

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2023.10.009

考虑半刚性连接的输电塔结构离散优化设计方法

李正良¹, 彭思思¹, 王涛^{1,2}

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要: 输电塔半刚性节点会对结构内力及变形产生不可忽视的影响, 然而, 在传统的输电塔结构优化设计中, 输电塔节点的半刚性连接往往被简化为铰接。为了准确评估输电塔的实际响应并对输电塔进行合理优化设计, 以考虑半刚性连接的输电塔为研究对象, 通过使用弹簧单元模拟半刚性节点的弯矩-转角关系, 建立了半刚性连接的输电塔有限元模型, 并提出了半刚性连接输电塔的优化数学模型和优化设计方案, 发展了一种考虑半刚性连接的输电塔结构离散优化设计方法。优化结果表明: 文中方法能够在满足结构应力及变形约束的条件下有效降低输电塔钢材的消耗量, 节约了工程造价成本, 具有良好的经济效益。

关键词: 离散变量; 优化设计; 输电塔; 半刚性连接

中图分类号: TM753

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2023)10-098-09

Discrete optimization design method of transmission tower with semi-rigid connection

LI Zhengliang¹, PENG Sisi¹, WANG Tao^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

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

Abstract: Semi-rigid joints have a significant influence on the internal forces and deformations of transmission towers. However, in traditional transmission tower structure optimization, semi-rigid joints are often oversimplified as hinge joints. To accurately evaluate the true response of transmission towers and rationally optimize their structures, this study focuses on transmission towers with semi-rigid connections. A finite element model for such towers is established using spring elements to simulate the moment-rotation relationship of semi-rigid joints. Furthermore, an optimization mathematical model and design scheme for transmission towers with semi-rigid connection are proposed, resulting in the development of a discrete optimization method for these structures. The optimization results show that the proposed method effectively reduces the consumption of steel in transmission towers while satisfying structural stress and deformation constraints, leading to cost savings and

收稿日期: 2022-05-18

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: 李正良(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事工程力学和结构工程方向研究, (E-mail) lizhengli@hotmail.com。

通信作者: 王涛(1993-), 男, 博士研究生, (E-mail) taowang@cqu.edu.cn。

favorable economic benefits in engineering projects.

Keywords: discrete variables; optimization design; transmission tower; semi-rigid connection

随着国家输电网建设步伐的加快以及电网工程向着特高压不断升级^[1],输电线路的要求日益提高,不仅要考虑结构的安全性,更要考虑其经济性。输电塔作为输电线路的重要组成部分,其用钢量大、工程造价成本占比高,对其进行结构优化设计具有重要现实意义和经济效益。

1971年Beck等^[2]叙述了计算机对输电线路设计产生重要影响,此后,基于计算机的输电线路优化设计得到了极大拓展,国内外学者将不同优化方法应用于输电塔优化设计领域,对输电塔塔身、塔腿、斜材等的截面、形状、拓扑以及组合优化设计展开大量研究^[3-11],相关研究成果颇丰:Taniwaki等^[3]探究了包含218根杆件的输电塔整塔在静载和地震荷载作用下的组合优化问题;Rajeev^[4]、王藏柱^[5]、郭惠勇^[6-7]等对除塔头以外的输电塔塔身进行优化设计;张卓群等^[8]研究了输电塔塔身局部截面、形状、拓扑和组合优化问题;邓洪洲^[9]等提出了针对输电塔交叉斜材的拓扑优化方案;崔磊^[10]、郭惠勇^[11]等采用不同优化算法实现输电塔下部塔腿的拓扑优化设计。在输电塔结构优化设计中,通常假定杆件之间的连接为铰接进行计算,在实际工程中,由于输电塔节点板连接处螺栓群和节点板共同受力并产生剪切变形,节点的受力特征往往介于二者之间,即半刚性连接。与铰接的零刚度以及刚接的无穷大刚度不同,输电塔半刚性连接节点具有一定转动刚度,因此在受力变形过程中能够传递部分弯矩,且产生一定相对转角,这种半刚性力学特征会对输电塔整体受力性能产生不可忽视的影响。

