

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.04.017

基于改进海洋捕食者算法的输电塔结构优化

周庆丰¹, 余宗斌², 张树林³, 鲁杭², 周焕林¹

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 国网安徽省电力有限公司 宣城供电公司, 安徽 宣城 242000; 3. 中国能源建设集团 安徽省电力设计院有限公司, 安徽 合肥 230601)

摘要: 为确保输电塔架线施工时取消临时拉线工况下输电塔架线施工安全, 需对其结构进行优化设计。文章建立输电塔结构的计算模型, 采用罚函数法确定海洋捕食者算法(marine predators algorithm, MPA)的目标函数; 考虑到 MPA 易陷入局部最优、收敛速度慢的缺点, 提出一种融合折射反向学习策略和黄金正弦算法的改进海洋捕食者算法(improved marine predators algorithm, IMPA), 并将其在 6 个基准测试函数数值实验中与其他算法进行比较, 结果表明 IMPA 具有更好的收敛性和求解精度。利用 IMPA 对输电塔结构在特殊工况下进行优化, 结果表明 IMPA 可以对三维杆系结构进行优化设计, 优化后的输电塔具有较好的力学性能。

关键词: 输电塔; 海洋捕食者算法(MPA); 结构优化; 离散化变量; 极限承载力

中图分类号: TU318 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2024)04-0539-09

Structural optimization of transmission tower based on improved marine predators algorithm

ZHOU Qingfeng¹, YU Zongbin², ZHANG Shulin³, LU Hang², ZHOU Huanlin¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Xuancheng Power Supply Company, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Xuancheng 242000, China; 3. China Energy Engineering Group Anhui Electric Power Design Institute Co., Ltd., Hefei 230601, China)

Abstract: In order to ensure the safety of the transmission tower line construction under the condition of cancelling the temporary pull line, the structure of the transmission tower line needs to be optimized. This paper establishes a computational model of transmission tower structure, and the penalty function method is used to determine the objective function of the marine predators algorithm(MPA). Then, considering the shortcomings of MPA such as easily falling into local optimum and slow convergence speed, an improved marine predators algorithm(IMPA) that integrates the refracted opposition-based learning(ROBL) strategy and the golden sine algorithm(Gold-SA) is proposed and compared with other algorithms on six benchmark test functions in numerical experiments. The results show that the IMPA has better convergence and solution accuracy. The IMPA is used to optimize the transmission tower structure under special working conditions. The results show that the IMPA can optimize the design of the three-dimensional truss structure, and the optimized transmission tower has good mechanical properties.

Key words: transmission tower; marine predators algorithm(MPA); structural optimization; discrete variables; ultimate bearing capacity

收稿日期: 2022-12-20; 修回日期: 2023-02-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11672098)

作者简介: 周庆丰(1996—), 男, 安徽滁州人, 合肥工业大学硕士生;

周焕林(1973—), 男, 安徽宿松人, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师, 通信作者, E-mail: zhouhl@hfut.edu.cn.

0 引言

输电塔结构是输电线路的重要组成部分,对其进行经济环保的设计具有重要的工程实践意义。按照《架空输电线路杆塔结构设计技术规定》(DL/T 5154—2012),铁塔在架线施工过程中一侧挂线时,另一侧需要打设临时拉线防止铁塔变形倾覆。但是在实际工程中,经常由于河道、山谷等地形条件限制,或者土地锚固可靠性差等原因无法打设临时拉线;即使条件许可,打设临时拉线也占用土地,延长工期,从而增加施工成本且加大对森林植被等的损毁。因此可以考虑在输电塔架线施工时取消临时拉线,但为确保该特殊情况下输电铁塔架线施工的安全,需对其结构进行优化设计,这不但可以提高输电线路工程建设的效率,同时增强了输电塔长久服役安全。

文献[1]研究转角输电塔线体系的风振响应,但如何进行既安全可靠又经济合理的结构优化一直是工程界研究的热点。近年来启发式算法的大量涌现,为输电塔等杆系结构提供新的优化设计方法。文献[2]采用萤火虫算法对跨越架结构进行优化;文献[3]提出一种在离散系统下的基于遗传算法的输电塔结构优化设计方法;文献[4]提出一种基于蚁群算法的输电塔结构局部优化设计方法;文献[5]提出一种基于改进人工鱼群算法的输电塔塔腿拓扑优化方法。但针对架线施工时取消临时拉线的特殊实际情况下的输电塔优化设计问题的相关研究并不多。

本文采用一种优化效率较高的海洋捕食者算法(marine predators algorithm,MPA)^[6],并运用黄金正弦指引机制和折射反向学习(refracted opposition-based learning,ROBL)策略^[7-8]、高斯变异策略^[9]对该算法进行阶段性改进,采用罚函数法确定算法的目标函数,并针对桁架结构截面离散化变量对某输电塔进行结构优化。

