

基于 SSA-SVR 和 NSGA-III 的含铁心真空灭弧室纵磁触头优化设计

丁 璨¹, 贾振威¹, 袁 召², 刘佳宇¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院强电磁技术全国重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 在高压真空断路器中, 触头结构设计对磁场分布特性以及抑制电动斥力引发的对断路器运行的动态失稳具有关键作用。为此, 本研究建立了杯状纵磁触头 3D 有限元模型, 并通过融合支持向量回归 (SVR) 与麻雀搜索算法 (SSA), 以触头片开槽长度 L_1 、宽度 L_2 、径向旋转角度 θ_1 、杯座厚度 W 、斜槽上下旋转角度 θ_2 以及斜槽高度 H 6 个关键结构参数作为输入, 以电动斥力 F 、电流峰值时中心平面有效磁场占比 S 和过零时中心点磁滞时间 t_0 分别为输出, 构建了 SSA-SVR 高精度预测模型; 最后通过 NSGA-III 生成 Pareto 前沿, 结合 TOPSIS 方法实现参数优选。结果表明: 与初始数据相比, 参数优化后 F 从 169.91 N 降低至 105.29 N, S 从 53.31% 上升至 63.07%, t_0 从 1.023 3 ms 降低至 0.789 9 ms, 显著提升了触头的开断性能和运行稳定。

关键词: 真空灭弧室触头; 电动斥力; 磁场特性; SSA-SVR; NSGA-III; TOPSIS

Optimization Design of Longitudinal Magnetic Contacts in Vacuum Interrupters with Iron Core Based on SSA-SVR and NSGA-III

DING Can¹, JIA Zhenwei¹, YUAN Zhao², LIU Jiayu¹

(1. College of Electrical and New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In high-voltage vacuum circuit breakers, the design of contact structure plays a key role in the magnetic field distribution characteristics as well as the suppression of dynamic instability triggered by electrodynamic repulsive force on the operation of circuit breakers. To this end, a 3D finite element model of the cup-shaped longitudinal magnetic contact is established in this study, and by fusing support vector regression (SVR) and sparrow search algorithm (SSA), six key structural parameters, namely, contact piece slotted length L_1 , width L_2 , radial rotation angle θ_1 , cup seat thickness W , slant slot up and down rotation angle θ_2 , and slant slot height H , are used as inputs, and the electrodynamic repulsive force F , the center plane at the peak of the current The SSA-SVR high-precision prediction model is constructed by taking the electric repulsive force F , the effective magnetic field occupation ratio S at the peak current and the hysteresis time t_0 at the center point when crossing zero as outputs, respectively; finally, the Pareto front is generated by NSGA-III, and the parameter optimization is realized by combining with the TOPSIS method. The results show that: compared with the initial data, the parameter optimization reduces F from 169.91 N to 105.29 N, S increases from 53.31% to 63.07%, and t_0 reduces from 1.023 3 ms to 0.789 9 ms, which significantly improves the opening performance and operation stability of the contact.

Key words: vacuum interrupter contacts; electrodynamic repulsion; magnetic field characteristics; SSA-SVR; NSGA-III; TOPSIS

0 引言

在“双碳”战略目标驱动下, 新型电力系统建设正顺应着号召向绿色低碳转型^[1]。在此背景下, SF_6 因强温室效应, 正逐步被电力系统淘汰^[2]。目前, 真空开断技术凭借其优异的开断性能及环境友好等优

势, 已成为替代 SF_6 断路器的关键路径^[3]。

作为真空断路器的核心单元, 真空灭弧室磁场调控与机械动态稳定协同作用直接决定了断路器开断性能和运行可靠性。在中低压领域, 杯状触头因其电流均匀分布和电弧等离子体扩散效率得到广泛应用^[4-5]。研究表明, 其触头片开槽参数及杯座斜槽结构

基金项目: 国家自然科学基金(52177143)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(52177143).

参数通过改变涡流路径调控触头间隙磁场^[6-8]，对电动斥力、有效磁场占比及磁滞时间等关键指标影响显著，形成了复杂的非线性竞争关系^[9-10]。这种多参数敏感特性使得传统单目标优化难以实现全局性能协调，现阶段主流方法主要为有限元与数据建模相结合的技术路线^[9, 11]。但受限于三维涡流场建模复杂度等造成的不便，现有研究样本通常控制为 50~100 组的小样本范畴。在此约束下，学者们主要采用响应面法^[12]、正交试验设计^[6, 13]、BP 神经网络模型^[11]以及 RBF 神经网络模型^[9]等构建代理模型进行参数优化。尽管这些方法取得了一定成就，但存在明显不足：响应面法和正交试验在高维非线性问题中存在拟合精度低和收敛稳定性差等缺陷^[14]；BP 和 RBF 神经网络虽具有较强的非线性拟合能力，但易出现局部最优和过拟合问题^[15]。针对上述，支持向量回归(support vector regression, SVR)通过结构风险最小化原则平衡模型复杂度与泛化能力，在小样本条件下建模时具有独特优势^[16-17]。但其预测性能受惩罚因子 C 等超参数联合调控，需采用智能优化算法进行整定^[18-19]。鉴于此，本研究引入麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)，凭借其强大的优化能力以及收敛速度，显著提升了 SVR 超参数优化效率^[20]。在多目标优化层面，NSGA-III 作为 NSGA-II 的进阶版本，其采用参考点引导机制改进了高维目标空间的种群分布性，在 Pareto 前沿中具有更好的种群的多样性和收敛效率，并已广泛应用于参数结构的优化设计^[21-22]。

基于上述，本研究创新构建 SSA-SVR-NSGA-III 协同优化框架。通过 Box-Behnken 实验设计与三维瞬态磁场—机械耦合仿真协同获取六维结构参数(触头片开槽长度 L_1 、宽度 L_2 、径向旋转角度 θ_1 、杯座厚

度 W 、斜槽上下旋转角度 θ_2 以及斜槽高度 H)与 3 种核心性能指标(电动斥力 F 、有效磁场占比 S 及磁滞时间 t_0)的样本数据。并采用 SSA 算法自适应优化 SVR 超参数空间，构建高精度 SSA-SVR 代理模型。最后通过 NSGA-III 驱动 SSA-SVR 模型生成 Pareto 前沿，并结合 TOPSIS(technique for order preference by similarity to ideal solution)多准则决策筛选最优参数组合并进行仿真验证。有效解决了杯状触头多参数耦合优化难题，显著增强了其磁场性能及运行稳定。

