

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.022

基于蒙特卡罗法的 110 kV 锈蚀耐张塔结构可靠度研究

刘双武¹, 舒应军¹, 阎晓铭², 姜岚²

(1. 广东电网佛山供电局, 广东 佛山 528010; 2. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘 要:为了准确评估锈蚀对输电铁塔结构性能的影响,以某铁塔为例,建立三维有限元模型,分析不同锈蚀情况下铁塔的失效模式及极限承载力。基于描述采样的蒙特卡罗法,从锈蚀发展和抗力时变两个方向分别进行可靠度分析,研究铁塔的失效概率及可靠度发展规律。结果表明:当该铁塔主材锈蚀深度达到 3 mm 时,铁塔极限承载力及失效概率已不能满足规范的要求,基于抗力时变函数的可靠度分析结果显示该铁塔的安全运行寿命约为 36 年。

关键词:输电铁塔; 锈蚀深度; 抗力时变; 极限承载力; 蒙特卡罗法; 失效概率; 结构可靠度

中图分类号: TM754 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)05-0116-06

Study on Structural Reliability of 110 kV Corroded Tensioning Tower Based on Monte Carlo Methods

LIU Shuangwu¹, SHU Yingjun¹, YAN Xiaoming², JIANG Lan²

(1. Foshan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid, Foshan 528010, China;

2. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: For the accurate evaluation of the corrosion influence on the structural performance of transmission tower, a three-dimensional finite element model of a tower is established to analyze the failure mode and ultimate bearing capacity of the tower under different corrosion conditions. Monte Carlo method based on description sampling is used to analyze the reliability from two directions of rust development and time-varying resistance respectively and study the failure probability and reliability development law of the tower. The results show that when the rust degree of the main material of the tower reaches 3 mm, the ultimate bearing capacity and failure probability of the tower can not meet the requirements of the code, and the reliability analysis results based on the time-varying function of resistance show that the safe operation life of the tower is around 36 years.

Keywords: transmission tower; corrosion depth; resistance time-varying; ultimate bearing capacity; Monte Carlo method; failure probability; structural reliability

0 引言

输电铁塔作为架空线路中重要的承载部分,其安全性和耐久性对供电系统的正常运行意义重大。在自然环境中,铁塔易受到气候、湿度、污染等影响而产生锈蚀,尤其在沿海地区和环境恶劣的工业区更为严重^[1-2]。

对于输电铁塔而言,结构整体的可靠度是度量其可靠性的重要指标,是评价铁塔服役性能及运行寿命的关键。现有研究中较多关注于锈蚀构件的可靠性,提出了不同锈蚀位置、形式和程度下构件的承载力退化规律^[3-7]。由于受到工程结构形式复杂、失效模式多样以及计算工作量庞大等因素制约,工程中对锈蚀钢结构的整体可靠性研究较少。

基于以上背景,本文以某 110 kV 输电铁塔为例,根据塔身已经发生及未来可能发生整体锈蚀程度,选取线路正常运行工况,对铁塔结构的极限承载力进行有限元分析,研究其达到极限状态的规律。在此基础上,针对可变荷载及材料强度的不确定性,采用基于描述采样的蒙特卡罗法,确定杆塔结构的整体可靠度指标。通过分析对比,提出结构极限状态判别标准,为线路运维和现场处置提供依据。

1 铁塔锈蚀情况及极限承载状态分析

1.1 基本情况

佛山地区某 110 kV 耐张塔如图 1 所示,塔型为 JGU3,铁塔呼高 21 m,水平档距 295 m,垂直档距 190 m。建成于 1992 年,运行至今铁塔整体锈

基金项目:电力系统及大型发电设备安全控制和仿真国家重点实验室基金资助项目(SKLD21KM11)

第一作者简介:刘双武(1985—),男,湖北荆州人,高级工程师,学士,研究方向为输电线路运行检修,jzgalaw@163.com。

蚀较为严重,主材表面镀锌层大面积剥落,部分角钢锈蚀深度近 1 mm。钢材表面锈蚀等级属于 D 级。

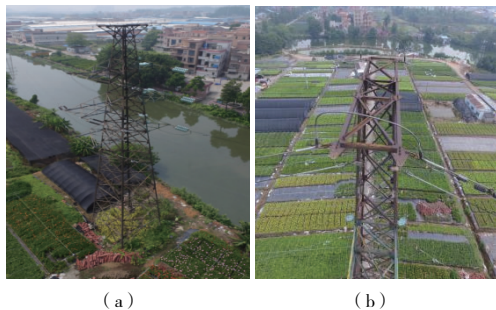


图 1 铁塔锈蚀情况

该线路导线为 LGJX—300/40 型钢芯铝绞线,地线为 GJ—50 型镀锌钢绞线,设计基本风速 30 m/s (30 年一遇),无覆冰。铁塔主材部分钢材为 Q345,其余钢材为 Q235。设计最大主材尺寸选用 140 mm×12 mm,正常运行工况下其最大应力比约 0.81。

