

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2023.02.013

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:张煜恒,沙池橙,廖海林,钱振东,黄国,吕勇,倪宏宇.基于杆件核心度的输电铁塔健康状态可靠度评价研究[J].西安理工大学学报,2023,39(2):281-290.

ZHANG Yuheng, SHA Chicheng, LIAO Hailin, QIAN Zhendong, HUANG Guo, LÜ Yong, NI Hongyu. Research on health state reliability evaluation of transmission tower based on member core degree[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2023, 39(2): 281-290.

基于杆件核心度的输电铁塔健康状态可靠度评价研究

张煜恒¹, 沙池橙¹, 廖海林², 钱振东¹, 黄国³, 吕勇², 倪宏宇²

(1. 东南大学智能运输系统研究中心, 江苏南京 211189;

2. 国网绍兴供电公司, 浙江绍兴 312000; 3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 输电铁塔属于由螺栓、杆件等多部件构成的大型复杂体系结构, 准确、定量地评价其健康状态始终是输电线路运维的重要方向。本文为解决此类问题, 提出了一套基于杆件核心度的输电铁塔健康状态可靠度评价方法。首先, 基于现役老旧铁塔状态统计, 构建了一套“结构状态-荷载响应”式输电铁塔健康状态评价指标体系与评定细则。然后, 针对典型铁塔进行 ANSYS 有限元分析, 基于杆件强度极限状态与失稳极限状态, 提出了一种输电铁塔杆件核心度分类方法, 赋权于各服役杆件。最后, 基于系统可靠理论与 PNET 概率网络算法建立了一套输电铁塔结构健康状态可靠性评估方法, 较准确地定量评价输电铁塔健康状态, 并选取浙江 500 kV 阳仪线 ZMS5222 直线塔进行算例检验。研究结果为输电线路内薄弱铁塔定位及具体薄弱环节确定提供了理论基础, 可进一步指导铁塔检修周期、特塔特检等实际铁塔维检困难。

关键词: 输电铁塔; 健康状态定量评价; 系统可靠度; 杆件核心度; 评价指标体系

中图分类号: TM753 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2023)02-0281-10

Research on health state reliability evaluation of transmission tower based on member core degree

ZHANG Yuheng¹, SHA Chicheng¹, LIAO Hailin², QIAN Zhendong¹, HUANG Guo³, LÜ Yong², NI Hongyu²

(1. Intelligent Transportation System Research Center, Southeast University, Nanjing 211189, China;

2. State Grid Shaoxing Power Supply Company, Shaoxing 312000, China;

3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: In order to solve the difficulty in evaluating the health status of the large-scale complex system structures composed of bolts, rods and other components such as transmission towers quantitatively and accurately, firstly this paper constructs an index system and evaluation rules of health status of transmission tower in the form of “structure-load.” Secondly, with a finite element analysis of a typical iron water by ANSYS, a classification method for the core degree of rods is proposed based on the strength limit state and the instability limit state of the rods. Finally, a reliability assessment method for the health state of transmission tower is purposed based on

收稿日期: 2022-06-17; 网络出版日期: 2023-01-06

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail//61.1294.n.20230104.1646.002.html>

基金项目: 国家电网公司科技资助项目(5600-202019160A-0-0-00)

第一作者: 张煜恒, 男, 博士生, 研究方向为基础设施智能监测与养护决策。E-mail: zhangyh_seu@hotmail.com

通信作者: 钱振东, 女, 教授, 博导, 研究方向为基础设施智能监测与养护决策。E-mail: qianzd@seu.edu.cn

the theory of system reliability. Indicators such as working years, conditions, deterioration of members are taken into consideration. A ZMS5222 transmission tower of 500 kV in the Zhejiang Province is used as a test case. The results provide a theoretical basis for the location of weak towers and the determination of specific weak links, which can further guide the difficulties in actual tower maintenance such as the maintenance cycle and special inspections of special towers.

Key words: transmission tower; quantitative assessment of health status; system reliability; core degree of rod; indexes system

输电铁塔作为输电网络系统的重要支撑结构与物理载体,其结构健康状态直接关系到全线路系统安全。因其长期暴露在恶劣环境与极端天气下,输电铁塔长期服役过程中必然出现材料老化、螺栓松动、钢材锈蚀等不同程度的损伤现象,导致结构不断弱化^[1-3]。台风、龙卷风、覆冰等恶劣灾害的频发更会加速输电铁塔结构局部损伤、杆件失稳甚至倒塔等重大事故发生。由于输电铁塔灾害的偶发性与突发性,针对铁塔灾害的措施多集中于事故后期的抢险阶段,难以根据及时输电铁塔健康状态评价进行预检维修^[4],亟需一种科学、准确的输电铁塔健康状态评价技术。

然而,输电铁塔作为由螺栓、杆件等多部件构成的大型复杂体系,其结构健康状态的定量分析一直以来都是困扰工程界的难题。近年来,有关输电铁塔病害理论与工程应用实践方面开展了大量的工作,但研究多针对输电塔铁塔健康状态中某单一指标、单一工况进行分析,缺乏全局性^[5-6]。或受限于理论算法与有效数据支撑,仅从定性的层级对输电线路结构健康状态进行指标分析与简单的打分评价^[7-9],受主观影响较大,稍欠评价准确性。总之,限制于输电铁塔的体系结构复杂度、所处地况服役环境的多样性,缺少一套考虑多维度指标体系的输电铁塔结构健康状态的定量评价方法。

