

基于改进正余弦算法的抱杆结构优化*

杨小猛¹, 李亮², 胡雄飞³, 周焕林¹

- (1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 合肥 230009;
2. 国网安徽省电力有限公司建设分公司, 合肥 230071;
3. 国网安徽省电力有限公司安庆供电公司, 安徽 安庆 246001)

(本刊编委周焕林来稿)

摘要: 抱杆是组立输电铁塔的特种起重设备,以最小质量为优化目标,杆件的截面尺寸、辅材连接方式以及摇臂节点坐标为优化变量,许用应力、位移和屈曲系数为约束条件,建立抱杆优化设计模型,提出一种改进的正余弦算法(improved sine cosine algorithm, ISCA),开展抱杆尺寸、形状和拓扑优化.引入 Lévy 飞行增强算法全局搜索能力,采用精英引导策略增强算法局部搜索能力,使用贪婪选择策略更新最优解.算例表明 ISCA 能够有效求解空间桁架结构的优化设计问题.

关键词: 正余弦算法; 抱杆; 桁架结构; 结构优化; 有限元分析

中图分类号: TU318 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.440354

Structure Optimization of Holding Poles Based on the Improved Sine Cosine Algorithm

YANG Xiaomeng¹, LI Liang², HU Xiongfei³, ZHOU Huanlin¹

- (1. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, P.R.China;
2. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd. Construction Branch, Hefei 230071, P.R.China;
3. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd. Anqing Electric Power Supply Company, Anqing, Anhui 246001, P.R.China)

(Contributed by ZHOU Huanlin, M. AMM Editorial Board)

Abstract: The holding pole is a special lifting device for the construction of transmission towers. The optimization design model for the holding pole was established. The minimum mass was set as the optimization objective. The cross-section sizes of members, the connection modes of auxiliary members and the coordinates of the rocker joint were set as the optimization variables. The allowable stress, displacement and buckling coefficient were taken as the constraining conditions. An improved sine cosine algorithm (ISCA) was proposed to carry out the size, shape and topology optimization designs of the holding pole. For the ISCA, the Lévy flight was introduced to enhance the global search ability, elite guidance strategy was applied to enhance the local search ability, and the greedy selection strategy was used to update the optimal solution. The example shows

* 收稿日期: 2023-12-14; 修订日期: 2024-01-23

基金项目: 国家自然科学基金(11972143)

作者简介: 杨小猛(1995—),男,硕士(E-mail: Yxiaomeng123@outlook.com);

周焕林(1973—),男,教授,博士,博士生导师(通讯作者. E-mail: zhouhl@hfut.edu.cn).

引用格式: 杨小猛,李亮,胡雄飞,周焕林. 基于改进正余弦算法的抱杆结构优化[J]. 应用数学和力学, 2024, 45(5): 529-538.

that, the ISCA can effectively solve the optimization design problems of spatial truss structures.

Key words: sine cosine algorithm; holding pole; truss structure; structure optimization; finite element analysis

0 引言

抱杆是一种特种起重设备,用于组立输电铁塔。抱杆是大型空间桁架结构,其自重过大,运输和组立不便。为减少制造和运输成本,需要对抱杆结构进行优化设计。陶然等^[1]基于响应面法和改进算术优化算法对 1 520 mm 截面双平臂抱杆结构进行了尺寸优化;方林等^[2]基于改进天鹰优化器,对 750 mm 截面双摇臂抱杆结构进行了尺寸优化,显示了元启发式算法在抱杆结构优化方面的适用性。

元启发式算法也常被用于其他各类工程结构的优化设计,刘宸宇等^[3]采用粒子群优化算法对弧形加筋板进行了轻量化设计。杜晨等^[4]采用经典遗传算法对变厚度连续纤维增强复合材料铺层进行了优化设计。郭惠勇等^[5]提出了一种改进的人工鱼群算法解决输电铁塔的塔腿优化问题。石开荣等^[6]利用改进的模拟植物生长算法优化了单层球面网格和弦支穹顶结构。Souza 等^[7]运用萤火虫算法和回溯搜索算法,对输电铁塔进行了尺寸、形状和拓扑优化。Khodzhaiev 等^[8]使用一种可两阶突变的变长基因组,对遗传算法进行改进,对输电塔进行了尺寸、形状和拓扑优化。Fiore 等^[9]使用差分进化算法对方形空心型钢桁架结构进行了尺寸和形状优化。Renkavieski 等^[10]综述了近十年来元启发式算法在桁架结构优化方面的应用。

正余弦算法(SCA)^[11]是一种新兴的元启发式优化算法,常被用于各种优化问题。Attia 等^[12]将其用于电力系统的设计问题。Ewees 等^[13]将 SCA 与人工蜂群算法结合,解决了多级阈值图像分割问题。Abualigah 等^[14]混合 SCA 和遗传算法来选择数据信息。Abdel-Mawgoud 等^[15]联合 SCA 和算术优化算法求解了配电系统集成问题。上述研究表明了 SCA 的优越性,但其在桁架结构优化方面的研究还有待拓展。