为考虑连接节点的半刚性特性对输电塔结构受力-变形的影响,王朋等^[12]探究了角钢输电塔螺栓滑移性能及其对输电塔的受力-变形特征的影响;Jiang等^[13]针对不同节点的连接刚度,总结了构造节点对输电塔静态特征的影响规律;安利强等^[14]采用一种刚度可调的半刚性连接单元模拟特高压钢管塔节点连接,分析了半刚性节点对钢管塔静力特征的影响;钱程等^[15]提出考虑节点半刚性连接对输电塔自振特征和风致响应的影响,表明考虑半刚性连接的输电塔模型更为合理。

综上所述,输电塔结构中不宜简单忽略半刚性节点的影响,但目前考虑半刚性连接输电塔的相关研究仍较少,尤其考虑半刚性连接的输电塔结构优化设计现有文献更少。笔者建立了考虑半刚性连接的输电塔有限元模型,提出考虑半刚性连接的输电塔优化数学模型,进而基于粒子群优化(PSO)算法发展了一种考虑半刚性连接的输电塔离散优化设计方法。

1 考虑半刚性连接的输电塔有限元模型

以沿海地区某220 kV角钢输电塔为例,其结构如图1所示。该塔高60.4 m,根开10.56 m,水平档距350 m,垂直档距为550 m。

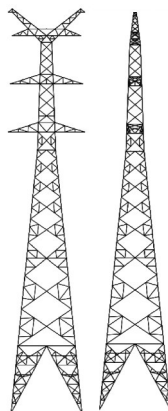


图1 输电塔K形节点构造示意图

Fig. 1 K-joint of transmission tower

笔者采用ANSYS软件建立输电塔有限元模型,其中输电塔杆件采用BEAM单元进行建模,杆件采用理想弹塑性本构关系模型,钢材密度为 7850 kg/m^3 ,弹性模量为 $2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$,屈服强度设为345 MPa。输电塔

所受荷载包括永久荷载以及可变荷载,其中永久荷载主要为输电塔塔身构件的自重荷载以及导线、地线的重力荷载,施加在输电塔有限元模型的可变荷载主要包括塔身的风荷载、导地线传至塔身的风荷载和金具绝缘子的风荷载。

为考虑半刚性连接对输电塔结构的影响,通过输电塔半刚性节点的弯矩-转角($M-\theta$)关系描述其力学性能,采用参考文献[16-17]中提供的角钢输电塔半刚性节点弯矩-转角($M-\theta$)曲线,如图2所示。为简化计算,有限元模型中各半刚性节点在 X 、 Y 、 Z 方向上的空间转动均采用同一条 $M-\theta$ 曲线^[18]。

在考虑半刚性连接的输电塔有限元模型中,将图1所示的输电塔塔身部分主材与交叉斜材的连接节点视为半刚性连接,其连接处简化模型如图3所示,使用COMBIN39弹簧单元模拟半刚性节点的力学行为,可通过定义实常数输入节点的弯矩-转角曲线。

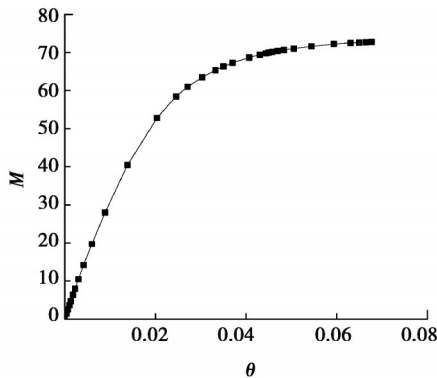


图2 半刚性节点的 $M-\theta$ 曲线

Fig. 2 The $M-\theta$ curve of semi-rigid joints

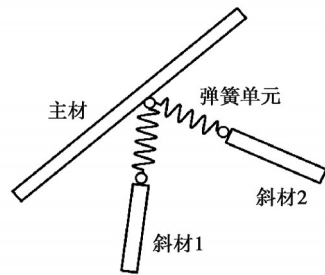


图3 K形节点有限元模型

Fig. 3 The finite elements model of K-joint

2 考虑半刚性连接的输电塔优化数学模型

对考虑半刚性连接的输电塔进行离散优化设计,其目的是在满足各项要求前提下,实现结构轻量化、经济化设计。在对输电塔结构进行优化设计前,首先建立相应的优化设计数学模型。