本研究基于现役老旧铁塔状态统计,综合考虑输电铁塔主要劣化因素,构建了一套“结构状态-荷载响应”式输电铁塔指标评价体系与评定细则。然后,针对典型铁塔进行 ANSYS 有限元分析,基于杆件强度极限状态与失稳极限状态,提出输电铁塔构件核心度概念与判定阈值,可实现各服役杆件异权标定。最后,基于系统可靠理论与 PNET 概率网络算法建立了一套输电铁塔结构健康状态可靠性评估方法,可较准确地定量评价输电铁塔健康状态,并选取浙江 500 kV 阳仪线 ZMS5222 直线塔进行算例检验,研究思路见图 1。研究结果为输电线路内薄弱铁塔定位及具体薄弱环节确定提供理论基础,可进一步指导铁塔检修运维工作。

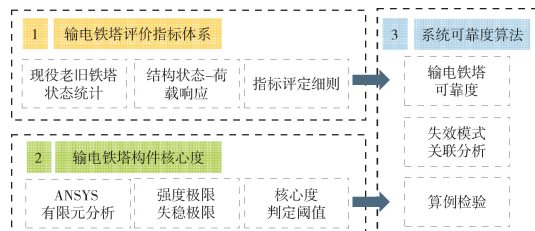


图 1 研究思路
Fig. 1 Research ideas

1 输电铁塔指标评价体系

为全面、准确地评价输电铁塔整体健康状态,本研究基于现役老旧铁塔状态统计分析^[10-12],依托现行标准^[13],采用“结构状态-荷载响应”方式建立输电线路健康状态指标评价体系,充分考虑输电铁塔年久劣化因素、输电铁塔常见破坏病害与关键构件的异化状态。

其中,“结构状态”指标表征着输电线路各部件服役状态与异化程度,主要包含输电铁塔螺栓、杆件、结构等承载性能参数,考虑到输电铁塔服役时间较长,老化情况普遍,增设年久劣化模块协同考虑。“荷载响应”指标表征着输电线路承受的外界荷载响应的种类与等级,包含多种常见危害类型对应的突发荷载响应。建立“结构状态-荷载响应”梯阶层次指标评价体系,见图 2,其中各二级指标的具体评价细则见附录表 S1。

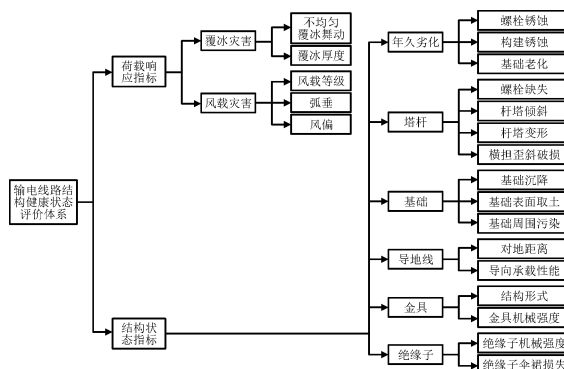


图 2 输电铁塔健康状态指标体系
Fig. 2 Health status index system of transmission Tower

2 输电铁塔杆件核心度

输电铁塔是以杆件、螺栓为主体的立体桁架结构,见图3,因构件区位和荷载作用位置的不同,各结构构件承载应力与失效后对整体铁塔结构系统影响程度差异性极大。例如,主材的破坏与斜材的破坏对于输电铁塔健康程度产生的影响不同,进行系统可靠度计算时将其同权处理必然会导致健康状态的评价失真。因此在进行输电铁塔结构健康状态可靠度评价时需针对不同类别杆件进行差异化分析。首先,本文提出输电铁塔构件核心度概念,其表征某杆件在铁塔结构中失效对整体铁塔结构的影响程度,即某杆件失效导致铁塔结构健康状态劣化越严重,则该杆件核心度越高。

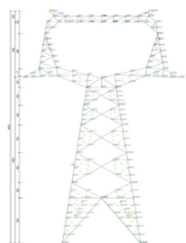


图3 输电铁塔单线图

Fig.3 Schematic diagram of transmission tower components

输电铁塔破坏模式多样,其中由于杆件、螺栓等构件破坏导致的铁塔结构损伤是最主要的破坏模式,因此本研究选择采用ANSYS有限元分析软件,从构件应力范畴进行核心度的划分。本研究选取典型直线塔为例,基于输电铁塔单线图见图3,建立铁塔ANSYS有限元模型见图4,其中采用BEAM188三维梁单元模拟主材,采用LINK180单元模拟辅助材。采用耦合节点转角位移和线位移的方法,模拟交叉斜材相交处的连接螺栓^[14]。对于塔脚,假定其与基础之间刚接,约束相应节点的所有位移。在定义模型材料时,钢材的非线性力学行为采用理想弹塑性模型。弹性模量为 $2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$,Poisson比为0.3。



图4 输电铁塔有限元模型

Fig.4 Finite element model of transmission tower

输电铁塔的杆件失效主要由强度破坏及失稳破坏两种破坏方式共同构成,因此在定义杆件核心度

时,本研究定义强度系数 φ 与压杆稳定系数 χ ,其中强度系数 φ 代表构件负荷占其强度极限负荷的比例,见式(1)。各杆件承受的结构应力由有限元模拟计算得出,杆件强度设计值,见表1。

$$\varphi = \frac{\sigma}{mf} \quad (1)$$

式中: φ 为构件负荷与强度的比例系数; σ 为轴心拉应力或轴心压应力值(N/mm^2); f 为钢材的强度设计值(N/mm^2); m 为构件强度折减系数。对于受拉构件,双肢连接的角钢 $m=1.0$,单肢连接的角钢构件(肢宽 $>40 \text{ mm}$) $m=0.70$,单肢连接的角钢构件(肢宽 $\leq 40 \text{ mm}$) $m=0.55$ 。对于受压构件,双肢连接的角钢 $m=1.0$,单肢连接的角钢 $m=0.85$,组合断面构件(无偏心) $m=1.0$,组合断面构件(有偏心) $m=0.85$ 。