1 工程概述及优化模型建立

1.1 SJI-1 型转角塔及有限元模型建立

本文主要针对 SJI-1 型转角塔进行研究,铁塔实物图如图 1a 所示,该铁塔总高 50.5 m,呼称高 33.0 m。导线转角取 20°;铁塔单侧共 8 个挂点,从塔头往下一共可挂 8 根线,如图 1b 所示。

本文采用有限元软件并使用梁单元模拟各个杆件,塔腿及铁塔呼称高以下的塔身主材材料采用 Q420 钢材,其余塔身及横担主材采用 Q345 钢

材。考虑最恶劣工况,即当输电铁塔一侧无拉线,另一侧全部挂线时,此时整体所受的张力最大,结构最危险。结构外部载荷主要分为风载荷、导线自重 2 个部分。在实际的工况中,风荷载一般取 5 m/s,由规范 DL/T 5154—2012 可得,杆塔风荷载的标准值 W_s 计算公式如下:

$$W_s = W_0 \mu_z \mu_s \beta_z B A_s, \\ W_0 = V^2 / 1600 \quad (1)$$

其中: W_0 为基准风压标准值; μ_z 为风压高度变化系数; μ_s 为构件的体形系数; β_z 为杆塔风荷载调整系数; B 为覆冰时风荷载增大系数; A_s 为构建承受风压的投影面积计算值; V 为基准高度为 10 m 的风速。

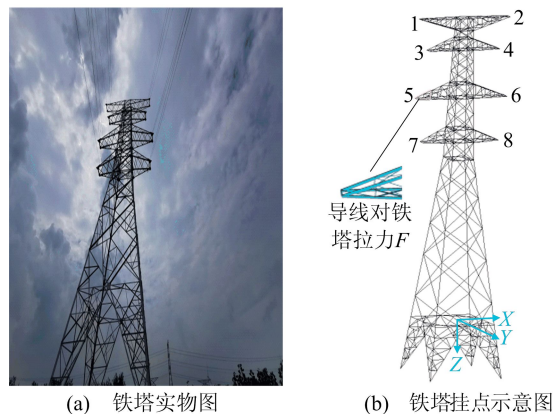


图 1 SJI-1 型转角塔

为方便计算,现将每根导线对铁塔的拉力分解为作用在耐张塔挂线处的 3 个方向分力,各挂线点处所设计拉力分力情况见表 1 所列。

挂点	分力		
	X 方向	Y 方向	Z 方向
1	4.71	24.02	2.19
2	4.71	24.02	2.19
3	16.24	82.77	7.10
4	16.24	82.77	7.10
5	16.24	82.77	7.10
6	16.24	82.77	7.10
7	17.50	91.04	7.00
8	17.50	91.04	7.00

1.2 计算结果与安全分析

采用有限元软件求解最恶劣工况下铁塔的最大 Mises 应力和最大位移,计算结果如图 2 所示。由图 2a 可知,最大 Mises 应力为 0.508 7 Pa,发生在塔腿处且已超出材料的屈服强度。由图 2b

可知,最大位移为 0.514 3 mm,发生在塔顶横担处,并未满足设计规范要求。由此可见,结构整体稳定性非常差,必须对其进行结构优化才能安全投入使用。本文采用改进海洋捕食者算法(improved marine predators algorithm, IMPA)对其进行结构优化设计。

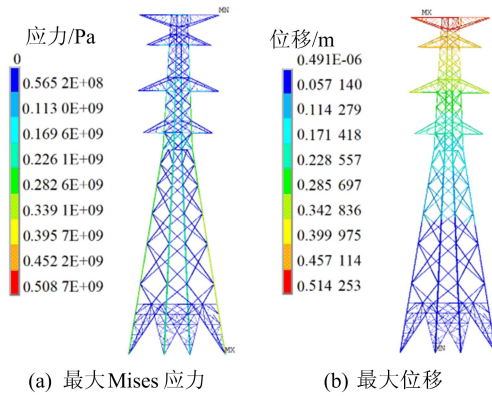


图 2 最恶劣工况下铁塔最大 Mises 应力和最大位移

2 基于 IMPA 的结构优化

2.1 输电塔结构优化及实现

2.1.1 约束条件确立

为实现结构整体强度和稳定性的提升,本文将主要承力构件的角钢型号作为设计变量。基于设计的轻量化和经济性,将铁塔的经济花费转化为结构质量作为基本目标函数,即

$$W = \min \left\{ \sum_{j=1}^m L_j \rho_j A_j \right\} \quad (2)$$

其中: W 为结构总质量; L_j 、 ρ_j 、 A_j 分别为第 j 个梁单元的长度、密度和面积; m 为铁塔结构中梁单元的数目。

该工况性质特殊,钢材为线弹性材料,其平均强曲比在 1.3~1.7 之间,并且材料的分项系数为 1.1;另外,按照概率论极限强度设计理论以及铁塔结构的真型实验来看,将构件应力按钢材强度设计值是可以满足受力要求和材料特性要求的,从而达到充分利用构件承载能力、降低塔重的目的。下面是该数学模型的约束条件。

