.56199 \times 10^{-4} e^{(\frac{t}{11.96051})})} \times (1.14636 \times 10^{13} + 2.09891 \times 10^{13} e^{(\frac{t}{87.38132})}) \quad (9)$$

由上式绘制出不同腐蚀时间的 99% - S - N 曲线和试验结果如图 3 所示

2.3 随机 S-N 曲线方程

首先, 由上述试验结果可以建立具有不同可靠度

的腐蚀疲劳 $t - P - S - N$ 曲线方程。由此曲线方程, 分别计算出腐蚀时间等于 0 h、25 h、50 h、75 h、100 h、125 h 和 150 h 七个等级时, 不同可靠度 P 对应的疲劳寿命 N_p 。然后, 将不同腐蚀时间内的各疲劳寿命 N_p 与 $P =$

50%的疲劳寿命 $N_{0.5}$ 相除,得到不同可靠度 P 对应的疲劳寿命与平均疲劳寿命的比值 γ 。最后,根据 P 与比值 γ 分布情况,由常用的疲劳寿命分布函数正态分布和三参数 Weibull 分布函数计算出的超值累积频率曲线如图 4 所示。

不难发现,相同腐蚀时间内正态分布和 Weibull 分布曲线与计算值吻合良好,差异较小;但是与正态分布曲线相比,Weibull 分布的吻合性更好,更能真实反映

出 γ 的超值累积频率的变化情况。同时,腐蚀时间对 γ 的 P 值亦存在显著影响。例如, γ 为 0.9 时,与腐蚀时间为 0 h 的可靠度 P 值相比,腐蚀时间分别为 50 h、100 h 和 150 h 时,采用正态分布计算的 P 值分别增加了 6.37%、12.12% 和 16.28%,而采用 Weibull 分布计算出的 P 值增加幅度相对较小,增加的百分比分别为 3.44%、6.69% 和 14.75%。因此,Weibull 分布能够更加准确合理地反映 γ 的分布情况。

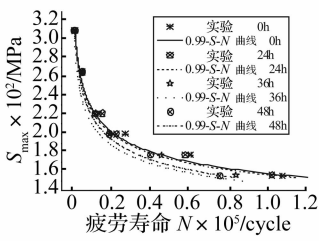
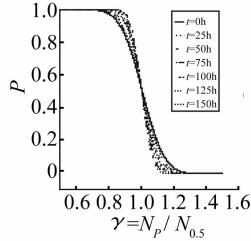


图3 腐蚀时间对构件腐蚀疲劳 $P-S-N$ 曲线的影响

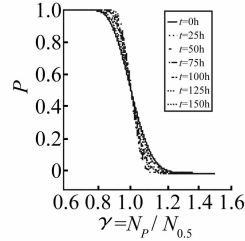
Fig. 3 Effects of corrosion time on $P-S-N$ curves with $P=99\%$



(a) 正态分布

图4 腐蚀时间对超值累积频率的影响

Fig. 4 Effects of corrosion time on excessive accumulation



(b) Weibull分布

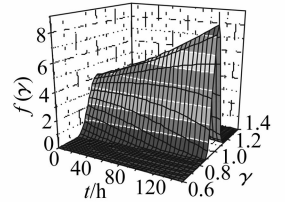


图5 Weibull 分布概率密度随腐蚀时间的变化曲面

Fig. 5 Probability density surface of Weibull distribution in different corrosion time

根据不同腐蚀时间作用下比值 γ 及其对应 P 值可以拟合出对应 Weibull 分布的参数值见于表 2。显然,随腐蚀时间增加试件抗疲劳性能降低,疲劳寿命与均值之间的偏差较小。计算值亦表明了 Weibull 分布各参数随腐蚀时间的变化规律:特征参数 α 随腐蚀时间增加而降低,腐蚀时间由 0 h 增加到 50 h、100 h 和 150 h 时, α 分别降低了 18.20%、33.63% 和 46.44%;形状参数 β 和最小比值 v 随腐蚀时间增加而增大,腐蚀时间增加到 50 h、100 h 和 150 h 时, β 分别增加了 5.02%、9.18% 和 12.75%,而 v 的增加幅度与 β 大致相同,分别增加了 5.13%、9.55% 和 13.26%。

表2 分布函数参数

Tab. 2 Parameters of distribution function

腐蚀时间 t/h	Weibull 分布		
	α	β	v
0	0.258 33	2.700 89	0.774 73
25	0.233 89	2.771 35	0.795 31
50	0.211 32	2.836 37	0.814150
75	0.190 49	2.895 05	0.832 34
100	0.171 46	2.948 95	0.848 73
125	0.154 10	2.998 44	0.863 76
150	0.138 35	3.045 20	0.877 45