表1 钢材强度设计值

Tab.1 Design value of steel strength

牌号	厚度或内径/mm	抗拉、抗压/ $(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$
Q235 钢	(0,16]	215
	(16,40]	205
	(40,60]	200
	(60,100]	190
Q355 钢	(0,16]	310
	(16,35]	295
	(35,50]	265
	(50,100]	250

压杆稳定系数 χ 代表构件负荷占其失稳极限负荷的比例,见式(2)。

$$\chi = \frac{\sigma}{m_N f} \quad (2)$$

式中: m_N 为压杆稳定强度折减系数,根据翼缘板自由外伸宽度 b 与厚度 t 之比计算确定;当 $\frac{b}{t} \leq \left(\frac{b}{t}\right)_{\text{lim}}$ 时, $m_N = 1.0$;当 $\left(\frac{b}{t}\right)_{\text{lim}} \leq \frac{b}{t} \leq \frac{380}{\sqrt{f_y}}$ 时, $m_N = 1.677 - 0.677 \frac{b/t}{(b/t)_{\text{lim}}}$ 。

对于轴心受压构件:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{\text{lim}} = 10 \sqrt{\frac{235}{f_y}} + 0.1\lambda \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (3)$$

对于压弯构件:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{\text{lim}} = 15 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (4)$$

式中: λ 为构件长细比,当 $\lambda < 30$ 时,取 $\lambda = 30$,当

$\lambda > 100$ 时,取 $\lambda = 100$; f_y 为钢材的强度标准值; φ 为轴心受压稳定系数。

输电铁塔各杆件的核心度均可由式(1)~(2)计算得出,但由于输电铁塔杆件繁多,体系复杂,逐一计算各杆件核心度会导致后续可靠度计算量极大,不利于研究的应用与推广。本研究采用先分类、后赋权的方式进行可靠度分析。依托于输电铁塔有限元计算结果,针对各杆件应力状态进行聚类分析,并选定较为有区分度的阈值作为分类依据。由于输电铁塔各杆件主要破坏形式主要分为强度不足破坏与压杆失稳破坏两类,本文选定强度系数 φ 与压杆稳定系数 χ 对输电铁塔杆件核心度进行分类,分为一类杆件、二类杆件、三类杆件,分类标准见表 2。

表 2 杆件核心度分类

Tab. 2 Classification of core degree of members

φ 阈值	χ 阈值	杆件核心度
$0.9 \leq \varphi$	—	一类杆件
$0.7 \leq \varphi < 0.9$	$\chi \geq 0.9$	一类杆件
	$\chi < 0.9$	二类杆件
$\varphi < 0.7$	$\chi \geq 0.9$	二类杆件
	$\chi < 0.9$	三类杆件

3 输电铁塔健康状态可靠度评价

输电铁塔属于多组件构成的复杂桁架体系结构,该系统正常服役状态是由若干彼此联系并相互协调的工作单元能否正常工作共同决定。例如专家打分法等常规评价方法在针对此类复杂系统时无法考虑各构件、各子系统对整体的差异影响,评价易失真。

本文基于系统可靠度^[15-18],依据“构件-子系统-整体”划分研究尺度,综合考量各失效模式与其之间关系,建立“输电铁塔”系统与“铁塔构件”子系统,异权分配各类核心杆件,针对输电铁塔健康状态评价进行研究。

3.1 输电铁塔可靠度

定义输电铁塔可靠度 $R(t)$ 为描述输电铁塔整体正常工作的可靠性,即无故障完成服役功能的输电铁塔占总投入运营铁塔的百分数,其取值范围应为: $0 \leq R(t) \leq 1$ 。定义输电铁塔不可靠度为输电铁塔在预定条件及时间内,不能完成服役功能的概率,即失效概率,用 $F(t)$ 表示。输电铁塔可靠度与不可靠度之间应满足互补关系,即:

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (5)$$

3.2 输电铁塔结构安全余量方程

输电铁塔在正常服役状态下必然存在一定的状

态富裕,分析输电铁塔结构各富裕状态余量是明确输电铁塔结构可靠度界限的基础。输电铁塔各元件破坏的原因主要为突发荷载状态下某元件瞬时应力高于其应力极限状态或失稳极限状态。因此,本文采用结构内力状态指标进行表征,依托有限元应力分析结果,以设计容许应力为界限建立结构安全余量方程。定义失效元件集合为 I_C ,则其余铁塔结构中各构件安全余量为:

$$M_i = A_i C_{yi} + \sum_{t \in I_C} a_{it} A_t C_{yt} - \sum_{k=1}^{Q_k} b_{ik} P_k, i \notin I_C \quad (6)$$

式中: A_i 为铁塔 i 元件截面积; P_k 为铁塔 k 元件所承受外荷载; b_{ik} 表示铁塔 k 节点荷载为单位值时 i 元件中产生的内力; C_{yi} 为铁塔 i 元件许用应力; a_{it} 表示铁塔 t 元件抗力为单位值时 i 元件中产生的内力,称铁塔抗力影响系数; Q_k 是 i 元件全部节点数。