1 灭弧室杯状纵磁触头计算模型

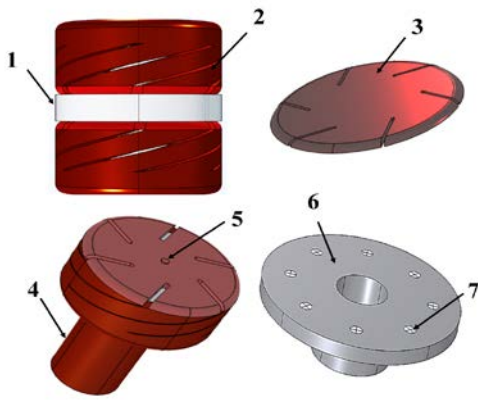
1.1 几何模型建立

真空灭弧室触头系统的电动斥力本质源自接触面电流收缩引发的 Holm 力与载流回路自洽磁场产生的 Lorentz 力耦合作用形成。当总电动斥力超过触头机械约束阈值时，将引发触头弹跳现象，导致接触电阻突变和电弧重燃风险倍增。因此，在触头设计时需将电动斥力作为关键优化约束。本研究聚焦于触头几何结构对电磁特性的影响机制，基于此，选择合闸状态下的电动斥力作为优化指标。其合闸时接触半径 r 采用经典弹性接触理论推导，其计算模型为

$$r = \sqrt{\frac{F_k}{\pi \xi H}} \quad (1)$$

式(1)中： ξ 为接触斑点修正系数，取值范围为 0.3~1； H 为触头材料布氏硬度，采用 CuCr50 合金， N/mm^2 ，依据文[23]测定范围为 784~1 176 N/mm^2 ，并结合材料塑性变形特性，选取 $H=980 N/mm^2$ 作为基准； F_k 为触头间接触压力，N。设定 $\xi=0.45$ ，当 $F_k=3 500 N$ 时，通过式(1)计算得电流收缩区等效电桥半径约为 1.6 mm。鉴于导电桥高度对电动斥力贡献度很低，为降低多物理场计算复杂度，高度取 0.5 mm 固

定值^[24]。基于经典电弧理论,本研究以触头半径为基准构建圆柱形导电路径替代断口电弧等离子体分布。针对传统无铁心触头纵磁磁场均匀性不足、磁感应强度衰减快等固有缺陷,本研究提出利用柱状铁心耦合杯状触头的复合结构,以增强触头纵向磁场的强度与均匀性并提升其电弧控制能力与开断特性^[25-26]。同时依据触头机械刚度需求,将支撑件厚度设置为4 mm。触头模型基本结构和参数见图1及表1。



1—真空电弧; 2—触头杯座; 3—触头片; 4—导电杆; 5—导电桥; 6—支撑件; 7—铁心

图1 含铁心杯状纵磁触头三维仿真模型

Fig. 1 Three-dimensional simulation model of cup-shaped longitudinal magnetic contact with iron core

表1 触头结构主要模型参数

Table 1 Contact structure and model parameters

触头主要结构参数	参数值
触头半径/mm	29
杯座高度/mm	24
触头片厚度/mm	3
触头槽数	6
触头片开槽长度/mm	16
触头片开槽宽度/mm	2
开槽径向旋转角度/(°)	20
杯壁厚度/mm	4
杯座斜槽角度/(°)	100
杯座斜槽高度/mm	16
触头开距/mm	12
铁心半径/mm	3

铁心个数	8
支撑件厚度/mm	4

将几何模型导入至有限元软件中,设定峰值为40 kA的工频正弦交流电流作为激励源,求解时间为20 ms,瞬态求解时间步长为1 ms,电流加载路径设定从静导电杆侧通入触头系统。各部件材料属性见表2。

表2 触头模型各部件材料及其属性

Table 2 Materials and properties of each component of the contact model

触头模型	材料	电导率 /(S·m ⁻¹)	相对磁导率
真空电弧	—	2 800.000	1
触头杯座	Cu	5.998×10 ⁷	1
导电杆	Cu	5.998×10 ⁷	1
触头片	CuCr50	1.500×10 ⁷	1
导电桥	CuCr50	1.500×10 ⁷	1
支撑件	不锈钢	1.100×10 ⁶	1
铁心	电工纯铁	1.000×10 ⁷	B-H 曲线

1.2 仿真数学分析模型

在有限元仿真软件中,基于时域有限元法建立三维瞬态电磁控制方程。其核心数学框架源自麦克斯韦方程组构建电磁场控制方程,相应公式如下:

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (4)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (5)$$

$$E = -\nabla \varphi \quad (6)$$

$$B = \nabla \times A \quad (7)$$

$$D = \varepsilon E \quad (8)$$

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (9)$$

式(2)-(9)中: D 为电位移矢量; ρ 为体电荷密度; B 为磁感应强度; E 为电场强度; J 为电流密度; H 为磁场强度; φ 为标量电势; A 为磁矢势; ε 为介质的介电常数; μ 为介质的磁导率。

导电桥半径较小时，电动斥力的仿真结果与 Holm 公式计算的结果误差较小，验证了电动斥力本质上是洛伦兹力的特殊表现形式，因此电动斥力 F 统一表述为

$$F = \iiint J \times B dV \quad (10)$$

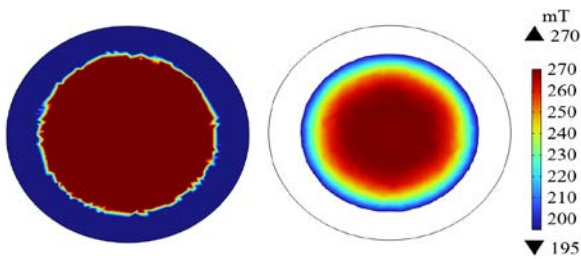
真空电弧由于自生磁场会产生径向收缩现象，为使电弧保持扩散态，所需磁场值应满足^[27]

$$B \geq \frac{\mu_0 I}{4\pi R} \quad (11)$$

式(11)中： B 为磁感应强度； μ_0 为真空磁导率； I 为电弧电流； R 为触头半径。通过(11)得出使电弧保持扩散状态的最小磁场值为 195mT。

1.3 有限元仿真结果分析

针对杯状纵磁触头灭弧系统的电弧控制效能评估，本研究将在电流峰值时刻断口中心面磁场超过电弧扩散态临界阈值(195 mT)的区域定义为有效控制域，并以该区域面积和断口中心平面的面积之比 S 作为纵向磁场有效性的量化评价指标。电流峰值时中心平面磁场有效面积的分布图见图 2，根据仿真数据表明，初始参数下该区域面积占比为 53.31%。