本文提出了一种改进的正余弦算法(ISCA),结合罚函数法和有限元方法对 700 mm 截面双摇臂抱杆结构进行尺寸、形状和拓扑一体化优化设计。

1 抱杆结构有限元分析

1.1 抱杆简介

对某工程中使用的 700 mm 截面落地双摇臂抱杆进行分析研究,如图 1 所示。抱杆结构包括主杆(普通段和加强段)、桅杆和摇臂三个主要部分,以及回转支座、腰环拉线、内拉线、调幅绳等辅助结构。该抱杆高 120 m,其中普通段高 96 m,加强段高 12 m,桅杆高 12 m。主杆和桅杆截面尺寸均为 700 mm×700 mm,摇臂长 12 m,截面尺寸为 500 mm×600 mm。抱杆回转支座处设置内拉线,与水平面呈 70°夹角。抱杆与铁塔间设置 8 道腰环,其中第一道和第二道腰环相距 12 m,其余腰环间距小于等于 15 m。

抱杆最初构件尺寸如表 1 所示,主材采用 Q345 钢,辅材采用 Q235 钢。密度 $\rho = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E = 2.06 \times 10^{11} \text{ Pa}$,Poisson 比 $\nu = 0.3$ 。

表 1 抱杆各段角钢型号

Table 1 The angle steel model for each part of the holding pole

	main part	auxiliary part
ordinary	L 80×6	L 63×5
reinforcement	L 90×8	L 63×5
mast	L 90×8	L 60×6
rocker	L 65×6	L 50×6
mass	13.64 t	

1.2 有限元模型

为了方便建模,做以下约定:摇臂方位,摇臂俯视图与 x 轴正向所成的角度;风向, x 轴负方向的风向为 0° ,垂直 x 轴的风向为 90° ,二者角平分线为 45° 方向,如图 2 所示。

建立抱杆三维有限元分析模型,采用梁单元模拟摇臂抱杆的主杆、桅杆和摇臂;用索杆单元模拟只受拉力的内拉线和腰环等.释放摇臂绕轴转动的自由度.

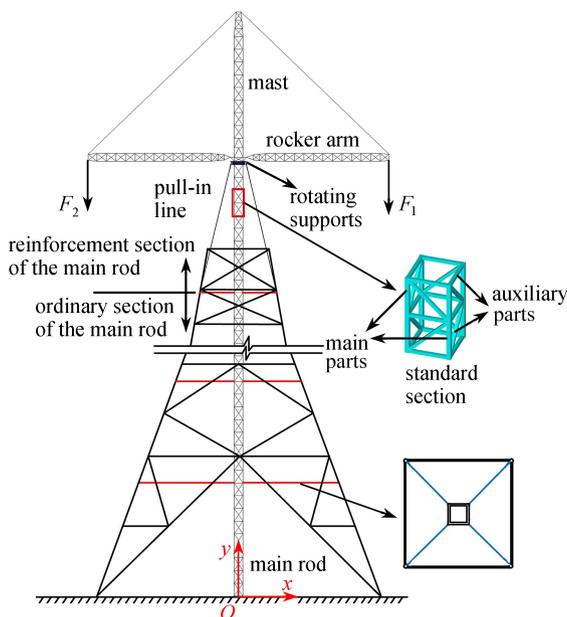


图 1 抱杆整体示意图

Fig. 1 Overall diagram of the holding pole

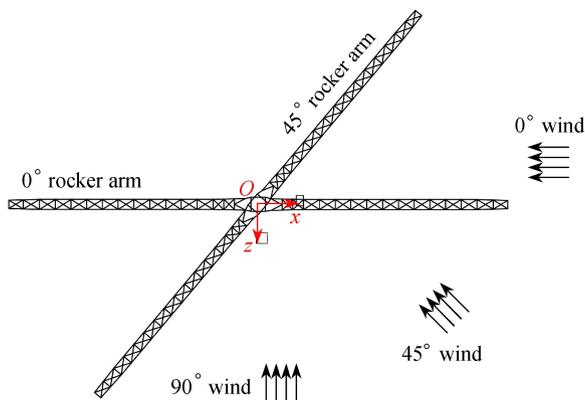


图 2 摇臂方位和风载荷方向

Fig. 2 Rocker arm orientations and wind load directions

1.3 荷载工况

抱杆受力包括自重、风载荷以及吊重等.抱杆额定最大不平衡吊重为 4 t 和 3 t,吊钩重 250 kg,起吊钢丝绳重 400 kg,最大工作风速为 13.8 m/s,大风风速为 28.4 m/s.

