第 50 卷 第 2 期：543-550　　高电压技术　　Vol.50, No.2: 543-550
2024 年 2 月 29 日　　High Voltage Engineering　　February 29, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20231192

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

丁　璨[1]，王周琳[1]，袁　召[2]，李　江[1]
（1. 三峡大学电气与新能源学院，宜昌 443002；
2. 华中科技大学电气与电子工程学院强电磁工程与新技术国家重点试验室，武汉 430074）

摘　要：在真空灭弧室触头开断过程中，合适的磁场分布有利于提高其开断性能；在合闸过程中，动、静触头间存在的电动斥力会导致触头出现弹跳现象。针对以上问题，首先建立了带铁芯式杯状纵磁触头的三维模型，进行了磁场分布与电动力的计算；为了进一步提高触头的性能，然后构建了以触头片开槽长度、开槽宽度、径向偏转角度、杯座斜槽高度及单个斜槽上下旋转角度为输入，电流峰值时刻触头间隙中心平面纵向磁场强度最大值、过零时刻中心点处磁滞时间、合闸时动静触头间的电动斥力分别为输出的 RBF 神经网络模型；最后结合 RBF 神经网络模型与多目标灰狼优化算法(MOGWO)对触头结构进行了优化。结果表明：与初始结构参数相比，当触头片开槽长度为 19.74 mm、宽度为 3.94 mm、径向偏转角为 19.9°、杯座斜槽高度为 18.0 mm、斜槽上下旋转角为 119.2°时，触头具有更好的磁场分布特性，且动、静触头间的电动斥力明显减小，有利于提高触头的工作性能。
关键词：真空灭弧室触头；电动斥力；RBF 神经网络；磁场特性；多目标灰狼优化算法

Structural Optimization Design of Vacuum Interrupter Contact Based on Multi-objective Grey Wolf Optimization Algorithm and RBF Neural Network

DING Can[1] , WANG Zhoulin[1], YUAN Zhao[2], LI Jiang[1]
(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract：A suitable magnetic field distribution of the vacuum interrupter contact when breaking is conducive to improving its interrupting performance. At the moment of closing, the electrodynamic repulsion force between the moving and static contact can cause the contact to bounce. To solve the above problems, this paper firstly establishes a three-dimensional model of cup-shaped longitudinal magnetic contact with iron core, and carries out the calculation of magnetic field distribution and electrodynamic repulsion force. In order to further improve the contact performance, the RBF neural network model is constructed with the contact plate slot length, slot width, radial deflection angle, the heigth of cup holder slope slot, and individual slope slot up-and-down rotation angle as inputs. The maximum longitudinal magnetic field strength in the center plane of the contact gap at the peak current moment, the hysteresis time at the center point at the over-zero moment, and the electrodynamic repulsion force between the dynamic and static contact at closing are taken as outputs, respectively. Finally, the structure of contact is optimized by combining the RBF neural network model with the multi-objective grey wolf optimization algorithm (MOGWO). The results show that, compared to the initial structure, when the length of the contact plate slot is 19.74 mm, the width is 3.94 mm, the radial deflection angle is 19.9°, the height of the cup holder slope slot is 18.0 mm, and up-and-down rotating angle rotation angle is 119.2°, the contacts have a better magnetic field characteristics and the electrodynamic repulsion force between the dynamic and static contact is significantly reduced, which is conducive to improving the working performance of the contacts.
Key words：vacuum interrupter contact; electrodynamic repulsion force; RBF neural network; magnetic field characteristics; multi-objective grey wolf optimization algorithm

基金资助项目：国家自然科学基金(52177143)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52177143).

0 引言

随着“碳中和、碳达峰”的提出和新型电力系统建设的不断深入，六氟化硫(SF_6)作为强温室效应气体，在电力系统中逐步被减少使用甚至禁止[1-2]。真空开断技术因自身优越的开断性能和对环境友好的特点被广泛应用于中低压电力系统中，而真空灭弧室作为真空断路器的核心部位，其工作性能直接决定断路器的综合性能[3-7]。在接通电流时，由于触头片不能做到完全光滑，电流会收缩在动静触头片实际接触的微小区域，此时流过动、静触头片的电流方向相反，产生 Holm 力；同时，触头回路由于自身磁场的作用产生了洛伦兹力，两者共同构成了触头间的电动斥力。过大的电动斥力会导致合闸时出现弹跳现象，不利于断路器的稳定工作。除此之外，作为真空开断的“心脏”，触头应该具有较好的磁场特性，实现对电弧的有效调控从而提高真空灭弧室的开断性能。因此，在设计触头时应尽可能减小触头间的电动斥力，并使触头产生较好的磁场特性，即具有较大数值的纵向磁场且磁滞时间较小，将有利于断路器工作性能的提升。