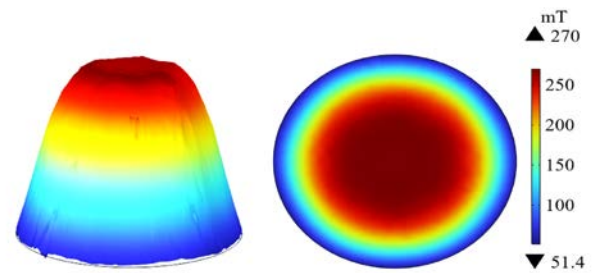
(a) 有效磁场面积(53.31%) (b) 有效磁场分布

图 2 峰值时使电弧保持扩散的有效磁场面积区域及分布

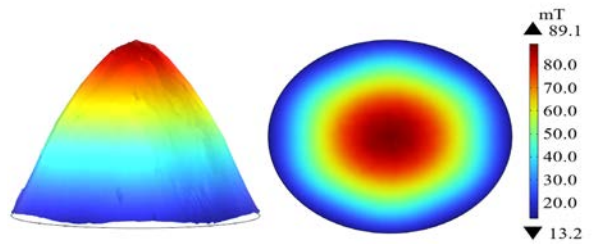
Fig. 2 The effective magnetic field area and distribution for maintaining the diffusion of the arc at the peak current.

电流峰值及过零时刻纵向磁场 B_z 分布图见图 3，由图 3 可知，中心面纵向磁场在电流峰值时为 270 mT，中心略显凹陷；过零点剩余磁场为 89.1 mT，三

维分布呈伞状。基于磁滞特性分析，磁滞时间会对电弧过零时的扩散产生影响，且与剩余磁场正相关，因此中心点磁滞时间最长，计算得该点 t_0 为 1.023 3 ms。电动斥力计算时磁场及电流密度分布见图 4，受接触面电流收缩影响，高磁场强度区域集中于导电桥附近。基于静触头固定特性，取动触头电动斥力 z 分量作为计算对象。动触头轴向电动斥力在各部件上的分布见表 3。



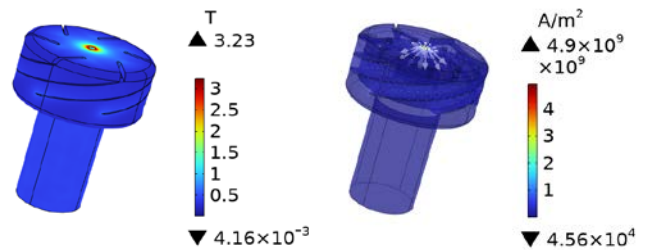
(a) 触头间隙中心电流峰值时刻纵向磁场分布



(b) 触头间隙中心电流过零时刻纵向磁场分布

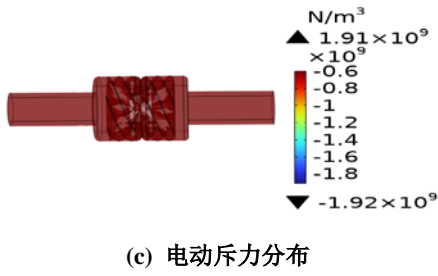
图 3 电流峰值及过零时刻纵向磁场 B_z 分布图

Fig. 3 Distribution map of longitudinal magnetic field B_z at current peak and zero-crossing moments



(a) 动触头磁场分布

(b) 动触头电流密度分布



(c) 电动斥力分布

图 4 动触头电力计算部分相关结果

Fig. 4 Graphs of relevant results for the calculation of electrodynamic force of moving contacts

表 3 动触头各部件电动斥力

Table 3 Electric repulsion of each component of the moving contact

部件	杯座	触头片	导电杆	支撑件	合力
电动斥力/N	-140.80	315.60	-8.08	3.19	169.91

2 回归预测模型构建

针对触头系统多物理场耦合建模的高维度非线性及小样本数据约束的双重挑战,本研究提出了一种基于麻雀算法优化支持向量回归的建模方法。该方法选用径向基核函数,通过结构风险最小化原理与核空间映射平衡模型复杂度与泛化能力,构建以触头片开槽长度 L_1 、宽度 L_2 、径向旋转角度 θ_1 、杯座厚度 W 、斜槽上下旋转角度 θ_2 以及斜槽高度 H 等六维参数(见图 5)与电动斥力 F 、有效磁场占比 S 和磁滞时间 t_0 三

项性能指标的六输入三输出的映射关系。并为突破传统 SVR 超参数寻优的局部收敛困境,采用麻雀算法对惩罚因子 C 等超参进行全局自适应优化。为断路器电磁结构优化提供了高效代理模型框架。

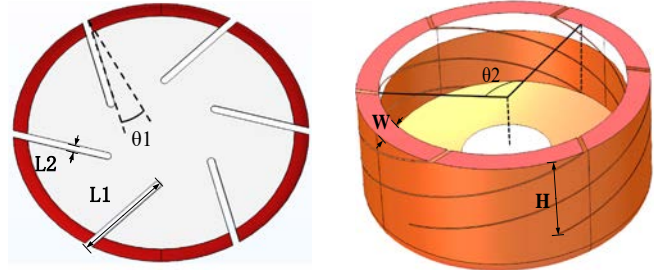


图 5 优化变量示意图

Fig. 5 Optimization variable diagram

2.1 样本实验设计

针对传统全因子实验设计在复杂多因素系统中组合爆炸问题, Box-Behnken 设计试验(BBD)作为一种广泛使用的实验方法,可以在很大程度减少实验次数的基础上较好的反映输入和输出的对应关系。基于此,本研究通过 BBD 实验设计与有限元结合获取了涵盖电动斥力及磁场特性的六因素三水平多维度数据样本,为后续构建高精度代理模型奠定了数据基础。部分仿真实验结果见表 4。

