

锈蚀-疲劳耦合作用下输电塔力学性能分析*

张 腾, 何浩祥, 张耀源, 田书宇

(北京工业大学工程抗震与结构诊治北京市重点实验室 北京, 100124)

摘要 输电塔的工作环境复杂而恶劣,且受风载等外界激励影响,在大气锈蚀或者疲劳损伤状态下易发生破坏。针对目前输电塔多灾害安全评定研究不足的问题,采用试验测试、理论分析与数值模拟相结合的方式,建立输电塔损伤演化模型,并进行寿命预测。首先,通过锈蚀-疲劳交替试验,得到多因素下输电塔关键构件的弹性模量和截面尺寸退化规律;其次,建立输电塔整体模型,并基于典型地区年平均风速数据计算结构各部分的风振时程响应;最后,更新不同运营时期有限元模型中的截面尺寸、单元损伤和力学性能退化情况,并基于多种时域法和频域法,提出考虑锈蚀-疲劳耦合作用下输电塔综合疲劳寿命评定方法。结果表明,该方法提高了输电塔结构寿命评估的精度。

关键词 输电塔;锈蚀疲劳;雨流计数法;频域疲劳法;寿命预测

中图分类号 TM753;TH113

0 引 言

输电塔是电力输送的主要载体及生命线工程^[1],其杆件众多,柔性较大,属于高耸结构。随着国家工业化的迅猛发展,输电塔的结构形式日趋复杂,在强风等灾害下发生严重损伤和寿命折减的可能性有所抬升^[2],其后果较为严重,亟需得到重视。输电塔处于恶劣的自然环境中,其结构在发生环境腐蚀的同时还承受风荷载持续而交变的作用。腐蚀介质会导致部分杆件锈蚀,风荷载下杆件将产生疲劳退化,二者耦合将加快杆件裂纹的出现及发展^[3],从而降低结构的整体安全性和使用寿命。

输电塔主要由碳钢构件组成,由于常年裸露在大气环境中,不可避免地发生化学锈蚀,从而影响其结构稳定性,因此评估服役结构锈蚀后的安全性极为重要。钱锡汇等^[4]利用腐蚀程度与剩余承载力之间的函数关系,对不同构件给出了相应的健康评分。李杰等^[5]基于层次分析法,用锈蚀裕度定义构件的安全指标,并以此求解各层及整体结构的安全度。

对于输电塔的疲劳损伤和寿命预测,首先通过模拟生成风荷载^[6-7]对输电塔模型进行风振响应分析,针对易产生疲劳损伤的关键构件采用雨流计数法进行循环计数统计,进而应用 Miner 线性疲劳损伤累积理论评估结构的剩余寿命^[8]。张春涛等^[9]将风向风速联合分布模型与 Miner 线性疲劳累积损伤

理论相结合,推导出输电塔的风振疲劳计算方法。白海峰等^[10]结合输电杆塔的结构和环境荷载的概率分布特征,提出了结构疲劳损伤、疲劳破坏的可靠度分析方法。

目前,关于钢构件锈蚀或疲劳的试验与理论研究成果较丰富,但相关试验和分析大多局限于材料层次或构件层次,关于腐蚀疲劳耦合作用对结构整体性能的影响研究较少。祖云飞等^[11]研究了 Q420B 等边角钢在模拟酸雨大气作用下的腐蚀疲劳性能,基于简化的单点似然法及单点成组法拟合了应力疲劳寿命曲线,证明了酸雨大气环境会缩短试件疲劳寿命。文献[12]建立了随机疲劳曲线方程,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。

在结构疲劳损伤分析中,随着应力时程的不断增加,时域法的计算效率逐渐降低。频域法^[13-14]可以避免繁琐的时程分析,根据荷载作用下结构关键位置处的应力响应功率谱计算疲劳损伤,结果比较精准,具有良好的工程应用前景。周春良等^[15]在考虑了窄带共振和宽带背景响应后,用等效窄带法对铁塔架的疲劳寿命进行了分析。王世村等^[16]分别采用雨流法、等效应力法、等效窄带法和 Holmes 估算法对单杆输电塔进行疲劳寿命计算,证明了在频域内计算高耸结构的风振疲劳损伤具有良好的精度。

* 国家自然科学基金资助项目(52378469)

收稿日期:2025-01-13;修回日期:2025-04-10

本研究提出了多环境因素作用下输电塔寿命的预测方法。首先,以足尺等边角钢构件的锈蚀-疲劳试验为基础,提出计算构件尺寸和力学性能退化的经验公式,建立了输电塔时变模型;其次,考虑输电塔的受力特点和重要程度对结构进行分层,依据年平均风速数据模拟得出各层关键杆件不同服役时期的风振响应;最后,利用时域分析法和频域分析法的疲劳损伤计算理论得到各层关键杆件使用寿命,结合加权规则提出输电塔结构寿命预测的计算方法。

1 典型杆件的锈蚀-疲劳耦合试验及性能测试

1.1 试验目的

针对目前钢杆件耦合损伤试验及理论研究的不足,为了探究锈蚀和疲劳的耦合作用,笔者在考虑大气环境干湿交替、加速腐蚀效率及疲劳加载等因素的情况下,选取在输电塔结构中广泛应用的Q355等边角钢构件作为试验对象进行了锈蚀-疲劳耦合试验。对不同腐蚀天数加载方式、不同循环载荷和不同循环次数作用下钢构件的疲劳试验结果进行分析,研究了环境腐蚀和疲劳荷载因素耦合作用下构件弹性模量的变化规律。

1.2 试验概况

本次试验选取 $70\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 的Q355等边角钢构件,根据塔体中的构造要求对试件进行了开孔加工,孔洞直径为 20 mm 。为了避免疲劳振动中发生失稳破坏,并考虑边界条件的影响情况,确定了试件详细尺寸。试件几何尺寸如图1所示。Q355等边角钢试件如图2所示。采用图3所示的MTS电液伺服疲劳机进行了试件加载。

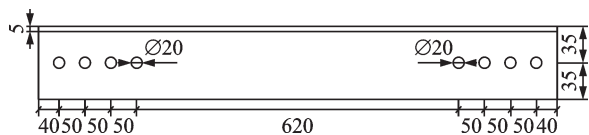


图1 试件几何尺寸(单位:mm)

Fig.1 Geometric dimensions of the test piece(unit:mm)

为了确保角钢端部满足试验机夹持需求,加工了附加连接件,将角钢和连接件通过高强螺栓连接形成组件。试件连接图如图4所示。试件安装过程中,为了保证试件处于轴心受力,在角钢构件两肢中