1.2 结构极限状态判定

在正常运行情况下,该铁塔可能出现的极限状态包括:1) 杆件应力超过材料屈服强度;2) 受压杆件出现失稳而无法继续承载;3) 铁塔整体变形超过规范限值。

1.3 计算模型及分析方法

基于通用有限元软件 ABAQUS 建立铁塔的三维模型如图 2 所示,角钢采用梁单元模拟,考虑材料非线性及几何非线性,允许材料强度进入塑性、杆件发生屈曲变形。对模型施加正常使用工况下的导地线和金具自身质量、导地线不平衡张力以及其传给铁塔及铁塔自身承受的风荷载,铁塔自身质量由程序自动计算,通过分析判定在结构完好及不同的锈蚀情况下结构的极限状态。

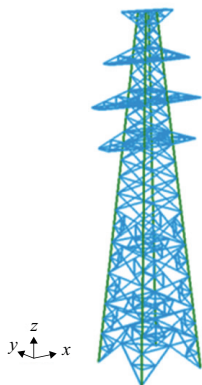


图 2 铁塔有限元模型图

根据文献[8],相比孔状锈蚀、区域锈蚀等情况,全面锈蚀对角钢的刚度和强度影响更大。在本项目所在周边工业大气环境中,铁塔以均匀锈蚀为主,塔腿部分同时受到土壤锈蚀等因素影响,腐蚀速度较塔身更快。为了简化分析,仅考虑整塔全面锈蚀以及塔腿锈蚀程度不同的多重工况。杆件的锈蚀程度通过调整模型中角钢的截面尺寸实现。

计算采用弧长法(Riks),荷载因子(实际施加荷载与最初施加正常运行工况荷载标准值的比值)从 1.0 开始计算,反复迭代,直至最终不收敛时计算结束。正常运行工况根据规范要求采用基本风速、无冰、未断线情况下的荷载组合标准值。

1.4 计算工况及结果

根据铁塔现状及未来可能发生的最不利情况,根据杆件锈蚀程度不同,确定 5 种分析工况,如表 1 所示,杆件最大锈蚀深度 3 mm。

表 1 分析工况

工况编号	锈蚀情况
1	铁塔完好
2	全部杆件锈蚀深度 1 mm
3	全部杆件锈蚀深度 2 mm
4	塔腿主材深度锈蚀 3 mm,其它杆件锈蚀深度 2 mm
5	全部杆件锈蚀深度 3 mm

依次计算以上工况,结构响应情况如表 2 所示,荷载因子-位移曲线如图 3 所示。曲线拐点处,荷载变化不大,铁塔变形急剧增加,视为结构达到极限状态。极限状态对应的铁塔杆件塑性应变及其最大值如图 4 所示。

表 2 各工况响应情况

工况编号	正常运行情况		进入屈服		极限状态	
	荷载因子	杆件最大应力/MPa	荷载因子	荷载因子	杆件最大应力/MPa	最大水平位移/mm
1	1.0	201	1.90	2.32	370	12.2
2	1.0	218	1.73	2.13	371	11.4
3	1.0	241	1.57	1.95	367	12.6
4	1.0	268	1.41	1.68	373	11.6
5	1.0	270	1.40	1.67	374	11.2

