

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.052

引用格式:王松涛,冯衡,曾二贤,等.基于规范表达式的服役杆塔抗风时变可靠度分析[J].重庆大学学报,2026,49(1): 70-81.



基于规范表达式的服役杆塔抗风时变可靠度分析

王松涛¹,冯衡¹,曾二贤¹,杨雅婷^{2a},余书君^{2a},李正良^{2a,2b}

(1. 中南电力设计院有限公司,武汉 430060; 2. 重庆大学 a. 土木工程学院;

b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室,重庆 400045)

摘要:基于规范的输电杆塔可靠度分析通常未考虑腐蚀对结构性能的影响,对风荷载效应比取值范围的建议较为主观。文中以服役杆塔为研究对象,提出一种基于规范表达式的抗风时变可靠度分析方法。首先,结合环境与材料类型对腐蚀速率的影响,建立考虑腐蚀的抗力退化模型;其次,将风荷载效应比作为随机变量,基于真实杆塔数据进行分布拟合获得其统计信息;然后,采用当量正态化法(JC 法)计算基于规范表达式的服役杆塔的可靠指标;最后,定量分析规范表达式中不同参数的取值对可靠指标的影响。结果表明,风荷载效应比近似服从广义极值分布,且与服役杆塔可靠指标密切相关;此外,大气腐蚀环境、构件初始厚度以及风荷载调整系数均对可靠度有一定影响,可靠指标下降速率随大气腐蚀等级的升高而降低;腐蚀对构件可靠指标的影响程度随构件初始厚度的增加而减小;可靠指标随风荷载调整系数的增大而增大。

关键词:输电杆塔;时变可靠度;抗力退化模型;设计规范;风荷载效应比

中图分类号:TM75;O213

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2026)01-070-12

Time-dependent reliability analysis of service towers under wind load based on a standard formula

WANG Songtao¹, FENG Heng¹, ZENG Erxian¹, YANG Yating^{2a}, YU Shujun^{2a}, LI Zhengliang^{2a,2b}

(1. Zhongnan Electric Power Design Institute Co. Ltd., Wuhan 430060, P. R. China; 2a. School of Civil Engineering; 2b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Conventional reliability assessments of transmission towers using standard calculation formulas usually neglect corrosion-induced performance degradation, and the recommended range of wind load effect ratios is typically subjective. To address these limitations, this study focuses on service towers and proposes a time-dependent reliability analysis method under wind load within the framework of the standard formula. First, a resistance degradation model considering corrosion effects is developed by integrating environmental conditions

收稿日期:2024-01-29 网络出版日期:2024-09-11

基金项目:中南院重大科技专项(40-1A-KY202019-T201);国家电网科学技术项目(SGZJJY00SJJS2310014)。

Supported by the Research on Structural Reliability Assessment and Life Prediction of Overhead Transmission Lines (40-1A-KY202019-T201), the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (SGZJJY00SJJS2310014).

作者简介:王松涛(1989—),男,高级工程师,硕士,主要从事输电线路结构设计工作,(E-mail) 772703979@163.com。

通信作者:李正良,男,教授,博士,(E-mail) lizhengl@hotmail.com。

and material type into the corrosion rate. Second, the wind load effect ratio is used as a random variable and its statistical characteristics are obtained by distribution fitting using real tower monitoring data. Third, the equivalent normalization (JC) method is used to calculate the reliability index of the service tower based on the standard formula. Finally, the sensitivity of the reliability index to key parameters in the standard formula is quantitatively evaluated. Results show that the wind load effect ratio approximately obeys a generalized extreme value distribution and exhibits strong correlation with tower reliability. Moreover, member initial thickness, atmospheric corrosivity and wind load adjustment coefficients all significantly influence reliability evolution. Specifically, higher atmospheric corrosivity accelerates reliability degradation, while the influence of corrosion decreases as member initial thickness increases. Additionally, a higher wind load adjustment coefficient corresponds to a higher reliability index.

Keywords: transmission tower; time-dependent reliability; resistance degradation model; design specification; wind load effect ratio

输电杆塔一旦发生倒塌、破坏,就会对生命安全及社会财产造成威胁,其服役期间的可靠性一直倍受关注。目前,基于规范设计的杆塔结构的可靠性分析虽已有大量研究^[1-9],但往往假设抗力为时不变随机变量,服役输电杆塔,由于受到长年累月的自然腐蚀影响,其抗力会随着时间逐步退化,可靠度也随之改变。虽已有一些针对抗力退化模型的研究^[10-15],但考虑抗力退化的时变可靠度研究仍较缺乏。传统的抗力退化模型采用服役结构的初始抗力乘以单调递减的抗力退化函数^[12-13],抗力退化函数的常见形式有幂函数模型、指数函数模型等。姚继涛等^[14]针对拟建结构和服役结构,分别建立了不同的独立增量抗力概率模型;杨波等^[15]通过将防腐措施有效时间、环境影响系数、防腐性能系数引入到抗力退化函数中,构建出一个考虑较为全面多元的抗力退化模型。上述模型大多假定抗力的退化规律是确定性的,与实际抗力衰减规律不完全相符。

由于杆塔结构的设计规范是在建筑结构规范的基础上修订的,部分参数的要求与实际存在差异,其中,荷载效应比是一个关键性参数。大多数建筑结构的荷载效应比都不大于3^[16],而输电杆塔属于典型的高柔结构,尽管钢材密度较大,但是由于整体上的镂空式布置,结构自重在总的荷载中占比不大;由于杆塔结构高度较高,风荷载是主要的控制荷载之一,风荷载与永久荷载的比值较常规建筑结构有显著差异。针对该问题,许多学者对荷载效应比的取值给出了不同建议范围。冯云芬等^[17]通过校准规范表达式中随机变量的统计参数,计算了荷载效应比在0.1~100时杆塔的平均可靠度;刘堃等^[18]以输电杆塔轴心拉压构件为研究对象,研究了0.1~8.0的荷载效应比与可靠度的关系;吴海洋等^[19]采用JC法计算了荷载效应比取4.0~10.0时的输电杆塔可靠指标。以上荷载效应比的取值范围依据现行规范,但仍具有主观性,且未考虑针对服役杆塔荷载效应比的随机性。

综上所述,针对服役输电杆塔,文中提出一种基于规范表达式的抗风时变可靠度分析方法。首先,建立考虑腐蚀影响的抗力退化模型,并给出抗力的统计参数,再引入规范表达式,给出荷载以及荷载效应比的统计信息,在此基础上进行时变可靠度分析,对不同参数的取值影响进行定量分析。