图2 Q355等边角钢试件

Fig.2 Q355 equilateral angle steel specimen



图3 MTS电液伺服疲劳机

Fig.3 MTS electro-hydraulic servo fatigue machine

部分别对称布置了3个电阻式应变片。轴心受力应变片布置如图5所示。试件安装过程中调整支座和试件位置,使得两肢对称部位应变片的应变相等。



图4 试件连接图

Fig.4 Sample connection diagram

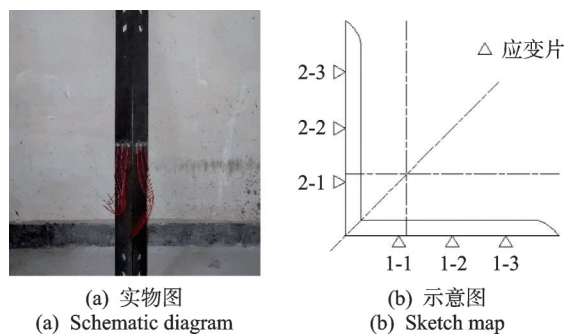


图5 轴心受力应变片布置

Fig.5 Arrangement of strain gauges under axial force

为了模拟环境腐蚀和风振疲劳耦合作用对角钢构件疲劳性能的影响,采用以下3种加载模式:①纯疲劳加载试验,目的是研究未腐蚀情况下钢构件的弹性模量退化情况,相应的疲劳应力包括100、120及140 MPa这3种工况;②纯锈蚀试验,根据北京地

区酸雨平均组成及其比例,采用纯硫酸、硝酸、盐酸和蒸馏水配置成 PH 值为 2 的酸性溶液,并采取“浸泡溶液 1 天-晾晒 1 天”的交替方式测试试件在腐蚀 8、16 以及 24 d 后锈蚀率和弹性模量的变化情况;③不同疲劳应力水平下的腐蚀-疲劳耦合试验,按照腐蚀-疲劳交替模式循环 3 次,每次腐蚀 8 d,之后进行前述疲劳应力水平下的疲劳加载。耦合试验流程如图 6 所示。等边角钢试验工况见表 1。

疲劳加载制度采取等应力循环模式,施加交变荷载。为避免试件发生受压屈曲,应力比 R 取为 0.1,最大和最小应力均为拉应力,构件疲劳振动加载频率为 10 Hz。在锈蚀试验或疲劳加载完成后,使用 MTS 电液伺服疲劳机调整角钢试件,使其处于初始平衡位置,施加适当的拉应力,测试试件,在

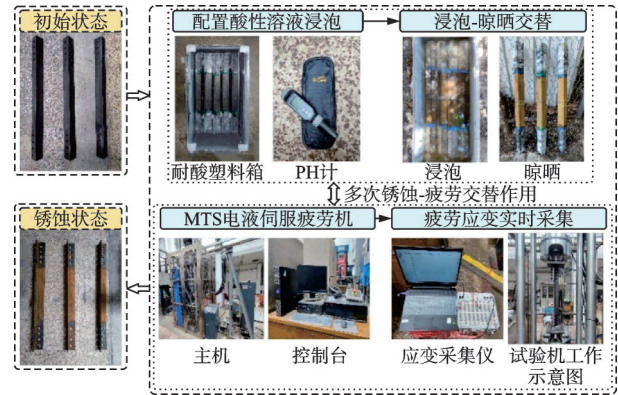


图 6 耦合试验流程示意图

Fig.6 Schematic diagram of the coupling test process

弹性变形区间内的应力和应变,进而计算得到实际弹性模量。

表 1 等边角钢试验工况
Tab.1 Test conditions of equilateral angel steel specimen

分类	组别	腐蚀				疲劳应力/ MPa	单次疲劳次数	“腐蚀-疲劳” 循环次数	试件 个数
		溶液 PH 值	浸泡时间/d	晾晒时间/d	次数				
疲劳组	PL ₁	—	—	—	—	100	1.5×10 ⁴	3	2
	PL ₂	—	—	—	—	120	1.5×10 ⁴	3	2
	PL ₃	—	—	—	—	140	1.5×10 ⁴	3	2
锈蚀组	XS ₁	2	1	1	4	—	—	—	2
	XS ₂	2	1	1	8	—	—	—	2
	XS ₃	2	1	1	12	—	—	—	2
耦合组	OH ₁	2	1	1	4	100	1.5×10 ⁴	3	2
	OH ₂	2	1	1	4	120	1.5×10 ⁴	3	2
	OH ₃	2	1	1	4	140	1.5×10 ⁴	3	2

1.3 试验结果分析

1.3.1 腐蚀对等边角钢弹性模量的影响

钢材在发生腐蚀后,其自身质量将有所损失,可通过腐蚀前后试件质量的变化来表征钢材的腐蚀速度,从而量化评价腐蚀程度。本研究选用失重率来代表各试件的锈蚀率,将腐蚀前后的试件做好表面除锈处理,通过高精度电子秤精确获得初始质量 m_0 和最终质量 m_1 ,相应的计算式为

$$\eta = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\%$$
 (1)

其中: η 为腐蚀钢材试件的质量损失率(即锈蚀率); m_0 、 m_1 分别为钢材腐蚀前、后的质量。

试件腐蚀 8、16 及 24 d 后,不同腐蚀时间的失重率见表 2。

锈蚀率随腐蚀时间变化曲线如图 7 所示。由图可知,试件锈蚀率随腐蚀时间的增长而线性递增。

表 2 不同腐蚀时间的失重率

Tab.2 Weight loss rate at different corrosion times

组别	编号	m_0 /g	m_1 /g	Δm /g	失重率/%
XS ₁	XS ₁₋₁	2 528.4	2 484.7	43.7	1.73
	XS ₁₋₂	2 539.2	2 490.2	49.0	1.93
XS ₂	XS ₂₋₁	2 531.4	2 436.0	95.4	3.77
	XS ₂₋₂	2 545.4	2 455.8	89.6	3.52
XS ₃	XS ₃₋₁	2 552.7	2 417.4	135.3	5.30
	XS ₃₋₂	2 537.7	2 406.0	131.7	5.19

在线性回归分析中,可通过决定系数 R^2 来评估回归方程与真实样本输出之间的相似程度, R^2 的数值越大,表示模型拟合效果越好。 R^2 的计算式为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y - \hat{y})^2}{\sum (y - \bar{y})^2}$$
 (2)