表 4 Box-Behnken 设计部分实验及其结果

Table 4 Box-Behnken design of selected experiments and their results

样本	L_1/mm	L_2/mm	$\theta_1/(\text{°})$	W/mm	$\theta_2/(\text{°})$	H/mm	F/N	$S/\%$	t_0/ms
1	17	2.5	20	5	105	16	152.73	56.78	0.984 3
2	17	2.5	15	7	105	14	157.34	50.99	1.041 4
3	20	2.5	15	5	105	18	154.76	52.75	0.779 3
4	14	2.5	25	5	105	14	156.63	59.03	1.169 4
...
51	20	2.5	20	3	90	16	180.23	45.04	0.890 1
52	17	1.0	15	5	90	16	183.25	38.15	0.993 0
53	20	4.0	20	3	105	16	165.32	56.21	0.897 0
54	14	4.0	20	7	105	16	150.96	56.05	0.953 3

2.2 SVR算法原理

针对触头系统小样本、高维非线性建模难题,本

研究采用支持向量回归(SVR)构建触头参数-性能映射模型。如图 6 所示, SVR 通过引入 ε -不敏感损失函数, 在回归超平面两侧构建了一个宽为 2ε 的容差带, 允许训练样本在此区间内不产生惩罚, 从而抑制过拟合风险。其目标函数可表达为

$$\begin{aligned} \min_{w,b} & \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} |y_i - (w^T \phi(x_i) + b)| \leq \varepsilon + \xi_i^* \\ \xi_i, \xi_i^* \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)中: C 为惩罚因子, 控制模型复杂度与训练误差的权衡; $\phi(\cdot)$ 为径向基核函数, 其将触头关键结构参数作为输入映射到高维特征空间, 通过风险最小化原理, 在 SVR 中建立六维输入空间与三维输出响应的非线性关联, 为后续优化提供高泛化能力的代理模型基础。

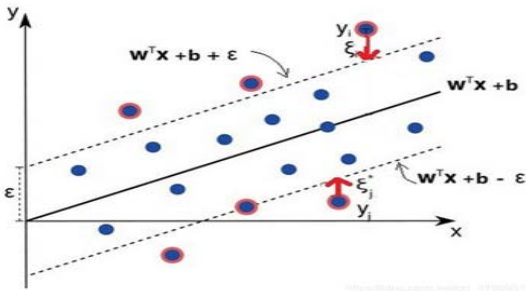


图 6 SVR 示意图

Fig. 6 Schematic Diagram of SVR

2.3 SSA算法原理

为克服传统网格搜索在三维超参数空间(C, g, ε)在六维触头模型优化中的维度灾难与局部收敛问题, 鉴于麻雀搜索算法(SSA)强大的优化能力与其极快的收敛速度^[20, 28], 本研究将麻雀算法引入真空断路器代理模型训练, 通过模拟麻雀种群 3 层协同进化机制进行高效参数寻优。其优化过程如下

1) 占种群 20% 发发现者执行广域搜索, 其位置更新公式为

$$X_{ij}^{N+1} = \begin{cases} Q \exp\left(\frac{X_{worst}^N - X_{ij}^N}{\beta^2}\right) & R_2 < S \\ X_p^{N+1} + |X_{ij}^N - X_p^{N+1}| \times A^+ L & R_2 \geq S \end{cases} \quad (13)$$

2) 剩余个体通过莱维飞行策略跟踪优质解

$$X_{ij}^{N+1} = \begin{cases} Q \exp\left(\frac{X_{worst}^N - X_{ij}^N}{\beta^2}\right) & i \geq n/2 \\ X_p^{N+1} + |X_{ij}^N - X_p^{N+1}| \times A^+ L & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

3) 当适应度停滞时, 10% 个体执行高斯绕道逃逸

$$X_{ij}^{N+1} = \begin{cases} X_{best}^N + \beta |X_{ij}^N - X_{best}^N| & f_i > f_g \\ X_{ij}^N + K \left(\frac{X_{ij}^N - X_{worst}^N}{(f_i - f_w) + \varepsilon} \right) & f_i = f_g \end{cases} \quad (15)$$

式(13)-(15)中: X 为个体空间位置, 对应当前解向量; N 为预设最大迭代次数; β 为服从正态分布随机数; i 为个体索引编号; j 为决策变量维度; Q 为正态分布特征采样系数; L 为单位矩阵; S 为警告阈值; R_2 为警告值; X_p 为当前迭代周期最优解; X_{worst} 为当前最劣个体坐标; A 为由 ± 1 构成的随机行向量, 矩阵 $A^+ = A^T(AA^T)^{-1}$; X_{best}^N 为当前全局最优个体位置; K 是 $[-1, 1]$ 上随机数; ε 是一个较小的常数, 防止分母为 0; f_w 和 f_g 分别为当前最差和最佳适应度。

2.4 SSA-SVR回归预测代理模型构建

针对传统 SVR 超参数优化中网格搜索计算维度灾难问题, 本研究提出利用麻雀搜索算法(SSA)的自适应优化框架。通过群体智能机制同步优化惩罚因子 C 、核函数 g 以及不敏感损失系数 ε 的协同关系。SSA-SVR 代理模型构建流程与触头系统实际工程需求深度耦合见图 7, 具体实现如下:

1) 基于触头系统的有限元仿真数据, 将 54 组数据按照 3 : 1 比例采用分层抽样划分为训练集和测试集, 并进行标准化处理消除结构参数量纲差异对核函

数计算的影响。

2)以均方根误差(RMSE)作为适应度函数,初始化 SSA 种群规模 $N=30$, 并按照发现者(20%)、跟随者(80%)并随机选取 20 个个体作为警戒者将个体划分为三类角色, 进行参数寻优

3)将 SSA 优化所得超参数带入 SVR, 构建触头结构参数与电磁性能的六输入三输出代理模型。并通过测试集对比验证, 对模型误差和稳定性进行分析, 确定 SSA-SVR 最优架构。