首先,由表 2 中各参数值随腐蚀时间的变化规律建立与之对应的变化式 $\alpha(t)$ 、 $\beta(t)$ 和 $v(t)$; 然后,再将各参数变化式代入分布函数即可得到随腐蚀时间变化

的 Weibull 分布函数表达式为

$$f(\gamma) = \frac{\beta(t)}{\alpha(t)} \left(\frac{\gamma - v(t)}{\alpha(t)} \right)^{\beta(t)-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{\gamma - v(t)}{\alpha(t)} \right)^{\beta(t)} \right] \quad (10)$$

式中,各参数随腐蚀时间 t 的变化式为

$$\alpha(t) = -0.0367 + 0.29512e^{-\frac{t}{286.87057}} \quad (11)$$

$$\beta(t) = 3.55146 - \quad (12)$$

$$0.4252e^{\frac{t}{290.12045}} - 0.4252e^{\frac{t}{289.40592}} \quad (12)$$

$$v(t) = 1.04249 - \quad (13)$$

$$0.13393e^{\frac{t}{309.34613}} - 0.13393e^{\frac{t}{309.33415}} \quad (13)$$

显然,将式(11)和式(13)代入式(10)即能给出随腐蚀时间变化的 Weibull 分布表达式,并绘制出相应的概率密度变化曲面,如图 5 所示。曲面形象地反映出了随腐蚀时间 t 增加,随机变量 γ 取值的离散程度逐渐减小的变化规律。若将随机变量 γ 代入可靠度 P 为 50% 的 $S-N$ 曲线方程,便可得到随机腐蚀疲劳 $S-N$ 曲线表达式

$$N = \gamma \cdot N_{0.5} =$$

$$\gamma \cdot f(S_{\max}, t) =$$

$$\gamma \cdot (S_{\max} - 68.589 \times e^{-0.004743046t})^{-(9.523-5.074)} \times e^{\left(\frac{t}{151.483}\right)} \times (3.5428 \times 10^{12} + 7.9356 \times 10^{13} e^{\left(\frac{-t}{100.578}\right)}) \quad (14)$$

3 输电塔线体系疲劳可靠性分析

本节以风速 V 、腐蚀时间 T 、以及 $S-N$ 曲线随机因子 γ 作为随机变量,采用文中建议自适应响应面法拟

合出输电塔线体系的极限状态曲面并进行可靠度分析。其中,随机变量风速 $V \sim N(11, 1.35)$ 和腐蚀时间 $T \sim N(1018, 98)$; 前已述及 Weibull 更能真实地反映 γ 的超值累积频率的变化情况,因此,确定样本点时概率密度函数采用式(10)。塔体服役期为 100 年^[2],损伤 $[D]$ 为 1。

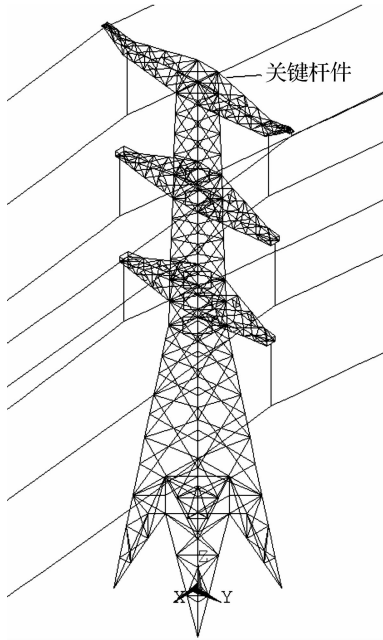


图 7 输电塔分段示意图
Fig. 7 The schematic diagram of transmission tower segments

3.1 腐蚀疲劳损伤计算

首先,根据自适应响应面法的实现算法构造出样本点,再由样本点中各风速值按文献[2, 16-17]的方法拟合出不同的风速功率谱并转化为气动力。然后,对输电塔线体系进行时程分析,找出结构中最不利受力杆件(关键杆件)的应力时程,并采用雨流计数法对应力时程进行整理统计,得到各应力幅及其在整个时程分析中出现的次数,再由文中建立的随机腐蚀疲劳 $S-N$ 曲线模型(即式(14))确定各应力幅的疲劳寿命;最后,结合各应力幅出现的次数和对应的疲劳寿命采用 Miner 准则计算出该平均风速对应功率谱对结构构件造成的实际损伤,由此损伤亦可确定构件或结构的疲劳寿命。