其中: y 为真实值; $\hat{y}$ 为预测值; $\bar{y}$ 为平均值。

图 7 中,具体拟合曲线函数为

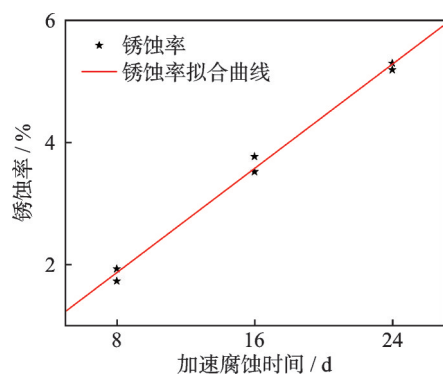


图7 锈蚀率随腐蚀时间变化曲线
Fig.7 Corrosion rate with corrosion time

$$\eta=0.047\,5+0.219T\tag{3}$$

其中: T 为加速腐蚀天数。

决定系数 R^2 为0.987,表明拟合程度较好。

相关研究^[17]表明:单纯以锈蚀率来评价钢材的腐蚀状态是不全面的,应结合材料力学性能的退化来衡量构件的腐蚀程度。笔者通过腐蚀时间分别为8、16及24 d的3组试件的弹性模量,重点研究了钢材弹性模量的退化规律。不同腐蚀时间的弹性模量剩余百分率见表3。

表3 不同腐蚀时间的弹性模量剩余百分率				
Tab.3 Residual percentage of elastic modulus at different corrosion times				
组别	编号	E_0/MPa	E_1/MPa	$K_E/\%$
XS ₁	XS ₁₋₁	202.42	198.49	98.06
	XS ₁₋₂	198.88	194.64	97.87
XS ₂	XS ₂₋₁	203.63	193.00	94.78
	XS ₂₋₂	201.49	192.60	95.59
XS ₃	XS ₃₋₁	200.74	186.41	92.86
	XS ₃₋₂	202.57	186.99	92.31

弹性模量剩余百分率随腐蚀时间变化曲线如图8所示。由图可知,弹性模量随着锈蚀率的增加退化明显,试件腐蚀8 d时弹性模量平均退化了约2%,腐蚀24 d时弹性模量平均退化了约8%。

通过表3中钢材弹性模量随腐蚀时间变化试验数据,采用线性函数拟合试件各弹性模量剩余百分率 K_E 随加速腐蚀天数 T 的表达式,即

$$K_E=100.37-0.35T\tag{4}$$

决定系数 R^2 为0.927,可见拟合程度良好。

1.3.2 疲劳对等边角钢弹性模量的影响

当材料内出现一定数量的微孔洞、微裂纹等缺陷时,材料的连续性将遭到破坏,抵抗弹性变形的能

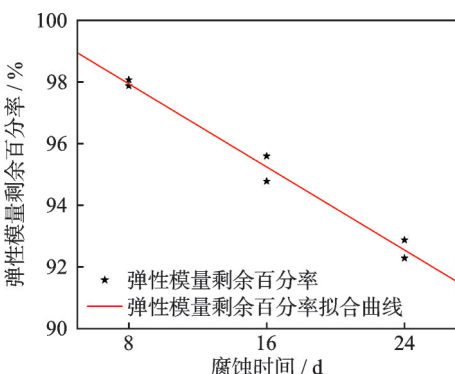


图8 弹性模量剩余百分率随腐蚀时间变化曲线
Fig.8 Residual percentage of elastic modulus with corrosion time

力就会下降。因此,经循环变形后材料内部将发生疲劳损伤,其弹性模量会产生一定的损失。3组试件分别在100、120及140 MPa的应力值下,纯疲劳试验弹性模量剩余百分率见表4。

表4 纯疲劳试验弹性模量剩余百分率				
Tab.4 Residual percentage of elastic modulus in pure fatigue test				
组别	编号	疲劳次数		
		1.5×10^4	3.0×10^4	4.5×10^4
PL ₁	PL ₁₋₁	99.39	98.68	98.22
	PL ₁₋₂	99.42	98.80	98.02
PL ₂	PL ₂₋₁	99.00	97.98	97.23
	PL ₂₋₂	99.06	98.09	97.10
PL ₃	PL ₃₋₁	98.74	97.52	96.35
	PL ₃₋₂	98.87	97.69	96.23

对上述试验结果分析可知,应力大小和疲劳循环次数都会对弹性模量损失造成不同程度的影响。基于构件的 $S-N$ 曲线和Miner线性累积损伤理论,根据试验应力 S 和疲劳次数 N ,可以计算出不同工况下的疲劳损伤值 D 。其计算公式为

$$D=NS^m/K\tag{5}$$

其中: m 、 K 为疲劳参数。

根据钢结构设计规范^[18],分别取 $m=3$ 、 $K=2.36\times10^{12}$,后续公式出现的 m 、 K 取值均相同。

不同工况下的疲劳损伤见表5。

表5 不同工况下的疲劳损伤			
Tab.5 Fatigue damage under different conditions			
组别	疲劳次数		
	1.5×10^4	3.0×10^4	4.5×10^4
PL ₁	0.006 4	0.012 7	0.019 1
PL ₂	0.011 1	0.022 1	0.032 9
PL ₃	0.017 4	0.034 9	0.052 3

根据表 4、5 的数据,建立弹性模量剩余率和结构疲劳损伤值的关系。拟合函数表达式为

$$K_E=98.682\,34-66.798D\tag{6}$$

其中: D 为疲劳损伤。

决定系数 R^2 为 0.923,可认为试件弹性模量随疲劳损伤的增加呈近似线性递减趋势。弹性模量剩余百分率随疲劳损伤变化曲线如图 9 所示。

1.3.3 耦合作用对等边角钢弹性模量的影响

虽然腐蚀时间和疲劳损伤都与弹性模量剩余率存在线性关系,但仅考虑单一因素的影响是不充分的。钢构件及输电塔结构在实际使用状态下同时承受大气腐蚀和风振疲劳荷载的共同作用,需要探究耦合作用下的构件损伤。锈蚀-疲劳耦合试验弹性

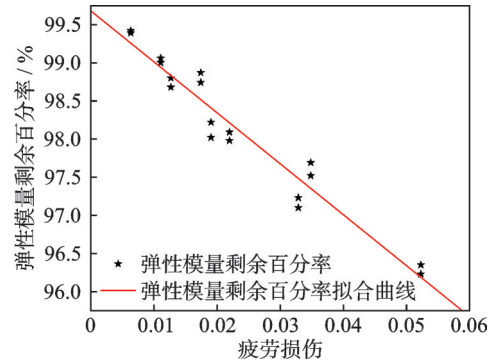


图 9 弹性模量剩余百分率随疲劳损伤变化曲线

Fig.9 Residual percentage of elastic modulus with fatigue damage

模量剩余百分率见表 6。

表 6 锈蚀-疲劳耦合试验弹性模量剩余百分率

Tab.6 Residual percentage of elastic modulus based on coupled corrosion-fatigue tests							%
组别	编号	腐蚀 8 d 后	$N=1.5\times10^4$ 次后	腐蚀 16 d 后	$N=3.0\times10^4$ 次后	腐蚀 24 d 后	$N=4.5\times10^4$ 次后
OH ₁	OH ₁₋₁	97.30	96.61	93.29	92.57	89.80	89.13
	OH ₁₋₂	98.06	97.37	94.98	94.35	91.82	91.29
OH ₂	OH ₂₋₁	97.33	96.20	93.90	92.83	90.79	89.56
	OH ₂₋₂	96.79	96.07	93.38	92.06	89.53	88.47
OH ₃	OH ₃₋₁	98.42	97.04	93.83	92.30	89.71	88.73
	OH ₃₋₂	97.87	96.79	93.79	92.35	90.03	88.95