杯状纵磁触头在中低压系统中有着较为广泛的应用，引起了许多学者的关注。文献[8-11]基于径向开槽研究了触头片结构、杯指结构、铁芯的排列方式及结构对磁场特性的影响。文献[12]研究了不同开槽偏转角度下触头片结构变化对触头间隙磁场特性的影响。当前对杯状纵磁触头的研究大多数都集中于磁场特性，很少考虑到电动斥力。目前国内对电动斥力的研究多基于有限元法，文献[13-14]引入导电桥模型代替触头接触点，采用有限元软件计算触头系统的电动斥力并验证了其正确性。文献[15]研究了不同补偿结构下的电动斥力，继而选择出最优补偿结构。文献[16]对高压直流继电器的动触头高度、触头间距及动簧片结构对电动斥力的影响进行研究，为其优化提供了参考。文献[17]研究了触头片径向开槽个数及长度、斜槽回旋角度、铁芯结构对杯状纵磁触头电动斥力的影响并实现优化设计。上述文献研究都是基于某一结构参数变化，其他结构参数不变的情况下进行的，而杯状纵磁触头的磁场特性和电动斥力往往是多参数共同作用的结果。研究多变量、非线性的输入与输出关系，可以采用径向基(radial basis function, RBF)神经网络等机器学习智能算法[18-22]，结合智能优化算法进而实现杯状纵磁触头的结构设计，与结合有限元仿真与优化算法的传统优化方法相比，可以大幅减少计算量，提高计算效率。

基于上述分析，本文采用中心复合设计(central composite design, CCD)试验，通过有限元法得到不同触头结构参数下触头间隙平面纵向磁场最大值、中心点磁滞时间以及合闸时电动斥力的仿真样本数据；然后根据获得的数据样本构建相应的 RBF 神经网络回归预测模型；综合考虑磁场特性与电动斥力，最后在多目标灰狼优化(multi-objective grey wolf optimization, MOGWO)算法中调用 RBF 神经网络预测模型实现对新型带铁芯杯状纵磁触头的结构优化设计，从而提高触头的工作性能。

1 触头的有限元模型

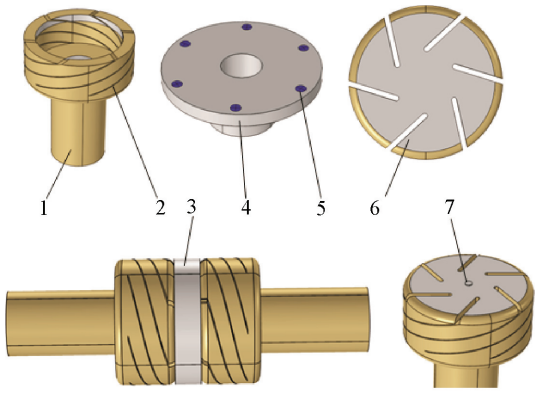
1.1 杯状纵磁触头几何模型

图 1 为杯状纵磁触头的三维几何模型。磁场计算时用半径与触头片相等、高度为额定开距的圆柱体表示电弧模型。计算电动斥力的导电桥模型的高度设为 0.5 mm，其半径 r 可表示为：

$$r=\sqrt{\frac{F_{\mathrm{K}}}{\pi\zeta H'}} \tag{1}$$

式中：ζ 表示触头片接触情况，通常为 0.3~1；触头系统的预设压力为 F_{K}；H' 为触头片材料的布氏硬度，相关取值参考文献[17]。计算求得接触点半径约为 1.6 mm，触头的基本结构参数见表 1。

设置峰值为 40 kA 的工频电流作为激励，表 2 为触头各部分的材料属性设置。



1—导电杆；2—杯座；3—真空电弧；
4—支撑盘；5—铁芯；6—触头片；7—导电桥

图 1 带铁芯杯状纵磁触头三维几何模型

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

表 1　带铁芯杯状纵磁触头的结构参数

Table 1　Geometric parameters of cup-shaped longitudinal magnetic contact with iron cores

触头结构参数	数值
触头直径/mm	58
触头杯座高度/mm	24
杯座斜槽高度/mm	16
杯壁厚度/mm	6
触头片开槽偏转角/(°)	15
触头片开槽长度/mm	18
触头片开槽宽度/mm	2
杯座斜槽旋转角度/(°)	100
触头片厚度/mm	3
开距/mm	12

表 2　触头各部件材料属性

Table 2　Material properties of the individual components of the contact

部件	材料	电导率/(S·m^{-1})	磁导率
导电杆	Cu	5.8×10^7	1
杯座	Cu	5.8×10^7	1
支撑盘	不锈钢	1.1×10^6	1
触头片	CuCr50	1.5×10^7	1
铁芯	电工纯铁	1.0×10^7	B-H 曲线
电弧	—	2800	1
导电桥	CuCr50	1.5×10^7	1

