

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2024.04.007

基于代理模型的输电塔半刚性节点弯矩-转角曲线预测方法

刘 泉¹, 李正良², 彭思思², 王 涛^{2,3}

(1. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045;

3. 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要:为了准确、高效地评估输电塔半刚性节点的力学特性,提出了一种基于代理模型的输电塔半刚性节点弯矩-转角曲线预测方法,通过引入代理模型方法近似半刚性节点几何尺寸与极限抗弯承载力、初始转动刚度之间的函数关系,建立具有较高精度的预测模型,进而结合 Kish-Chen 幂函数模型拟合输电塔半刚性节点的弯矩-转角曲线。结果表明,提出的基于代理模型的输电塔半刚性节点弯矩-转角曲线预测方法能减少实验和数值模拟的成本,较好地模拟输电塔半刚性节点实际受力-变形情况,为输电塔半刚性节点的工程设计和理论研究提供了参考。

关键词:代理模型;输电塔;半刚性节点;弯矩-转角曲线

中图分类号:TM754

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2024)04-086-08

A surrogate model-based prediction method of moment-rotation curve of semi-rigid joints in transmission towers

LIU Quan¹, LI Zhengliang², PENG Sisi², WANG Tao^{2,3}

(1. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, P. R. China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 3. School of

Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, P. R. China)

Abstract: In order to accurately and efficiently evaluate the mechanical properties of semi-rigid joints in transmission towers, a method based on surrogate model is proposed to predict the moment-rotation relationship of the semi-rigid joints. By introducing the surrogate model method to approximate the functional relationship between the geometric dimensions, ultimate flexural capacity, and initial rotational stiffness of semi-rigid joints, a prediction model with high accuracy is established. Furthermore, the moment-rotation curves of semi-rigid joints in transmission towers are fitted using the Kish-Chen power function model. The results show that the proposed surrogate model-based prediction method for moment-rotation curves of semi-rigid joints can reduce the cost of

收稿日期:2023-06-18

基金项目:国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(51611140123);国家重点研发计划项目(2017YFC0703901, 2018YFC0809406);重庆市博士后研究项目特别资助(2022CQBSHBT3009)。

Supported by International (Regional) Cooperation and Exchange Program of the National Natural Science Foundation of China (51611140123), National Key R&D Plan Project (2017YFC0703901, 2018YFC0809406) and Special Support of Chongqing Postdoctoral Research Project (2022CQBSHBT3009).

作者简介:刘泉(1984—),男,高级工程师,硕士,主要从事特高压工程设计工作,(E-mail)41853374@qq.com。

通信作者:王涛(1992—),男,博士(后),(E-mail)taowang@alu.cqu.edu.cn。

experiments and numerical simulations, while accurately approximating the actual force-deformation relationship of semi-rigid joints in transmission towers. This method also provides valuable insights for the engineering design and theoretical research of semi-rigid joints in transmission towers.

Keywords: surrogate model; transmission towers; semi-rigid joints; moment-rotation curves

近年来,特高压输电线路在我国得到了迅速发展^[1]。作为电网工程中的重要基础设施,输电塔结构中各构件通过节点相互连接,由连接节点实现杆件之间的传力。输电塔节点既可以传递部分弯矩,也会产生一定的相对转角,是介于铰接与刚接之间的半刚性连接,受其构造影响,输电塔半刚性节点的力学性能表现出明显的非线性特征。输电塔节点的破坏往往会导致相连杆件的失效甚至整个结构的破坏,因此,节点的安全可靠对于整个输电塔结构至关重要。近年来,许多学者通过理论分析^[2]、实验研究^[3]和数值模拟^[4-5]等方法对不同类型的输电塔连接节点展开了研究,其主要内容为:对节点极限承载力的研究以及对节点弯矩-转角($M-\theta$)曲线关系的研究。在输电塔节点的极限承载力方面,学者们对不同类型节点的实际极限承载力值进行测量^[4-5],并推导承载力理论计算公式^[2,6],研究了影响节点极限承载力大小的因素^[3]。相较于前者,关于输电塔节点弯矩-转角曲线关系的研究尚在起步阶段,李正良等^[6]对特高压角钢输电塔K形半刚性连接节点进行了足尺试验,考察节点的弯矩-转角曲线关系;在试验的基础上,焦安亮等^[7]推导了输电塔半刚性节点弯矩-转角曲线的理论计算公式;王开源^[8]通过建立精细化的角钢塔节点有限元模型,获取了节点对角钢的弯矩-转角曲线。总体而言,现有的输电塔半刚性节点弯矩-转角曲线的相关研究往往通过昂贵的实验或耗时的数值模拟等方法获取^[2,6],存在实验成本高、模拟耗时久、计算效率低等不足。