具体计算过程为:由上述步骤可计算出某平均风速对应风速功率谱作用下输电塔线结构体系中待研究杆件的应力时程 $[\sigma_i]$ (应力幅个数 $i = 1, 2, \dots, k$), 并通过雨流法得到应力幅矩阵

$$S = [S_1, S_2, S_3, \dots, S_k] \quad (15)$$

显然,将式(15)确定的应力幅和各样本点中的 t 和 γ 代入式(14)可计算出各应力幅对应的疲劳寿命矩

阵,即

$$N = [N_1, N_2, N_3, \dots, N_k] \quad (16)$$

同时,由雨流计数法经统计分析可得到整个计算期内式(15)中各等效应力幅出现的循环次数

$$n = [n_1, n_2, n_3, \dots, n_k] \quad (17)$$

根据 Miner 累积损伤理论,即可得到杆件的损伤矩阵

$$d = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (18)$$

由式(18)即可计算出各平均风速的模拟风场在计算期对构件造成的损伤。

3.2 疲劳损伤可靠性分析

腐蚀疲劳作用下结构可靠度功能函数可表示为

$$g(x) = D - d(x) \quad (19)$$

式中, $d(x)$ 表示由式(18)确定的腐蚀疲劳损伤值, $x = (v, t, \gamma)$ 表示基本随机变量。显然, $d(x)$ 为隐式函数,因此 $g(x)$ 亦为隐式函数,可用建议自适应响应面法拟合出 $g(x)$ 的显示表达式并求解其可靠度,具体计算过程如下:

① 由交叉项判断准则确定交叉项 $vt, v\gamma$ 和 γt 的存在性。根据建议算法,首先由 1.2 节步骤(1)~(2)选取 4 个样本点,再按步骤(3)判断交叉项是否存在,并确定自适应响应面的形式,详细过程示于表 3。

表 3 自适应响应面形式的确定过程

Tab. 3 The format of adaptive response surface

	差值	样本点	函数值
$x_1 \dots$	$P_1(11, 1019, 1.003)$,	$g_1 = 0.260$	$g_2 - g_1 = -2.65$
	$P_2(15.05, 1019, 1.003)$	$g_2 = -2.387$	
$x_2 \dots$	$P_3(11, 1313.46, 1.003)$,	$g_3 = -0.393$	$g_4 - g_3 = -2.41$
	$P_4(15.05, 1313.46, 1.003)$	$g_4 = -2.800$	
$x_1 \dots$	$P_1(11, 1019, 1.003)$,	$g_1 = 0.260$	$g_2 - g_1 = -2.65$
	$P_2(15.05, 1019, 1.003)$	$g_2 = -2.387$	
$x_3 \dots$	$P_5(11, 1019, 1.227)$,	$g_5 = 0.265$	$g_6 - g_5 = -2.65$
	$P_6(15.05, 1019, 1.227)$	$g_6 = -2.385$	
$x_2 \dots$	$P_1(11, 1019, 1.003)$,	$g_1 = 0.260$	$g_3 - g_1 = -0.65$
	$P_3(11, 1313.46, 1.003)$	$g_3 = -0.393$	
$x_3 \dots$	$P_5(11, 1019, 1.227)$,	$g_5 = 0.265$	$g_5 - g_5 = -0.65$
	$P_7(11, 1313.46, 1.227)$	$g_7 = -0.381$	
结论	含有交叉项 $x_1 x_2$, 响应面形式为: $\alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 + \alpha_{11} x_1^2 + \alpha_{22} x_2^2 + \alpha_{33} x_3^2 + \alpha_{12} x_1 x_2$		

② 按照步骤(4)确定初始响应面为

$$g(x) = 2.4216 + 1.1147v - 0.0014t - 10.0275\gamma - 0.0742v^2 - 4.0869 \times 10^{-7}t^2 + 5.3396\gamma^2 + 0.00014vt \quad (20)$$

利用 Monte Carlo 法可计算出失效概率为 22.88%

(抽样数为 1×10^5 , 下同)。

③ 同时由 JC 法给出其验算点 X^* 的坐标为 (13.1, 1.018, 4, 1)。然后, 根据步骤(5)可确定新的选点中心和其他 6 个新的样本点。综合利用上述样本点进行回归分析, 可确定最终的自适应响应面为

$$g(\mathbf{x}) = -6.3112 + 0.8341v + 0.0040t + 4.5901\gamma - 0.0603v^2 - 3.6976 \times 10^{-6}t^2 - 2.0446\gamma^2 + 0.0002vt \quad (21)$$

与之对应的失效概率为 36.92%。

同时, 采用传统的不含交叉项的响应面法, 根据 Bucher 选点方案, 通过两次迭代得到的响应面为

$$g(\mathbf{x}) = -7.5896 + 0.9581v + 0.0051t + 4.4307\gamma - 0.05668v^2 - 3.01188 \times 10^{-6}t^2 - 2.03818\gamma^2 \quad (22)$$