1) 结构的强度约束(第四强度理论)。计算公式为:

$$\sigma_{j\max-Mises} \leq f \quad (3)$$

2) 最大位移约束。计算公式为:

$$\mu \leq \mu_{\max} \quad (4)$$

3) 单肢刚度长细比约束。计算公式为:

$$\lambda_j = \frac{l_0}{r_{\min}} \leq [\lambda] \quad (5)$$

其中: $\sigma_{j\max-Mises}$ 为第 j 根杆的最大 Mises 应力; f 为钢材强度设计值,按 DL/T 5154—2012 中规定, Q420、Q345 的钢材杆件屈服强度设计值分别为 380、310 MPa; μ 为结构最大位移值; μ_{\max} 为最大位移限值,本文结合其他真型实验和规范作为参考,取 $\mu_{\max} = 400$ mm; λ_j 为第 j 根杆件的长细比; l_0 为构件的长度; r_{\min} 为构件的最小回转半径; $[\lambda]$ 为竖杆主材和斜杆辅材受压构件的允许长细比,按 DL/T 5154—2012 中规定,竖杆主材 $[\lambda] = 150$,斜杆辅材 $[\lambda] = 250$ 。

2.1.2 罚函数法确定目标函数

直接采用基本目标函数容易致使算法生成的新位置违背约束条件,从而难以求解。罚函数法^[10]因其原理简单而被广泛使用,罚函数法经过加权转化将约束优化问题中的方程和原目标函数相结合,因此本文采用罚函数法处理上述约束条件,构建一种新的方程作为目标函数,即

$$\Phi(x, r_1, r_2) = \sum_{j=1}^m L_j \rho_j A_j + r \sum_{j=1}^s \max \left[0, \left(\frac{\sigma_{j\max-Mises}}{f} - 1 \right), \left(\frac{\mu}{\mu_{\max}} - 1 \right), \left(\frac{\lambda_j}{[\lambda]} - 1 \right) \right] \quad (6)$$

其中: r 为惩罚因子,对于最小优化问题,需选取一个较大的数,本文取 $r = 10^{10}$; s 为约束条件函数个数。通过求解上述新目标函数的无约束极小值,可得到原问题的约束最优解。

2.2 海洋捕食者算法

MPA 是文献[6]提出的一种元启发式优化算法,模拟海洋中捕食者与猎物之间的捕食关系。MPA 以当前迭代次数 t 和最大迭代次数 T 为根据将算法划分为 3 个阶段。引起海洋捕食者行为变化的原因还有环境问题,如涡流形成、鱼群聚集装置(fish aggregating devices, FADs)效应。

2.2.1 算法初始化

MPA 采用随机初始化的方法生成初始种群,具体表示为:

$$X_{i,j} = b_{uj} + r_1(b_{uj} - b_{lj}) \quad (7)$$

其中: $X_{i,j}$ 为第 i 个猎物的第 j 维位置; $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, d$, n 、 d 分别为优化问题模型的种群数和变量维数; b_{uj} 、 b_{lj} 分别为优化问题模型在第 j 维搜索空间的上、下界; r_1 为 $[0, 1]$ 范围内的随机数。

种群初始化后,计算每个个体的适应度值,适

应度值最好的个体作为顶级捕食者,将顶级捕食者向量复制 n 次,形成精英矩阵 E 。因为一个捕食者可能是更高级捕食者的猎物,所以在每次迭代中,根据是否将顶级捕食者替换为其他捕食者来更新精英矩阵 E 。同时构建猎物矩阵 P ,每个捕食者根据矩阵 P 改变位置。精英矩阵 E 和猎物矩阵 P 分别表示为:

$$E = \begin{bmatrix} X_{1,1}^1 & X_{1,2}^1 & \cdots & X_{1,d}^1 \\ X_{2,1}^1 & X_{2,2}^1 & \cdots & X_{1,d}^1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{n,1}^1 & X_{n,2}^1 & \cdots & X_{n,d}^1 \end{bmatrix}_{n \times d},$$

$$P = \begin{bmatrix} X_{1,1} & X_{1,2} & \cdots & X_{1,d} \\ X_{2,1} & X_{2,2} & \cdots & X_{1,d} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{n,1} & X_{n,2} & \cdots & X_{n,d} \end{bmatrix}_{n \times d} \quad (8)$$

2.2.2 第 1 阶段

在优化的第 1 阶段($t \leq T/3$),算法主要进行全局搜索,具体表示为猎物矩阵 P 按照式(9)进行更新,即

$$\begin{cases} S_i = R_B \otimes (E_i - R_B \otimes P_i), \\ P_i = P_i + pR \otimes S_i \end{cases} \quad (9)$$

其中: $i=1, \dots, n$; p 取 0.5; $R \in [0, 1]$ 为一个均匀分布的随机向量; S_i 为猎物与捕食者的移动步长; R_B 为布朗运动; \otimes 表示矩阵叉乘。