根据《起重机设计规范》(GB 3811—2008),风载荷的计算公式如下所示:

$$P_w = CPA, \tag{1}$$

$$C = 1.7(1 + \eta), \tag{2}$$

$$P = 0.625V_s^2, \tag{3}$$

式中, C 为风力系数; A 为迎风面积; P 为风压; η 为挡风折减系数,由充实率 φ 确定; V_s 为计算风速.风向和吊重按照最不利方向来确定,表 2 中的工况为典型工况.工况 1—3 为最大偏载吊装工作工况,工况 4—6 为大风特殊工况,没有吊重荷载.

1.4 有限元分析

采用有限元方法对双摇臂抱杆各工况进行计算,结果如表 3 所示.由表 3 可知,工作工况下,主材的最大

Mises 应力为 169.19 MPa,发生在工况 2,位于第一道腰环处;且在工况 2 时,辅材的 Mises 应力最大,为 84.48 MPa,位于摇臂处.依据《架空输电线路施工机具基本技术要求》(DL/T 875—2016),工作工况屈服强度安全系数取 2.0,主材许用应力为 172.5 MPa,辅材许用应力为 117.5 MPa,计算结果满足规范要求;在工况 2 下,抱杆顶端位移最大,为 268.47 mm,同样满足要求.对于大风工况,在工况 5 下 Mises 应力最大,为 181.43 MPa,位于第一道腰环处.依据上述规范,大风工况屈服强度安全系数取 1.45,主材许用应力为 237.93 MPa,辅材许用应力为 162.07 MPa,计算结果也满足规范要求;最大位移发生在工况 5,为 252.56 mm,所有工况屈曲系数均满足不小于 2.0 的设计要求.由上可知,工况 2 是正常工作工况,工况 5 为大风特殊工况,对比工况 5,工况 2 屈服强度安全系数要求更大,应力与位移更靠近约束值,因此工况 2 为最危险工况,可将其作为优化工况对抱杆进行优化.

表 2 载荷工况

Table 2 Load cases

load case		lifted weight	wind direction	rocker orientation
max unbalance loading	case 1	4 t, 3 t	0°	45°
	case 2	4 t, 3 t	45°	45°
	case 3	4 t, 3 t	90°	45°
high wind	case 4	-	0°	45°
	case 5	-	45°	45°
	case 6	-	90°	45°

表 3 各工况分析结果

Table 3 Analysis results of each working condition

load case	max Mises stress σ_m /MPa		top displacement	buckling coefficient	
	main part	auxiliary part	u_t /mm		
working	case 1	166.53	76.47	259.82	4.01
	case 2	169.19	84.48	268.47	3.93
	case 3	168.41	75.15	248.93	4.00
	case 4	173.19	58.42	243.36	3.80
high wind	case 5	181.43	47.94	252.56	3.62
	case 6	180.58	44.54	244.19	3.57

2 ISCA

2.1 SCA

SCA^[11]是 Mirjalili 于 2016 年提出的一种新元启发式算法,利用正弦和余弦函数的震荡行为实现优化搜索,同时算法中的自适应参数以及随机参数能够较好地平衡局部搜索和全局搜索,从而找到全局最优解.

在 SCA 中,初始阶段在 d 维空间中随机生成 N 个个体,通过目标函数计算每个个体的适应度值,比较选取当前最优解 P ,并通过更新公式找到全局最优解.种群中第 i 个个体的第 j 维更新公式为

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j}^t + r_1 \times \sin(r_2) \times |r_3 P_j^t - X_{i,j}^t|, & r_4 \leq 0.5, \\ X_{i,j}^t + r_1 \times \cos(r_2) \times |r_3 P_j^t - X_{i,j}^t|, & r_4 > 0.5, \end{cases} \quad (4)$$

其中, $X_{i,j}^t$ 为第 t 次迭代中第 i 个个体的第 j 维位置; P_j^t 为第 t 次迭代中最优解第 j 维位置; r_2, r_3, r_4 为服从均匀分布的随机数,且 $r_2 \in [0, 2\pi]$; $r_3 \in [0, 2]$,是当前最优解的权重; $r_4 \in [0, 1]$,是正弦和余弦机制切换的随机概率. r_1, r_2 是非常重要的控制参数,当 $r_1 \times \sin(r_2)$ 或 $r_1 \times \cos(r_2)$ 的值在区间 $[-1, 1]$ 时,算法进行局部搜索,其他情况进行全局搜索.为了更好地平衡全局搜索与局部搜索, r_1 通过下式自适应调节:

$$r_1 = c \left(1 - \frac{t}{T} \right), \quad (5)$$

其中, c 为常数,一般取 2; t 为当前迭代次数; T 为最大迭代次数.