对应的失效概率为 19.52%。显然, 式(21)因为考虑了存在相互影响的随机变量之间的交叉项, 其失效概率与不考虑交叉项的式(22)存在较大差异。最后, 由文献[3]的方法, 采用 ANSYS 中的 Monte Carlo 法即可验证结构可靠度分析中建议自适应响应面法的有效性。

4 结 论

本文首先通过严格的数学推导给出了交叉项是否存在的判断准则, 考虑了相互影响随机变量之间的交叉项, 舍弃了不存在的交叉项, 建立了更为合理和精确的自适应响应面法。同时, 为了克服传统材性试件 $S-N$ 曲线模型的不足, 文中通过 Q345 等边角钢的腐蚀疲劳试验建立了构件随机腐蚀疲劳 $S-N$ 曲线模型。最后, 结合自适应响应面法和构件随机 $S-N$ 曲线模型对输电塔线体系进行了疲劳可靠性分析, 验证了随机变量交叉项判断准则能有效地保留相互影响随机变量之间的交叉项; 建议自适应响应面法在保证精度的同时能显著减少计算量; 构件随机腐蚀疲劳 $S-N$ 曲线模型在结构可靠度分析中既简单易行又能考虑构件截面形式的影响。

参 考 文 献

- [1] 肖正直. 特高压输电塔风振响应及等效风荷载研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009, 5.
- [2] 汪之松. 特高压输电塔线体系风振响应及风振疲劳性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009, 9.
- [3] 张春涛. 腐蚀环境和风振疲劳耦合作用下输电塔线体系疲劳性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012, 12.
- [4] Natarajan K. Wind load analysis-probabilistic approach national seminar on analysis and design for wind loads[J]. Indian Concrete Institute (ICI), Madras, 1991: 35-46.
- [5] Natarajan K, Santhakumar A R. Reliability-based optimization of transmission line towers [J]. Computers & Structures, 1995, 55(3): 387-403.
- [6] 石少卿, 童卫华, 姜节胜, 等. 极值型风荷载作用下大型

结构可靠性分析[J]. 应用力学学报, 1997, 14(4): 142-147.

SHI Shao-qing, Tong Wei-hua, Jiang Jie-sheng, et al. System reliability analysis of large structure under Gumbel distribution wind loads [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 1997, 14(4): 142-147.

- [7] 高险峰, 屠海明. 江阴长江大跨越输电塔节段静力试验模型可靠度分析[J]. 特种结构, 2004, 21(3): 15-17. GAO Xian-feng, TU Hai-ming. Reliability analysis of mockup experiment of Jiang Yin long-span transmission tower [J]. Special Structures, 2004, 21(3): 15-17.
- [8] 李杰, 何军, 李天. 大型电力网络系统抗震可靠度分析[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, 35(1): 7-11. LI Jie, HE Jun, LI Tian. Seismic reliability analysis of large electric power systems [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering & Architecture, 2002, 35(1): 7-11.
- [9] 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[J]. 土木工程学报, 2008, 41(11): 31-38. LI Hong-nan, BAI Hai-feng. Dynamic behavior and stability of transmission tower-line system under wind (rain) forces [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(11): 31-38.
- [10] 李茂华. 1000kV 级特高压输电杆塔结构可靠度研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012, 4.
- [11] Bucher C G, Bourgund U. A fast and efficient response surface approach for structural reliability problems [J]. Structural Safety, 1990, 7(1): 57-66.
- [12] Faravelli L. Response surface approach for reliability analysis [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1989, 115(12): 2763-2781.
- [13] Rajashekher M R, Ellingwood B R. A new look at the response surface approach for reliability analysis [J]. Structural Safety, 1993, 12(3): 205-220.
- [14] Zheng Y, Das P K. Improved response surface method and its application to stiffened plate reliability analysis [J]. Engineering Structures, 2000, 22(5): 544-551.
- [15] Yu L, Das P K, Zheng Y L. Stepwise response surface method and its application in reliability analysis of ship hull structure [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2002, 124(4): 266-270.
- [16] 张春涛, 李正良, 范文亮, 等. 考虑风向风速联合分布的输电塔线体系风振疲劳研究[J]. 工程力学, 2013, 30(3): 315-322. ZHANG Chun-tao, LI Zheng-liang, FAN Wen-liang, et al. Study on wind-induced fatigue of transmission tower-line coupled system considering the joint distribution of wind speed and wind direction [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(3): 315-322.
- [17] 张春涛, 李正良, 范文亮, 等. 遮挡山体对输电塔线体系风振疲劳的影响[J]. 振动与冲击, 2013, 32(10): 184-191. ZHANG Chun-tao, LI Zheng-liang, FAN Wen-liang, et al. Effect of occluding hills on wind-induced fatigue of transmission tower-line coupled system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(10): 184-191.