注:表中最大水平位移按规范中 5 m/s 风速工况计算。

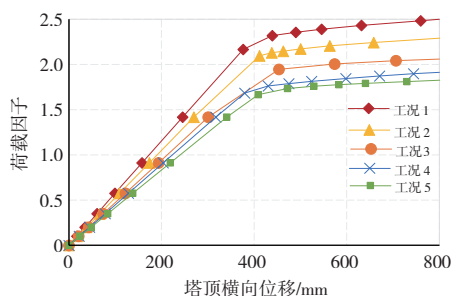


图3 铁塔荷载-位移曲线

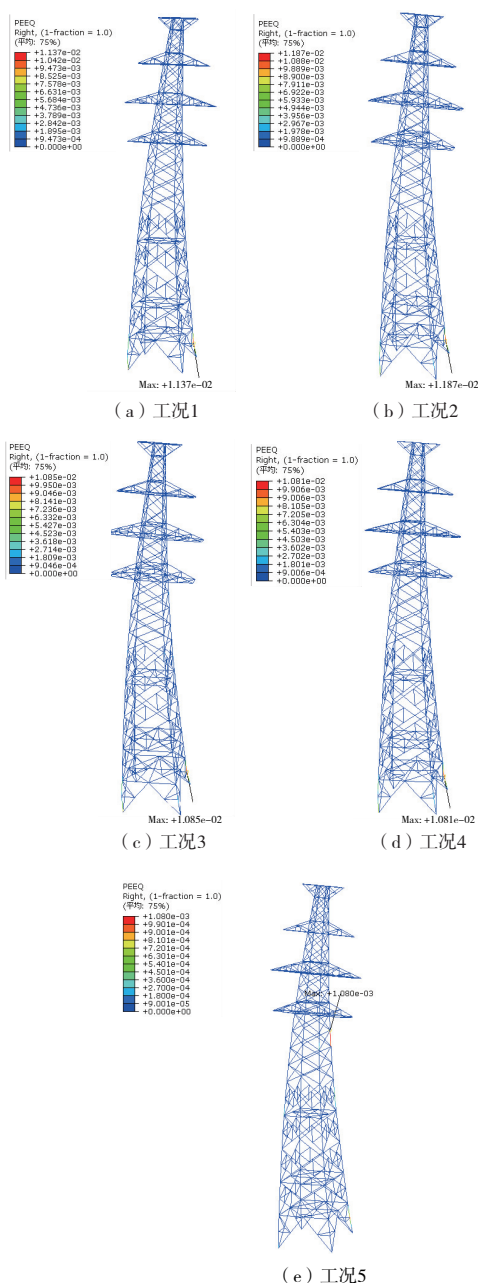


图4 极限状态下铁塔塑性应变

1) 随着锈蚀程度加重,结构承受的极限荷载逐步降低。按照荷载及材料设计值进行换算,工

况3极限荷载作用下,杆件应力比已接近1.0。

2) 极限状态下,主材最大应力约为370 MPa,已超出钢材屈服强度而进入塑性阶段,其最大塑性应变约为1%。至工况5时,最大塑性应变出现位置由塔腿移动至塔身靠近下横担处主材上。相比塔腿主材截面75%残余厚度,塑性应变最大处截面的残余厚度约62%,成为铁塔的最薄弱部位。

3) 正常运行及极限状态下,结构均为整体弯曲变形,由于杆件的长细比适中,各工况未出现杆件压曲导致失稳现象。结构整体变形均不大,远小于《架空输电线路杆塔结构设计技术规程》中耐张塔 $7h/1\ 000$ (h 为基础顶面至计算点的高度)的挠度限值要求。

由上可知,该铁塔的极限状态为杆件应力屈服,塑性应变达到某一定值。计算中也发现,相比铁塔中的主材,斜材、辅材及横隔材等杆件的锈蚀程度对分析结果基本没有影响。

2 基于蒙特卡罗法的可靠度计算方法

上述分析结果虽满足规范对于铁塔承载力及变形的要求,但是采用安全系数(进入屈服状态下荷载因子)反映结构的安全性存在以下问题:1)未定量考虑抗力和荷载效应的随机性;2)安全系数只与抗力和作用效应均值的比值有关,而与两者的离散程度无关。因此,该方法并不一定能真实反映结构的实际安全状态。

结构可靠度是结构在规定的时间内、规定的条件下完成预定功能的概率。它是结构可靠性的概率量度,相比采用安全系数评估更为科学合理。根据文献[9],发生延性破坏的结构构件可靠度及失效指标如表3所示。

表3 可靠度指标 β 及失效概率 P_f

指标	安全等级		
	一级	二级	三级
β	3.7	3.2	2.7
P_f	1.1×10^{-4}	6.9×10^{-4}	3.5×10^{-3}

对于该铁塔而言,安全等级为二级。在其运行过程中受力以风、雪等活荷载为主(计算结果显示自身质量引起的塔腿主材内力不超过20%),荷载随机波动较大。另外,结构的材料性能也存在不确定性,因此有必要研究在设计基准期内,在一系列随机变量的影响下锈蚀铁塔结构的可靠性,以确定其是否能够继续正常运行。