鉴于此,文中提出了一种基于代理模型的输电塔半刚性节点弯矩-转角曲线预测方法,即采用代理模型方法拟合节点几何尺寸与极限抗弯承载力、初始转动刚度之间的函数关系,并结合 Kish-Chen 幂函数模型拟合输电塔半刚性节点的弯矩-转角曲线。

1 代理模型方法及模型精度评价指标

1.1 代理模型方法

代理模型方法通过获取少量样本点及其响应,构建输入输出系统的近似映射关系,可用于替代复杂工程结构的响应分析计算过程,能够大幅降低计算消耗。目前,常见的代理模型方法有多项式响应面(Polynomial response surface, PRS)模型、径向基函数(Radial basis function, RBF)模型、克里金(Kriging)模型、支持向量回归(Support vector regression, SVR)模型、响应面(Response surface method, RSM)模型等。

1.1.1 PRS 模型

PRS 模型^[9]应用了数学和统计学相关的理论知识,在已有的输入输出数据基础上,通过回归方法求出基函数中的各个多项式的权重系数,得到输入输出之间的近似数学表达。PRS 模型的基本形式为

$$\tilde{y}(\mathbf{x}) = \beta_0 + \sum_{i=1}^d \beta_i x_i + \sum_{i_1=1}^d \sum_{i_2=1}^d \beta_{i_1 i_2} x_{i_1} x_{i_2} + \cdots + \sum_{i_1=1}^d \sum_{i_2=1}^d \cdots \sum_{i_m=1}^d \beta_{i_1 i_2 \dots i_m} x_{i_1} x_{i_2} \cdots x_{i_m}, \quad (1)$$

式中: d 为变量的维度; m 表示多项式的次数; $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}, \dots, \beta_{i_1 i_2 \dots i_m}$ 表示回归系数,一般可通过最小二乘法获取; $x_1, x_2, x_3, \dots, x_m$ 表示输入变量; $\tilde{y}(\mathbf{x})$ 表示输出响应变量; i, i_1, i_2, \dots, i_m 表示变量具体对应的维数。

PRS模型的优势在于构造简单,建模所需样本少,能够达到较好的全局近似效果,还能对系统各个变量进行灵敏度分析,具有较好的透明性。实际工程中应用较为广泛的是线性响应面和二次响应面模型:

$$\tilde{y}(\mathbf{x}) = \beta_0 + \sum_{i=1}^d \beta_i x_i, \quad (2)$$

$$\tilde{y}(\mathbf{x}) = \beta_0 + \sum_{i=1}^d \beta_i x_i + \sum_{i_1=1}^d \sum_{i_2=1}^d \beta_{i_1 i_2} x_{i_1} x_{i_2}. \quad (3)$$

式中,各物理量的含义同式(1),不再赘述。如式(2)所示,线性响应面虽然待定系数和所需样本较少,但不能反映函数的非线性特征;如式(3)所示,二次响应面能够体现函数的非线性特征,计算时通常采用加权最小二

乘法确定系数,但对于高维非线性问题,PRS模型的局部拟合效果较差^[10]。

1.1.2 RBF模型

RBF模型^[11]作为一种应用广泛的非线性代理模型方法,具有结构简单、精确插值、鲁棒性好等特点。RBF模型假设输出为基函数的线性组合,采用插值方法进行逼近,通过一元函数对多变量问题进行描述^[12]。对于一个样本容量为 n 的训练样本集合 $\mathbf{X}=\{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n\}$ 及其响应 $\mathbf{Y}=\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$,RBF模型的一般表达式为

$$\hat{y}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \phi(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|) + \sum_{j=1}^m \beta_j P_j(\mathbf{x}), \quad (4)$$