2.1 优化设计变量

优化设计变量的选取即确定自变量及其取值范围。在考虑半刚性连接的输电塔优化问题中,对输电塔除塔头以外塔体部分的主材杆件进行截面优化设计,故优化设计变量为输电塔塔身主材构件截面尺寸,其取值是不连续的,可以根据不同主材截面所采用的型钢种类,将其设为多个离散设计变量。每个设计变量的取值需满足

$$x_i \in \mathcal{S}_i, i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

式中: n 为设计变量个数;优化设计变量 $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$; \mathcal{S}_i 为第 i 个离散变量的取值集合,一般来源于常用的输电塔角钢型号表。

2.2 优化目标函数

优化设计目标函数是以设计变量为自变量的函数表达式,函数值应与自变量的取值对应。对于输电塔塔架结构,其工程造价主要来源于结构的钢材用量,故在满足结构安全性的前提下,造价成本成为了设计人员主要的考虑因素。在考虑半刚性连接的输电塔离散优化设计中,为降低成本、节省材料,以结构杆件的总质量作为优化目标函数,即

$$\min W = \sum_{i=1}^n \rho_i A_i l_i, \quad (2)$$

式中: W 表示输电塔杆件的总质量; n 为设计变量总数,即优化中主材杆件数目; ρ_i 为第 i 根杆件的材料密度,统一取钢材密度 $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$; A_i 为第 i 根杆件的横截面面积; l_i 为第 i 根杆件的计算长度。

2.3 约束条件

为了防止输电塔塔身主材构件发生强度破坏,保证结构的安全使用,荷载作用下的杆件应力绝对值不应大于材料的容许应力值,故杆件应满足下列应力约束条件

$$\sigma_i = \begin{cases} \frac{N_i}{A_i} \leq [\sigma], N_i \geq 0, \\ \frac{|N_i|}{\varphi_i A_i} \leq [\sigma], N_i < 0, \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

式中: σ_i 表示第*i*根杆件的应力; N_i 表示第*i*根杆件的轴力; A_i 为第*i*根杆件的横截面面积; φ_i 为第*i*根杆件的稳定系数; $[\sigma]$ 为第*i*根为杆件的容许应力值,可通过调节容许应力值使设计的半刚性连接输电塔结构具有一定安全裕度。

同时,为保证结构正常使用,在荷载作用下输电塔整体结构应具有足够刚度,限制结构的最大位移绝对值不大于给定的位移上限值,故变形约束条件为

$$|u_{\max}| \leq [u], \quad (4)$$

式中: u_{\max} 为荷载作用下考虑半刚性连接输电塔结构产生的最大位移; $[u]$ 为给定的容许位移值。

2.4 优化数学模型

对于考虑半刚性连接的输电塔离散优化设计问题,其数学模型可写为如下形式

$$\begin{aligned} \min \text{Weight} &= \sum_{i=1}^n \rho_i A_i l_i, \\ \text{s.t. } \sigma_i &= \begin{cases} \frac{|N_i|}{A_i} \leq [\sigma], N_i \geq 0, \\ \frac{|N_i|}{\varphi_i A_i} \leq [\sigma], N_i < 0, \end{cases} \\ &|u_{\max}| \leq [u], \\ &x_i \in \mathbf{S}_i, \\ &i = 1, 2, \dots, n, \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)所示的输电塔经济性优化设计数学模型中给出了设计变量约束条件和状态变量约束条件,得到最优设计结果既能满足所有的约束条件又能得到最小的目标函数值,实现结构的安全性指标,同时保障了经济性。

3 半刚性连接的输电塔离散优化设计方法

3.1 优化算法

在考虑半刚性连接的输电塔离散优化设计中,采用计算简单、易于实现的粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法^[9]进行寻优,通过MATLAB软件编写基于代理模型的离散优化设计算法程序,其中PSO算法参数设定如表1所示。