1 考虑腐蚀的抗力退化模型

与传统模型相似,文中抗力退化模型采用以时间为变量的抗力退化函数 $g(t)$ 乘以抗力初始值 R_0 的形式^[12],表达式为

$$R(t) = g(t) R_0. \quad (1)$$

1.1 抗力退化函数

在腐蚀作用下,服役杆塔的劣化主要体现在材料腐蚀上^[20-21],假设构件截面面积减小是抗力退化的主要原因。考虑将构件截面面积的失厚率 $\eta(t)$ 作为腐蚀退化模型的重要参数,得到结构腐蚀退化系数 $g(t)$ 的表达式为

$$g(t) = 1 - \eta(t) = 1 - D(t)/\tau, \quad (2)$$

式中: τ 为构件的初始厚度; $D(t)$ 为第 t 年时的构件表面腐蚀深度。由文献[22-25]可知, 在大气环境下, 钢的腐蚀深度呈正态分布, 其变异系数 $\delta_D = 0.33$, 均值 μ_D 为

$$\begin{cases} \mu_D = r_{\text{corr}} t^b, & t \leq 20; \\ \mu_D = r_{\text{corr}} [20^b + b(20^{b-1})(t-20)], & t > 20. \end{cases} \quad (3)$$

式中: b 为金属环境特性参数, 在无实验数据的情况下, 钢材取 0.523; r_{corr} 为第一年平均腐蚀速率, $\mu\text{m/a}$; 其取值与环境和材料类型有关, 部分地区不同钢材的 r_{corr} 取值如表 1 所示。

表 1 部分地区不同钢材第一年腐蚀速率数据

Table 1 First year corrosion rate data for different steels in the regions

钢材	地区 (大气腐蚀等级)			
	琼海(C3)	武汉(C4)	江津(C5)	万宁(CX)
Q235	36.00	58.00	88.00	107.20
16Mn	25.00	46.20	77.30	112.10

假设, τ 为常数, $g(t)$ 服从正态分布, 其均值、标准差以及变异系数为

$$\mu_g = 1 - \mu_D / \tau, \quad (4)$$

$$\sigma_g = \sigma_D / \tau = 0.33 \mu_D / \tau, \quad (5)$$

$$\delta_g = \sigma_g / \mu_g = 0.33 \mu_D / (\tau - \mu_D). \quad (6)$$

式中: μ_g 为均值; σ_g 为标准差; δ_g 为变异系数。

1.2 抗力统计特征

若不考虑腐蚀影响, 对于轴心受拉构件与轴心受压构件, 其抗力初始值的表达式分别为

$$R_0^{(h)} = Q^{(h)} m A_0 f, \quad (7)$$

$$R_0^{(p)} = Q^{(p)} \varphi m A_0 f, \quad (8)$$

式中: $Q^{(h)}$ 、 $Q^{(p)}$ 分别为 $R_0^{(h)}$ 、 $R_0^{(p)}$ 对应的计算模式不定性系数; φ 为轴压构件稳定系数; m 为构件强度折减系数; A_0 为构件的初始截面面积; f 为材料强度。

由文献[17]可知, 抗力初始值服从对数正态分布, $R_0^{(h)}$ 与 $R_0^{(p)}$ 的均值系数分别为

$$k_{R_0^{(h)}} = 1.134, \quad (9)$$

$$k_{R_0^{(p)}} = 1.185. \quad (10)$$

将式(7)代入式(1)可得, 轴心受拉构件的抗力时变表达式为

$$R^{(h)}(t) = g(t) R_0^{(h)}, \quad (11)$$

基于式(11), $R^{(h)}(t)$ 的均值与变异系数为

$$\mu_{R^{(h)}} = \mu_g \mu_{R_0^{(h)}} = \mu_g R_k^{(h)} k_{R_0^{(h)}}, \quad (12)$$

$$\delta_{R^{(h)}} = \sqrt{\delta_{Q^{(h)}}^2 + \delta_{A_0}^2 + \delta_f^2 + \delta_g^2}, \quad (13)$$

式中: $\mu_{R_0^{(h)}}$ 为 $R_0^{(h)}$ 的均值; $R_k^{(h)}$ 为轴心受拉构件抗力初始值的标准值; $\delta_{Q^{(h)}}$ 、 δ_{A_0} 、 δ_f 分别为变量 $Q^{(h)}$ 、 A_0 、 f 的均值系数和变异系数。

同理, 轴心受压构件的均值与变异系数为

$$\mu_{R^{(p)}} = \mu_g R_k^{(p)} k_{R_0^{(p)}}, \quad (14)$$

$$\delta_{R^{(p)}} = \sqrt{\delta_{Q^{(p)}}^2 + \delta_{\varphi}^2 + \delta_{A_0}^2 + \delta_f^2 + \delta_g^2}, \quad (15)$$

式中: $R_k^{(p)}$ 为轴心受压构件抗力初始值的标准值; $k_{R_0^{(p)}}$ 、 k_{φ} 与 $\delta_{Q^{(p)}}$ 、 δ_{φ} 分别为变量 $Q^{(p)}$ 、 φ 的均值系数和变异系数。

以上变量的统计信息如表2所示^[26],结合式(4)(6)(9)(10)和式(12)~式(15)可得,轴心受拉构件与轴心受压构件的抗力统计参数为

$$\mu_{R^{(h)}} = 1.134(1 - \mu_D/\tau) R_k^{(h)}, \quad (16)$$

$$\delta_{R^{(h)}} = \sqrt{0.0138 + [0.33\mu_D/(\tau - \mu_D)]^2}, \quad (17)$$

$$\mu_{R^{(p)}} = 1.185(1 - \mu_D/\tau) R_k^{(p)}, \quad (18)$$

$$\delta_{R^{(p)}} = \sqrt{0.02274 + [0.33\mu_D/(\tau - \mu_D)]^2}. \quad (19)$$

表2 构件抗力统计参数

Table 2 Statistical parameters of component resistance

变量	统计参数		概率分布
	k	δ	
$Q^{(h)}$	1.050	0.070	正态
$Q^{(p)}$	1.070	0.096	正态
A_0	1.000	0.050	正态
f	1.080	0.080	正态
φ	1.025	0.068	正态