2.1 计算原理

假设影响结构可靠性的随机变量为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 其概率密度函数分别为 $f_{x_1}, f_{x_2}, \dots, f_{x_n}$, 结构的功能函数为 $Z=g(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 则 $g(x)>0$ 、 $g(x)<0$ 、 $g(x)=0$ 分别表示结构安全、失效和处于临界状态。

结构的失效概率如式(1)所示。

$$P_f = \int_{g(x) \leq 0} \dots \int f(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (1)$$

当结构的失效概率超出结构承载力极限状态设计可靠指标对应的失效概率值时,视为结构可靠度不满足要求。

由于研究对象杆件较多,功能函数复杂,且随机变量的分布特性不同,本文采用蒙特卡罗法(monte carlo simulation, MCS)进行可靠度分析。该方法的优点是概念简单、直观,不受功能函数非线性和复杂性的影响,不需要对基本随机变量进行正态化,而且收敛速度与问题的维数无关。在样本量充足的情况下,该方法可以获得高精度的失效概率估计值。但缺点是为了确保达到足够的精度,抽样所需的计算量相当大,计算效率不高^[10-11]。为了解决这一问题,分析中采用了基于方差缩减技术的描述采样法,抽样范围更小更紧凑,使用同样数量的采样点,可以得到更好的可信度,大大提高了计算效率^[12-14]。

2.2 计算参数

由于铁塔构件均采用标准型钢,工程中对其允许偏差有着严格的要求,构件自身质量和几何尺寸差异性不大,对结果的影响可以忽略不计。在正常运行情况下,荷载作用中随机性最大的为风荷载,结构抗力中的构件强度也存在一定的随机性,因此可确定风荷载和钢材强度为两个随机变量。其分布形式及统计参数如表 4 和图 5 所示。

表 4 随机变量分布参数

随机变量	分布形式	均值	方差
风荷载	极值 I 型	0.999	0.195
钢材强度	正态分布	1.08	0.08

由前文研究可知,对于该铁塔结构,当体系中的某一根塔腿主材进入屈服且塑性应变达到 1%,结构整体虽然并未完全失效,但结构承载力基本

达到峰值,之后结构变形快速增长而超出规范限值要求,故以此作为该铁塔的失效模式,铁塔主材的塑性应变作为响应变量。

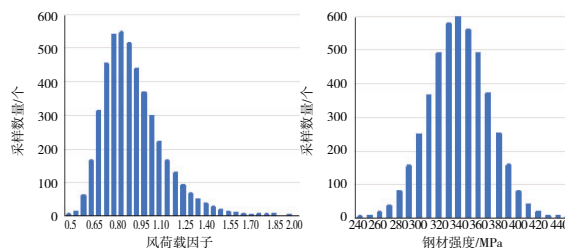


图 5 随机变量采样分布图

通过比较,抽样次数取为 5 000 次,既能确保计算精度,又同时兼顾了计算成本。

2.3 计算流程

提取有限元软件中的相关输入参数作为随机变量,赋予其分布特性及统计参数。根据计算精度要求,基于蒙特卡罗法,程序生成足够的随机变量值,反复调用有限元软件进行分析,提取每次响应变量结果,直到全部计算完成。统计计算结果,根据确定的失效准则确定失效概率,最终判断结构可靠度是否满足要求。操作流程如图 6 所示。

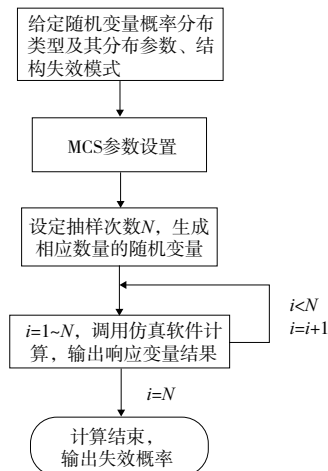


图 6 蒙特卡罗模拟流程图

3 考虑锈蚀发展的结构可靠度分析

利用本文中的计算模型,以风荷载和钢材强度作为随机变量,铁塔主材的塑性应变作为响应变量,分别计算正常运行工况下表 1 中各工况下的结构失效概率。

计算结果如表 5 所示。可见随着整体锈蚀深度的增大,结构塑性应变更明显,当锈蚀深度超过 2 mm 后,结构的失效概率超出安全等级二级对

应的延性破坏的失效概率限值(表3)。对比本文表2中的分析结果可知,采用常规设计方法与可靠度分析结果规律相近。

表5 不同锈蚀工况下铁塔的失效概率

工况编号	锈蚀深度/mm	塑性应变最大值	失效概率
1	0	0	0
2	1	0	0
3	2	0.021	3.33×10^{-4}
4	塔腿3,其余2	0.028	9.99×10^{-4}
5	3	0.033	2.69×10^{-3}