2.2 ISCA

2.2.1 参数 r_1 的调整策略

参数 r_1 对整个算法的搜索方向起着重要作用,SCA 在寻优的过程中是高度非线性的,原线性递减的 r_1 并不符合优化过程,使得算法容易陷入局部最优解^[16].因此,本文提出了一种非线性递减的参数 r_1 ,使算法在迭代前期注重全局搜索,后期倾向于局部搜索,能够更好地平衡算法对搜索区域的探索,使得算法的优化更加符合实际.修改后的 r_1 如下所示:

$$r_1 = \frac{b/a}{\frac{t^8}{T^8} + \ln(e - 1 + t/T)} - 1/a, \quad (6)$$

式中 a, b 为常数,文中取 $a = 1.34, b = 2$.

2.2.2 改进的更新策略

在 SCA 中,最优个体引导整个种群的搜索方向,但是最优个体缺乏自我学习能力,一旦陷入局部最优解,整个种群将很难得到有效的更新,算法会陷入早熟状态^[17].为了避免 SCA 陷入局部最优解,在 SCA 更新公式中引入 Lévy 飞行.Lévy 飞行是一种频繁的短距离与偶尔的长距离结合的运动轨迹,能够很好地避免算法在搜索过程中陷入局部最优解^[18].Lévy 飞行的数学表达式为

$$L(s, \gamma, \mu) = \begin{cases} \sqrt{\frac{\gamma}{2\pi}} \exp\left[-\frac{\gamma}{2(s-\mu)}\right] \frac{1}{(s-\mu)^{3/2}}, & 0 < \mu < s < \infty, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (7)$$

其中, μ, s 和 γ 分别为传输参数、随机步长和控制分布规模的参数.

Lévy 飞行表达形式有很多,其中使用最多的是用正态分布求解随机数的方法,可表示为

$$L(\beta) = \frac{u}{|v|^{1/\beta}}, \quad (8)$$

式中

$$u \sim N(0, \sigma_u^2), v \sim N(0, \sigma_v^2), \quad (9)$$

$$\sigma_u = \left\{ \frac{\Gamma(1+\beta) \sin(\pi\beta/2)}{\Gamma[(1+\beta)/2] \times \beta \times 2^{(\beta-1)/2}} \right\}^{1/\beta}, \sigma_v = 1. \quad (10)$$

使用 Lévy 飞行对排名前三的解进行更新,然后将更新后的解 Q 组合代替原更新公式中的当前最优解 P . Q 的表达式如下所示:

$$Q_j^t = \frac{1.5Q_{j,1}^t + Q_{j,2}^t + 0.5Q_{j,3}^t}{3}, \quad (11)$$

$$Q_{j,1}^t = P_{j,1}^t + P_{j,1}^t \oplus L(\beta), \quad (12)$$

$$Q_{j,2}^t = P_{j,2}^t + P_{j,2}^t \oplus L(\beta), \quad (13)$$

$$Q_{j,3}^t = P_{j,3}^t + P_{j,3}^t \oplus L(\beta), \quad (14)$$

式中, $P_{j,1}^t, P_{j,2}^t$ 和 $P_{j,3}^t$ 分别为第 t 次迭代后最优解、次优解和第三优解的第 j 维位置; \oplus 为矢量运算符; $L(\beta)$ 为步长服从 Lévy 分布的随机搜索向量.

修改后的位置更新公式为

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j}^t + r_1 \times \sin(r_2) \times |r_3 Q_j^t - X_{i,j}^t|, & r_4 \leq 0.5, \\ X_{i,j}^t + r_1 \times \cos(r_2) \times |r_3 Q_j^t - X_{i,j}^t|, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (15a)$$

$$(15b)$$

改进后的位置更新公式能够有效地提高算法的全局搜索能力,使算法跳出局部最优解,但同时算法的局部搜索能力会降低,使 ISCA 的收敛速度变慢.为加快算法的收敛速度,引入精英引导策略,用当前最优个体引导种群位置更新,位置更新公式为

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} d_i^t \sin(\theta) + P_j^t, & i \text{ is an even number,} \\ d_i^t \cos(\theta) + P_j^t, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (16a)$$

$$(16b)$$

$$d_i^t = F_{\text{best}}^t / F_i^t \times 10^{-t/20} \times \theta, \quad (17)$$

式中 F_{best}^t 为第 t 次迭代后的最优适应度值, F_i^t 为第 t 次迭代后第 i 个个体的适应度值; θ 为 $[0, 2\pi]$ 中的随机数。为了合理地平衡两个位置更新公式, 引入一个新的参数 r_5 ,

$$r_5 = a_{\max} - a_{\min}(t/T), \quad (18)$$

其中, a_{\max} 和 a_{\min} 是属于 $[0, 1]$ 中的常数, 且 a_{\max} 大于 a_{\min} ; 当 $r_{\text{rand}} \leq r_5$ (r_{rand} 为 $[0, 1]$ 中的随机数) 时, 使用式 (15) 更新位置, 否则使用式 (16) 更新位置。