2 考虑腐蚀的服役杆塔抗风可靠度分析

2.1 考虑腐蚀的服役杆塔抗风可靠度功能函数

在风荷载作用下,考虑腐蚀的服役输电塔构件时变功能函数为

$$Z(t) = R(t) - S_G - S_w, \quad (20)$$

式中: S_G 和 S_w 分别为结构的永久荷载效应和风荷载效应。若已知上式中各随机变量的均值、变异系数、分布类型,即可利用JC法^[27-28]计算其可靠度。

对于抗力 $R(t)$,由第2节分析可知,在已知构件厚度、腐蚀深度的情况下,可求得抗力的变异系数,但其均值还与抗力初始值的标准值 R_k 有关。在极限状态下, R_k 的表达式为

$$R_k = \gamma_R \gamma_0 (\gamma_G S_{Gk} + \gamma_Q \beta_C S_{Wk}), \quad (21)$$

式中: γ_R 、 γ_G 、 γ_Q 分别为抗力分项系数、永久荷载分项系数与风荷载分项系数,其取值分别为1.1、1.2、1.4^[29]; γ_0 为杆塔结构重要性系数; β_C 为风荷载调整系数; S_{Wk} 、 S_{Gk} 分别为风荷载效应标准值与永久荷载效应标准值,这两者的比值被定义为风荷载效应比,即 $\rho_w = S_{Wk}/S_{Gk}$,其取值越大,结构受风荷载影响程度越大。假设, $S_{Gk}=1$,式(21)可简化为

$$R_k = \gamma_R \gamma_0 (\gamma_G + \gamma_Q \beta_C \rho_w), \quad (22)$$

对于 S_G 和 S_w ,参考已有研究^[30-31], S_G 服从正态分布,均值 $\mu_G=1.06$,变异系数 $\delta_G=0.07$;50年设计基准期的风荷载 S_w 服从极值I型分布,均值 $\mu_{wT}=0.998\rho_w$,变异系数 $\delta_{wT}=0.193$ 。

由上述分析可知,风荷载效应比 ρ_w 的取值是影响输电杆塔可靠指标的重要因素之一。文中考虑将 ρ_w 作为随机变量,通过对杆塔构件样本的统计拟合,得到反映荷载效应比统计规律的分布拟合曲线。

1)样本选取。

文中选取自重荷载和风荷载共同作用下的杆塔构件为样本。考虑到按构造要求设计的某些辅材不受设计表达式的控制,仅选择杆塔应力百分比大于30%的构件进行统计分析,共抽取992个杆塔构件样本。

2)荷载效应比分布拟合。

文中采用 MATLAB 中的 Distribution fitter 工具箱,对选取的构件样本点进行分布函数及密度函数的拟合,结果如图 1 和图 2 所示。由图可知, ρ_w 近似服从广义极值分布,其对应的均值 $\mu_{\rho_w}=5.972 2$,标准差 $\sigma_{\rho_w}=3.856 9$ 。

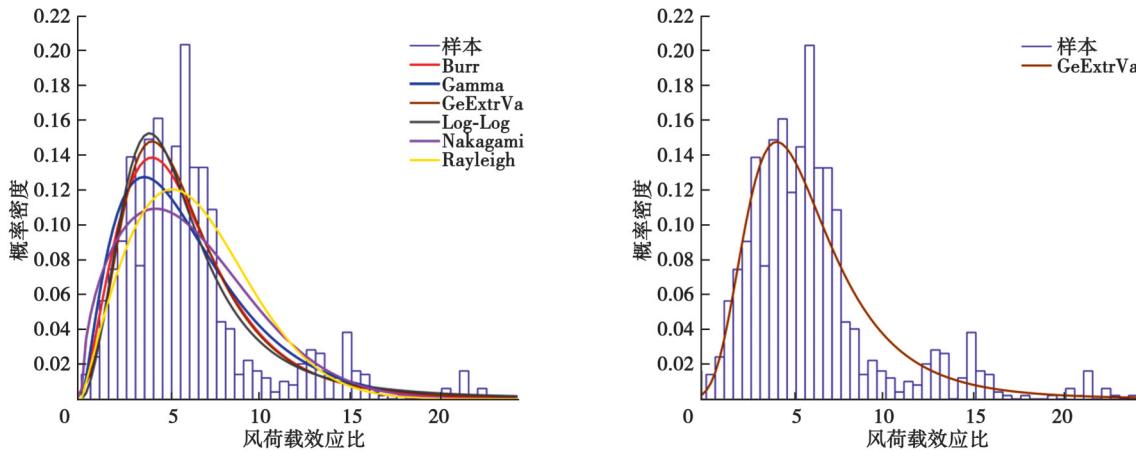


图 1 风荷载效应比概率密度函数

Fig. 1 The probability density function of wind load effect ratio

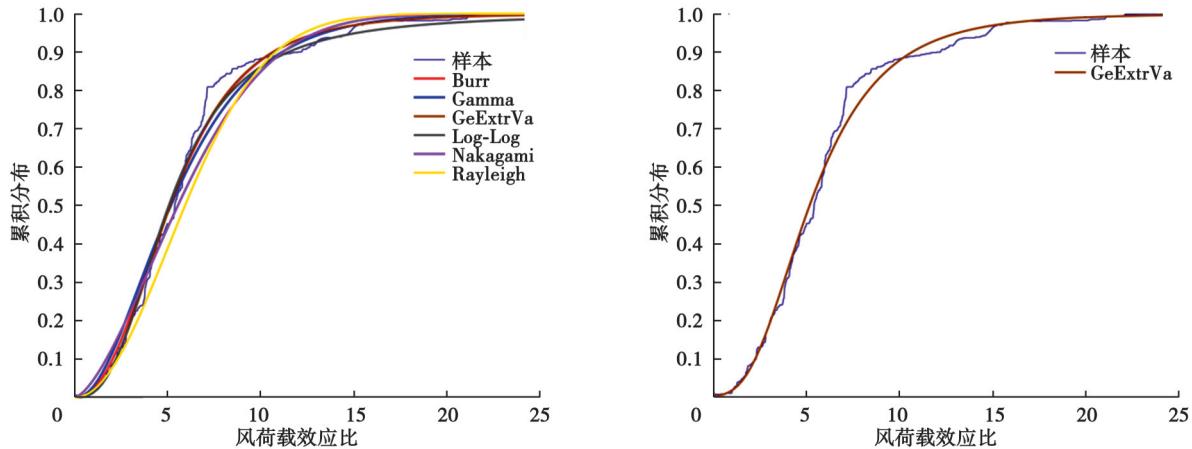


图 2 风荷载效应比累积分布函数

Fig. 2 The cumulative distribution function of wind load effect ratio

2.2 服役杆塔抗风时变可靠度分析步骤

在确定服役杆塔的时变功能函数及各随机变量的统计特性后,可对结构的抗风可靠指标进行计算。服役杆塔抗风时变可靠度的计算流程如下。

1)考察时段选取。

假设,考察时段总时长为 T ,将其分为 N 个时段,依次为 $[0, t_1], [0, t_2], \dots, [0, t_N]$,这里取 $N=10$,其中 $t_1=5$, $t_2=10$, $t_3=15$, $t_{10}=50$ 。