参考文献[15]规定:线路工程中对于在役的钢结构,当结构件厚度(直径)腐蚀减薄至原规格80%及以下,或部件表面腐蚀坑深度超过2mm或者出现锈蚀穿孔、边缘缺口,金具厚度腐蚀减薄至原规格90%及以下均应更换或加固处理。可以看出,以上分析结果与这一判断标准基本一致。

4 考虑抗力时变的结构可靠度分析

工程结构件在使用过程中,其抗力会随着时间的变化而逐步退化,使得结构的可靠度比最初设计时降低,钢材锈蚀正是其中的一种典型情况。工程中可以采用钢结构的抗力时变函数来表征这一变化,利用蒙特卡罗法对结构的可靠度变化及残余寿命进行大致估测^[16-17]。

铁塔角钢采用热浸镀锌处理,使其在一般的大气环境中可达10年以上的有效保护。随着防腐层的变薄、剥落,钢材开始出现锈蚀,抗力开始下降,且趋势逐年加快。这是一个与时间相关的随机变量,与荷载、环境和材料内部因素等诸多影响因素有关,考虑以上影响因素,引入钢材抗力时变函数^[18-19]如下:

$$\varphi(t) = \left[1 - 0.7 \times \frac{(t-t_e)^3}{1\,000} \times 0.04 \times \alpha \times \varepsilon \right] \times \left(1 - \frac{t^2}{r^2} \right) \quad (2)$$

式中: t 为结构从建成之日到计算点的时间,年; t_e 为不同防腐措施的有效作用时间,年;热浸镀锌取10年; α 为不同钢材防腐蚀性能区分系数,普通钢材取1; ε 为环境影响系数,污染严重可取1; r 为静载和反复荷载区分系数,疲劳验算取0.05。

将以上函数代入钢材强度的随机变量中,分析对象为完好的铁塔模型,其他计算条件同第3节。采用蒙特卡罗法计算得到不同运行年份下,

结构的可靠度变化情况如表6和图7所示。可见,当该铁塔运行超过36年后,结构的失效概率开始超出规范要求,此时结构抗力降至最初的50%左右。

表6 不同运行年份下铁塔的失效概率

运行年份/年	塑性应变最大值	失效概率
32	0	0
34	0	0
36	0.013	3.41×10^{-4}
38	0.035	9.48×10^{-3}

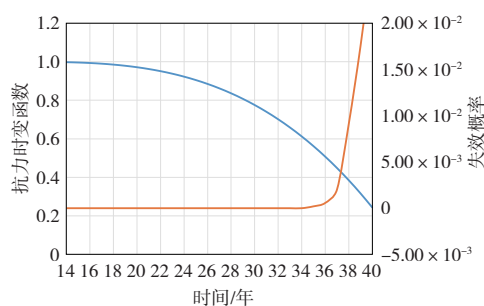


图7 抗力时变函数及失效概率曲线

5 结语

通过对某110kV锈蚀铁塔进行极限承载力计算和基于锈蚀发展和抗力时变的可靠度分析,得出以下结论。

1)随着荷载的增加,铁塔破坏模式为主材屈服并发生一定的塑性应变。本例中,铁塔杆件全面锈蚀深度不超过2mm时,结构承载力及刚度均满足规范限值要求。

2)考虑锈蚀发展情况下,当本例中铁塔杆件全面锈蚀深度达到3mm后,结构整体可靠度已超出规范限值要求;考虑抗力时变情况下,该铁塔的正常运行寿命大约为36年。

3)采用基于描述采样的蒙特卡罗法适用于功能函数复杂的构件或结构的可靠度分析,方法直观,能够保证计算精度和计算效率。

4)考虑构件锈蚀发展和抗力时变的可靠度分析精度均依赖于所定义随机变量参数的准确性,未来需要更多的研究及实验成果对参数不断进行修正,使分析结果更贴近于实际情况。

参考文献:

- [1] 吴树涛,林桂,方煌盛,等. 输电线路铁塔塔腿腐蚀分析及防治措施研究[J]. 能源与环境,2023(3):41-44.

- 收稿日期:2023-11-13

100(4):2057-2061.

- 收稿日期:2023-10-26