2.2.3 贪婪选择策略

在 SCA 中, 对于更新后的解会全部接受, 这会导致接受的新解的适应度值比当前解差, 失去找到全局最优解的可能性。因此, 本文采用贪婪选择策略, 比较更新后的解与当前解的适应度值确定是否更新当前解, 确保将每个个体的最优解传递给下一代。贪婪选择策略可表示为

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} X_i^{t+1}, & f(X_i^{t+1}) \leq f(X_i^t), \\ X_i^t, & f(X_i^{t+1}) > f(X_i^t), \end{cases} \quad (19)$$

其中, f 为适应度函数, 上述选择方式是以最小优化问题为例。通过贪婪选择策略, 保留更有希望的解, 能够充分利用每个个体的位置信息, 减少更新停滞的可能性。

2.2.4 ISCA 的基本流程

ISCA 的基本流程如图 3 所示。

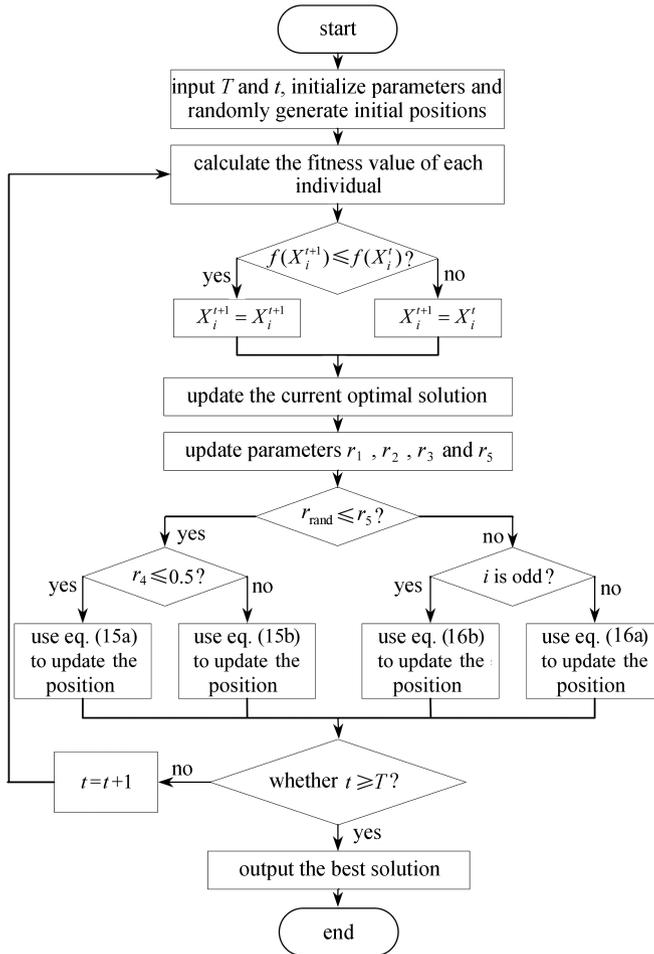


图 3 ISCA 优化流程图

Fig. 3 The ISCA optimization flowchart

3 抱杆结构的优化

3.1 抱杆优化模型

在有限元方法的基础上,利用 ISCA 对抱杆结构进行优化,在满足结构承载力的情况下,寻找材料的最合理布置.对于抱杆结构优化问题,以结构的强度、刚度和稳定性为约束条件;以抱杆结构杆件的截面尺寸、各部分标准节辅材排布方式以及摇臂形状为优化变量;整体结构的质量最小化为目标建立优化模型.

将抱杆结构的质量记为 $W(x)$, 结合罚函数法,可将优化设计的目标函数记为

$$F(x) = W(x) + C \sum_{i=1}^k g_i^2(x), \tag{20}$$

式中, k 为约束个数; $g(x)$ 为约束函数; C 为惩罚系数,表示惩罚力度的大小,当满足约束时, $C = 0$.

对于抱杆结构,以结构的强度、刚度和稳定性为约束条件:

$$\begin{cases} g_1 = \sigma_{z\max} - [\sigma_z] \leq 0, \\ g_2 = \sigma_{f\max} - [\sigma_f] \leq 0, \\ g_3 = \delta_{\max} - [\delta] \leq 0, \\ g_4 = K_f - [K_f] \geq 0, \end{cases} \tag{21}$$

其中, $\sigma_{z\max}$ 为主材最大应力, $[\sigma_z]$ 为主材许用应力,取 172.5 MPa, $\sigma_{f\max}$ 为辅材最大应力, $[\sigma_f]$ 为辅材许用应力,取 117.5 MPa,二者均需满足工作工况屈服强度安全系数 2.0 的要求; δ_{\max} 为结构最大位移, $[\delta]$ 为最大允许位移,经计算为 321.6 mm; K_f 为屈曲系数, $[K_f]$ 为最小允许屈曲系数,取 2.0.