2)时段 $[0, t_k]$ 的构件可靠度分析。

①参考表 1 得到目标地区第 1 年的腐蚀速率 r_{corr} ,将其代入式(3),得到构件腐蚀深度均值 μ_D ;

②将 $t=t_k$ 带入式(20)中,得到 t_k 时刻的功能函数表达式,再基于荷载效应比的拟合分布对 ρ_w 进行抽样,根据前述随机变量的统计特性,计算功能函数中各随机变量的均值及标准差;

③采用 JC 法计算 t_k 时刻构件的可靠指标。

3)对下一个时段 $[0, t_{k+1}]$ 进行可靠度分析,返回步骤 2,进行 $t=t_{k+1}$ 的可靠度分析,直至 $k=10$ 。

3 可靠指标的影响参数分析

基于上述时变可靠指标计算方法,分别讨论荷载效应比、大气腐蚀环境、构件厚度以及风荷载调整系数的取值对可靠指标的影响。

3.1 荷载效应比取值范围的影响分析

假设,参数 $\tau=5$ mm, $\gamma_0=1$, $\beta_c=1$,以江津(C5)的大气腐蚀环境为研究对象,对比不同荷载效应比在不同典型时刻下,Q235和Q355(取表1中16Mn的参数)的时变可靠度,其可靠指标如表3和表4所示。

表3 时变情况下不同荷载效应比的可靠指标(Q235)

Table 3 The reliability index of different load effect ratio under time-dependant condition (Q235)

时段	荷载效应比		
	0.1~100	4~10	分布拟合法
t_0	2.461(2.461)	2.521(2.513)	2.565(2.545)
t_1	2.299(2.309)	2.352(2.353)	2.388(2.377)
t_2	2.224(2.237)	2.272(2.277)	2.305(2.298)
t_3	2.163(2.179)	2.208(2.216)	2.237(2.235)
t_4	2.109(2.129)	2.151(2.163)	2.178(2.179)
t_5	2.058(2.080)	2.097(2.112)	2.121(2.125)
t_6	2.005(2.030)	2.041(2.059)	2.062(2.070)
t_7	1.951(1.979)	1.983(2.005)	2.001(2.014)
t_8	1.895(1.926)	1.924(1.949)	1.939(1.955)
t_9	1.837(1.872)	1.863(1.892)	1.874(1.895)
t_{10}	1.779(1.817)	1.800(1.833)	1.808(1.834)

注:括号内为杆塔受压构件的平均可靠指标。

表4 时变情况下不同荷载效应比的可靠指标(Q355)

Table 4 The reliability index of different load effect ratio under time-dependent condition (Q355)

时段	荷载效应比		
	0.1~100	4~10	分布拟合法
t_0	2.461(2.462)	2.521(2.513)	2.565(2.545)
t_1	2.320(2.328)	2.374(2.373)	2.410(2.399)
t_2	2.255(2.266)	2.305(2.308)	2.337(2.331)
t_3	2.202(2.216)	2.249(2.255)	2.279(2.276)
t_4	2.156(2.173)	2.201(2.210)	2.228(2.228)
t_5	2.112(2.131)	2.154(2.166)	2.179(2.182)
t_6	2.067(2.089)	2.106(2.121)	2.129(2.135)
t_7	2.021(2.045)	2.057(2.075)	2.077(2.087)
t_8	1.973(2.000)	2.007(2.027)	2.024(2.038)
t_9	1.925(1.955)	1.956(1.979)	1.970(1.987)
t_{10}	1.875(1.908)	1.903(1.930)	1.914(1.936)

注:括号内为杆塔受压构件的平均可靠指标。

由上可知,风荷载效应比的取值范围对构件平均可靠指标有一定的影响,且随着服役时间的增长,不同取值方法的差异性减小。为了得到更客观的结果,采用分布拟合法更为合理。

3.2 大气腐蚀环境的影响分析

假设,参数 $\tau=5 \text{ mm}$, $\gamma_0=1$, $\beta_c=1$, 以琼海(C3)、武汉(C4)、江津(C5)、万宁(CX)4个不同地区的大气腐蚀环境为研究对象,对比不同典型时刻下Q235和Q355的时变可靠度。可靠指标变化趋势如图3和图4所示,对应可靠指标如表5和表6所示。

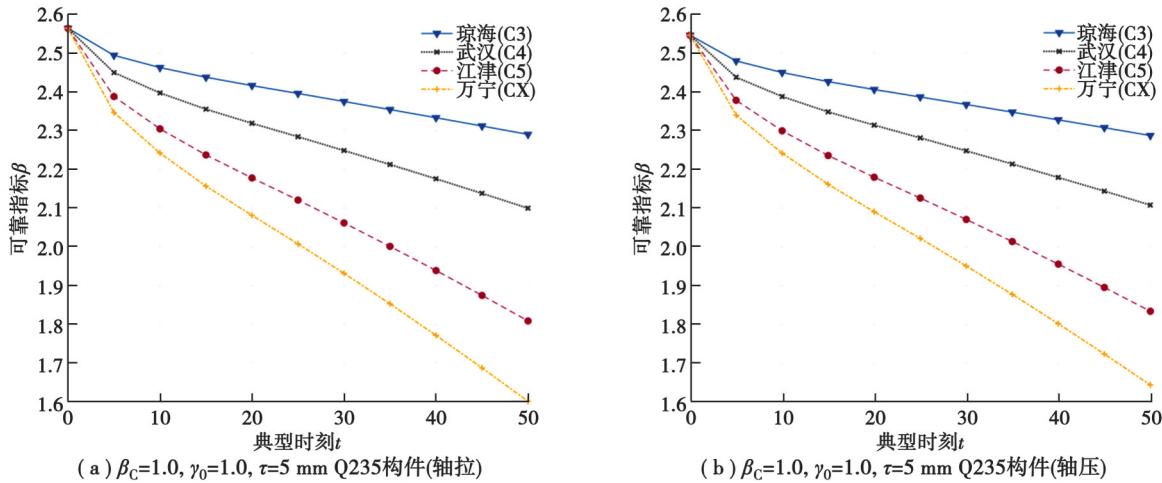


图3 大气腐蚀环境对可靠指标的影响(Q235)