在式(5)所示的优化数学模型中,应力约束条件和变形约束条件是与设计变量相关的状态变量约束条件,对于该约束优化问题,需进一步采用罚函数法计算优化目标函数的适应度值。定义罚函数 $P(\mathbf{x}, a)$ 为

$$P(\mathbf{x}, a) = a(h_1(\mathbf{x}) + h_2(\mathbf{x}))^2, \quad (6)$$

式中:系数*a*被称为惩罚系数,通常为一个很大的正数; $h_1(\mathbf{x})$ 和 $h_2(\mathbf{x})$ 可分别如下计算

$$\begin{cases} h_1(\mathbf{x}) = \max \{0, u_{\max} - [u]\}, \\ h_2(\mathbf{x}) = \max \{0, \sigma_i - [\sigma]\}, \end{cases} \quad (7)$$

进而,PSO优化算法中适应度函数 $F(\mathbf{x})$ 为

$$F(\mathbf{x}) = W(\mathbf{x}) + P(\mathbf{x}, a). \quad (8)$$

3.2 考虑半刚性连接的输电塔优化设计流程

对考虑半刚性连接的输电塔进行截面优化设计(如图4所示),即改变结构杆件的截面尺寸,寻找满足约束条件的最优截面面积,使构件的应力接近满应力状态,实现材料的充分利用。

表1 PSO算法参数值

Table 1 The parameter values of PSO algorithm

参数名称	种群大小	迭代次数	惯性权重系数	学习因子
参数值	10	100	1.0	1.494 45

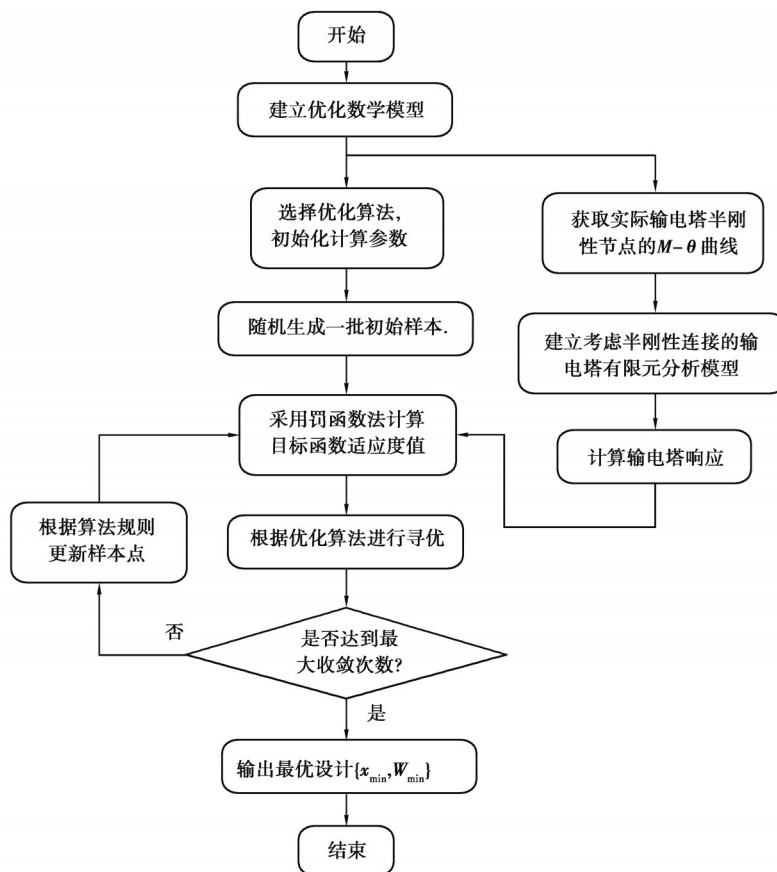


图4 考虑半刚性连接的输电塔离散优化设计流程

Fig. 4 Discrete optimization flowchart for transmission tower with semi-rigid joints

基于半刚性连接的输电塔离散优化设计方法的流程如图4所示,其具体步骤为:

1)建立基于半刚性连接的代理模型优化设计的数学优化模型,确定离散优化设计变量 \mathbf{x} 、约束条件以及优化目标函数 W ;

2)获取输电塔连接节点的实际弯矩-转角曲线;其次在ANSYS软件中采用弹簧单元模拟半刚性连接节点的力学行为,建立考虑半刚性连接的输电塔有限元分析模型;然后设置输电塔有限元模型中单元属性、网格划分、接触单元、荷载大小、非线性分析等相关参数,计算输电塔的结构响应;