式中: λ_i 表示权重系数,可通过求解线性插值方程组获得; $\|\cdot\|$ 表示用于计算向量的欧氏距离的二范数; $\phi(\cdot)$ 为基函数,其常用的形式包括线性函数、高斯函数、二次函数、逆二次函数、薄板样条函数等,文中选用的二次函数为基函数为

$$\phi(r) = \sqrt{c^2 + r^2}, \quad (5)$$

式中: r 表示样本点的欧氏距离; c 为实常数,文中取 $c=1$ 。

式(4)中第二项表示 m 阶的多项式回归,其中, β_j 表示回归系数, $P_j(\mathbf{x})$ 表示多项式且满足如下正交条件:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i P_j(\mathbf{x}_i) = 0. \quad (6)$$

因此,系数 λ 和 β 可通过求解下列线性方程组得到:

$$\begin{bmatrix} \Phi & \mathbf{P} \\ \mathbf{P}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中: Φ 为 n 阶方阵, $\Phi(i, j) = \phi(\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|)$; \mathbf{P} 为 $n \times m$ 阶矩阵, $P(i, j) = p_j(\mathbf{x}_i)$ 。

1.1.3 Kriging模型

Kriging模型^[13]是一种基于贝叶斯数学模型的线性无偏估计模型,显著特点在于其数学表达式中包括了线性回归参数部分和非参数部分,即:

$$\hat{y}(\mathbf{x}) = G(\beta, \mathbf{x}) + Z(\mathbf{x}), \quad (8)$$

式中: $G(\beta, \mathbf{x})$ 被称为全局近似函数,为Kriging模型的数学期望; β 为回归系数; $Z(\mathbf{x})$ 为一个均值为零、方差为 σ^2 的静态随机过程,其协方差不等于零,可表示为

$$\text{Cov}(Z(\mathbf{x}_i), Z(\mathbf{x}_j)) = \sigma^2 R(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j), \quad (9)$$

式中, $R(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ 为空间相关函数,其相关性随着距离增大而减小,当距离为0时,等于1;当距离无穷大时,等于0。目前,常用的空间相关函数包括高斯函数、线性函数、指数函数等,文中采用的高斯相关函数为

$$R(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \exp\left(-\sum_{k=1}^d \theta_k |\mathbf{x}_i^k - \mathbf{x}_j^k|^{\delta_k}\right), \quad (10)$$

式中: d 表示设计变量的维数; $\mathbf{x}_i^k, \mathbf{x}_j^k$ 分别为任意2个样本 $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ 在第 k 个维度上的分量; θ_k 为相关性参数; δ_k 为光滑程度参数。

1.2 模型精度评价指标

为评估代理模型的全局及局部近似程度,采用4种通用的精度评价指标来衡量代理模型的精度,包括确定性系数 R^2 、标准均方根误差NRMSE、相对平均绝对误差RAAE、相对最大绝对误差RMAE,计算公式分别为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [y(\mathbf{x}_i) - \hat{y}(\mathbf{x}_i)]^2}{\sum_{i=1}^N [y(\mathbf{x}_i) - \bar{y}(\mathbf{x}_i)]^2}, \quad (11)$$

$$\text{NRMSE} = \frac{1}{y_{\max} - y_{\min}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N |y(\mathbf{x}_i) - \hat{y}(\mathbf{x}_i)|}{N}}, \quad (12)$$

$$\text{RAAE} = \frac{\sum_{i=1}^N |y(\mathbf{x}_i) - \tilde{y}(\mathbf{x}_i)|}{N \times \text{STD}}, \quad (13)$$

$$\text{RMAE} = \frac{\max |y(\mathbf{x}_i) - \tilde{y}(\mathbf{x}_i)|}{\text{STD}}, \quad (14)$$

式中: N 为测试样本点数量; $y(\mathbf{x}_i)$ 是测试样本点所对应的函数输出结果; y_{\max} 和 y_{\min} 分别为函数最大值、最小值; $\bar{y}(\mathbf{x}_i)$ 是函数输出响应的平均值; $\tilde{y}(\mathbf{x}_i)$ 为模型近似值;STD表示实际函数值的标准差。

上述模型精度指标中, R^2 整体反映了代理模型的精度,当值越接近1,模型越精确;NRMSE和RAAE为全局精度指标,其值越小,模型精度越高;RMAE则是1个局部指标,描述的是设计空间内某个局部区域的误差,故其值越小越好。