Fig. 3 The influence of atmospheric corrosive environment on the reliability index (Q235)

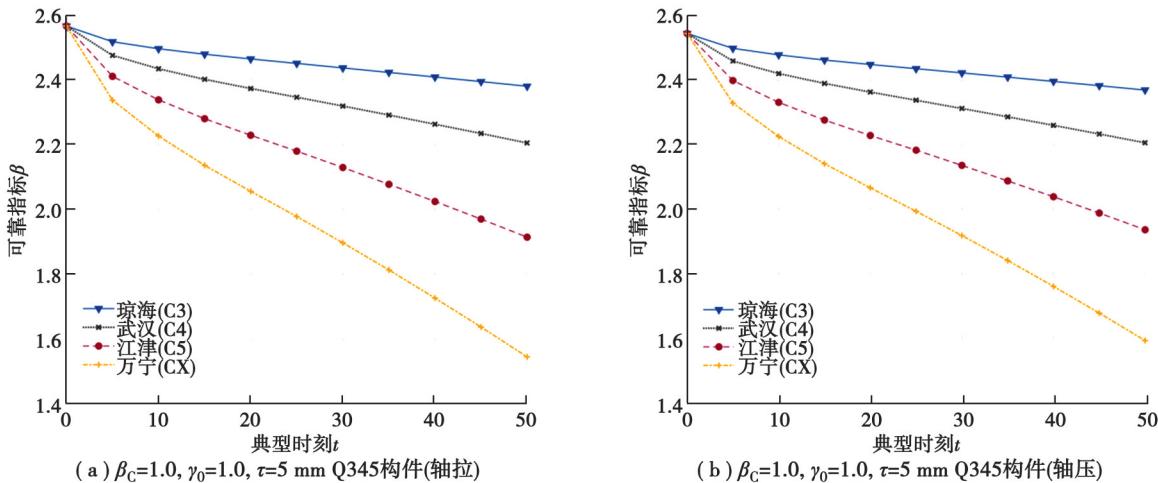


图4 大气腐蚀环境对可靠指标的影响(Q355)

Fig. 4 The influence of atmospheric corrosive environment on the reliability index (Q355)

由上可知,不同大气腐蚀环境对构件的腐蚀程度、抗力退化程度及平均可靠指标有着决定性影响。在腐蚀开始阶段,轴心受拉构件的可靠度大于轴心受压构件,但当腐蚀达到一定深度后,轴心受压构件的可靠度开始高于轴心受拉构件。以轴心受拉构件为例,构件的初始可靠指标为2.565,在达到设计基准期时,C3腐蚀等级下的构件可靠指标降低至2.379,下降约10%;C4、C5、CX腐蚀等级下的构件可靠指标降低至2.205、1.914、1.545,腐蚀等级每增长一级,可靠指标下降比例增加约6%~8%,说明腐蚀等级越高,结构可靠度下降越快。同时,抗力退化速度及可靠度下降速度随着时间的推移逐渐变缓直至匀速下降,各方法之间的可靠度差异性逐渐增大。

表5 不同大气腐蚀环境下的构件平均时变可靠指标(Q235)

Table 5 The average time-dependent reliability index of components under different atmospheric corrosive environment (Q235)

时段	地区 (大气腐蚀等级)			
	琼海(C3)	武汉(C4)	江津(C5)	万宁(CX)
t_0	2.565(2.545)	2.565(2.545)	2.565(2.545)	2.565(2.545)
t_1	2.495(2.479)	2.450(2.437)	2.388(2.377)	2.347(2.339)
t_2	2.463(2.449)	2.398(2.387)	2.305(2.298)	2.242(2.241)
t_3	2.438(2.425)	2.356(2.347)	2.237(2.235)	2.157(2.161)
t_4	2.417(2.405)	2.319(2.313)	2.178(2.179)	2.081(2.090)
t_5	2.396(2.386)	2.284(2.280)	2.127(2.125)	2.007(2.022)
t_6	2.376(2.366)	2.249(2.247)	2.062(2.070)	1.931(1.951)
t_7	2.355(2.347)	2.213(2.213)	2.001(2.014)	1.853(1.877)
t_8	2.333(2.327)	2.176(2.179)	1.939(1.955)	1.771(1.802)
t_9	2.312(2.307)	2.138(2.143)	1.874(1.895)	1.687(1.724)
t_{10}	2.290(2.286)	2.100(2.107)	1.808(1.834)	1.600(1.644)

注:括号内为杆塔受压构件的平均可靠指标。

表6 不同大气腐蚀环境下的构件平均时变可靠指标(Q355)

Table 6 The average time-dependent reliability index of components under different atmospheric corrosive environment (Q355)

时段	地区 (大气腐蚀等级)			
	琼海(C3)	武汉(C4)	江津(C5)	万宁(CX)
t_0	2.565(2.545)	2.565(2.545)	2.565(2.545)	2.565(2.545)
t_1	2.516(2.499)	2.474(2.459)	2.410(2.399)	2.336(2.329)
t_2	2.495(2.478)	2.433(2.420)	2.337(2.331)	2.226(2.225)
t_3	2.478(2.462)	2.400(2.390)	2.279(2.276)	2.136(2.141)
t_4	2.463(2.449)	2.372(2.363)	2.228(2.228)	2.055(2.066)
t_5	2.450(2.436)	2.345(2.338)	2.179(2.182)	1.977(1.993)
t_6	2.436(2.422)	2.318(2.312)	2.129(2.135)	1.897(1.918)
t_7	2.422(2.409)	2.290(2.286)	2.077(2.087)	1.813(1.840)
t_8	2.408(2.396)	2.262(2.260)	2.024(2.038)	1.727(1.760)
t_9	2.393(2.383)	2.234(2.233)	1.970(1.987)	1.637(1.677)
t_{10}	2.379(2.369)	2.205(2.206)	1.914(1.936)	1.545(1.592)