进一步对上述数据进行分析,并对得到的加速腐蚀天数-疲劳损伤-弹性模量剩余率数据组进行多元线性回归。弹性模量剩余百分率与腐蚀天数及疲劳损伤拟合图如图 10 所示。

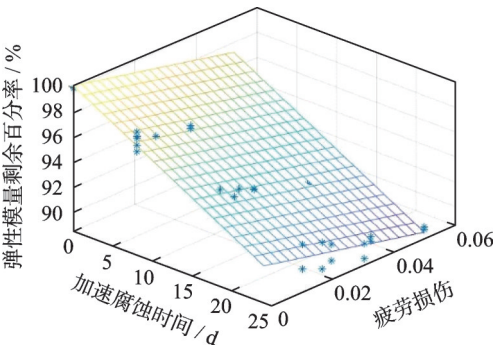


图 10 弹性模量剩余百分率与腐蚀天数及疲劳损伤拟合图
Fig.10 Fitting of the residual percentage of elastic modulus with corrosion days and fatigue damage

试件的弹性模量剩余率与加速腐蚀天数及疲劳损伤的关系式为

$$K_E=100.197-0.363T-56.598D\tag{7}$$

决定系数 R^2 为 0.961,表明式(7)精度较高。

萧以德等^[19]根据文献试验数据,拟合得到北京

地区 Q355 钢材腐蚀预测模型。其函数形式为

$$d=At^n\tag{8}$$

其中: d 为腐蚀深度; t 为暴露时间; A 、 n 为根据不同地区大气条件取的常数,对于北京地区 A 取 0.032, n 取 0.44。

根据锈蚀率和腐蚀深度的关系,可以将式(8)改写为

$$\eta=\frac{d}{h_0}\times100\%=\frac{At^n}{h_0}\times100\%\tag{9}$$

其中: h_0 为钢材厚度。

为了在实际工程应用中考虑腐蚀-疲劳耦合作用对疲劳损伤的影响并开展剩余服役寿命评估,可将式(3)、式(9)代入式(7),得到试件弹性模量剩余率与大气暴露时间及疲劳损伤的关系式为

$$K_E=100.276-1.059t^{0.44}-56.598D\tag{10}$$

2 输电塔疲劳寿命预测分析

在正常服役状态下,风荷载是作用在输电塔上的主要外力形式,基于有限元动力分析研究腐蚀-疲劳耦合作用下输电塔局部及整体的风振响应,进而根据疲劳分析方法及塔体结构特征进行综合评价,

可以较精准地预测整体寿命。

2.1 基于有限元的疲劳损伤计算流程

为了有效地模拟风荷载作用下高周疲劳损伤过程,基于 Miner 线性损伤模型,将服役期疲劳损伤进行分段,可线段化地采样估计并计算出疲劳寿命。具体步骤如下:

1) 建立初始有限元模型,选取有限元模拟风振响应时间 ΔT ,得到应力时程曲线,通过雨流计数法或频域法得到模拟时间内的疲劳损伤情况;

2) 认为疲劳损伤累积行为是线性的,将风振响应时间 ΔT 的疲劳损伤按时间比例放大,作为结构在此服役时间段 Δt 所产生的累积疲劳损伤;

3) 在上一段计算结束后,根据锈蚀-疲劳耦合试验退化规律和有限元疲劳模拟结果,更新不同服役时期的有限元模型中单元截面退化、疲劳损伤和力学性能退化情况,并重新开始下一服役时间段的计算,直至累计损伤达到1为止。

疲劳损伤的累积采用前向欧拉法,第 i 段结束的累积损伤表示为

$$D(t_i) = D(t_{i-1}) + D(\Delta T) \frac{\Delta t}{\Delta T} \quad (11)$$

其中: $D(t_i)$ 为运营 t_i 年的累积疲劳损伤值; $D(\Delta T)$ 为模拟时间内的疲劳损伤值; $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ 。

2.2 疲劳损伤分析理论

本研究基于输电塔有限元模型风振响应分析获取典型部位的应力时程数据,分别利用时域分析法和频域分析法的疲劳损伤计算理论,对输电塔结构进行疲劳损伤评估和寿命预测。

2.2.1 时域分析法

基于雨流计数法以及 Miner 线性疲劳累积损伤理论,输电塔疲劳值计算流程如下。

1) 采用雨流计数法对应应力时程结果进行分析,生成应力疲劳载荷谱。引入连续损伤动力学的疲劳损伤模型^[20],根据循环应力幅值、均值及对应循环次数的关系,可以计算出输电塔杆件的有效应力幅值和等效循环次数。杆件应力等效应力幅值 $\Delta\sigma_{ef}$ 的计算式为

$$\Delta\sigma_{ef} = \left\{ \sum_i \frac{n_i}{N_T} [(\Delta\sigma_i + 2\sigma_{mi})\Delta\sigma_i]^{\frac{\beta+3}{2}} \right\}^{\frac{1}{\beta+3}} \quad (12)$$

其中: $\Delta\sigma_i$ 为第 i 次循环应力幅值; n_i 为对应的循环次数; N_T 为总循环次数; σ_{mi} 为第 i 次循环均值; β 为等幅 S-N 曲线的斜率,此处取值为 3。

2) 计算构件等效应力 $\Delta\sigma$

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_{ef} + \Delta\sigma_0 \quad (13)$$

其中: $\Delta\sigma_0$ 为结构的初始应力。

3) 以材料 S-N 曲线和 Miner 线性疲劳累积损伤理论为基础,计算不同应力循环分布 $S_i (i=1, 2, \dots, n)$ 下的疲劳损伤值,即

$$D_0 = \frac{n\bar{S}^m}{K} \quad (14)$$

其中: n 为循环次数; m 、 K 为疲劳参数;

$$\bar{S}^m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i^m。$$

2.2.2 频域分析法

频域法在时域分析得到的应力响应时程基础上,通过频谱分析得到应力响应功率谱。根据功率谱密度函数通过穿越分析求得应力幅值的概率密度函数,再根据疲劳寿命频域分析理论估算结构寿命。与时域法相比,其计算量相对较小,并且能够得到较为准确的结果。常用的频域方法有理想窄带法、W-L 法、Dirlik 法和 T-B 法等。