输电铁塔绝大部分元件均为弹塑性材料,其在达到屈服极限后不再能继续承担更大的内力,本文采用反向节点力法表征此现象。即将铁塔失效元件承载力通过反向节点力的形式加载于其余输电铁塔结构上,并以抗力影响系数形式表征。输电铁塔元件脆性破坏前正常产生反向节点力,当其达到屈曲极限后,其产生的抗力影响系数为零。考虑输电铁塔元件屈曲破坏的输电铁塔安全余量为:

$$M_i = \sum_{t=1}^n a_{it} A_t C_{yt} - \sum_{k=1}^{Q_k} b_{ik} P_k$$

$$a_{it} = \begin{cases} 0, & \text{屈曲破坏} \\ 1, & t = i \end{cases}$$

$$C_{yt} = \begin{cases} \sigma_y, & s > 0 \\ \min[\sigma_y, \sigma_{cr}], & s < 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: n 为铁塔总元件数。除失效元件以外元件内力 s 为拉力时,容许应力取输电铁塔元件屈服应力 σ_y ,当内力为压力时,考虑屈曲破坏现象,容许应力取屈服应力 σ_y 与屈服临界应力 σ_{cr} 最小值。输电铁塔屈曲临界应力 σ_{cr} 为:

$$\sigma_{cr} = \psi m_N \sigma_y \quad (8)$$

式中: ψ 、 m_N 分别为输电铁塔轴心受压构件稳定系数和铁塔压杆稳定强度折减系数。

3.3 输电铁塔元件可靠性指标

输电铁塔作为超静定结构,其系统结构产生风险失效是由于多个元件共同失效导致。因此本研究选取输电铁塔元件可靠性指标作为基础分析对象,进而判断结构失效模式特征,基于失效模式耦合完成输电线路结构系统可靠性分析。

可靠性指标主流计算方法分为中心点法与一次二阶矩阵方法^[19]。由于输电铁塔元件可靠性多呈正态分布,采用中心点法进行计算时,其可靠性指标 $\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z}$ 受展开点的选择影响较大,且在功能函数的选取上分析结果乖离度也较大。本研究选择一次二阶矩阵方法,线性化点选于其失效边界,并选择结构最大可能失效点,该方法在输电铁塔类多随机变量范畴下具有较优的适用性。设某元件的安全余量方程形式为:

$$M = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (9)$$

式中: X_i 为服从正态分布的随机变量。

则在 X^* 点线性化展开为:

$$M \approx g(X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*) + \sum_{i=1}^n (X_i - X_i^*) \frac{\partial M}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \quad (10)$$

输电铁塔安全余量 M 的均值为:

$$\mu_M = g(X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*) + \sum_{i=1}^n (\mu_{X_i} - X_i^*) \frac{\partial M}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \quad (11)$$

考虑随机变量的相关性, M 的标准差为:

$$\sigma_M = \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial M}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \frac{\partial M}{\partial X_j} \Big|_{X^*} \rho_{ij} \sigma_{X_i} \sigma_{X_j} \right]^{\frac{1}{2}} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \frac{\partial M}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \sigma_{X_i} \quad (12)$$

其中:

$$\rho_{ij} = \frac{\text{Cov}[M_i, M_j]}{\sigma_{M_i} \sigma_{M_j}} \quad (13)$$

$$\alpha_i = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{\partial M}{\partial X_j} \Big|_{X^*} \rho_{ij} \sigma_{X_j}}{\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial M}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \frac{\partial M}{\partial X_j} \Big|_{X^*} \rho_{ij} \sigma_{X_i} \sigma_{X_j} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (14)$$

式中: ρ_{ij} 为 X_i 与 X_j 之间的相关系数; α_i 为灵敏度系数,它表示第 i 个随机变量对标准差的相对影响; σ_{X_i} 为随机变量 X_i 的标准差。

可得,输电铁塔元件的可靠性指标为:

$$\beta = \frac{g(X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*) + \sum_{i=1}^n (\mu_{X_i} - X_i^*) \frac{\partial M}{\partial X_i} \Big|_{X^*}}{\sum_{i=1}^n \alpha_i \frac{\partial M}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \sigma_{X_i}} \quad (15)$$

最终求得 X^* 应位于结构失效面中,即 $g(X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*) = 0$,故变化式(15)为:

$$X_i^* = \mu_{X_i} - \beta \alpha_i \sigma_{X_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (16)$$

式中 X^* 和 β 用迭代法求得,迭代过程说明如下。

首先,假设1个 β 和验算点 X^* ,一般取 $X^* = \mu_{X_i}$;计算 α_i 值,并求得 X^* ;检验 $g(X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*) = 0$ 是否满足。若不满足,重复上述迭代,直到 $g(X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*) = 0$ 检验成功,此时可根据式(14)得输电铁塔元件可靠性指标 β 。

3.4 输电铁塔失效模式可靠性指标与相关系数

输电铁塔中多个元件同时失效会导致某一种铁塔整体失效模式出现,而输电铁塔结构系统可靠度是由若干种出现概率不同的失效模式决定的。因此本节针对输电铁塔主要失效模式进行分析,并确定其各失效模式之间的相关系数。

假设输电铁塔共有 N 个元件,建立各铁塔元件的安全余量方程并求得可靠性指标 β 。针对所求的所有铁塔元件可靠性指标,设其中可靠性指标最小者为失效元件,将其刚度设为0并重构铁塔刚度矩阵,考虑此失效元件产生的反向节点力,计算新结构的各铁塔元件可靠性指标。此过程代表某一元件失效对整体结构的影响,重复上述过程至铁塔结构成为机构,即刚度矩阵行列式为0,至此形成某单一失效结构模型,针对此单一失效模式下失效元件展开如下分析。

设 N 个元件中此时已失效 q 个元件,分别列为 r_1, r_2, \dots, r_q ,则输电铁塔失效模式的失效概率为:

$$P_f = P[M_{r_1}^{(1)} \leq 0 \cap M_{r_2(r_1)}^{(2)} \leq 0 \cap \dots \cap M_{r_q(r_1, \dots, r_{q-1})}^{(q)}] \quad (17)$$

式中: $M_{r_1}^{(1)}$ 为铁塔元件 r_1 的安全余量; $M_{r_2(r_1)}^{(2)}$ 为铁塔元件 r_1 失效后铁塔元件 r_2 的安全余量; $M_{r_q(r_1, \dots, r_{q-1})}^{(q)}$ 为铁塔元件 r_1, \dots, r_{q-1} 失效后,铁塔元件 r_q 的安全余量。