注:括号内为杆塔受压构件的平均可靠指标。

3.3 构件厚度的影响分析

假设,参数 $\gamma_0=1$, $\beta_c=1$,以江津(C5)的大气腐蚀环境为研究对象,对比不同厚度的构件在不同典型时刻下Q235和Q355的时变可靠度。可靠指标的变化趋势如图5和图6所示。

不难看出,当构件初始厚度小于12 mm时,构件的时变可靠度受初始厚度的影响较大,且初始厚度小于7 mm时,可靠指标显著下降,说明腐蚀对于细小构件的影响较为明显。当构件初始厚度大于25 mm时,其可靠指标在设计基准期内无明显变化,说明此时的构件可靠指标几乎不受腐蚀影响。

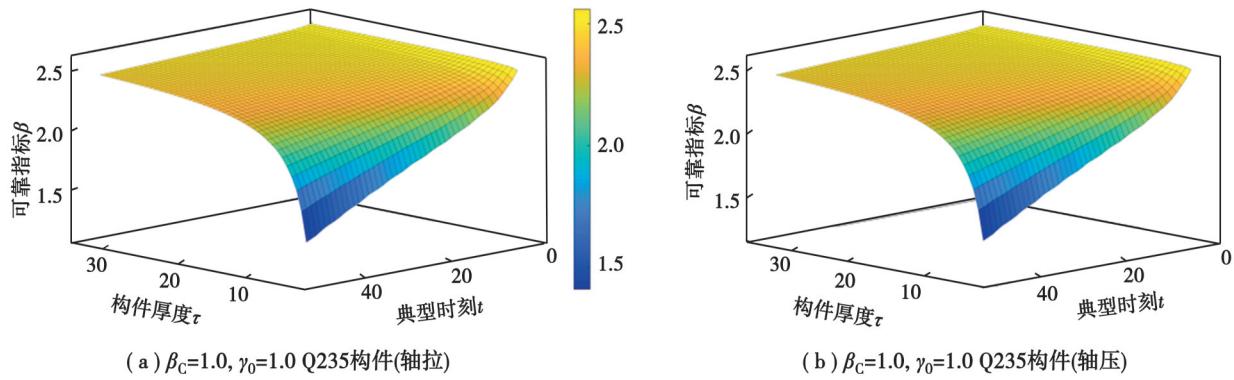


图5 不同典型时刻下构件厚度对可靠指标的影响(Q235)

Fig. 5 The influence of member thickness on the reliability index under different typical times (Q235)

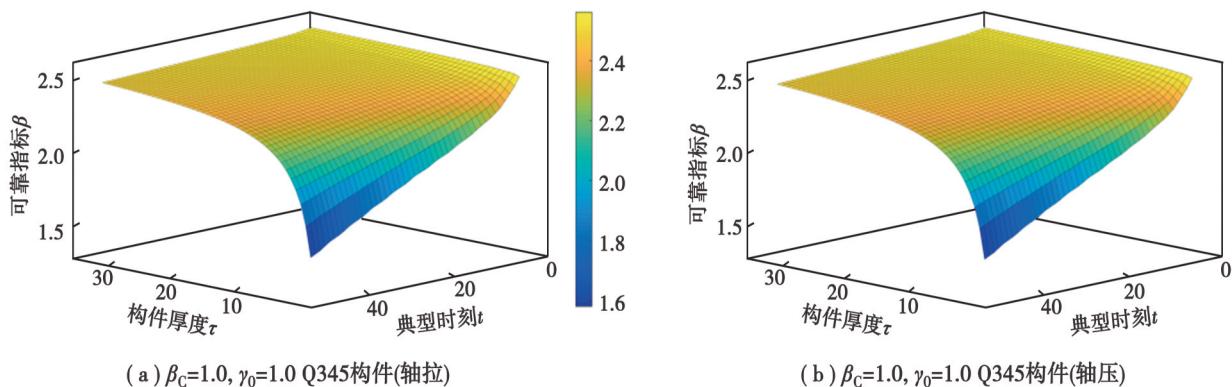


图6 不同典型时刻下构件厚度对可靠指标的影响(Q345)

Fig. 6 The influence of member thickness on the reliability index under different typical times (Q345)

3.4 风荷载调整系数的影响分析

假设,参数 $\tau=5$ mm, $\gamma_0=1$,以江津(C5)的大气腐蚀环境为研究对象,对比风荷载调整系数取 $\beta_C=1.0, 1.1, 1.2, 1.3$ 时,不同典型时刻下 Q235 和 Q355 的时变可靠度。可靠指标变化趋势如图 7 和图 8 所示。

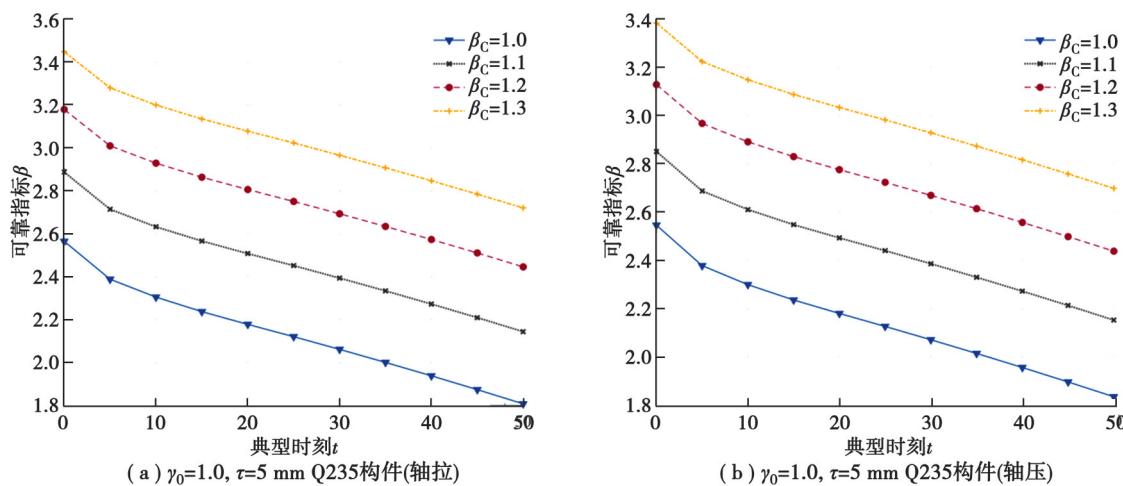


图7 风荷载调整系数对可靠指标的影响(Q235)