1) 理想窄带法。在某些条件下结构风振响应属于理想窄带信号,应力幅值概率分布接近于 Rayleigh 分布^[21],则 T_s 时刻结构的疲劳损伤为

$$D_{NB} = \left(\frac{v_p T_s}{K} \right) (2\sqrt{2\lambda_0}) \Gamma\left(\frac{m+2}{2}\right) \quad (15)$$

其中: D_{NB} 为窄带疲劳累积损伤; v_p 为单位时间内应力过程的正穿越速率; λ_i 为应力过程谱密度函数的第 i 阶矩; $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数; m 、 K 为疲劳参数。

2) W-L 法。某些情况下结构响应可视为宽带过程, W-L 法提出宽带应力过程的累积疲劳损伤可以用具有相同的窄带过程的累积疲劳损伤乘以一个等效系数 χ_{WL} 来近似计算^[22],即

$$D_{WL} = \chi_{WL} D_{NB} \quad (16)$$

等效系数是通过通过对几种宽带频谱进行时域模拟后,经雨流计数法统计应力循环数据,再采用最小二乘法拟合得到的经验系数。其计算式为

$$\chi_{WL} = a(m) + [1 - a(m)](1 - \epsilon)^{b(m)} \quad (17)$$

$$\epsilon^2 = \frac{\lambda_0 \lambda_4 - \lambda_2^2}{\lambda_0 \lambda_4} \quad (18)$$

其中: $a(m) = 0.926 - 0.033m$; $b(m) = 1.587m - 2.323$; m 为疲劳参数; ϵ 为带宽参数。

3) Dirlik 法。文献[23]对 70 余种应力过程进行时域分析后,总结出了雨流计数循环应力幅值分布的经验性模型,相关的宽带过程频域疲劳损伤公式为

$$D_{DK} = \frac{v_p T_s}{K} (2\sqrt{\lambda_0})^m [D_1 Q^m \Gamma(1+m) + 2^{\frac{m}{2}} \Gamma(1+\frac{m}{2})(D_2 R^m + D_3)] \quad (19)$$

其中: D_1 、 D_2 、 D_3 和 R 为比例系数, 其取值方法详见文献[22]。

4) T-B法。T-B法提出平稳高斯过程的疲劳累积损伤表达式^[24]为

$$D_{TB} = \frac{v_p T_s}{K} \hat{\alpha}_2 (2\sqrt{2\lambda_0})^m \Gamma(1+\frac{m}{2}) [b_{TB} + (1-b_{TB})\hat{\alpha}_2^{m-1}] \quad (20)$$

$$b_{TB} = \frac{(\hat{\alpha}_1 - \hat{\alpha}_2)[1.112(1 + \hat{\alpha}_1 \hat{\alpha}_2 - \hat{\alpha}_1 - \hat{\alpha}_2)e^{2.11\hat{\alpha}_2} + (\hat{\alpha}_1 - \hat{\alpha}_2)]}{(\hat{\alpha}_2 - 1)^2} \quad (21)$$

其中: $\hat{\alpha}_1 = \lambda_1 / \sqrt{\lambda_0 \lambda_2}$; $\hat{\alpha}_2 = \lambda_2 / \sqrt{\lambda_0 \lambda_4}$ 。

2.2.3 层次分析法

根据疲劳分析法可计算出关键部位或杆件的疲劳损伤, 再进一步通过综合分析方法对结构整体的疲劳性能和服役寿命进行评定。层次分析法可按重要程度和受力特点对结构进行分层, 以此求解各层及整体结构的安全度。本研究采用层次分析法进行整体计算, 并使用疲劳损伤程度表征构件的安全指标。考虑输电塔不同部位的受力情况以及重要程度, 本研究提出的塔体分层示意图及实例图如图11所示。

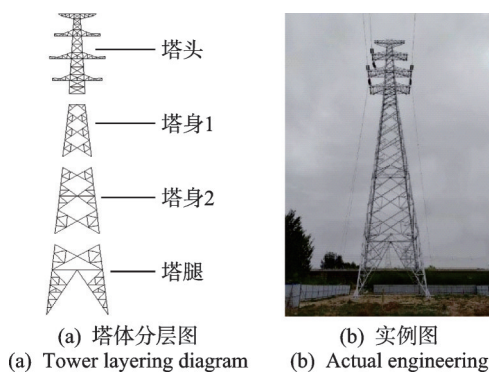


图11 塔体分层示意图及实例图

Fig.11 Schematic diagram of tower layering and practical cases

将输电塔评价目标分为重要性相同的3层, 分别为结构重要程度、初始应力幅值和有效应力幅值, 计算得到塔腿、塔身1、塔身2以及塔头各部分的权重系数分别为0.5、0.2、0.2和0.1。计算输电塔整体的疲劳寿命, 即

$$L_T = 0.5L_1 + 0.2L_2 + 0.2L_3 + 0.1L_4 \quad (22)$$

其中: L_T 为输电塔整体疲劳寿命; L_1 、 L_2 、 L_3 和 L_4 分别为塔腿、塔身1、塔身2以及塔头部位关键杆件的疲劳寿命。

基于钢材 S-N 曲线和线性疲劳累积损伤理论, 根据时域和频域分析理论, 可计算出不同部位中关键杆件对应的使用年限, 通过层次分析法和加权规则即可推测出输电塔整体的疲劳寿命。

3 实例分析

为了验证本研究提出的锈蚀-疲劳耦合作用下输电塔疲劳损伤及寿命预测方法, 以位于北京市房山区某 220 kV “干” 字型输电塔为对象进行分析。该输电塔全高为 48.0 m, 呼高为 36.0 m。

输电塔主要杆件为 Q235 角钢和 Q355 角钢, 杆件节点之间采用螺栓连接。在进行有限元模拟和分析时, 输电塔主材能传递力和弯矩, 采用梁单元进行模拟; 支撑斜材主要传递轴向力, 采用杆单元进行模拟; 材料初始弹性模量 E 为 206 GPa, 密度 ρ 为 $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。根据输电塔设计资料, 选用梁桁混合模型建立输电塔有限元模型, 并施加重力荷载。输电塔轴力云图如图12所示。由图可以看出, 在只考虑重力荷载的作用下, 输电塔同一高度处, 主材所受应力比横担和斜材大; 输电塔不同高度处, 塔底杆件应力最大, 由下到上应力水平逐渐降低, 在运营过程中宜重视塔底主材力学性能。