2 Kish-Chen 模型

国内外关于半刚性连接节点弯矩-转角曲线的研究主要集中于框架结构领域,学者们提出了线性模型、多项式模型、B样条模型、幂函数模型、指数模型等拟合半刚性节点的弯矩-转角($M-\theta$)曲线。其中,Kish等^[14-15]在大量实验数据基础上,对Lui等^[16]、Ang等^[17]建议的多参数模型进行了改进,提出了Kish-Chen三参数幂函数模型,模型因形式直观、易于实现且具有明确的物理含义而颇受研究者青睐^[18],是应用最为广泛的半刚性节点 $M-\theta$ 曲线预测模型之一。

Kish-Chen幂函数模型使用初始刚度、极限弯矩承载力、形状系数3个参数描述梁柱节点的半刚性,其数学表达式为

$$M = \frac{K_i \theta}{\left[1 + \left(\frac{\theta}{\theta_0}\right)^\omega\right]^{\frac{1}{\omega}}}, \quad (15)$$

式中: K_i 为初始转动刚度; ω 是曲线拟合得到的形状系数; θ_0 为相对塑性转角,可通过极限抗弯承载力 M_u 和初始转动刚度 K_i 计算得到:

$$\theta_0 = \frac{M_u}{K_i}. \quad (16)$$

文中采用Kish-Chen模型拟合输电塔半刚性节点的 $M-\theta$ 曲线,由式(16)可知,输电塔半刚性节点的极限抗弯承载力 M_u 和初始转动刚度 K_i 是建立 $M-\theta$ 曲线预测模型的关键。

3 输电塔半刚性节点弯矩-转角曲线预测方法

输电塔半刚性节点的极限抗弯承载力 M_u 和初始转动刚度 K_i 与节点的几何尺寸密切相关,一般通过实验测试或有限元分析计算得到。由于实验研究成本高且资源相对有限,精细化数值模型计算较为耗时,连接节点的构造又较为复杂,完全依赖实验或者数值模拟对半刚性节点进行参数分析难以实现。因此,提出一种更加简单易行、精度高的方法对于深入研究输电塔半刚性节点几何尺寸与其力学性能之间的关系具有重要意义。代理模型方法^[19]是解决这类问题的有效途径之一。为进一步降低成本、提高计算效率,文中采用代理模型方法拟合输电塔半刚性节点几何尺寸与极限抗弯承载力 M_u 、初始转动刚度 K_i 之间的近似函数关系,并将预测的 \tilde{M}_u 和 \tilde{K}_i 带入Kish-Chen模型中拟合输电塔半刚性节点的 $M-\theta$ 曲线,发展了基于代理模型的输电塔半刚性节点弯矩-转角曲线预测方法。其步骤如下:

- 1) 选取输电塔半刚性节点几何尺寸作为设计变量,抽取 n 个训练样本点,通过实验或数值分析模型计算相应的极限抗弯承载力 M_u 、初始转动刚度 K_i 响应值;
- 2) 基于已知训练样本点及其响应,分别建立输电塔半刚性节点 M_u 和 K_i 的PRS、Kriging、RBF预测模型;
- 3) 选取 N 个测试样本点及其响应值,并根据式(11)~式(14)计算PRS、Kriging、RBF模型的精度;
- 4) 选择当前精度最高的预测模型,输入某一输电塔半刚性节点的几何尺寸,得到相应的输电塔半刚性节点的极限抗弯承载力 \tilde{M}_u 和初始转动刚度 \tilde{K}_i ;
- 5) 将代理模型预测结果 \tilde{M}_u 和 \tilde{K}_i 带入式(15)~式(16)所示Kish-Chen幂函数模型,拟合输电塔半刚性节点

$M-\theta$ 关系曲线。

4 算例分析

为验证文中提出的基于代理模型的输电塔半刚性节点弯矩-转角曲线预测方法,以参考文献[20]中输电塔K形连接节点为例,构造如图1所示,根据文中方法计算其弯矩-转角曲线关系。