可以看出,当输电铁塔失效元件增加至失效路径时,其失效概率未继续增加。本研究选取输电铁塔失效模型的第 q 个元件 r_q 的安全余量作为此失效模式的安全余量,将安全余量方程线性展开,求得其安全余量 M 的均值与标准差,即可得到相应输电铁塔失效模式的可靠性指标 β_s :

$$\beta_s = \frac{g(X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*) + \sum_{i=1}^n (\mu_{X_i} - X_i^*) \frac{\partial M}{\partial X_i} \Big|_{X^*}}{\sum_{i=1}^n \alpha_i \frac{\partial M}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \sigma_{X_i}} \quad (18)$$

基于输电铁塔评价指标体系,本文选定杆塔、基础、导线、金具以及绝缘子5项作为主要失效模式,基于有限元模拟计算结果与铁塔破坏形式统计,确

定本文各失效模式可靠度参数见表 3。其中各项目劣化程度评定标准按表 S1 进行分级统计,选其子项最严重等级作为项目劣化程度等级进行可靠度确认。

表 3 各失效模式可靠度参数

Tab. 3 Reliability parameters of each failure mode

项目	劣化程度	可靠度		
		一类	二类	三类
杆塔	无、一般	3.72	3.78	3.89
	严重	3.59	3.67	3.72
	危急	3.41	3.47	3.53
基础	无、一般	3.78	3.83	3.91
	严重	3.62	3.72	3.81
	危急	3.51	3.60	3.64
导线	无、一般	3.89	3.92	3.98
	严重	3.64	3.75	3.90
	危急	3.56	3.61	3.77
金具	无、一般	3.91	4.16	4.51
	严重	3.75	4.13	4.48
	危急	3.70	4.09	4.44
绝缘子	无、一般	4.41	4.79	5.14
	严重	4.37	4.76	5.11
	危急	4.34	4.72	5.07

综合计算输电铁塔结构系统可靠性指标时,必须考虑各工况下各失效模式,并定义其各失效模式间的关系。

本研究采取 PNET 算法,即概率网络估算法。其原理是综合输电铁塔全部失效模式的可靠性指标以计算输电铁塔结构系统可靠性指标。将铁塔构件分成若干组,若同组构件中与某一代表构件高度相关,则该代表构件定义为该组所有机构中失效概率最高的机构。并且,输电铁塔构件失效系数即可代表该塔中所有机构的失效概率。基于失效模式相关系数将各工况下失效模式综合计算,确定输电铁塔结构系统可靠性指标。

设铁塔结构的第 i 个失效模式有 $q-1$ 个已失效元件,建立安全余量方程:

$$M_i = \sum_{t=1}^n a_{it} A_t [\sigma_t] - \sum_{t=1}^Q b_{it} P_t \quad (19)$$

式中: b_{it} 为 Q 个铁塔结点载荷中的第 t 载荷为单位值,作用于此失效模式中 $q-1$ 个元件已失效结构时, q 元件中产生的内力,称为输电铁塔载荷影响系数; A_{it} 为 t 属于 $q-1$ 个铁塔已失效元件时, a_{it} 为输

电铁塔中第 t 元件的抗力形成的结点载荷为单位值,作用于 $q-1$ 个元件已失效结构时, q 元件中产生的内力; $t=q$ 时, $a_{it}=1$, t 为非失效失效元件时, $a_{it}=0$,称为输电铁塔抗力影响系数; $[\sigma_t]$ 为 t 的容许应力。

第 i 个输电铁塔失效模式安全余量的均值为:

$$\mu_{M_i} = \sum_{t=1}^n a_{it} A_t \mu_{[\sigma_t]} - \sum_{t=1}^Q b_{it} \mu_{P_t} \quad (20)$$

第 i 个输电铁塔失效模式安全余量的均方差为:

$$\sigma_{M_i} = \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^n a_{ij} a_{it} A_j A_t \sigma_{[\sigma_j]} \sigma_{[\sigma_t]} \rho_{[\sigma]_{jt}} - \sum_{j=1}^Q \sum_{t=1}^Q b_{ij} b_{it} \sigma_{P_j} \sigma_{P_t} \rho_{P_{kt}} \quad (21)$$

式中: $\rho_{[\sigma]_{jt}}$ 为 $[\sigma_j]$ 和 $[\sigma_t]$ 的相关系数; $\rho_{P_{kt}}$ 为 P_k 和 P_t 的相关系数。

故两输电铁塔失效模式间相关系数可根据式(13)进行计算:

$$\rho_{ij} = \left(\sum_{k=1}^n \sum_{t=1}^n a_{ik} a_{jt} A_k A_t \sigma_{[\sigma_k]} \sigma_{[\sigma_t]} \rho_{[\sigma]_{kt}} - \sum_{k=1}^Q \sum_{t=1}^Q b_{ik} b_{jt} \sigma_{P_k} \sigma_{P_t} \rho_{P_{kt}} \right) / (\sigma_{M_i} \sigma_{M_j}) \quad (22)$$

3.5 输电铁塔系统可靠度计算

为计算输电铁塔结构系统可靠度,本研究将所有输电铁塔失效模式按照可靠度进行数量级排序。选取可靠度最低的失效模式作为一个代表模式,计算其他输电铁塔失效模式与代表失效模式间的相关系数 ρ_{ij} ,把 $\rho_{ij} \geq \rho_0$ 的所有模式作为一组,以代表模式的失效概率 P_i (约等于该失效模式中第 r_q 个杆件)作为这一组铁塔失效模式的失效概率。对剩下的输电铁塔失效模式重复数量级排序与相关系数计算工作,直至所有输电铁塔失效模式全部分组完毕,并得到 G 个铁塔代表模式。将三类核心杆件的损伤作为主要失效模式,通过输电铁塔代表性失效模式间独立性判断,输电铁塔结构系统失效概率可表达为:

$$P_t = \left[1 - \prod_{i=1}^3 \left(1 - \frac{(4-n)}{2} P_i \right) \right] \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \quad (23)$$