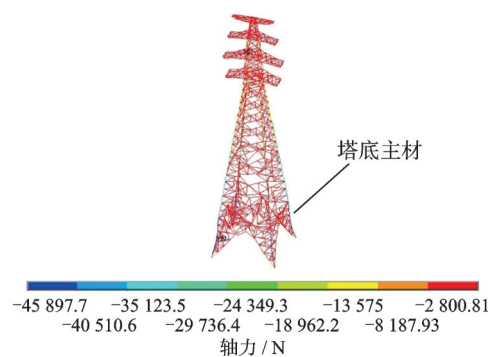


图12 输电塔轴力云图

Fig.12 Axial force of transmission tower

在结构动力分析过程中, 若对塔上所有节点的风荷载均进行模拟, 工作量过大, 且不易实现。为了计算简便, 将输电塔按高度分为9个节段, 每个节段选取2个加载点, 作为各节段的风速模拟和风荷载施加位置, 结合各节段迎风面积, 计算风速模拟点的风荷载时程。

根据北京气象局 2001—2022 年的年平均风速监测数据,取基本风速为 6.0 m/s。所研究的输电塔位于城市郊区,房屋比较稀疏,则相应的地貌类型为 B 类^[25]。基于 Davenport 谱和线性滤波法 AR 模型生成脉动风时程,选取代表性节段。模拟风速谱与功率谱如图 13 所示。将脉动风速模拟功率谱与目标功率谱进行了对比,结果吻合程度良好,两者的谱线趋势基本一致。

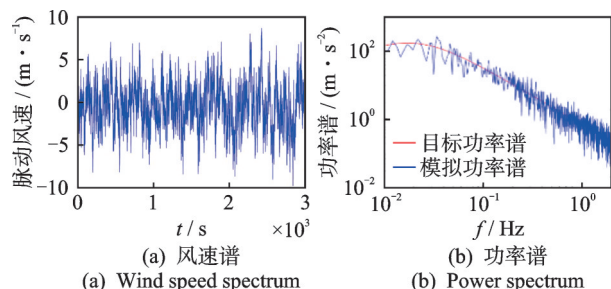


图 13 模拟风速谱与功率谱

Fig.13 Simulated wind speed spectrum and power spectrum

在确定结构所受风荷载的过程中,首先将风速时程转化为风压时程,再结合结构的迎风面积以及风荷载体型系数^[25],可得到结构风振响应分析所需的风荷载时程。其计算公式为

$$F_i = A_i \mu_s w_i / 2 \quad (23)$$

其中: F_i 为结构 i 点的风荷载时程; A_i 为 i 点垂直于风向的风荷载计算面积; w_i 为结构 i 点的风压时程; μ_s 为风荷载体型系数。

对于输电塔段都是采用两点加载,故加载节点处的荷载值都要除以 2。

求解结构的时程动力特性,选取垂直横担方向为迎风面,荷载施加在各节段加载点,计算得到塔身关键节点在风荷载下的时程响应。输电塔关键受力杆件的应力时程如图 14 所示。

采用时域法计算疲劳损伤,利用雨流计数法将风荷载作用下的应力时程数据整理为一系列等幅或者变幅循环,并统计出对应的循环次数,生成能够用于分析计算的疲劳载荷谱。输电塔雨流计数法载荷谱如图 15 所示。

根据式(12)求解出塔头、塔身和塔腿关键杆件模拟时间内的有效应力幅值和等效循环次数,并利用有限元计算重力荷载和风荷载下对应部位的初始应力。由于篇幅所限,只给出无损伤状态下输电塔关键杆件的等效应力,如表 7 所示。

根据疲劳损伤演化计算流程,对于输电塔疲劳

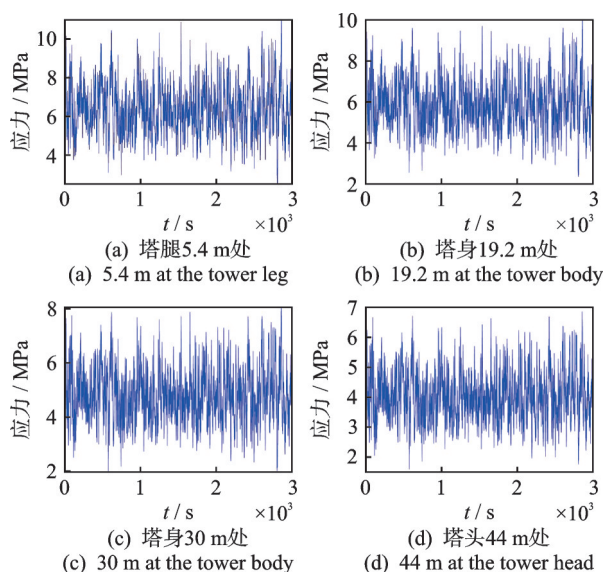


图 14 输电塔关键受力杆件的应力时程图

Fig.14 Strain history of key members of transmission tower

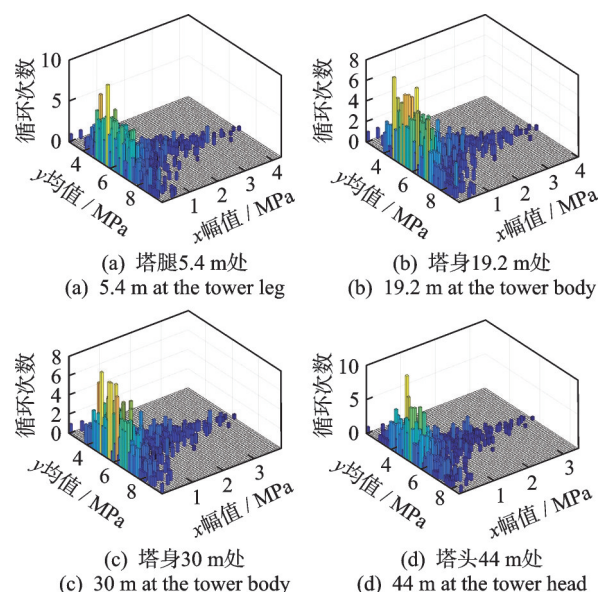


图 15 输电塔雨流计数法载荷谱图

Fig.15 Load spectrum of tower by rain flow counting method

表 7 无损伤状态下输电塔关键杆件的等效应力

Tab.7 Equivalent stress of typical members of transmission towers without damage

部位	有效应力 / MPa	循环次数	初始应力 / MPa
5.4 m 高塔腿主材	3.647 5	807	9.82
19.2 m 高塔身主材	3.514 7	812	8.11
30.0 m 高塔身主材	3.173 2	822	7.92
47.1 m 高塔头主材	2.911 2	827	6.56