3.2 变量设置

对于抱杆结构的优化,以抱杆各部位的主材和辅材的角钢型号为尺寸变量,共 8 个离散变量,角钢型号可从以下集合中选择, $A_i \in [\angle 45 \times 3, \angle 45 \times 4, \angle 45 \times 5, \angle 50 \times 5, \angle 56 \times 5, \angle 50 \times 6, \angle 63 \times 5, \angle 60 \times 6, \angle 63 \times 6, \angle 65 \times 6, \angle 70 \times 6, \angle 80 \times 6, \angle 70 \times 7, \angle 75 \times 7, \angle 80 \times 7, \angle 75 \times 8, \angle 90 \times 7, \angle 80 \times 8, \angle 90 \times 8, \angle 100 \times 8, \angle 90 \times 10, \angle 100 \times 10]$ ($i = 1, 2, \dots, 8$),共 22 个角钢型号.抱杆普通段主材和辅材,加强段主材和辅材,桅杆主材和辅材以及摇臂主材和辅材对应 A_1, A_2, \dots, A_8 .

形状变量由抱杆摇臂的节点坐标控制,使得抱杆摇臂变为变截面设计,如图 4 所示.图中 $y_1 = y_2 = -y_3 = -y_4, y_5 = y_6 = -y_7 = -y_8 \in [-150, 150]$ mm 中 10 的倍数;摇臂截面的长和高保持 1:1.2 的比例,则 $z_1 = -z_2 = z_3 = -z_4 = y_1/1.2, z_5 = -z_6 = z_7 = -z_8 = y_5/1.2$.上述变量为节点纵坐标的移动量,正数表示向坐标轴正向移动,反之向负向移动.

为了获得差异显著的结构,可采用拓扑构型的方法对结构进行优化.考虑结构对称性,将标准节的斜杆排布形式由拓扑构型表示,如图 5 所示.

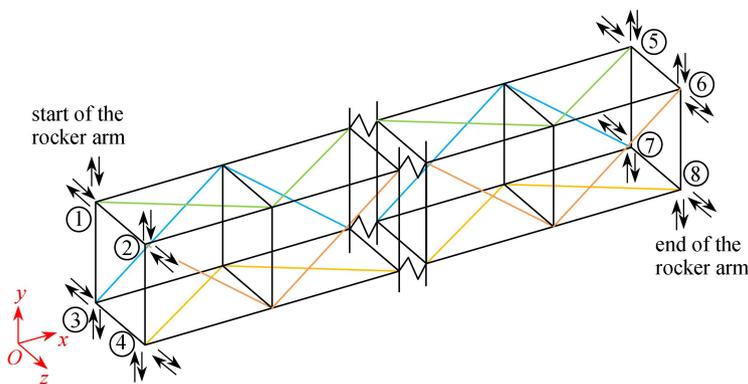


图 4 摇臂节点移动模型

Fig. 4 The rocker arm node movement model

3.3 优化结果

设定 ISCA 和 SCA 的种群数量为 10,迭代次数为 200,以工况 2 为优化工况对抱杆结构进行优化.表 4 给

出了 ISCA 和 SCA 的优化设计结果, $T_j(j=1,2,3,4)$ 分别表示普通段、加强段、桅杆以及摇臂的拓扑构型,其收敛曲线如图 6 所示.优化前后结构的应力、位移和屈曲系数对比如图 7—9 所示.

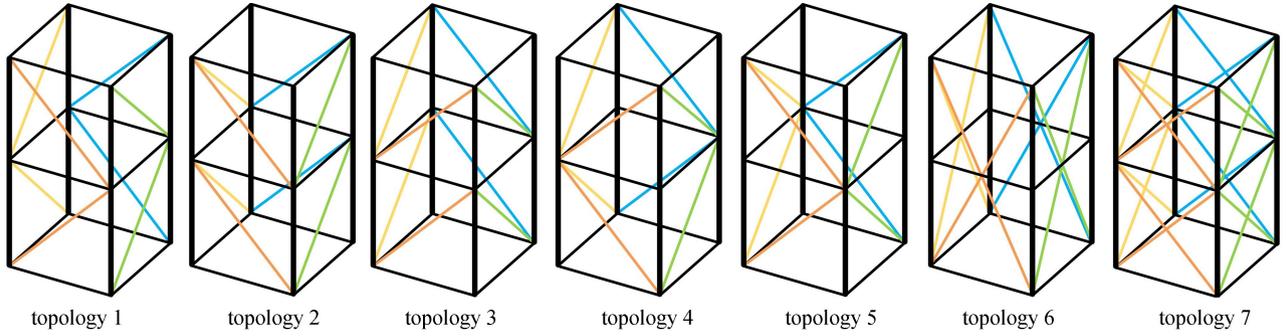


图 5 标准节排布形式

Fig. 5 The standard section arrangement

表 4 优化结果

Table 4 Optimization results

algorithm	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	y_1	y_5	T_1	T_2	T_3	T_4	mass W/t
ISCA	└ 70×6	└ 45×3	└ 80×7	└ 45×3	└ 75×7	└ 45×3	└ 45×5	└ 45×4	80	-150	5	3	4	2	10.44
SCA	└ 70×6	└ 45×3	└ 90×8	└ 45×4	└ 75×8	└ 50×6	└ 50×6	└ 50×5	90	-50	2	1	3	1	11.18

表 4 表明 ISCA 得到的结构质量比 SCA 更小, ISCA 的优化结果比优化前降低了 23.46%. 图 6 表明 ISCA 的收敛速度更快. 因此, 改进算法大幅度提升了性能.