2.2.3 第 2 阶段

在优化的第 2 阶段($T/3 < t < 2T/3$),猎物矩阵 P 按照式(10)进行更新,即

$$S_i = \begin{cases} R_L \otimes (E_i - R_L \otimes P_i), & i = 1, \dots, n/2; \\ R_B \otimes (R_B \otimes E_i - P_i), & i = n/2, \dots, n; \end{cases}$$

$$C_F = (1 - t/T)^{2t/T};$$

$$P_i = \begin{cases} P_i + pR \otimes S_i, & i = 1, \dots, n/2; \\ E_i + pC_F \otimes S_i, & i = n/2, \dots, n \end{cases} \quad (10)$$

其中: R_L 为莱维运动; C_F 为自适应参数,随着当前迭代次数变大而越来越小,用来控制捕食者运动的步长。

2.2.4 第 3 阶段

在优化的第 3 阶段($2T/3 < t$),猎物矩阵 P 按照式(11)进行更新,即

$$\begin{cases} S_i = R_L \otimes (R_L \otimes E_i - P_i), \\ P_i = E_i + pC_F \otimes S_i \end{cases} \quad (11)$$

其中, $i=1, \dots, n$ 。

2.2.5 涡流的形成与 FADs 的影响

每次迭代后再将 FADs 效应应用于每个海洋捕食者,即对局部最优解进行扰动,FADs 取值为

0.2,其在数学上可表示为:

$$P_i = \begin{cases} P_i + C_F [X_{\min} + R \otimes (X_{\max} - X_{\min})] \otimes U, & r_2 \leq 0.2; \\ P_i + [0.2(1 - r_2) + r_2](P_{n1} - P_{n2}), & r_2 > 0.2 \end{cases} \quad (12)$$

其中: U 为包含 0 和 1 数组的二进制向量; r_2 为 $[0, 1]$ 中均匀随机数; P_{n1} 、 P_{n2} 分别为随机选择的 2 个猎物。因为 MPA 全局勘探能力有限,且易陷入局部桎梏难以跳出,所以对 MPA 进行阶段性改进非常必要。

2.3 改进海洋捕食者算法

2.3.1 第 1 阶段全局勘探能力改进

ROBL 是在反向学习的基础上,结合光的折射定律寻找更优的候选解,主要是通过计算当前解的折射反向解来扩大搜索范围;将其与元启发式算法结合可帮助算法实现对更多区域的勘探以及加快算法收敛速度。因此本文采取在迭代的第 1 阶段选取 1/2 适应度较差的猎物进行该策略勘探,猎物可按式(13)计算其进行折射反向学习后的新位置,即

$$P_{i,j}^* = \frac{a_j + b_j}{2} + \frac{a_j - b_j}{2k} - \frac{P_{i,j}}{k} \quad (13)$$

其中: $P_{i,j}$ 为当前种群中第 i 个猎物在第 j 维的值; $P_{i,j}^*$ 为 $P_{i,j}$ 经过折射反向学习后形成的解; a_j 、 b_j 分别为当前猎物种群在第 j 维的最大值和最小值; k 为入射光线与折射光线长度的比值。

2.3.2 第 2 阶段融合改进

黄金正弦算法(golden sine algorithm, Gold-SA)是文献[8]提出的,灵感来自于正弦三角函数与单位圆的关系,可以用正弦函数得到的固定半径和固定频率对整个单位圆进行扫描。Gold-SA 具有更少的依赖于算法的参数和操作符,由文献[11]研究发现,将其与其他算法融合可以为算法提供更快收敛速度,其黄金分割系数为:

$$\begin{cases} c_1 = a_1(1 - h) + b_1h, \\ c_2 = a_1h + b_1(1 - h) \end{cases} \quad (14)$$

其中: a_1 、 b_1 为黄金分割搜索初始值,一般取 $a_1 = \pi$, $b_1 = -\pi$; h 为常数,通常取 $h = (\sqrt{5} - 1)/2$ 。

Gold-SA 的主要过程是其解的更新过程,其位置更新公式为:

$$X_i^{t+1} = X_i^t | \sin r_3 | - r_4 \sin r_3 | c_1 D^t - c_2 X_i^t | \quad (15)$$

其中: D^t 为第 t 次迭代中顶级捕食者的位置; r_3 、 r_4 为随机数,取 $r_3 \in [0, 2\pi]$, $r_4 \in [0, \pi]$ 。

近年来融合算法方式层出不穷,本文参照麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)^[12]中跟随者的方式将 2 种算法融合。融合后的更新计算公式为:

$$P_i = X_i^t + Q \exp\left(\frac{X_{\text{worst}}^t - X_i^t}{i^2}\right) \quad (16)$$

其中: X_{worst} 为当前迭代的全局最差位置; X_i 为第 i 个粒子经过第 2 阶段更新后再按照黄金分割更新到的新位置; Q 为一个服从正态分布的随机数。