3)采用粒子群算法求解离散优化问题:初始化优化算法参数后,在设计空间中抽取一定数量的初始样点 $\mathbf{X}_0 = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n\}$,通过有限元模型计算样本点对应的输电塔杆件的应力 σ 和结构的最大位移 u_{\max} ,并根据等式(8)计算优化算法中粒子的适应度函数,依据算法规则进行寻优,直至优化迭代次数达到给定的最大迭代次数,输出结构最优设计结果 $\{\mathbf{x}_{\min}, W_{\min}\}$ 。

4 优化设计结果分析

在考虑半刚性连接的输电塔结构离散优化设计中,共涉及64根输电塔主材杆件,将主材截面尺寸按不同高度、不同区域分为16组,故离散优化设计变量的个数 $n=16$,在优化过程中每根角钢有6种不同截面型号可供选择,其取值如表2所示。

表 2 离散变量的尺寸集合

Table 2 Allowable values for the discrete design variables

变量	肢宽 h/mm	肢厚 b/mm	面积 A/cm^2
1	100	12	22.80
2	110	12	25.50
3	125	12	28.91
4	140	12	32.51
5	160	12	37.44
6	160	14	43.30

1)优化过程分析

采用基于罚函数法的 PSO 算法对半刚性连接的输电塔进行离散优化设计,其优化收敛曲线如图 5 所示。

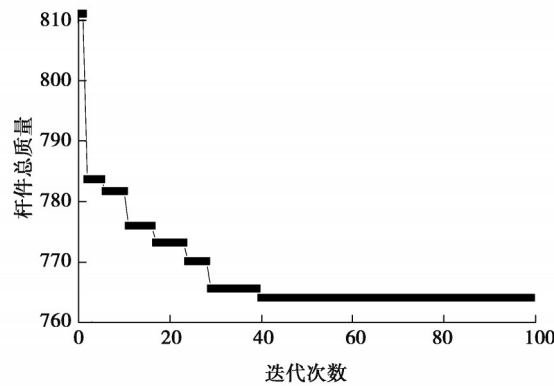


图 5 离散优化过程

Fig. 5 The process of discrete optimization

图 5 中展示了优化的输电塔杆件总质量随 PSO 算法迭代次数的变化趋势,随着优化次数的增加,构件总质量逐渐下降并最终趋于一个稳定值,在前 40 代,优化算法在设计空间中不断探寻潜在最优解,收敛速度较快;在 40 代左右找到一个最优解,此后杆件总质量最小值不再发生变化。

2)优化前后杆件质量对比

依据方法对半刚性连接的输电塔主材进行离散优化设计,并对优化结果进行分析。优化设计前后杆件截面尺寸发生变化的情况如表 3 所示。

表 3 优化前后截面面积对比

Table 3 Comparison of section area before and after optimization

设计变量	面积 A/cm^2		设计变量	面积 A/cm^2	
	优化前	优化后		优化前	优化后
1	32.51	25.50	9	32.51	28.91
2	32.51	32.51	10	32.51	28.91
3	37.44	32.51	11	37.44	28.91
4	37.44	32.51	12	37.44	32.51
5	32.51	25.50	13	32.51	32.51
6	32.51	28.91	14	32.51	28.91
7	37.44	28.91	15	37.44	28.91
8	37.44	28.91	16	37.44	28.91

从表3可以观察到,在优化后各杆件的截面设计发生了显著变化,其截面面积有所下降,进一步比较优化目标函数结果,优化设计前后构件重量的对比情况见表4。

表4 优化前后总重量对比

Table 4 Comparison of weight before and after optimization

状态	总重量/kg
优化设计前 W_1	882.176
优化设计后 W_2	764.093

由表4可知,对考虑半刚性连接的输电塔主材进行离散优化有效降低钢材的总质量,减少钢材消耗量,节约经济成本,该输电塔离散优化设计的优化效率 ζ 为

$$\begin{aligned} \zeta &= \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \\ &= \frac{882.176 - 764.093}{882.176} \times 100\% = 13.39\%。 \end{aligned} \quad (9)$$