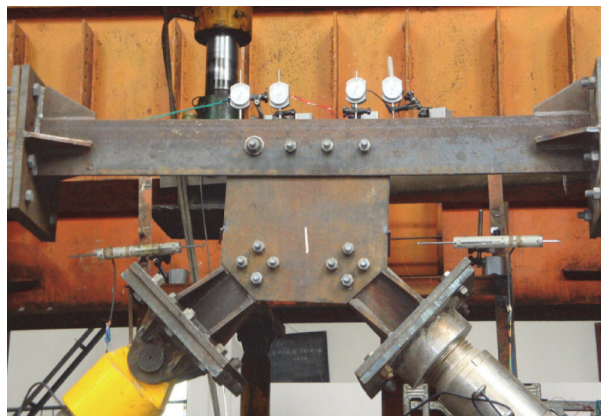


图1 输电塔K形连接节点^[20]

Fig. 1 K-joint of transmission towers^[20]

文献[20]中给出了此类节点参数数据,选取其中钢材屈服强度 $f_y=420$ MPa、螺栓等级强度 $n_g=10.9$ 级、螺栓个数 $n_l=4$ 、节点板厚 $t_j=10$ 的41组数据,将其分为用于构建代理模型的训练样本以及用于检验模型精度的测试样本,分别如表1和表2所示,共涉及3个节点几何尺寸设计变量:肢宽(b)、肢厚(t)、螺栓直径(d)。

表1 训练样本集^[20]

Table 1 The set of training samples^[20]

b/mm	t/mm	d/mm	$M_u/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$K_u/(\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1})$
140	10	20	72.63	3 250
140	12	20	72.49	3 320
160	10	20	71.91	3 300
160	14	20	71.40	3 410
160	16	20	71.16	3 450
180	14	20	71.94	3 450
180	16	20	71.92	3 480
180	18	20	72.28	3 510
200	14	20	71.25	3 480
200	16	20	71.58	3 520
200	20	20	70.72	3 540
200	24	20	70.82	3 510
160	12	16	59.54	3 200
160	12	22	73.91	3 410
160	12	24	74.32	3 440
160	12	27	74.63	3 460
160	12	30	77.47	3 550
140	10	16	63.87	3 140
140	10	18	64.83	3 180
140	10	22	73.38	3 283

续表 1

b/mm	t/mm	d/mm	$M_u/(kN \cdot m)$	$K_t/(kN \cdot m \cdot rad^{-1})$
140	10	24	73.59	3 285
140	10	27	73.37	3 309
140	10	30	74.96	3 376
180	14	18	67.00	3 365
180	14	22	74.19	3 511
180	14	24	75.60	3 529
200	16	16	62.38	3 351
200	16	18	66.99	3 412
200	16	22	73.58	3 568
200	16	24	74.14	3 600
200	16	27	74.59	3 647

表 2 测试样本集^[20]

Table 2 The set of test samples^[20]

b/mm	t/mm	d/mm	$M_u/(kN \cdot m)$	$K_t/(kN \cdot m \cdot rad^{-1})$
160	12	18	69.14	3 300
140	13	20	71.15	3 390
180	12	20	72.56	3 410
180	14	30	77.47	3 664
160	12	20	71.88	3 370
180	14	16	62.84	3 294
200	16	30	76.87	3 758
180	14	27	75.68	3 593
140	12	20	71.87	3 360
200	18	20	70.86	3 534
160	12	18	69.14	3 300

根据表 1 所示的训练样本集合,分别采用 PRS、Kriging、RBF 3 种代理模型方法建立输电塔半刚性节点极限抗弯承载力 M_u 、初始转动刚度 K_t 的预测模型,并依据表 2 中测试样本集合比较当前代理模型精度。

根据式(11)~式(14)计算 3 种不同代理模型方法的建模精度,结果如表 3 所示。由表 3 可知,采用 PRS 模型方法建立的输电塔半刚性节点极限抗弯承载力 M_u 预测模型的整体精度和局部精度优于其他方法;然而,对于输电塔半刚性节点初始转动刚度 K_t ,使用 RBF 模型所得结果更佳,精度更高。