2.3.3 增强局部搜索的高斯变异操作

高斯变异(Gaussian mutation)^[9]操作是指用一个服从正态分布的随机数代替原来的参数值。高斯变异计算公式为:

$$m(P) = P(1 + N(0, 1)) \quad (17)$$

其中: P 为当前解; $m(P)$ 为当前解经过高斯变异后形成的新解; $N(0, 1)$ 为期望为 0、标准差为 1 的正态分布随机数。

从式(17)可以看出,高斯变异在局部搜索过程中的扰动性很强,可以更好地跳出局部极小值。因此本文在迭代的后半段将该 FADs 效应换为高斯扰动,这可以在一定程度上避免算法陷入到局部桎梏的风险。

2.4 改进算法的优化过程及测试函数数值分析

IMPA 具体流程如图 3 所示。

本文选取 MPA、融合策略 IMPA、灰狼优化算法(grey wolf optimizer, GWO)^[13]及蝴蝶优化算法(butterfly optimization algorithm, BOA)^[14]进行测试函数数值实验对比。为保证实验的公平性,初始化种群均为 30,最大迭代次数均为 500,IMPA 中 k 取 200 000,其余算法参数与各参考文献要求保持一致。基准测试函数见表 2 所列,为避免实验的偶然性误差,对表 2 中 6 个具有典型特征的基准测试函数分别进行 30 次独立实验,表 2 中 F1~F3 为单峰测试函数, F4~F6 为多峰测试函数,并记录它们的最优值、平均值和标准差,测试结果见表 3 所列。

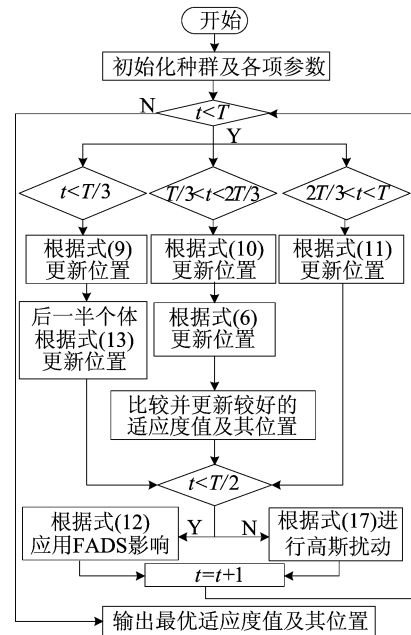


图 3 IMPA 优化流程

表 2 基准测试函数

函数编号	测试函数	维数 d	搜索范围	最优值
F1	Sphere	50	$[-100, 100]$	0
F2	Schwefel	50	$[-100, 100]$	0
F3	Step	50	$[-100, 100]$	0
F4	Schwefel	50	$[-500, 500]$	-418.983 <i>d</i>
F5	Rastrigin	50	$[-5.12, 5.12]$	0
F6	Alpine	50	$[-10, 10]$	0

由表 3 可知,本文提出的 IMPA 的寻优精度远远高于原算法与其他优秀算法,其中,在 F1、F2、F5 和 F6 已经达到了函数的理论最优值, F3、F4 的实验结果虽未达到最优值,但与原始 MPA 相比,都提高了很多数量级,说明改进算法的局部开发能力得到极大的提升,同时也证明改进策略的有效性;IMPA 在 F1、F2、F5 和 F6 测试函数中的平均值和标准差均为 0,且 F3、F4 的平均值和标准差在所选实验算法中均为最小,说明 IMPA 具有更好的稳定性和鲁棒性。

表 3 基准测试函数实验结果

统计量	算法	F1	F2	F3	F4	F5	F6
最优值	MPA	2.53E-22	2.25E-04	5.76E-03	-15 353.20	0	9.95E-02
	IMPA	0	0	1.52E-15	-20 949.14	0	0
	GWO	5.94E-21	7.88E-04	1.74	-10 846.63	2.84E-13	9.95E-02
	BOA	1.16E-11	1.18E-11	9.84	5 748.62	0	3.98E-01
平均值	MPA	3.24E-21	2.79E-02	2.13E-01	-13 936.10	0	9.95E-02
	IMPA	0	0	9.38E-09	-20 949.14	0	0
	GWO	8.26E-20	1.33E-11	2.61	-9 048.66	4.81	6.33E-01
	BOA	1.33E-11	2.19E-01	10.83	-4 748.33	2.86E-07	4.17E-01

续表

统计量	算法	F1	F2	F3	F4	F5	F6
标准差	MPA	3.04E-21	3.44E-02	1.75E-01	772.49	0	4.16E-17
	IMPA	0	0	1.48E-08	7.28E-12	0	0
	GWO	8.62E-20	1.02E-12	5.35E-01	396.44	4.43	2.46E-01
	BOA	8.49E-13	2.70E-01	6.11E-01	1 280.39	1.34E-06	1.97E-01

根据实验数据,绘出函数迭代收敛曲线,单峰函数迭代曲线如图 4 所示,多峰函数迭代曲线如图 5 所示。

由图 4、图 5 可知,IMPA 收敛速度和寻优精

度比原算法与其他算法好,IMPA 的迭代曲线拐点较多,说明 IMPA 对跳出局部最优值的性能要优于 MPA、GWO、BOA 算法,IMPA 收敛速度快的同时也保证了算法的抗早熟能力。