式中: $P_i = P_{i-1} + P_{i-2} + P_{i-3} + P_{i-4} + P_{i-5}$; n 为核心理等级; α_1 、 α_2 、 α_3 分别为铁塔覆冰、风载、年久劣化指标,依据表 1 进行判定,取其子指标最严重状态为该项目状态,正常与一般状态时取 1、严重状态取 1.05、危机状态取 1.20。

输电铁塔结构系统可靠性指标 β 为:

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} = \frac{g(X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*) + \sum_{i=1}^n (\mu_{X_i} - X_i^*) \frac{\partial M}{\partial X_i} | X^*}{\sum_{i=1}^n \alpha_i \frac{\partial M}{\partial X_i} | X^* \sigma_{X_i}} \quad (24)$$

式中: α_i 称为灵敏度系数,它表示结构系统中第 i 个随机变量对标准差的相对影响:

$$\alpha_i = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{\partial M}{\partial X_j} | X^* \rho_{ij} \sigma_{X_j}}{\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial M}{\partial X_i} | X^* \frac{\partial M}{\partial X_j} | X^* \rho_{ij} \sigma_{X_i} \sigma_{X_j} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (25)$$

式中: ρ_{ij} 为 X_i 与 X_j 之间的相关系数; σ_{X_i} 为随机变量 X_i 的标准差。

3.6 算例验证

为验证本文提出的输电铁塔结构系统可靠度算法的准确性与科学性,本文选取浙江 500 kV 阳仪线 ZMS5222 直线塔进行算例分析。该塔为典型 ZM 猫头塔,服役年限为 15 年,铁塔塔呼高 63 m,塔身段 45 m,铁塔根开为 9 m,塔头 13 m。铁塔均采用 Q235 钢材,材料弹性模量 E 为 206 GPa,角钢厚度均小于 16 mm,抗拉抗压计算时 f 取 215 N/mm²。依托实际情况建立该铁塔 ANSYS 有限元计算自然工况下输电铁塔轴向应力,见图 5,展开输电铁塔核心杆件分析。

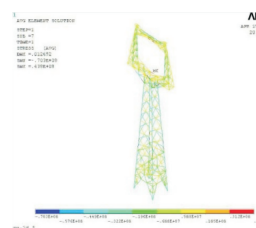


图 5 ANSYS 有限元分析模型

Fig. 5 ANSYS finite element analysis model

基于模拟结果,根据表 2 完成核心杆件分类。计算发现,该塔猫头部分承受荷载与设计极限荷载承载能力最为接近,塔身中上部区域承受荷载较大,且主材较弱,为一、二类杆件聚集区域,铁塔根开端为三类杆件主要聚集区域,为结构相对安全区,与实际情况一致。

根据本文所述内容分别建立安全余量方程、求得铁塔元件与各失效模式可靠度指标、确定各失效模式间相关系数,本节不再赘述。输电铁塔结构系统可靠度计算过程量见表 4~5。

表 4 输电铁塔结构系统可靠度计算过程量

Tab. 4 Calculation process of structural system reliability of transmission tower

项目	劣化数据类别	铁塔劣化程度	取值	α 值
覆冰	覆冰厚度	一般	$\tau_1 = 1$	$\alpha_1 = 1.00$
	输电线路舞动	无	$\tau_2 = 1$	
风载	风载等级	严重	$\theta_1 = 1.05$	$\alpha_2 = 1.05$
	弧垂	一般	$\theta_2 = 1$	
	风偏	一般	$\theta_3 = 1$	
年久劣化	螺栓锈蚀	严重	$\epsilon_1 = 1.05$	$\alpha_3 = 1.05$
	构件锈蚀	严重	$\epsilon_2 = 1.05$	
	基础老化	一般	$\epsilon_3 = 1$	

将表 4 数据代入式(16)进行计算,可计算出该塔的失效概率与可靠度:

$$P_f = \left[1 - \prod_{i=1}^3 \left(1 - \frac{(4-n)}{2} P_i \right) \right] \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 =$$

$$\left[1 - \left(1 - \frac{3}{2} P_1 \right) \left(1 - P_2 \right) \left(1 - \frac{1}{2} P_3 \right) \right] \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 =$$

$$0.001107 \quad (26)$$

经本文提出的系统可靠度方法计算,500 kV 阳仪线直线型铁塔失效概率为 0.001 107,相应的杆塔

可靠度指标 β 为 3.05,满足《建筑结构可靠度设计统一标准》中二级构件承载能力可靠度 β 界限 3.20,属于正常服役状态,但接近可靠度上限,在其输电线路中处于较薄弱环节。分析其子项可靠度因素,发现是由于年久劣化引起的螺栓、构件锈蚀与杆塔横担歪斜现象导致。计算结果同实际状况一致,本文提出的基于杆件核心度的输电铁塔健康状态系统可靠度计算方法可较准确地定量表征输电铁塔在一定工况下的健康状态。

表5 输电铁塔结构系统可靠度计算
Tab.5 Calculation of structural system reliability of transmission tower

项目	劣化数据类别	劣化程度数据	综合劣化等级	失效模式可靠度		
				一类	二类	三类
杆塔	螺栓缺失	无	严重	3.59	3.67	3.72
	杆塔倾斜	一般				
	杆塔变形	一般				
	横担歪斜破损	严重				
基础	基础沉降	一般	一般	3.62	3.72	3.81
	基础表面取土	严重				
	基础周围污染	严重				
导线	对地距离	一般	一般	3.89	3.92	3.98
	导线承载性能	一般				
金具	结构形式	一般	一般	3.91	4.16	4.51
	金具机械强度	一般				
绝缘子	绝缘子机械强度	一般	一般	4.41	4.79	5.14
	绝缘子伞裙损伤	一般				