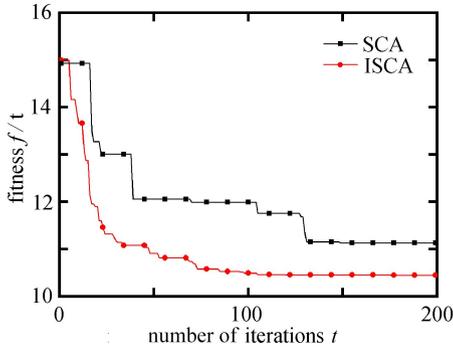


图 6 优化收敛曲线

Fig. 6 Optimization convergence curves

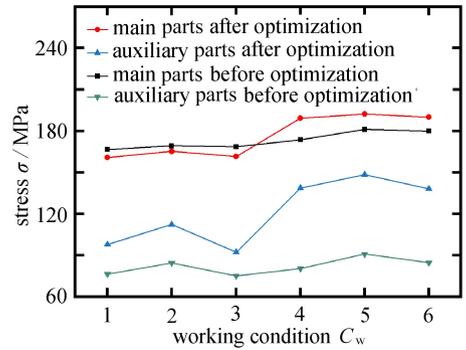


图 7 应力对比

Fig. 7 Stress comparison

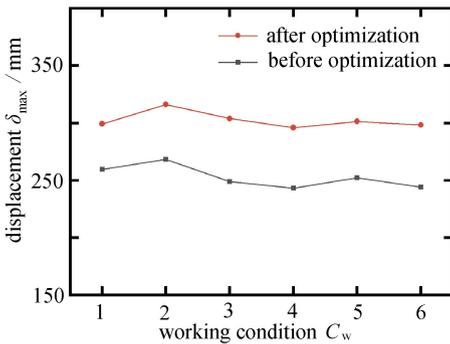


图 8 最大顶端位移对比

Fig. 8 Comparison of maximum displacements

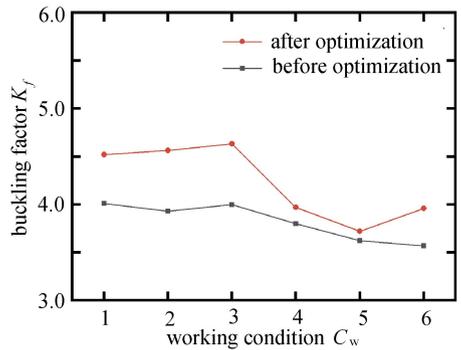


图 9 屈曲系数对比

Fig. 9 Comparison of buckling coefficients

图 7—9 显示了优化后的结构在各种工况下均满足设计要求. 工作工况下, 主材和辅材的最大应力分别小于许用应力 172.5 MPa 和 117.5 MPa, 主材和辅材在工况 2 时应力最大, 分别为 165.18 MPa 和 112.35 MPa, 位于加强节的顶端, 相较于优化前, 主材应力降低 4.01 MPa, 辅材增大了 27.87 MPa, 材料分布更加合

理;顶端最大位移发生在工况 2,为 316.37 mm,满足相关规范要求,增大了 80.22 mm。大风工况下,主材和辅材的最大应力分别小于许用应力 237.93 MPa 和 162.07 MPa,主材和辅材的最大应力分别为 192.30 MPa 和 148.31 MPa,最大应力位于第一道腰环处,发生在工况 5,对比优化前,分别增加了 10.70 MPa 和 100.37 MPa;最大顶端位移为 301 mm,同样满足规范要求,发生在工况 5。屈曲系数也均满足相关规范的要求。

4 结 论

本文提出了一种 ISCA,结合有限元方法,以抱杆结构质量为优化目标对抱杆结构进行优化设计,主要结论如下:

1) 通过引入 Lévy 飞行、精英引导策略以及贪婪选择策略对 SCA 进行改进,有效提高了算法的搜索能力以及搜索精度,ISCA 的优化能力明显优于 SCA。

2) 建立抱杆结构优化模型,结合罚函数法,使用 ISCA 对其进行优化,能够看出,抱杆构件辅材截面尺寸显著减小;同时,优化后摇臂形状更符合摇臂受力情况;抱杆各部分优化后的拓扑构型也能为结构提供更好的力学性能。经过优化后,结构质量由 13.64 t 降为 10.44 t,降幅为 23.46%。