寿命计算,选取 Δt 为 10 a。利用本研究得到的锈蚀-疲劳耦合试验退化规律和有限元疲劳模拟结果,更新不同运营时期单元疲劳损伤、截面尺寸和力学

性能退化情况,得到不同运营时期下单元的应力情况,完成对输电塔关键杆件的寿命预测。

考虑不同环境因素作用,采用组合方案对输电塔疲劳寿命进行预测。不同部位关键杆件的疲劳寿命对比如图 16 所示。结果表明:不同部位杆件考虑锈蚀-疲劳耦合作用比仅考虑锈蚀作用的平均寿命减少了 10 年以上,比仅考虑疲劳作用减少了 20 年以上。因此,仅考虑单一因素影响不能准确评估输电塔的运营寿命,在对服役时间较长的输电塔进行疲劳寿命评估时,应同时考虑锈蚀和疲劳的影响,并综合考虑两者的耦合作用。

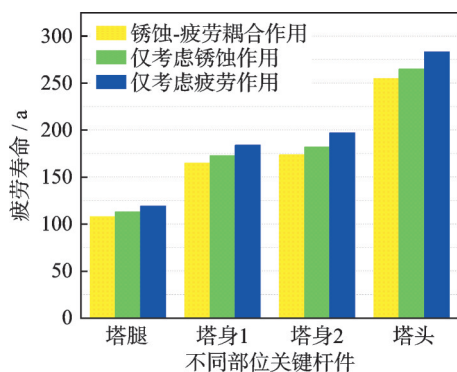


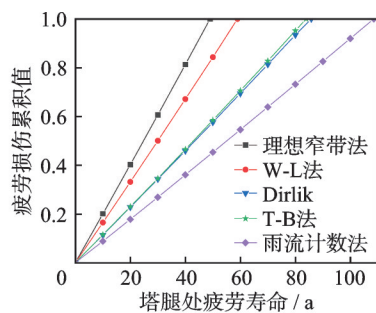
图 16 不同部位关键杆件的疲劳寿命对比图

Fig.16 Fatigue life of key components in different parts

同样地,可采用频域法计算结构疲劳损伤。在风荷载作用下,输电塔结构应力时程是非对称的,使用 Goodman 公式转化为对称情况,通过频谱分析得到应力响应功率谱。根据风振疲劳寿命频域分析理论,计算得出输电塔结构的疲劳寿命。

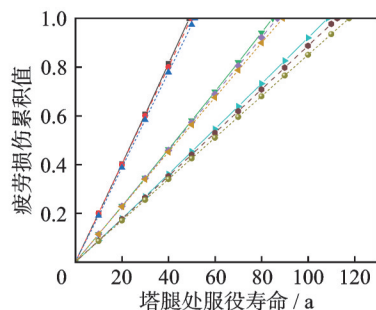
以塔腿部位为例,根据疲劳损伤演化计算流程,选取运营时间段 Δt 为 10 a,基于时域法和频域法,塔腿疲劳损伤累积图如图 17 所示。在锈蚀-疲劳耦合作用下得到的损伤累积见图 17(a),其中频域法得到的疲劳寿命结果相比于时域法偏小,更偏于保守。图 17(b、c)对比了仅疲劳作用、仅锈蚀作用和锈蚀-疲劳耦合作用下不同计算方法的损伤累积情况。可以看出:耦合作用下的疲劳损伤累积速度高于其他 2 种工况,随着时间的推移,将首先达到寿命极限。

按照相同方法可以得到塔身 1、塔身 2 以及塔头部位关键杆件的疲劳寿命,基于分层分析法和加权规则,根据式(22)计算得到时域法和频域法下输电塔疲劳寿命的预测值,如表 8 所示。其中:理想窄带法、W-L 法、Dirlik 法及 T-B 法为频域法。



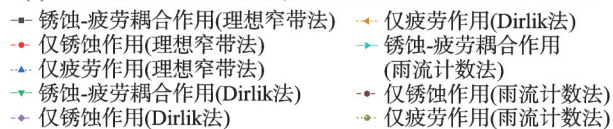
(a) 耦合作用下损伤累积

(a) Damage accumulation under coupling effect



(b) 理想窄带法、Dirlik 法和雨流法

(b) Ideal narrow-band method, Dirlik method and rainflow method



(c) W-L 法和 T-B 法

(c) W-L method and T-B method

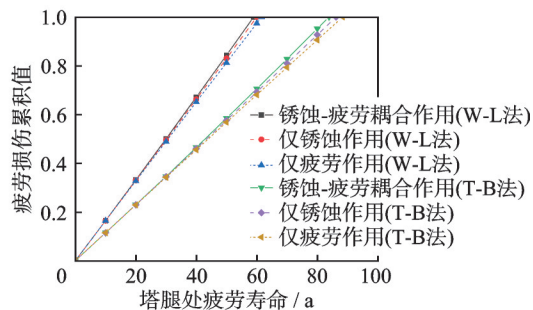


图 17 塔腿疲劳损伤累积图

Fig.17 Accumulated fatigue damage diagram of tower legs

由于输电塔的风振响应既不是窄带 Rayleigh 过程,也不是 Gauss 过程,而是介于二者之间的宽带过程,因此使用频域法对风振随机过程进行近似计算时,理想窄带法及其改善方法都会得出偏小的结果。由疲劳寿命预测结果可知,采取时域法得到的疲劳寿命是相对准确的,其次是 Dirlik 法和 T-B 法,而理想窄带法和 W-L 法的计算结果偏差较大。综合来看,考虑到输电塔的设计使用年限为 50 a,因此就结构运营寿命而言,输电塔塔体结构的可靠度是令人满意的,但对塔腿部分的安全性应有足够的关注。

表 8 输电塔疲劳寿命预测值
Tab.8 The fatigue life of transmission tower

类别	寿命预测值/a					频域法与时域法
	塔腿	塔身 1	塔身 2	塔头	总体寿命	寿命之比
时域法	108.52	164.77	173.66	254.97	147.19	1.00
理想窄带法	48.99	75.76	90.09	161.29	73.33	0.50
W-L 法	58.97	91.74	108.69	196.08	88.77	0.61
Dirlik 法	85.37	116.28	131.58	200.13	111.94	0.76
T-B 法	83.88	114.94	136.99	222.22	114.27	0.78

4 结 论

1) 通过锈蚀-疲劳耦合试验得到了构件截面尺寸和力学性能的退化规律,证明了单独考虑环境腐蚀或疲劳荷载,并不能充分表征锈蚀和疲劳对钢结构的影响。

2) 疲劳损伤的累积采用前向欧拉法,通过更新不同运营时期的有限元模型中单元截面退化、疲劳损伤和力学性能退化来进行计算。基于层次分析法,提出一种新型的考虑多环境因素的输电塔疲劳寿命评定方法。

3) 对比输电塔不同部位在仅考虑疲劳作用、仅考虑锈蚀作用和锈蚀-疲劳耦合作用下的疲劳寿命,可认为仅考虑单一因素影响会导致计算服役寿命偏大。在进行服役时间较长的输电塔疲劳寿命评估时,有必要同时考虑锈蚀和疲劳的影响。

4) 采用时域雨流计数法可以得到输电塔结构较为准确的疲劳寿命,而频域法计算得到的结构疲劳寿命均偏小,但是计算方法简便,其中 Dirlik 法和 T-B 法具有较高的精度,且偏于安全。

5) 目前的研究尚未充分考虑锈蚀和疲劳参数的时变特性对疲劳寿命的影响,在今后的研究中将进一步探讨动态参数下的输电塔时变可靠性计算方法和寿命预测方法。

参 考 文 献

[1] 杨靖波,李正,江俊.输电线路铁塔导线耦合振动动力特性研究[J]. 振动、测试与诊断, 2008, 28(2): 147-150.
YANG Jingbo, LI Zheng, JIANG Jun. Dynamic characteristics of wind-induced coupled vibration between conductor and tower of transmission line[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008, 28(2): 147-150. (in Chinese)

[2] XIE Q, ZHU R Y. Earth, wind, and ice [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2011, 9(2): 28-36.