4 结 论

本文综合考虑输电铁塔主要劣化因素,建立了一套基于系统可靠性理论的输电铁塔结构健康状态定量评估方法,并完成了实塔算例验证,具体研究结论为如下。

1) 构建了一套“结构状态-荷载响应”式输电铁塔健康状态指标评价体系及具体评定细则,为整合服役工况及年限、具体劣化构件等异域指标进行铁塔健康状态评价提供指标基础。

2) 提出了一种基于杆件强度极限状态与失稳极限状态的输电铁塔杆件核心度的分类方法,进一步增加输电铁塔健康状态定量评价的准确度与科学性。

3) 建立了一套基于系统可靠性理论的输电铁塔结构健康状态可靠性评估方法,定义输电铁塔主要失效模式与相关系数,综合服役年限、工况、构件劣化水平等指标定量评价输电铁塔可靠度。为输电线路内薄弱铁塔定位及具体薄弱环节确定提供了理论基础,可进一步指导铁塔检修周期、特塔特检等实际铁塔维检难题。

参考文献:

[1] 陆佳政,周特军,吴传平,等.某省级电网220 kV及以上输电线路故障统计与分析[J].高电压技术,2016,42(1):200-207.
LU Jiazheng, ZHOU Tejun, WU Chuanping, et al.

Fault statistics and analysis of 220 kV and above power transmission line in province-level power grid[J]. High Voltage Engineering, 2016,42(1): 200-207.
[2] 刘春城,张伟,杨杰,等.基于数据融合的大型输电铁塔结构损伤识别[J].应用基础与工程科学学报,2011,19(6):947-955.
LIU Chuncheng, ZHANG Wei, YANG Jie, et al. Structural damage identification based on data fusion for large power transmission tower[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2011,19(6): 947-955.
[3] 熊铁华,侯建国,安旭文,等.覆冰荷载下输电铁塔体系可靠度研究[J].土木工程学报,2010,43(10):8-13.
XIONG Tiehua, HOU Jianguo, AN Xuwen, et al. System reliability of a transmission tower under ice load[J]. China Civil Engineering Journal, 2010,43(10):8-13.
[4] KALYANI S, SWARUP K S. Particle swarm optimization based K-means clustering approach for security assessment in power systems[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(9):10839-10846.
[5] 何迪,章禹,郭创新,等.一种面向风险评估的输电线路故障概率模型[J].电力系统保护与控制,2017,45(7):69-76.
HE Di, ZHANG Yu, GUO Chuangxin, et al. Probability model of transmission lines for risk assessment[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 69-76.
[6] 袁广林,张云飞,陈建稳,等.塌陷区输电铁塔的可靠性评估[J].电网技术,2010,34(1):214-218.

- YUAN Guanglin, ZHANG Yunfei, CHEN Jianwen, et al. Reliability assessment of transmission tower in mining subsidence area [J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 214-248.
- [7] 陈志梅,袁广林,宋康,等.煤矿采动区高压输电线路安全性评估[J].中国电力,2015,48(10):101-106.
CHEN Zhimei, YUAN Guanglin, SONG Kang, et al. Safety evaluation of high voltage transmission lines in coal mining areas [J]. China Power, 2015, 48 (10): 101-106.
- [8] 马键,杨芒生,王赫男,等.输电线路铁塔基础安全综合评价体系[J].安全与环境学报,2020,20(1):25-30.
MA Jian, YANG Mangsheng, WANG Henan, et al. Innovated safety evaluation system for the foundation construction of power transmission line towers[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20 (1): 25-30.
- [9] 张宏杰,杨风利,张鑫,等.基于现场实测沉降数据的复合防护板基础铁塔承载力评估[J].建筑结构,2018,48(13):90-95.
ZHANG Hongjie, YANG Fengli, ZHANG Xin, et al. Bearing capacity estimate based on field test settlement data of steel tower with composite protective plate base-ment[J]. Building Structure, 2018, 48 (13): 90-95.
- [10] 雷勇.老旧输电杆塔结构安全性分析[D].南京:东南大学,2019.
LEI Yong. Safety analysis of old transmission tower structure [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [11] 杨风利.考虑螺栓连接滑移影响的输电铁塔塔身结构分析[J].工程力学,2018,35(增刊1):193-199.
YANG Fengli. Structural analysis on a typical transmission tower body section with bolt slippage effects [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(S1): 193-199.
- [12] 刘洋,李鸿泽,陈杰,等.ZS型老旧杆塔自动化建模及承载特性分析[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(2):171-175.
LIU Yang, LI Hongze, CHEN Jie, et al. Automatic numerical simulation of ZS-type transmission tower and its bearing capability analysis[J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2020, 48(2): 171-175.
- [13] 国家电网公司.架空输电线路状态评价导则:Q/GDW 1173—2014[S].
- [14] 刘建红,杨波,节连彬,等.采动区输电塔线体系在地表水平变形和边界层风作用下的承载性能及安全性评价[J].工业建筑,2021,51(11):90-99.
LIU Jianhong, YANG Bo, JIE Lianbin, et al. Bearing performances and safety assessment of transmission tower-line systems in mining areas under surface horizontal deformation and boundary layer wind[J]. Industrial Construction, 2021, 51 (11): 90-99.
- [15] 秦力,张学礼,陶颐格.500kV输电铁塔结构体系可靠性分析[J].中国电力,2008,41(12):64-68.
QIN Li, ZHANG Xueli, TAO Yige. Analysis on reliability of 500 kV transmission line tower structure [J]. Electric Power, 2008, 41 (12): 64-68.
- [16] 陈卫东,李建操,于艳春,等.多工况下输电铁塔结构系统可靠度计算[J].工程力学,2013(B06):180-183.
CHEN Weidong, LI Jiancao, YU Yanchun, et al. Method for system reliability of transmission tower structure in various conditions [J]. Engineering Mechanics, 2013(B06): 180-183.
- [17] 熊铁华,侯建国,安旭文.覆冰、风荷载作用下南方某输电铁塔可靠度分析[J].武汉大学学报(工学版),2011,44(2):207-210,265.
XIONG Tiehua, HOU Jianguo, AN Xuwen. Reliability analysis of a transmission tower in South China under icing and wind load [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44 (2): 207-210, 265.
- [18] 李建操.送电线路自立铁塔结构可靠性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009.
LI Jiancao. Research on structural reliability of self-supporting tower of transmission line [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009.
- [19] 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,2018,37(2):127-131.
HUANG Xing, TIAN Lei, YANG Yang, et al. Average reliability analysis of transmission tower structure based on point estimation method [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37 (2): 127-131.