表 3 代理模型精度

Table 3 The accuracy of surrogate models

代理模型方法	PRS		Kriging		RBF	
	$M_u/(kN \cdot m)$	$K_t/(kN \cdot m \cdot rad^{-1})$	$M_u/(kN \cdot m)$	$K_t/(kN \cdot m \cdot rad^{-1})$	$M_u/(kN \cdot m)$	$K_t/(kN \cdot m \cdot rad^{-1})$
R^2	0.874	0.961	0.712	0.697	0.773	0.967
NRMSE	0.098	0.065	0.147	0.180	0.131	0.060
RAAE	0.286	0.162	0.398	0.381	0.380	0.139
RMAE	0.649	0.340	1.021	1.345	0.852	0.331

文中分别采用PRS和RBF模型方法建立输电塔K形连接节点的极限抗弯承载力 M_u 和初始转动刚度 K_i 的预测模型,进一步将计算结果带入式(15)~式(16)所示的Kish-Chen幂函数模型,最终得到输电塔半刚性节点的近似 $M-\theta$ 关系曲线,将部分节点的拟合结果与文献[20]中有限元模拟的 $M-\theta$ 关系实际曲线进行比较,如图2所示。

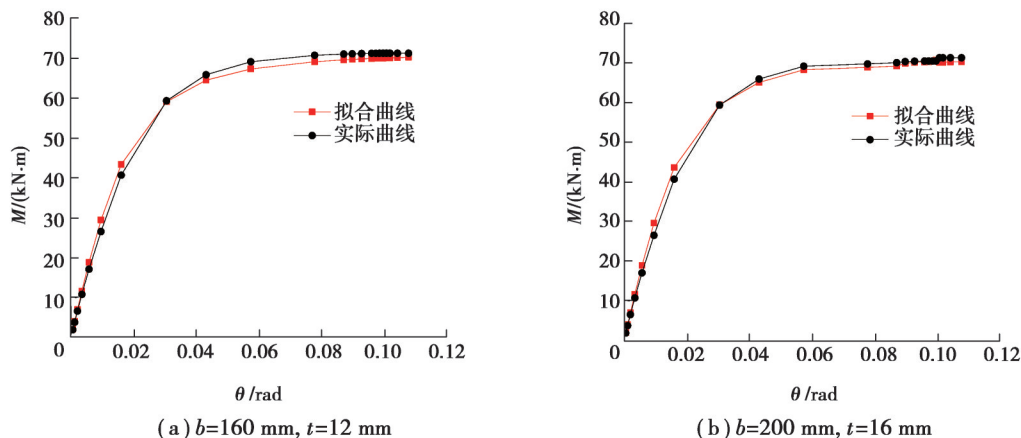


图2 $M-\theta$ 关系曲线对比

Fig. 2 Comparison of $M-\theta$ relationship

图2分别为2种不同规格的输电塔半刚性K形节点弯矩-转角关系曲线,节点的 $t_j=10$ mm, $d=20$ mm,模型中形状系数 ω 的取值为文献[20]中建议的平均值。由图2可知,文中基于代理模型以及Kish-Chen模型的预测方法拟合的输电塔半刚性K形节点 $M-\theta$ 关系曲线与实际曲线整体吻合效果良好,表明文中方法具有一定的可靠性,适用于输电塔半刚性节点的弯矩-转角曲线计算。

5 结 论

文中提出了一种普适的输电塔半刚性节点弯矩-转角关系预测方法,该方法基于代理模型建立输电塔半刚性节点极限抗弯承载力和初始转动刚度的预测模型,并结合Kish-Chen模型拟合输电塔半刚性节点的弯矩-转角曲线关系。结果表明,使用PRS和RBF代理模型方法所得输电塔半刚性K形节点几何尺寸与极限抗弯承载力、初始转动刚度的预测模型精度较高,最终拟合的输电塔半刚性节点弯矩-转角曲线效果良好。文中方法通过引入代理模型能大幅减少计算消耗,同时能够有效预测输电塔半刚性连接节点的受力-变形性能,广泛适用于各类输电塔半刚性节点的弯矩-转角关系计算,为输电塔节点受力分析及设计提供了参考。