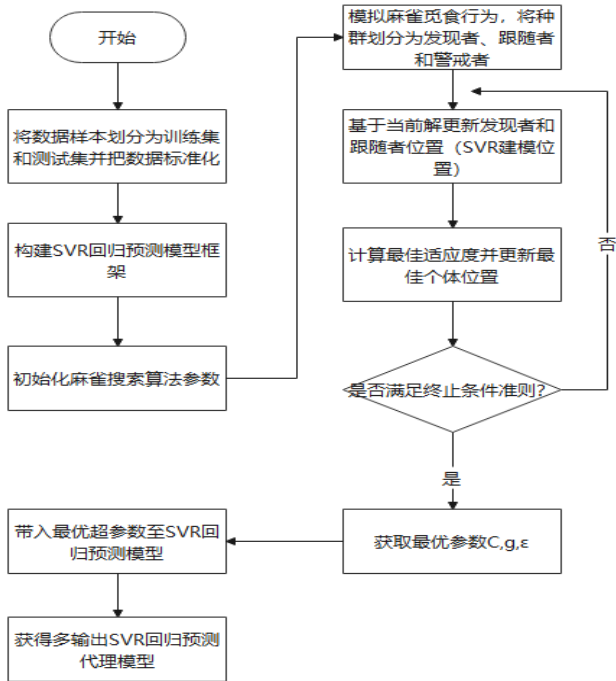


图 7 SSA-SVR 预测模型构建流程图

Fig. 7 Flow chart of SSA-SVR prediction model construction

2.5 代理模型效果分析

为确保 SVR 模型在触头系统多目标优化中的泛化性能力, 本研究基于 Box-Behnken 实验设计获取的数据样本, 采用分层随机抽样方法将 54 组样本划分为训练集和测试集, 以确保数据分布的均衡性。此方法通过约束输入参数空间的边缘一致性, 有效消除样本偏执对模型评估的干扰。为确保模型预测精度, 本研究采用均方根误差(RSME)和决定系数(R^2)双准则

验证机制评估模型泛化能力。其公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y - Y')^2} \quad (16)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y - Y')^2}{\sum_{i=1}^N (Y - \bar{Y})^2} \quad (17)$$

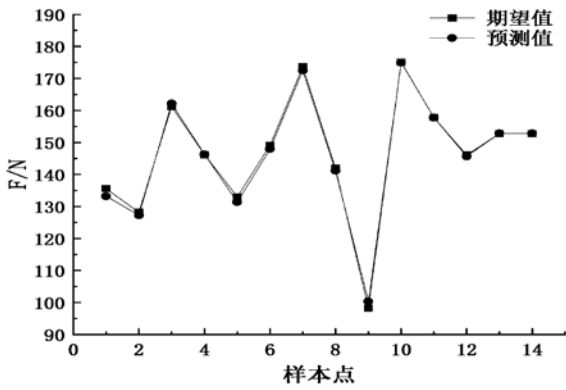
式(16)、(17)中: N 为测试点数量; Y 为模型期望值, Y' 为 SSA-SVR 代理预测模型的预测值, \bar{Y} 为实际值的平均值。SSA-SVR 预测模型的相关指标见表 5。

表 5 SSA-SVR 回归预测代理模型各相关评价指标结果
Table 5 SSA-SVR regression predictive agent model results for each relevant evaluation indicator

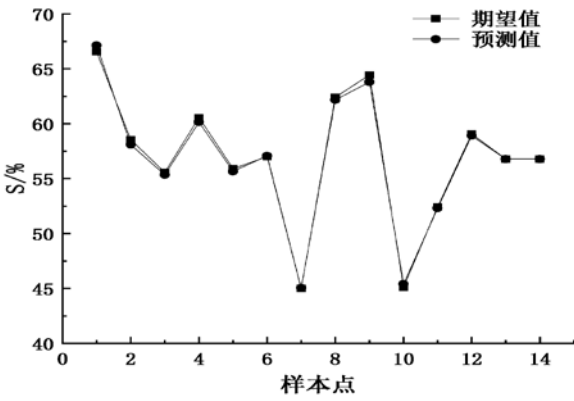
SSA-SVR 代理模型	均方根误差 RSME	决定系数 R^2
F	1.155 3	0.996 2
S	0.393 1	0.994 3
t_0	0.009 4	0.991 5

SSA-SVR 代理模型预测与期望对比见图 8, SSA-SVR 代理模型预测误差见图 9。如图 8、9 所示, SSA-SVR 模型各项输出预测值和期望值的对比图以及预测误差呈现良好的拟合特性。基于拟合度分析, 所构模型的各项性能的决定系数(R^2)均高于 0.99, 表明各项触头系统待优化性能指标预测值与实际值之间高度线性相关。并基于各项指标的误差分析, 有效磁场面积占比 S 以及磁滞时间 t_0 的均方根误差(RMSE)处于工程可接受的极低水平, 反映了两项指标预测值和期望值之间的高度吻合。对于电动斥力 F , 其均方根误差(RSME)为 1.155 3, 结合样本数据的纵向波动范围进行相对误差测算, 其预测偏差保持在 5% 以内, 属于工程应用的高精度区间。基于上述分析, 所构建的 SSA-SVR 代理模型对触头系统的电动斥力 F 、有效磁场面积占比 S 以及磁滞时间 t_0 的预测展现出了卓

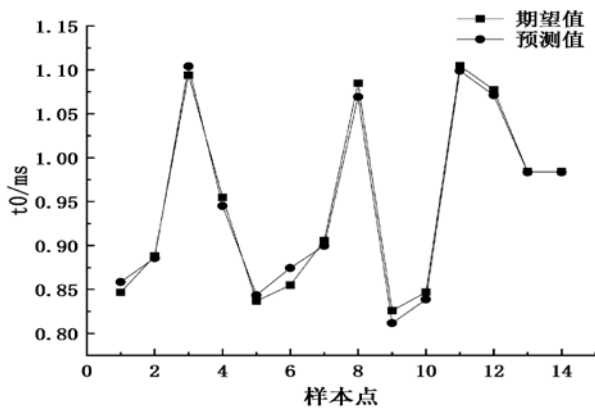
越的拟合精度以及可靠的泛化能力，为后续触头结构的优化设计奠定了模型基础。



(a) 合闸时电动斥力 F 对比



(b) 电流峰值中心平面有效磁长占比 S 对比



(c) 电流过零时刻磁滞时间 t_0 对比

图 8 SSA-SVR 代理模型预测与期望对比

Fig. 8 Comparison between the prediction results of the SSA-SVR surrogate model and the expected values