Fig. 7 The influence of dynamic wind load factor on the reliability index (Q235)

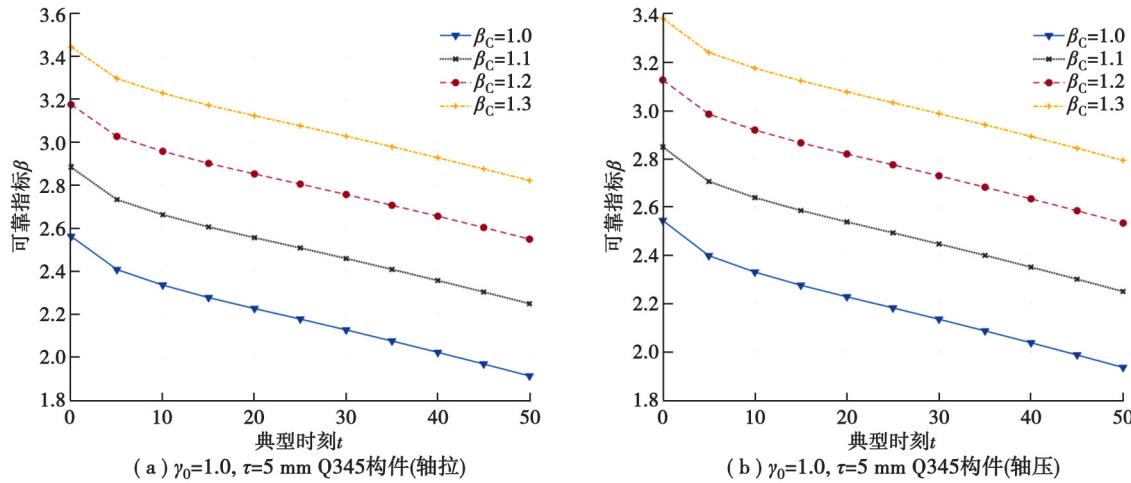


图 8 风荷载调整系数对可靠指标的影响(Q355)

Fig. 8 The influence of dynamic wind load factor on the reliability index (Q355)

由图可知,各曲线间几乎呈平行状态,风荷载调整系数对抗力退化速度、腐蚀速率、可靠指标下降速度没有明显影响;随着风荷载调整系数的增加,构件可靠指标逐渐增大,抗力退化速度和可靠性下降速度逐渐减缓直至匀速下降。

4 结 论

文中针对服役输电杆塔,提出了一种基于规范表达式的抗风时变可靠度分析方法。该方法给出了规范表达式中各随机变量的统计特征,在此基础上采用JC法进行时变可靠度分析,并进一步对不同参数取值及相互影响进行定量分析,得到如下结论。

- 1) 风荷载效应比近似服从广义极值分布,其取值范围对服役杆塔的平均可靠指标存在一定影响,且随着服役时间的增长,不同取值造成的差异性减小。
- 2) 在设计基准期 50 年内,C3 腐蚀等级下的构件可靠指标由 2.565 下降至 2.379,下降率约 10%;而 C4、C5、CX 腐蚀等级下的构件可靠指标分别下降至 2.205、1.914、1.545,腐蚀等级每增长一级,可靠指标下降率增加约 6%~8%,并且不同腐蚀等级下可靠指标的差异性随服役时间的推移而增大。
- 3) 腐蚀对构件可靠指标的影响程度与构件初始厚度有关:当构件初始厚度小于 12 mm 时,其时变可靠指标有明显变化,即腐蚀对可靠指标的影响较为明显;当构件初始厚度大于 25 mm 时,设计基准期内的可靠指标无明显变化,即腐蚀几乎不影响可靠指标。
- 4) 可靠指标随风荷载调整系数的增大而增大,但风荷载调整系数对抗力退化速度、腐蚀速率、可靠指标下降速度没有明显影响。

参考文献

- [1] Bhuyan G, Li H. Achieved reliability of the North American design approaches for transmission overhead structures[C]//2006 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. June 11-15, 2006. Stockholm, Sweden. IEEE, 2006: 1-5.
- [2] Li M H, Li Z L, Yu D K. The system reliability analysis of 1000 kV UHV transmission tower based on moment method [C]. Proceedings of 2012 International Conference on Future Energy, Environment, and Materials (FEEM 2012 V16 (Part A)), 2012: 173-178.
- [3] 王松涛,高斐略,李正良,等. 现行输电塔设计规范可靠度水准的评估与分析[J]. 广东电力, 2015, 28(7): 100-108.
Wang S T, Gao F L, Li Z L, et al. Evaluation and analysis on reliability level of current design specification for power transmission tower[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(7): 100-108. (in Chinese)