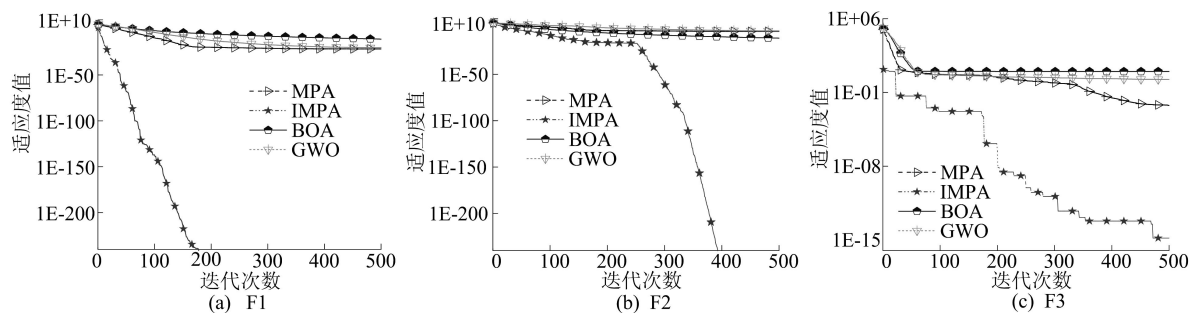


图 4 单峰函数迭代收敛曲线

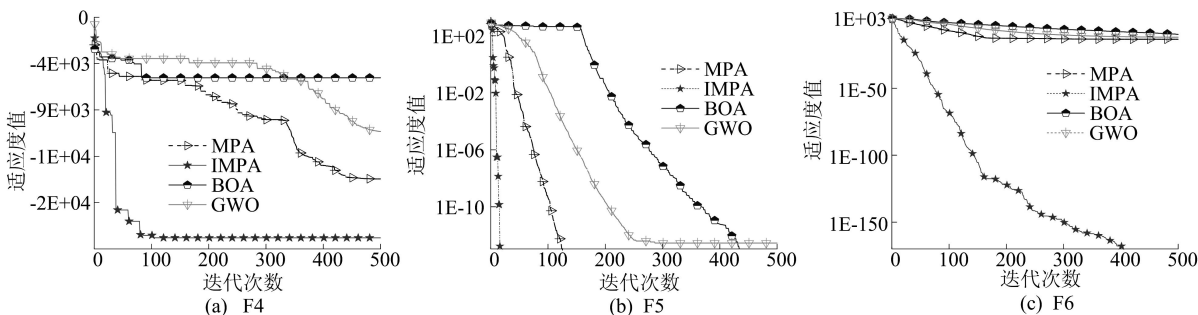


图 5 多峰函数迭代收敛曲线

3 优化计算

本文采用 Q420 钢材的主要受力构件按截面面积分为 4 类,采用 Q345 钢材的次要受力构件按截面面积选取 6 类,共 10 个设计变量。现将各算法的种群数设为 10,迭代次数设为 100,分别进行 10 次独立实验,截面库按照《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)角钢类型以等边角钢的截面面积大小排序来设立,共选取 70 种类型,即

$$A = \{L40 \times 3(2.360 \text{ cm}^2), \dots, L200 \times 16(62.010 \text{ cm}^2)\}。$$

输电铁塔优化前后的各参数对比结果见表 4 所列,其中长细比按 DL/T 5154—2012 中规定计算验证。由表 4 可知,优化后的构件长

细比均在规范要求之内,优化后的输电铁塔的最大 Mises 应力及最大位移均在安全范围内。输电铁塔基于最恶劣工况的结构优化结果对比见表 5 所列。

表 4 优化结构前后各参数对比

参数	原模型	MPA	IMPA	GWO	BOA
竖杆主材最大长细比	95.5	113.4	137.1	113.4	124.1
斜杆辅材最大长细比	168.6	225.7	225.7	225.7	168.6
Q420 构件最大 Mises 应力/MPa	508.7	365.0	365.0	365.0	359.0
Q345 构件最大 Mises 应力/MPa	194.0	296.0	303.0	302.0	234.0
结构最大位移/mm	514.3	400.0	400.0	400.0	393.5

IMPA 优化后和原模型在 8 种工况下的最大 Mises 应力和最大位移计算结果对比如图 9 所示。由图 9 可知, IMPA 优化后模型在相同工况下的最大 Mises 应力和位移基本都小于原模型, 可见优化后的模型安全性能得到了极大提升。