参考文献

- [1] 俞登科, 李正良, 施菁华, 等. ± 800 kV 直流双柱悬索拉线塔塔线体系风振响应的风洞试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 1009-1013.
Yu D K, Li Z L, Shi J H, et al. Wind tunnel test on wind-induced response of ± 800 kV DC cross-rope suspension tower-line[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 1009-1013.(in Chinese)
- [2] 余世策, 孙炳楠, 叶尹, 等. 高耸钢管塔节点极限承载力的试验研究与理论分析[J]. 工程力学, 2004, 21(3): 155-161.
Yu S C, Sun B N, Ye Y, et al. Experimental study and theoretical analysis of ultimate strength for steel tubular joint of tall towers[J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(3): 155-161.(in Chinese)
- [3] 李正良, 刘红军. 输电塔钢管-插板连接节点板承载力研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(S1): 52-58.
Li Z L, Liu H J. Study on bearing capacity of steel tube-plug connection joint plate of transmission tower[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(S1): 52-58.(in Chinese)
- [4] 邓洪洲, 朱雯瑞, 黄斌, 等. 输电钢管塔典型塔脚节点承载力研究[J]. 工程力学, 2017, 34(9): 175-183.
Deng H Z, Zhu W R, Huang B, et al. Study on the capacity of typical tower leg joint of transmission steel tubular tower[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(9): 175-183.(in Chinese)

- [5] 邓洪洲,姜琦,黄誉. 输电钢管塔K型管板节点承载力试验及参数[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(2): 226-231, 314.
Deng H Z, Jiang Q, Huang Y. Experimental investigation and parametric studies on ultimate strength of K-type tubegusset plate connections in transmission towers[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(2): 226-231, 314.(in Chinese)
- [6] 李正良,赵楠,尤军,等. 角钢塔K形节点弯矩-转角曲线研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(4): 46-54.
Li Z L, Zhao N, You J, et al. Development of moment-rotation curves of angle steel tower K-joints[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2013, 45(4): 46-54.(in Chinese)
- [7] 焦安亮,李正良,刘红军,等. 特高压输电塔半刚性连接K形节点受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(7): 53-60.
Jiao A L, Li Z L, Liu H J, et al. Study on ultimate strength of semi-rigid K-type joints in UHV transmission tower[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(7): 53-60.(in Chinese)
- [8] 王开源. 输电塔节点半刚性及角钢稳定承载力分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
Wang K Y. The analysis of semi-rigid joint and single angle stability bearing capacity of transmission tower[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese).
- [9] Booker A J, Dennis J E, Frank P D, et al. A rigorous framework for optimization of expensive functions by surrogates[J]. Structural Optimization, 1999, 17(1): 1-13.
- [10] Barton R R. Metamodels for simulation input-output relations[C]//Proceedings of the 24th conference on Winter simulation. December 13 - 16, 1992, Arlington, Virginia, USA. ACM, 1992: 289-299.
- [11] Dyn N, Levin D, Rippl S. Numerical procedures for surface fitting of scattered data by radial functions[J]. SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, 1986, 7(2): 639-659.
- [12] 胡凡,武泽平,王东辉,等. 序列近似优化方法[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(1): 92-101.
Hu F, Wu Z P, Wang D H, et al. Sequential approximate optimization method[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2017, 39(1): 92-101.(in Chinese)
- [13] Kleijnen J P C. Kriging metamodeling in simulation: a review[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 192(3): 707-716.
- [14] Kishi N, Matsuoka K I, Chen W F, et al. Moment-rotation relation of top and seat-angle connections[J]. Memoirs of the Muroran Institute of Technology, 1987, 37: 163-172.
- [15] Kishi N, Chen W F. Moment-rotation semi-rigid connections[R]. Structural Engineering Report No. CE -STR-87-29. West Lafayette (IN): Purdue University, 1987.
- [16] Lui E M, Chen W F. Analysis and behaviour of flexibly-jointed frames[J]. Engineering Structures, 1986, 8(2): 107-118.
- [17] Ang K M, Morris G A. Analysis of three-dimensional frames with flexible beam - column connections[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1984, 11(2): 245-254.
- [18] Abolmaali A, Matthys J H, Farooqi M, et al. Development of moment - rotation model equations for flush end-plate connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(12): 1595-1612.
- [19] Jin R, Chen W, Simpson T W. Comparative studies of metamodeling techniques under multiple modelling criteria[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2001, 23(1): 1-13.
- [20] 赵楠. 特高压输电塔半刚性连接节点受力性能及结构非线性分析研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
Zhao N. Study on load-bearing performances of semi-rigid joints and structure nonlinear analysis of UHV transmission tower [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)