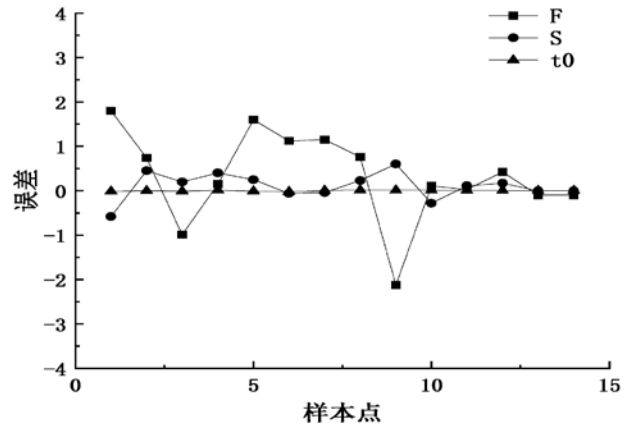


图 9 SSA-SVR 代理模型预测误差

Fig. 9 Surrogate model prediction error for SSA-SVR

3 基于NSGA-III算法的触头结构优化

针对真空断路器触头系统需同步优化电动斥力以及磁场特性的复杂需求，本研究突破传统 NSGA-II 算法在解决三目标及以上问题时基于拥挤度距离的选择策略的局限性，构建了基于 NSGA-III 的工程多目标优化框架。相对于既有研究，该方法优越性体现在：

1) NSGA-III 通过构建参考点机制，将触头系统的三目标优化问题映射为标准超平面上的均匀分布参考向量，相较于 NSGA-II 的拥挤度距离策略，使得 Pareto 前沿的均匀性得到了提升，有效解决了多性能指标均衡优化难题。

2) NSGA-III 采用快速非支配排序与参考点关联选筛选双机制，极大提高了收敛效率与搜索速度。

3.1 目标函数的选择

选择触头片开槽长度 L_1 、宽度 L_2 、径向旋转角度 θ_1 、杯座厚度 W 、斜槽上下旋转角度 θ_2 、斜槽高度 H 作为优化参数。以电动斥力 F 、有效磁场占比 S 以及磁滞时间 t_0 作为优化目标。确定触头系统为三目标优化问题

$$\begin{cases} obj_1 = \min(F) \\ obj_2 = \max(S) \\ obj_3 = \min(t_0) \end{cases} \quad (18)$$

根据工程设计经验，确定参数优化变量为

$$\begin{cases} 14\text{mm} \leq L1 \leq 20\text{mm} \\ 1\text{mm} \leq L2 \leq 4\text{mm} \\ 15^\circ \leq \theta_1 \leq 25^\circ \\ 3\text{mm} \leq W \leq 7\text{mm} \\ 90^\circ \leq \theta_2 \leq 120^\circ \\ 14\text{mm} \leq H \leq 18\text{mm} \end{cases} \quad (19)$$

3.2 TOPSIS决策方法

针对真空断路器触头多目标优化中 Pareto 解集的工程适配性难题，本研究采用双基准逼近的理想解排序法(TOPSIS 法)对最优解进行筛选。该方法通过归一化后的数据构建规范化矩阵，找出多个目标中的正理想解(各指标极值最优组合)与反理想解(各指标极值最劣组合)，并计算各方案与正理想解与反理想解的距离，建立方案优劣双重判据。最后，通过相对贴进度指标实现综合量化，规避单一距离的局限，作为评价优劣的依据。其公式为

$$S_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (20)$$

式(20)中： S_i 为相对贴进度(取值在 0~1 之间)，越接近于 1 越优； D_i^+ 为备选方案与正理想解的距离；

D_i^- 为备选方案与反理想解的距离。

3.3 含铁心杯状纵磁触头优化结果及分析

经 NSGA-III算法 300 次进化搜索，获得如图 10 所示的三维 Pareto 前沿解集，包含 200 个非支配解。基于空间分析表明，优化目标之间存在显著冲突，三维目标的 Pareto 解在空间中呈现曲面分布。因此，本研究采用 TOPSIS 多准则决策方法综合考虑 3 个优化目标，并基于各理想解相对贴进度对 Pareto 解集进行排序，基于 TOPSIS 法评价得分的前三排序及其指

标对应结果见表 6。

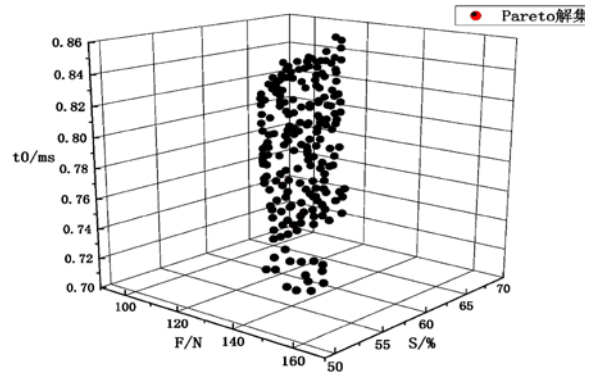


图 10 Pareto 最优解集

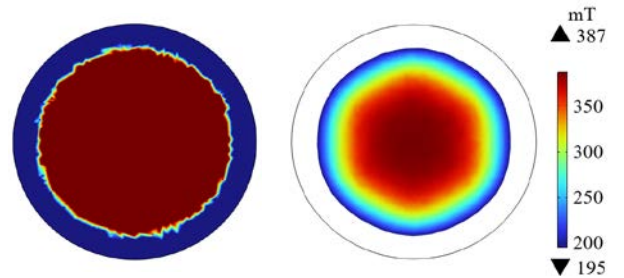
Fig. 10 Pareto optimal solution set

表 6 基于 TOPSIS 法的前三排序及其指标对应结果

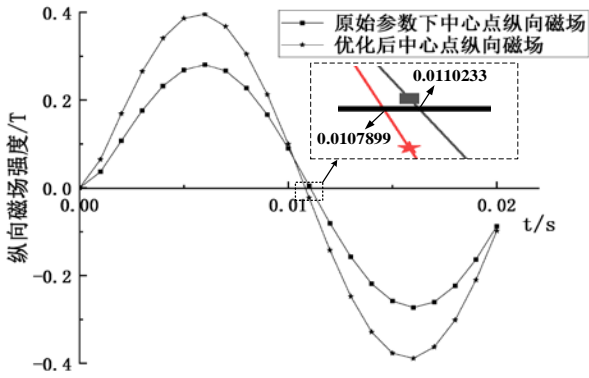
Table 6 Top three ranking based on the TOPSIS method and the corresponding results of its indicators

排序	S_i	解序号	F/N	S/%	t_0/ms
1	0.707 8	73	105.5	62.83	0.796 1
2	0.705 8	114	109.6	63.24	0.811 3
3	0.702 2	194	107.7	62.27	0.791 7