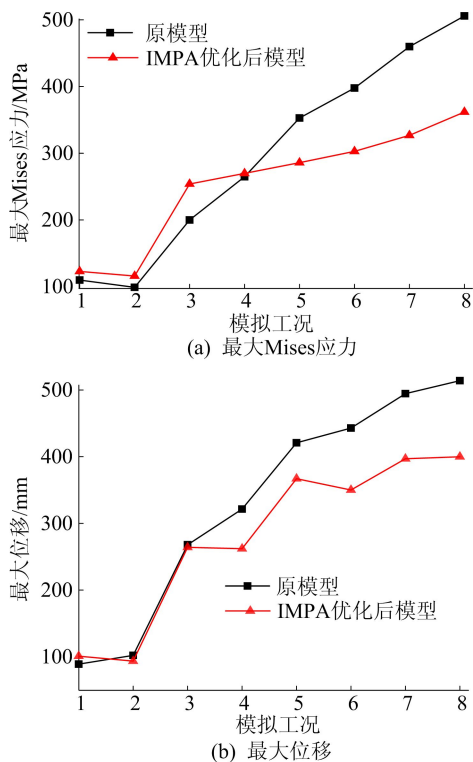


图 9 不同工况下最大 Mises 应力、最大位移对比图

4.2 最恶劣工况下的极限荷载分析

本文采用以最恶劣工况各挂点处的荷载为设计荷载^[15], 所有加载节点 X、Y、Z 方向的荷载以线性方式按比例增加, 直到模型发生破坏; 以设计荷载的倍数形式出现, 即为 θP_d , θ 为荷载倍数, P_d 为最恶劣工况设计荷载。该工况下施加荷载倍数-Y 方向最大位移的曲线如图 10 所示。

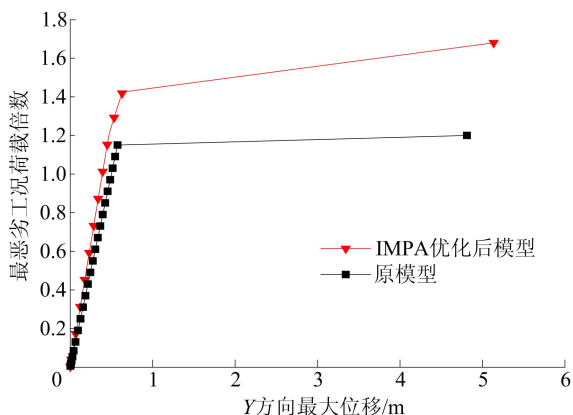


图 10 最恶劣工况下荷载倍数-Y 方向最大位移曲线

由图 10 可知, IMPA 优化后的模型在 $1.40P_d$ 荷载时由屈服阶段进入到强化阶段, 并在 $1.62P_d$ 荷载时发生破坏, 未优化模型在 $1.00P_d$ 荷载时由屈服阶段进入到强化阶段, 并在 $1.20P_d$ 荷载时发生破坏, 可见优化后的模型能够承受更大的极限荷载。

5 结 论

本文基于 IMPA 对输电铁塔进行结构优化, 首先采用罚函数法和按质量排序的变量库建立目标函数, 然后利用 MPA 对最恶劣工况下输电铁塔结构进行优化; 并考虑到 MPA 容易陷入局部桎梏的问题, 提出折射反向学习策略、黄金正弦分割指引机制以及高斯扰动操作。通过数值计算和有限元建模软件的联动分析, 得到如下结论。

1) 基准测试函数数值实验结果表明 IMPA 具有很好的勘探能力和寻优精度, 其搜索效率也高于 3 种对比的元启发式优化算法。

2) 提出的 IMPA 对输电铁塔进行结构优化, 优化后铁塔的强度、刚度均满足设计要求, 并实现了一定的轻量化。

3) 根据对最恶劣工况下的极限荷载分析结果可知, IMPA 优化后的模型能够承受更大的极限荷载, 这对于结构优化是有益的。

[参 考 文 献]

- [1] 窦汉岭, 程长征. 转角输电塔线体系的风振响应分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2020, 43(9): 1218-1222.
- [2] 罗杰, 罗义华, 李亮, 等. 移动展开式跨越架的设计与优化[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021, 44(7): 947-952.
- [3] RAJEEV S, KRISHNAMOORTHY C S. Genetic algorithms-based methodologies for design optimization of trusses[J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(3): 350-358.
- [4] 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.
- [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, 87.
- [6] FARAMARZI A, HEIDARINEJAD M, MIRJALILI S, et al. Marine predators algorithm; a nature-inspired metaheuristic [J]. Expert Systems with Applications, 2020, 152: 113377.
- [7] TIZHOOSH H R. Opposition-based reinforcement learning [J]. Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2006, 10(4): 578-585.
- [8] TANYILDIZI E, DEMIR G. Golden sine algorithm; a novel

- math-inspired algorithm[J]. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 2017, 17(2): 71-78.
- [9] HIGASHI N, IBA H. Particle swarm optimization with Gaussian mutation [C]//*Proceedings of the 2003 IEEE Swarm Intelligence Symposium*. [S. l.]: IEEE, 2003: 72-79.
- [10] FIACCO A V, MCCORMICK G P. The sequential unconstrained minimization technique (SUMT) without parameters[J]. *Operations Research*, 1967, 15(5): 820-827.
- [11] 高文欣,刘升,肖子雅,等. 收敛因子和黄金正弦指引机制的蝴蝶优化算法[J]. *计算机工程与设计*, 2020, 41(12): 3384-3389.
- [12] XUE J, SHEN B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm[J]. *Systems Science & Control Engineering*, 2020, 8(1): 22-34.
- [13] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer[J]. *Advances in Engineering Software*, 2014, 69: 46-61.
- [14] ARORA S, SINGH S. Butterfly optimization algorithm: a novel approach for global optimization[J]. *Soft Computing*, 2019, 23(3): 715-734.
- [15] 曾程. 大跨越输电塔结构极限承载力分析[D]. 上海: 同济大学, 2006.