3) ISCA 能够有效求解空间桁架结构的尺寸、形状和拓扑一体化优化设计问题。

致谢 本文作者衷心感谢合肥工业大学校企合作项目(W2019JSFW0503;W2023JSFW0622)和国网安徽省电力有限公司科技项目(SGAHJYJSXLJS1800347)对本文的资助。

参考文献(References):

- [1] 陶然,周焕林,孟增,等.基于响应面法和改进算术优化算法的抱杆优化设计[J].应用数学和力学,2022,43(10):1113-1122.(TAO Ran, ZHOU Huanlin, MENG Zeng, et al. Optimization design of holding pole based on response surface methodology and improved arithmetic optimization algorithm[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2022, 43(10): 1113-1122. (in Chinese))
- [2] 方林,蒋晓琳,周庆丰,等.基于改进天鹰优化器的抱杆结构优化[J].科学技术与工程,2023,23(27):11759-11767.(FANG Lin, JIANG Xiaolin, ZHOU Qingfeng, et al. Structure optimization of holding pole based on improved aquila optimizer[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(27): 11759-11767. (in Chinese))
- [3] 刘宸宇,骆烜赫,刘康翔,等.基于平铺刚度法的弧形加筋板的轻量化设计[J].应用数学和力学,2023,44(8):953-964.(LIU Chenyu, LUO Xuanhe, LIU Kangxiang, et al. Light weight design of arc rib stiffened plate based on the smeared stiffener method[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2023, 44(8): 953-964. (in Chinese))
- [4] 杜晨,彭雄奇.变厚度连续纤维增强复合材料铺层设计优化方法[J].应用数学和力学,2022,43(12):1313-1323.(DU Chen, PENG Xiongqi. Lamination design optimization for continuous fiber reinforced composites of variable thicknesses[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2022, 43(12): 1313-1323. (in Chinese))
- [5] 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.(GUO Huiyong, SONG Xiaohui, LI Zhengliang. 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. (in Chinese))
- [6] 石开荣,潘文智,姜正荣,等.基于生长空间限定与并行搜索的模拟植物生长算法的空间结构优化方法[J].建筑结构学报,2021,42(7):85-94.(SHI Kairong, PAN Wenzhi, JIANG Zhengrong, et al. Optimization method of spatial structures based on growth space limited & parallel search-based plant growth simulation algorithm [J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(7): 85-94. (in Chinese))
- [7] SOUZA R R D, MIGUEL L F F, LOPEZ R H, et al. A procedure for the size, shape and topology optimization of transmission line tower structures[J]. *Engineering Structures*, 2016, 111: 162-184.

- [8] KHODZHAIEV M, REUTER U. Structural optimization of transmission towers using a novel genetic algorithm approach with a variable length genome[J]. *Engineering Structures*, 2021, **240**: 112306.
- [9] FIORE A, MARANO G C, GRECO R, et al. Structural optimization of hollow-section steel trusses by differential evolution algorithm[J]. *International Journal of Steel Structures*, 2016, **16**(2): 411-423.
- [10] RENKAVIESKI C, PARPINELLI R S. Meta-heuristic algorithms to truss optimization; literature mapping and application[J]. *Expert Systems With Applications*, 2021, **182**: 115197.
- [11] MIRJALILI S. SCA: a sine cosine algorithm for solving optimization problems[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2016, **96**: 120-133.
- [12] ATTIA A F, EL SEHIEMY R A, HASANIEN H M. Optimal power flow solution in power systems using a novel-sine-cosine algorithm[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018, **99**: 331-343.
- [13] EWEES A A, ELAZIZ M A, AL-QANESS M A A, et al. Improved artificial bee colony using sine-cosine algorithm for multi-level thresholding image segmentation[J]. *IEEE Access*, 2020, **8**: 26304-26315.
- [14] ABUALIGAH L, DULAIMI A J. A novel feature selection method for data mining tasks using hybrid sine cosine algorithm and genetic algorithm[J]. *Cluster Computing*, 2021, **24**(3): 2161-2176.
- [15] ABDEL-MAWGOUD H, FATHY A, KAMEL S. An effective hybrid approach based on arithmetic optimization algorithm and sine cosine algorithm for integrating battery energy storage system into distribution networks [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, **49**: 104154.
- [16] LI N, WANG L. Bare-bones based sine cosine algorithm for global optimization[J]. *Journal of Computational Science*, 2020, **47**: 101219.
- [17] LONG W, WU T, LIANG X, et al. Solving high-dimensional global optimization problems using an improved sine cosine algorithm[J]. *Expert Systems With Applications*, 2019, **123**: 108-126.
- [18] GANDOMI A H, YANG X S, ALAVI A H. Cuckoo search algorithm; a metaheuristic approach to solve structural optimization problems[J]. *Engineering With Computers*, 2013, **29**(1): 17-35.