基于 TOPSIS 多准则决策的量化评估分，第 73 组优化方案的以相对贴进度为 0.707 8(排名首位)被遴选为最优组合参数，其参数配置为： $L_1=19.98$ mm、 $L_2=4$ mm、 $\theta_1=23.3^\circ$ 、 $W=6.96$ mm、 $\theta_2=117.8^\circ$ 、 $H=6.96$ mm。该组合参数结构仿真结果见图 11 及表 7。



(a) 优化后磁场面积占比以及磁场分布(63.07%)



(b) 优化前后中心点处纵向磁场随时间变化对比

图 11 优化后中心平面纵向磁场特性

Fig. 11 The longitudinal magnetic field characteristics of the central plane after optimization

表 7 优化后的电动斥力计算结果

Table 7 Optimized electrodynamic repulsion calculation

部件	杯座	触头片	导电杆	支撑件	合力
电动斥力/N	-180.20	288.30	-6.78	3.97	105.29

由图 11 以及表 7 的仿真数据对比分析, 与原始数据相比, 合闸时产生的电动斥力 F 从 169.89 N 减小为 105.29 N, 降幅 38.02%; 中心平面有效磁场占比 S 从 53.31% 上升至 63.07%, 提升 9.76%; 磁滞时间 t_0 缩短为 0.789 9 ms, 较优化前减小了 0.233 4 ms。基于上述结果, 结构优化后, 触头的磁场特性得到了明显的改善, 并显著抑制了合闸过程中电动斥力效应, 实现了真空灭弧室的灭弧性能及运行稳定的协同提升。

4 结论

本研究基于真空灭弧室含铁心杯状纵磁触头电磁场进行有限元仿真, 利用 SSA-SVR 构建了高精度代理模型, 并结合 NSGA-III-TOPSIS 对触头结构实现了优化设计, 得到以下结论:

1) 基于有限元法, 建立了含铁心杯状纵磁触头三

维有限元模型, 并对该触头结构的仿真进行了分析。

2) 结合麻雀算法(SSA)优化支持向量回归(SVR)超参数, 本研究基于仿真数据样本构建了六输入三输出的高精度 SSA-SVR 触头系统代理模型, 并采用均方根误差(RSME)和决定系数(R^2)双准则验证机制对该模型进行了评估。

3) 采用 NSGA-III 生成 Pareto 解集, 结合 TOPSIS 多准则决策对最优触头结构参数进行了筛选。将优化后参数进行仿真分析得出: 较于初始参数, 优化后电动斥力 F 、磁场有效面积 S 及磁滞时间 t_0 都得到明显改善, 显著增强了真空断路器的灭弧性能和运行稳定。

参考文献:

[1] 范清亮, 刘甲明, 黄平. 双碳目标条件下新型电力系统发展路径及电网建设分析[J]. 电器工业, 2025(2): 80-86.
FAN Qingliang, LIU Jiaming, HUANG Ping. Analysis of new power system development path and power grid construction under the condition of dual carbon target[J]. China Electrical Equipment Industry, 2025(2): 80-86.

[2] 张杰, 王放放, 夏忠林, 等. “双碳”目标下 SF₆ 排放现状、减排手段分析及未来展望[J]. 化工进展, 2023, 42(s1): 447-460.
ZHANG Jie, WANG Fangfang, XIA Zhonglin, et al. Current SF₆ emission, emission reduction and future prospects under “carbon peaking and carbon neutrality”[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(s1): 447-460.

[3] 葛国伟, 程显, 谢伟, 等. 多断口真空开关基础理论及技术综述[J]. 电网技术, 2019, 43(12): 4582-4590.
GE Guowei, CHENG Xian, XIE Wei, et al. Review on basic theory and technology of multi-break VCBs[J]. Power System Technology, 2019, 43(12): 4582-4590.

[4] 刘志远, 谢克松, 王仲奕, 等. 杯状纵磁真空灭弧室三维涡流场仿真[J]. 电工电能新技术, 2004, 23(2): 26-28.
LIU Zhiyuan, XIE Kesong, WANG Zhongyi, et al. Analysis

- of 3D eddy current field in cup-type axial magnetic field vacuum interrupter[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2004, 23(2): 26-28.
- [5] 张 炫, 刘志远, 王仲奕. 杯状纵磁真空灭弧室磁场特性分析[J]. *高压电器*, 2005, 41(3): 161-165.
ZHANG Xuan, LIU Zhiyuan, WANG Zhongyi. Analysis of axial magnetic field in vacuum interrupters with cup type axial magnetic field contacts[J]. *High Voltage Apparatus*, 2005, 41(3): 161-165.
- [6] 郑跃胜, 刘志远, 王仲奕, 等. 基于正交设计的杯状纵磁真空灭弧室磁场特性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(9): 23-27.
ZHENG Yuesheng, LIU Zhiyuan, WANG Zhongyi, et al. Analysis of magnetic field characteristics of vacuum interrupters with cup-type axial magnetic field contacts based on orthogonal design[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(9): 23-27.
- [7] 谢 菲, 叶兆平, 修士新. 触头片开槽方式对杯状纵磁触头磁场特性的影响[C]//2010 输变电年会. [S.l.]: [s.n.], 2010: 35-41.
XIE Fei, YE Zhaoping, XIU Shixin. Influence of contact piece grooving method on the magnetic field characteristics of cup-shaped longitudinal magnetic contacts[C]// *Proceedings of the 2010 Annual Conference on Power Transmission and Transformation*. [S.l.]: [s.n.], 2010: 35-41.
- [8] 庞先海, 景 皓, 修士新, 等. 真空灭弧室杯状纵向磁场触头的仿真分析[C]//2014 年江西省电机工程学会年会. [S.l.]: [s.n.], 2014: 268-273.
PANG Xianhai, JING Hao, XIU Shixin, et al. Simulation and analysis of cup-shaped axial magnetic field contact in vacuum interrupter[C]// *Proceedings of the 2014 Annual Meeting of Jiangxi Electrical Engineering Society*. [S.l.]: [s.n.], 2014: 268-273.
- [9] 丁 璨, 王周琳, 袁 召, 等. 基于多目标灰狼优化算法与 RBF 神经网络的真空灭弧室触头结构优化设计[J]. *高压电压技术*, 2024, 50(2): 545-552.
DING Can, WANG Zhoulin, YUAN Zhao, et al. Structural optimization design of vacuum interrupter contact based on multi-objective grey wolf optimization algorithm and RBF neural network[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(2): 545-552.
- [10] 曹 亮, 刘晓明, 陈 海, 等. 考虑公差的真空灭弧室磁场不确定性优化设计[J]. *真空科学与技术学报*, 2021, 41(11): 1025-1030.
CAO Liang, LIU Xiaoming, CHEN Hai, et al. Optimal design considering uncertainty in tolerances of magnetic field in vacuum interrupters[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2021, 41(11): 1025-1030.
- [11] 丁 璨, 李 江, 袁 召, 等. 基于 NSGA-II 和 BP 神经网络的杯状纵磁触头结构优化设计[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(23): 6074-6082.
DING Can, LI Jiang, YUAN Zhao, et al. Structural optimization design of Cup-Shaped longitudinal magnetic contact based on NSGA-II and BP neural network[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(23): 6074-6082.
- [12] 王文成, 张 朋, 李秀峰, 等. 12 kV 真空断路器灭弧室结构对电场分布影响的仿真研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2021, 41(11): 1031-1038.
WANG Wencheng, ZHANG Peng, LI Xiufeng, et al. The influence of 12 kV vacuum interrupter structure on electric field distribution: a simulation study[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2021, 41(11): 1031-1038.
- [13] 董华军, 温超阳, 孙 鹏, 等. 基于正交实验新型真空灭弧室触头磁场仿真与参数优化设计[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(21): 5598-5606.
DONG Huajun, WEN Chaoyang, SUN Peng, et al. Simulation and optimization of the contact magnetic field of a new type of vacuum interrupter based on orthogonal experiment[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(21): 5598-5606.
- [14] 张晓东, 李 谨, 龚 彦. 基于响应面法和正交试验的涡轮流量计优化设计[J]. *北京化工大学学报(自然科学版)*, 2019, 46(5): 80-86.