3) 优化前后杆件应力、位移对比

对优化设计前后考虑半刚性连接的输电塔进行结构响应分析,输电塔主材杆件的应力以及输电塔结构的最大位移分别如表5和表6所示。

表5 优化前后杆件应力比较

Table 5 Comparison of stress before and after optimization

主材 序号	杆件应力/MPa		主材 序号	杆件应力/MPa	
	优化前	优化后		优化前	优化后
1	133.958	148.366	33	92.380	103.215
2	134.806	150.599	34	103.431	115.877
3	158.744	176.946	35	105.601	118.086
4	159.348	160.135	36	121.666	135.536
5	173.512	173.679	37	121.336	134.480
6	168.147	168.661	38	57.073	72.549
7	190.860	191.476	39	64.014	80.971
8	114.208	114.784	40	60.691	77.428
9	101.143	100.918	41	71.209	90.120
10	122.458	122.920	42	69.251	70.116
11	114.441	129.317	43	79.338	80.203
12	158.826	159.270	44	76.680	76.679
13	139.065	139.893	45	86.064	85.743
14	157.382	158.386	46	99.327	99.004
15	141.441	141.973	47	82.633	93.126
16	126.799	126.657	48	88.257	99.018
17	150.451	150.434	49	83.964	94.587
18	159.338	158.541	50	95.827	107.551
19	188.171	187.810	51	94.350	95.094
20	169.354	168.766	52	103.929	104.824
21	192.922	192.184	53	102.369	102.289
22	105.737	117.339	54	113.777	113.525
23	106.860	119.436	55	125.482	125.178
24	126.971	141.237	56	60.024	75.296
25	127.368	140.885	57	63.932	81.383
26	142.225	160.001	58	61.707	78.641

续表 5

主材 序号	杆件应力/MPa		主材 序号	杆件应力/MPa	
	优化前	优化后		优化前	优化后
27	137.282	152.297	59	71.594	91.093
28	153.327	169.642	60	67.361	76.035
29	85.763	95.189	61	77.591	86.982
30	88.845	99.594	62	79.086	88.511
31	84.909	95.643	63	92.610	103.475
32	96.549	108.290	64	92.848	103.081

由表 5 可知,在离散优化设计后,输电塔主材的应力随着杆件横截面面积变化发生相应变化,与优化前对比,除杆件 9、44、46 的应力基本不变或略有减小,其他杆件的应力均在原基础上小幅上升,对杆件材料的利用效率更高;为保证结构具有一定的安全裕度,在应力约束条件中设置的应力容许值较小,故上述杆件应力变化幅度较小,且均未达到严格的满应力状态,在应用中设计者可根据实际要求做出相应调整。

此外,由表 6 可知,对输电塔主材截面尺寸进行优化设计后,由于绝大多数截面尺寸减小,输电塔整塔结构在 X、Y、Z 3 个方向上的最大位移均有所上升,但影响较小,处于所给定的位移约束要求范围内。

表 6 优化前后杆件位移比较

Table 6 Comparison of displacement before and after optimization

输电塔最大位移/mm	优化前	优化后
U_x	0.0043	0.0098
U_y	0.3177	0.3297
U_z	0.0089	0.0096

5 结 论

对考虑半刚性连接的输电塔结构进行离散优化设计,主要结论如下:

- 1) 通过引入实际输电塔半刚性节点的弯矩-转角曲线,采用弹簧单元模拟半刚性节点的力学性能,建立考虑半刚性节点的输电塔有限元模型;
- 2) 建立了考虑半刚性连接的输电塔结构离散优化设计数学模型和方案,提出考虑半刚性连接的输电塔优化设计方法;
- 3) 对半刚性连接的输电塔结构进行离散优化设计,在满足结构应力及变形约束的条件下减少了 13.39% 的输电塔用钢量,提高材料利用率,有良好的工程经济效益。