(附录详见下页)

附录:

表 S1 输电铁塔健康状态指标评定细则

Tab. S1 Detailed rules for health status index evaluation of transmission towers

项目	劣化名称	劣化程度	判断标准	项目	劣化名称	劣化程度	判断标准
覆冰	覆冰厚度	正常	设计条件满足冰区分布图要求	基础沉降	基础沉降	正常	基础无沉降
		一般	设计条件低于冰区分布图 5 mm			一般	基础轻微沉降
		严重	设计条件低于冰区分布图 10 mm			严重	基础不均匀沉降,造成杆塔轻微倾斜、变形、位移
		危急	设计条件低于冰区分布图 15 mm 以上			危急	基础不均匀沉降,造成杆塔严重倾斜、变形、位移
不均匀覆冰舞动	不均匀覆冰舞动	正常	正常	基础表面取土	基础表面取土	正常	未被取土
		一般	线路位于二级舞动区			一般	铁塔基础取土小于 30 cm
		严重	线路位于三级舞动区			严重	铁塔基础被取土 30~60 cm
风载等级	风载等级	正常	线路设计条件符合实际风速	基础周围污染	基础周围污染	正常	无污染
		一般	线路设计条件低于实际风速 1 m/s			一般	非易燃易爆物
		严重	线路设计条件低于实际风速 2 m/s			严重	易燃易爆物
		危急	线路设计条件低于实际风速 3 m/s 以上			危急	污染严重、已影响线路运行
风载弧垂	风载弧垂	正常	线路设计条件与实际符合	螺栓缺失	螺栓缺失	正常	无缺失
		一般	线路设计条件与实际偏差+2.5%以内			一般	辅材螺栓缺失
		严重	线路设计条件与实际偏差±5%以下,±2.5%以上			严重	主材螺栓缺失
		危急	线路设计条件与实际偏差大于 5%			危急	螺栓大量缺失,影响结构性能
风载风偏	风载风偏	正常	实际间隙符合设计最小空气间隙	杆塔倾斜	杆塔倾斜	正常	无倾斜
		一般	间隙小于设计最小空气间隙 2.5%以内			一般	全高 50 m 以下:倾 斜度 10%~15% 全高 50 m 以上:倾 斜度 5%~10%
		严重	间隙小于设计最小空气间隙 2.5%~5%			严重	全高 50 m 以下:倾 斜度 15%~20% 全高 50 m 以上:倾 斜度 10%~15%
		危急	间隙小于设计最小空气间隙 5%以上			危急	全高 50 m 以下:倾 斜度大于 20% 全高 50 m 以上:倾 斜度大于 15%
螺栓锈蚀	螺栓锈蚀	正常	无锈蚀	杆塔变形	杆塔变形	正常	弯曲度小于 2%
		一般	锈蚀损失率小于 10%			一般	辅材变形或主材弯曲度 2%~5%
		严重	锈蚀损失率 10%~20%			严重	主材弯曲度 5%~7%
		危急	锈蚀损失率大于 20%			危急	主材弯曲度大于 7%
构件锈蚀	构件锈蚀	正常	状态良好	横担歪斜破损	横担歪斜破损	正常	歪斜度小于 1%
		一般	杆身锈蚀,表面出现剥落			一般	歪斜度 1%~5%
		严重	塔材内外均有锈蚀,锈蚀减薄值超过 20%或存在腐蚀缺口,出现坑洼、鼓包			严重	歪斜度 5%~10%
		危急	塔材严重锈蚀、老化			危急	歪斜度大于 10%
基础老化	基础老化	正常	基础状态良好	结构形式	结构形式	正常	合理
		一般	基础混凝土表面有较大面积水泥脱落、蜂窝、露石或麻面			一般	基本合理
		严重	杆塔基础有钢筋外露;阶梯式基础阶梯间出现裂缝			严重	不合理但不影响使用
		危急	基础开裂严重、混凝土碎裂			危急	不合理严重影响使用
对地距离	对地距离	正常	1≤值/标准规定值	金具机械强度	金具机械强度	正常	1≤值/标准规定值
		一般	0.9≤值/标准规定值<1			一般	0.8≤值/标准规定值<1
		严重	0.8≤值/标准规定值<0.9			严重	0.7≤值/标准规定值<0.8
		危急	值/标准规定值<0.8			危急	值/标准规定值<0.7
导线性能	导线性能	正常	1≤值/标准规定值	绝缘子伞裙损伤	绝缘子伞裙损伤	正常	无明显损伤
		一般	0.93≤值/标准规定值<1			一般	个别绝缘子表面有明显灼伤痕迹
		严重	0.75≤值/标准规定值<0.93			严重	部分绝缘子表面有明显灼伤痕迹
		危急	值/标准规定值<0.75				

(责任编辑 王绪迪)