(责任编辑 张 镛)

(上接第 526 页)

由图 4d 可知,复合保鲜工艺处理组第 1 天的初始维生素 C 质量比较低,可能是由于维生素 C 对光照比较敏感,复合保鲜中的辐照处理导致其损失了一部分维生素 C,这与 UV-B 辐射处理组相似。然而,复合保鲜工艺处理组的维生素 C 质量比从第 2 天开始,减少趋势逐渐平缓,第 5 天时其质量比高于其他对照组,表明复合保鲜工艺相比传统单一保鲜工艺能够降低草菇采后维生素 C 质量比的损失。

本试验优化的复合保鲜工艺对鲜草菇能起到良好的保鲜效果,并且比传统单一保鲜工艺保鲜效果更好,是一种安全高效的保鲜工艺。

3 结 论

本文通过单因素试验和正交试验得出草菇保鲜的最优工艺条件,即保鲜温度 13 °C、1-MCP 体积比 30 μ L/L、乙醇体积比 200 μ L/L。采用该保鲜工艺对草菇进行处理后,能较好地降低草菇采后褐变以及蛋白质、总糖和维生素 C 质量比的损失,抑制草菇采后自溶,延长保质期,优于传统单一的保鲜工艺,是一种安全高效及有应用前景的保鲜工艺技术。

[参 考 文 献]

- [1] 裴建军,胡沂淮,邵蔚蓝. 草菇半纤维素酶系统的诱导、分布及初步定性[J]. *食品与生物技术学报*, 2003, 22(1): 61-64.
- [2] 徐高飞,刘斌. 啤酒糟对平菇栽培影响的研究[J]. *现代园艺*, 2020, 43(9): 43-45.
- [3] 张松阳. 不同包装材料对草菇保鲜效果的影响[J]. *安徽农业科学*, 2019, 47(9): 173-175, 178.
- [4] 臧传江,许念芳,舒锐,等. 草菇的营养价值及设施栽培技术[J]. *中国果菜*, 2018, 38(12): 73-74, 84.
- [5] 余华,刘达玉,李宗堂,等. 食用菌采后生理特性及保鲜技术研究进展[J]. *中国食用菌*, 2015, 34(1): 70-73, 76.
- [6] 陈炳智,钟咏汕,陈晓宁,等. 乙烯利和 1-MCP 在草菇采后保鲜中的作用[J]. *食药用菌*, 2018, 26(1): 40-43, 45.
- [7] 许原,张梦奇. 3 种天然保鲜剂对凤尾菇的保鲜效果[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(16): 253-257, 265.
- [8] 杨淑云,刘朝贵,曹必好,等. 草菇采后生理及保鲜技术[J]. *生物学杂志*, 2002(4): 36-38.
- [9] 王逸夫,谢裕俊,马晓鹏,等. 中草药保鲜剂对鲜切甘薯品质及褐变的影响[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(9): 160-166.
- [10] 凌育赵,刘经亮. 猕猴桃果酱中维生素 C 测定方法的比较研究[J]. *中国调味品*, 2009, 34(2): 101-102.
- [11] 何东慧,郭晓燕. 香菇中粗多糖含量测定的方法比较[J]. *现代食品*, 2015, 7(13): 29-32.
- [12] 巴良杰,张丽敏,蔡国俊,等. 低温对西番莲采后贮藏品质的影响[J]. *包装工程*, 2021, 42(15): 49-55.
- [13] HU Y H, CHEN C M, XU L, et al. Postharvest application of 4-methoxy cinnamic acid for extending the shelf life of mushroom (*Agaricus bisporus*) [J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2015, 104(15): 33-41.
- [14] KONDO S, SETHA S, RUDELL D R, et al. Aroma volatile biosynthesis in apples affected by 1-MCP and methyl jasmonate[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2005, 36(1): 61-68.
- [15] DING X C, ZHU X Y, YE L L, et al. The interaction of CpEBF1 with CpMADSs is involved in cell wall degradation during papaya fruit ripening [J]. *Horticulture Research*, 2019, 6(1): 13.
- [16] WANG K, PENG J, TANG S, et al. Improved control of postharvest decay in Chinese bayberries by a combination treatment of ethanol vapor with hot air[J]. *Food Control*, 2011, 22(1): 82-87.

(责任编辑 闫杏丽)