参考文献

- [1] 李宏男,白海峰. 高压输电塔-线体系抗灾研究的现状与发展趋势[J]. 土木工程学报, 2007, 40(2): 39-46.
Li H N, Bai H F. State-of-the-art review on studies of disaster resistance of high-voltage transmission tower-line systems[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(2): 39-46.(in Chinese)
- [2] Beck C F. Computer's role in transmission line design[J]. Journal of the Structural Division, 1971, 97(1): 63-79.
- [3] Taniwaki K, Ohkubo S. Optimal synthesis method for transmission tower truss structures subjected to static and seismic loads [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2004, 26(6): 441-454.
- [4] Rajeev S, Krishnamoorthy C S. Genetic algorithms-based methodologies for design optimization of trusses[J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(3): 350-358.
- [5] 王藏柱,董桂西. 架空输电铁塔形状优化的研究[J]. 华北电力大学学报, 2001, 28(2): 100-104.
Wang C Z, Dong G X. Investigation on shape optimization of transmission tower[J]. Journal of North China Electric Power University, 2001, 28(2): 100-104.(in Chinese)
- [6] 郭惠勇,李正良,罗乐. 基于离散变量的大跨越输电塔架构不同优化方法研究[J]. 工程力学, 2009, 26(12): 181-188.

- Guo H Y, Li Z L, Luo L. Investigation on structural optimization of long-span transmission tower based on discrete variables [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(12): 181-188.(in Chinese)
- [7] Guo H Y, Li Z L. Structural topology optimization of high-voltage transmission tower with discrete variables[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2011, 43(6): 851-861.
- [8] 张卓群, 任宗栋, 李宏男, 等. 基于蚁群算法的输电塔结构局部优化设计[J]. *建筑科学与工程学报*, 2016, 33(1): 76-82.
Zhang Z Q, Ren Z D, Li H N, et al. Local optimal design method of transmission tower structure based on ant colony optimization[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2016, 33(1): 76-82.(in Chinese)
- [9] 邓洪洲, 崔磊. 输电塔塔身交叉斜材拓扑优化方法研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(2): 205-213.
Deng H Z, Cui L. Synthesis method for topology optimization of intersecting bracing members on body of transmission tower [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2010, 38(2): 205-213.(in Chinese)
- [10] 崔磊, 邓洪洲. 基于差商算法的输电塔塔腿辅材的拓扑优化[J]. *特种结构*, 2007, 24(3): 89-92.
Cui L, Deng H Z. Topology optimization for the redundant members of transmission tower's legs based on RelativeDifference quotient algorithm[J]. *Special Structures*, 2007, 24(3): 89-92.(in Chinese)
- [11] 郭惠勇, 宋小辉, 李正良. 基于改进人工鱼群算法的输电塔塔腿拓扑优化[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(4): 52-58, 87.
Guo H Y, Song X H, Li Z L. Topology optimization of transmission tower legs based on an improved artificial fish-swarm algorithm[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(4): 52-58, 87.(in Chinese)
- [12] 王朋, 陈海波, 张会武, 等. 螺栓连接对基础非均匀沉降输电塔的影响研究[J]. *工程力学*, 2015, 32(10): 209-219.
Wang P, Chen H B, Zhang H W, et al. Effect of bolt joint on the behaviour of transmission tower with non-uniform settlement [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(10): 209-219.(in Chinese)
- [13] Jiang W Q, Wang Z Q, McClure G, et al. Accurate modeling of joint effects in lattice transmission towers[J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(5): 1817-1827.
- [14] 安利强, 朱登杰, 武文玲, 等. 节点半刚性对特高压钢管塔静力特性的影响[J]. *应用力学学报*, 2015, 32(6): 1019-1024, 1105.
An L Q, Zhu D J, Wu W L, et al. Influence of joint semi-rigidity on the static characteristic for UHV transmission steel tubular tower[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2015, 32(6): 1019-1024, 1105.(in Chinese)
- [15] 钱程, 沈国辉, 郭勇, 等. 节点半刚性对输电塔风致响应的影响[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2017, 51(6): 1082-1089.
Qian C, Shen G H, Guo Y, et al. Influence of semi-rigid connections on wind-induced responses of transmission towers[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2017, 51(6): 1082-1089.(in Chinese)
- [16] 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): 53-60.4: 46-54.4)-54.(in Chinese)
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)
- [17] 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)
- [18] 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.
- [19] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]//*Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*. November 27 - December 1, 1995, Perth, WA, Australia. IEEE, 2002: 1942-1948.

(编辑 侯 湘)