- ZHANG Xiaodong, LI Jin, GONG Yan. Optimization of the design of a turbine flowmeter based on the response surface method and orthogonal tests[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology(Natural Science Edition), 2019, 46(5): 80-86.
- [15]李小荣, 郭永刚. 基于遗传算法优化神经网络权值的损伤识别[J]. 噪声与振动控制, 2008, 28(6): 47-51.
- LI Xiaorong, GUO Yonggang. Damage identification on the base of optimistic neural network weight by genetic algorithm[J]. Noise and Vibration Control, 2008, 28(6): 47-51.
- [16]赵吉文, 刘永斌, 孔凡让, 等. 基于 SVM 和遗传算法的新型直线电机结构参数优化[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5): 870-875.
- ZHAO Jiwen, LIU Yongbin, KONG Fanrang, et al. Parameter optimization of novel cylinder type linear motor based on SVM and genetic algorithm[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(5): 870-875.
- [17]唐宁, 白雪. 基于改进支持向量机回归的非线性飞机结构载荷模型建模[J]. 航空工程进展, 2020, 11(5): 694-700.
- TANG Ning, BAI Xue. Nonlinear aircraft structure load model based on improved support vector machine regression[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(5): 694-700.
- [18]CHEN Tao, WU Weining, LI Wenpeng, et al. Laser cladding of nanoparticle TiC ceramic powder: Effects of process parameters on the quality characteristics of the coatings and its prediction model[J]. Optics & Laser Technology, 2019(116): 345-355.
- [19]ZHAI Xiuyun, CHEN Mingtong. Comparison of data-driven prediction methods for comprehensive coke ratio of blast furnace[J]. High Temperature Materials and Processes, 2023, 42(1): 20220261.
- [20]XUE Jiankai, SHEN Bo. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm[J]. Systems Science & Control Engineering, 2020, 8(1): 22-34.
- [21]ZHU Qingyu, HAN Qingkai, YANG Xiaodong, et al. Parameter sensitivity analysis of mounting pedestals and multi-objective optimization for a multi-support rigid body system[J]. Sensors, 2022, 22(18): 7067-7067.
- [22]童哲铭, 陈尧, 童水光, 等. 基于 NSGA-III 算法的低比转速离心泵多目标优化设计[J]. 中国机械工程, 2020, 31(18): 2239-2246.
- TONG Zheming, CHEN Yao, TONG Shuiguang, et al. Multi-objective optimization design of low specific speed centrifugal pumps based on NSGA-III algorithm[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(18): 2239-2246.
- [23]余小玲, 魏义江, 刘志远, 等. 高电压真空断路器温升影响因素的仿真研究[J]. 高压电器, 2007, 43(3): 179-182.
- YU Xiaoling, WEI Yijiang, LIU Zhiyuan, et al. Simulation researches on influence factors of temperature rise in high voltage vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(3): 179-182.
- [24]董华军, 孙鹏, 李东恒, 等. 12 kV 真空灭弧室触头电动斥力计算与结构优化[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3602-3611.
- DONG Huajun, SUN Peng, LI Dongheng, et al. Electro-dynamic repulsion force calculation and structure optimization of the contacts in 12 kV vacuum interrupter[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3602-3611.
- [25]刘志远, 胡亚平, 王季梅, 等. 铁心式杯状纵磁真空灭弧室触头磁场特性[J]. 电工技术学报, 2006, 21(7): 81-88.
- LIU Zhiyuan, HU Yaping, WANG Jimei, et al. Axial magnetic field of a new cup type axial magnetic field vacuum interrupter contact with Iron plates[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(7): 81-88.
- [26]张洁敏. 一种具有铁芯的杯状纵磁真空灭弧室的研制[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- ZHANG Jiemin. Development of a cup-shaped longitudinal magnetic vacuum interrupter with Iron core[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2006.
- [27]修士新, 王季梅. 纵向磁场对真空电弧作用的研究[J]. 真空电子技术, 1999, 12(5): 1-3.

XIU Shixin, WANG Jimei. Study on interaction of axial magnetic field on vacuum arc[J]. Vacuum Electronics, 1999, 12(5): 1-3.

[28]李大海, 詹美欣, 王振东. 混合策略改进的麻雀搜索算法及其应用[J]. 计算机应用研究, 2023, 40(2): 404-412.

LI Dahai, ZHAN Meixin, WANG Zhendong. Improved sparrow search algorithm with mixed strategy and its application[J]. Application Research of Computers, 2023, 40(2): 404-412.

丁 璨(1982—), 男, 博士, 讲师, 主要从事高压开关电器的实验、仿真及理论计算(E-mail: dingcan@ctgu.edu.cn)。

贾振威(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高压开关电器的仿真与设计(E-mail: jiazhenwei@ctgu.edu.cn)。