[3] 王荣. 金属材料的腐蚀疲劳[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2001:2-14.

[4] 钱锡汇,梁浩,吴建刚. 输电线路服役杆塔受腐蚀构件的耐久性评估[J]. 华东电力, 2013, 41(8): 1695-1698.
QIAN Xihui, LIANG Hao, WU Jiangang. Corroded component durability evaluation for service tower of transmission line[J]. East China Electric Power, 2013, 41(8): 1695-1698. (in Chinese)

[5] 李杰,巫世晶,吴利霞,等. 受腐蚀输电杆塔整体结构安全性分析与评估[J]. 水电能源科学, 2016, 34(1): 176-178.
LI Jie, WU Shijing, WU Lixia, et al. Safety analysis and assessment of whole structure of corroded transmission tower [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(1): 176-178. (in Chinese)

[6] LOREDO-SOUZA A M, DAVENPORT A G. The influence of the design methodology in the response of transmission towers to wind loading[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(8): 995-1005.

[7] 鞠彦忠,门丽丽,衣亚伟. ACCC 塔线体系在风荷载作用下的动力响应[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(4): 749-752.
JU Yanzhong, MEN Lili, YI Yawei. Aluminum conductor composite core wire transmission line towers and lines system in the dynamic response under wind loads [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(4): 749-752. (in Chinese)

[8] 张哲铨,许金一,潘泽昊. 非稳态冲击风下输电塔风致振动特性研究[J]. 低温建筑技术, 2023, 45(9): 124-127, 131.
ZHANG Zhequan, XU Jinyi, PAN Zehao. Study on wind-induced vibration characteristics of transmission tower under non-stationary downburst [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2023, 45(9): 124-127, 131. (in Chinese)

[9] 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 Chuntao, LI Zhengliang, FAN Wenliang, 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. (in Chinese)
- [10] 白海峰, 李宏男. 输电线路杆塔疲劳可靠性研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(6): 25-31.
- BAI Haifeng, LI Hongnan. Fatigue reliability study on power transmission tower[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2008, 28(6): 25-31. (in Chinese)
- [11] 祖云飞, 李正良, 范文亮, 等. 模拟酸雨大气环境下 Q420B 高强钢角钢的腐蚀疲劳性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(8): 105-115.
- ZU Yunfei, LI Zhengliang, FAN Wenliang, et al. Experimental study on corrosion fatigue behavior of Q420B angle in simulated acid rain atmospheric environment[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(8): 105-115. (in Chinese)
- [12] 张春涛, 范文亮, 鲁黎, 等. 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[J]. 振动与冲击, 2014, 33(11): 155-160.
- ZHANG Chuntao, FAN Wenliang, LU Li, et al. Corrosion fatigue reliability analysis of a transmission tower-line coupled system with adaptive response surface method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(11): 155-160. (in Chinese)
- [13] BRACCESI C, CIANETTI F, TOMASSINI L. Random fatigue: a new frequency domain criterion for the damage evaluation of mechanical components[J]. International Journal of Fatigue, 2015, 70: 417-427.
- [14] WU Z W, ZHAO Y, LIANG J, et al. A frequency domain approach in residual stiffness estimation of composite thin-wall structures under random fatigue loadings[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 124: 571-580.
- [15] 周春良, 梁枢果. 风荷载作用下钢塔架的疲劳寿命预估[J]. 建筑技术开发, 2005, 32(3): 1-3.
- ZHOU Chunliang, LIANG Shuguo. Analysis of wind induce vibration fatigue of steel towers[J]. Building Technique Development, 2005, 32(3): 1-3. (in Chinese)
- [16] 王世村, 孙炳楠, 叶尹. 自立式单杆输电塔顺风风向风振疲劳分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(12): 1880-1884.
- WANG Shicun, SUN Bingnan, YE Yin. Analysis on alongwind fatigue of free-standing single rod transmission tower[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, 39(12): 1880-1884. (in Chinese)
- [17] 邱斌, 徐善华. 锈蚀钢板力学性能的退化规律[J]. 机械工程材料, 2014, 38(10): 60-63, 68.
- QIU Bin, XU Shanhua. Deterioration law of mechanical properties of corroded steel plates[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2014, 38(10): 60-63, 68. (in Chinese)
- [18] 中华人民共和国建设部. GB50017—2003 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [19] 萧以德, 张三平, 曹献龙, 等. 我国大气腐蚀研究进展[J]. 装备环境工程, 2005, 2(5): 3-9.
- XIAO Yide, ZHANG Sanping, CAO Xianlong, et al. Recent development in atmospheric corrosion study of materials in China[J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(5): 3-9. (in Chinese)
- [20] 杨慧, 何浩祥, 闫维明. 锈蚀和疲劳耦合作用下梁桥时变承载力评估[J]. 工程力学, 2019, 36(2): 165-176.
- YANG Hui, HE Haoxiang, YAN Weiming. Time-varying bearing capacity evaluation of bridge under coupling action of corrosion and fatigue[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(2): 165-176. (in Chinese)
- [21] SARKANI S. Influence of high-frequency components on fatigue of welded joints[J]. International Journal of Fatigue, 1990, 12(2): 115-120.
- [22] WIRSCHING P H, LIGHT M C. Fatigue under wide band random stresses[J]. Journal of the Structural Division, 1980, 106(7): 1593-1607.
- [23] DIRLIK T. Application of computers in fatigue analysis [D]. Coventry: University of Warwick, 1985.
- [24] BENASCIUTTI D, TOVO R. Spectral methods for lifetime prediction under wide-band stationary random processes[J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(8): 867-877.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.



第一作者简介:张腾,男,1997年9月生,硕士。主要研究方向为钢结构动力分析及监测。
E-mail:zhangteng0914@163.com

通信作者简介:何浩祥,男,1978年5月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为结构健康监测和减震控制。
E-mail:hxx7856@163.com