- [4] 王松涛, 李正良, 范文亮, 等. 输电塔可靠度设计中统计参数研究[J]. 电力勘测设计, 2015(6): 54-57, 75.
Wang S T, Li Z L, Fan W L, et al. Research on statistical parameters in reliability design of transmission line tower[J]. Electric Power Survey & Design, 2015(6): 54-57, 75. (in Chinese)
- [5] 安利强, 张海威, 江文强. 超、特高压交直流同塔多回线路杆塔的设计可靠度研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(23): 107-112.
An L Q, Zhang H W, Jiang W Q. Research on designing reliability of UHV/EHV AC and DC tower with multi-circuit lines[J]. Building Structure, 2019, 49(23): 107-112. (in Chinese)
- [6] 孟令星, 郎需军, 刘凯, 等. 跨越高速铁路输电杆塔可靠度分析[J]. 工业建筑, 2019, 49(8): 121-128.
Meng L X, Lang X J, Liu K, et al. Reliability analysis of transmission tower crossing high-speed railway[J]. Industrial Construction, 2019, 49(8): 121-128. (in Chinese)
- [7] 陈波, 李鹏, 乔婉风, 等. 小根开细柔输电杆塔抗风可靠性研究[J]. 武汉理工大学学报, 2020, 42(5): 58-62.
Chen B, Li P, Qiao W F, et al. Research on wind-resistant reliability of slender transmission tower with a small root span[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2020, 42(5): 58-62. (in Chinese)
- [8] 杨风利. 输电线路风冰荷载重现期及结构可靠性影响分析[J]. 结构工程师, 2020, 36(6): 90-97.
Yang F L. Wind and ice load return periods for transmission lines and effects on transmission tower structural reliability[J]. Structural Engineers, 2020, 36(6): 90-97. (in Chinese)
- [9] 刘玥君, 张新语, 郭峻菘, 等. 输电线路在冰风荷载作用下的可靠性研究[J]. 东北电力大学学报, 2020, 40(5): 63-68.
Liu Y J, Zhang X Y, Guo J S, et al. Study on the reliability of electric transmission line under ice load and wind load[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2020, 40(5): 63-68. (in Chinese)
- [10] 罗立胜, 陈志华, 赵小龙, 等. 大气腐蚀环境下钢构件抗力退化模型[J]. 结构工程师, 2019, 35(2): 52-58.
Luo L S, Chen Z H, Zhao X L, et al. Deterioration model for resistance of steel member in atmospheric environment[J]. Structural Engineers, 2019, 35(2): 52-58. (in Chinese)
- [11] 高超, 刘建军, 郑逸川, 等. 锈蚀对输电塔角钢力学性能的影响[J]. 腐蚀与防护, 2020, 41(8): 32-38.
Gao C, Liu J J, Zheng Y C, et al. Effects of corrosion on mechanical properties of transmission tower angle steel[J]. Corrosion & Protection, 2020, 41(8): 32-38. (in Chinese)
- [12] Mori Y, Ellingwood B R. Reliability-based service-life assessment of aging concrete structures[J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119(5): 1600-1621.
- [13] Kong J S, Frangopol D M. Cost-reliability interaction in life-cycle cost optimization of deteriorating structures[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(11): 1704-1712.
- [14] 姚继涛, 刘金华, 吴增良. 既有结构抗力的随机过程概率模型[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2008, 40(4): 445-449.
Yao J T, Liu J H, Wu Z L. Model for stochastic resistance of existing structures[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2008, 40(4): 445-449. (in Chinese)
- [15] 杨波, 戴国欣, 陈昌海, 等. 钢结构工程抗力时变模型的构建与验证[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(5): 95-99.
Yang B, Dai G X, Chen C H, et al. Construction and confirmation of a model for time-dependent resistance of the steel structure project[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(5): 95-99. (in Chinese)
- [16] 蒋友宝, 杨伟军. 可变荷载效应占高比重时荷载分项系数取值研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(12): 130-135.
Jiang Y B, Yang W J. Research on values of load partial factors with large ratios of variable load effects[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(12): 130-135. (in Chinese)
- [17] 冯云芬, 贡金鑫, 李宏男, 等. 输电线路杆塔构件可靠度校准[J]. 电力建设, 2014, 35(5): 13-20.
Feng Y F, Gong J X, Li H N, et al. Reliability calibration of tower members in transmission line[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(5): 13-20. (in Chinese)
- [18] 刘堃, 白强, 冯衡, 等. 基于JC法的输电塔轴心拉压构件可靠度分析[J]. 山东电力技术, 2018, 45(3): 29-33.
Liu K, Bai Q, Feng H, et al. Reliability analysis of power transmission towers axial compression and tension components based on JC method[J]. Shandong Electric Power, 2018, 45(3): 29-33. (in Chinese)
- [19] 吴海洋, 王松涛, 叶爱民, 等. 基于可靠度理论的输电线路基础设计中的风荷载调整系数取值研究[J]. 电力勘测设计, 2020 (4): 45-50.

- Wu H Y, Wang S T, Ye A M, et al. Research on wind load adjustment coefficient in transmission line foundation design code based on reliability theory[J]. Electric Power Survey & Design, 2020(4): 45-50. (in Chinese)
- [20] Riggs Larsen K. Assessing galvanized steel power transmission poles and towers for corrosion[J]. Materials Performance, 2016, 55(12): 24-28.
- [21] Rodger J, Bartlett S, Atrens A. Corrosion of the galvanizing of galvanized-steel electricity transmission towers[J]. Materials and Corrosion, 2017, 68(8): 902-910.
- [22] Wang Y K, Wharton J A, Shenoi R A. Ultimate strength analysis of aged steel-plated structures exposed to marine corrosion damage: a review[J]. Corrosion Science, 2014, 86: 42-60.
- [23] 中国科学院金属研究所. 金属和合金的腐蚀大气腐蚀性: GB/T 19292-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences. Metals and alloys-corrosion-atmospheric corrosion-classification: GB/T 19292-2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018. (in Chinese)
- [24] 王友德, 徐善华, 李晗, 等. 一般大气环境下锈蚀结构钢表面特征与随机模型[J]. 金属学报, 2020, 56(2): 148-160. Wang Y D, Xu S H, Li H, et al. Surface characteristics and stochastic model of corroded structural steel under general atmospheric environment[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(2): 148-160. (in Chinese)
- [25] Wang Y D, Xu S H, Li H, et al. Stochastic model for surface characterization of structural steel corroded in simulated offshore atmosphere[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(2): 148-160.
- [26] 黄兴棣. 工程结构可靠性设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1992. Huang X D. Reliability design of engineering structures [M]. Beijing: China Communications Press, 1992. (in Chinese)
- [27] 黄兴, 田雷, 杨洋, 等. 基于点估计法的杆塔结构平均可靠度分析[J]. 电力工程技术, 2018(2): 127-131. Huang X, Tian L, Yang Y, et al. Average reliability analysis of transmission tower structure based on point estimation method [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018(2): 127-131. (in Chinese)
- [28] Fan W L, Wei J H, Ang A H, et al. Adaptive estimation of statistical moments of the responses of random systems[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2016, 43: 50-67.
- [29] 张相庭. 工程结构风荷载理论和抗风计算手册[M]. 上海: 同济大学出版社, 1990. Zhang X T. Wind load theory and wind resistance calculation manual for engineering structures[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1990. (in Chinese)
- [30] 李峰, 袁骏, 侯建国, 等. 我国输电线路铁塔结构设计可靠度研究[J]. 电力建设, 2010, 31(11): 18-23. Li F, Yuan J, Hou J G, et al. Research on reliability of transmission tower structure design in China[J]. Electric Power Construction, 2010, 31(11): 18-23. (in Chinese)
- [31] 屠向远. 风荷载的统计分析[J]. 冶金建筑, 1982, 12(2): 57-60. Tu X Y. Statistical analysis of wind load[J]. Industrial Construction, 1982, 12(2): 57-60. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)