1.2　仿真计算数学模型

基于麦克斯韦方程组使用求解器进行有限元仿真计算：

$$\nabla\times E=-\frac{\partial B}{\partial t} \tag{2}$$

$$\nabla\times H=J+\frac{\partial D}{\partial t} \tag{3}$$

$$\nabla\cdot D=\rho \tag{4}$$

$$\nabla\cdot B=0 \tag{5}$$

$$E=-\nabla\varphi \tag{6}$$

$$B=\nabla\times A \tag{7}$$

$$D=\varepsilon E \tag{8}$$

$$H=\frac{B}{\mu} \tag{9}$$

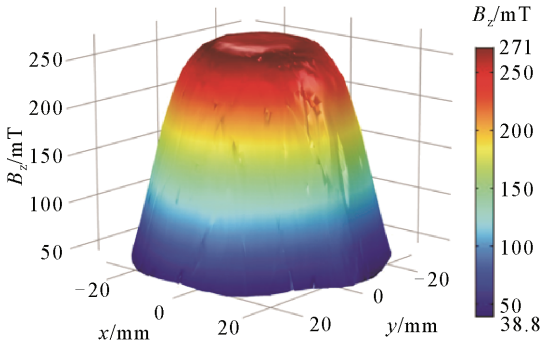
Holm 力从本质上仍属于洛伦兹力，故而电动斥力 F 可表示为：

$$F=\iiint J\times B\mathrm{d}V \tag{10}$$

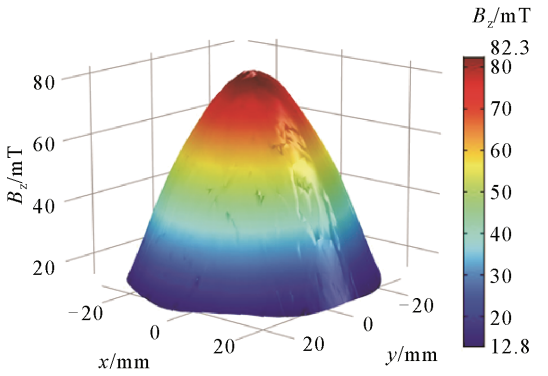
式中：E 为电场强度；B 代表磁感应强度；H 表示磁场强度；D 为电位移矢量；ρ 为体电荷密度；J 表示电流密度；A 代表磁矢势；φ 为标量电势；ε、μ 分别表示介质的介电常数与磁导率。

1.3　仿真结果分析

中心平面纵向磁场在电流峰值及过零时刻的分布如图 2 所示。电流峰值时，中心点沿径向的纵向磁场分布呈先略微上升然后迅速减小的趋势；最大值为 271 mT，位于开槽区域之间而不是中心点；磁场三维分布整体呈现中心区域略微凹陷，触头边缘处的纵向磁场最小，为 38.8 mT。过零时刻，纵向磁场分布呈尖顶帐篷状，最大值为 82.3 mT，位于中心点处；最小值位于边缘处，为 12.8 mT。因此，中心点处的磁场滞后时间最长，经过求解器计算出中心点的磁滞时间为 0.9615 ms。图 3 为电动力



(a) 电流峰值时刻纵向磁场三维分布图

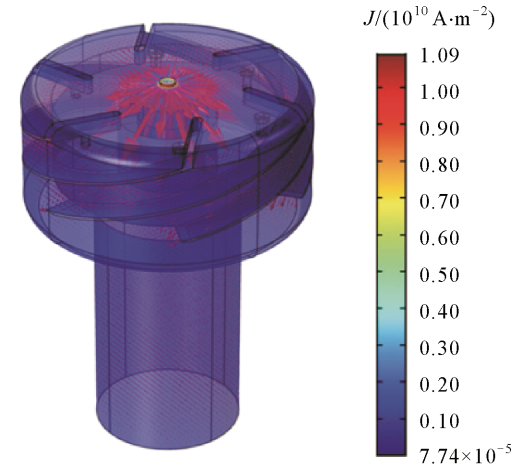


(b) 电流过零时刻纵向磁场三维分布图

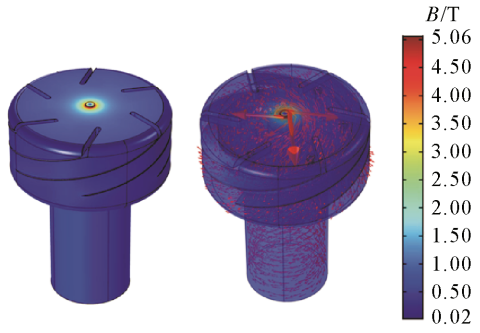
图 2　电流峰值及过零时刻纵向磁场强度 B_z 分布图

Fig.2　Longitudinal magnetic field distribution at peak current and past zero moment

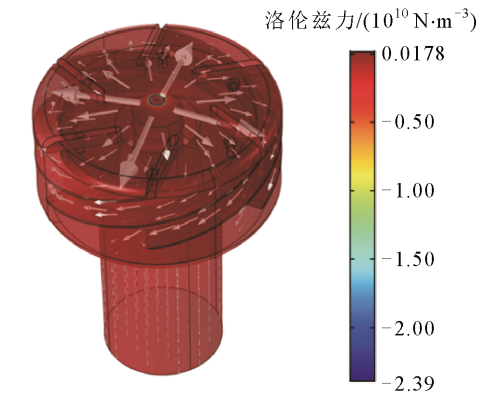
计算时的动触头电流密度及磁场分布，可以发现电流在动、静触头接触处出现收缩现象，进而导致导电桥附近的磁场强度远大于其余部分。由于静触头固定不动，且只有沿开距方向的电动力分量才能使触头斥开，故而本文电动斥力的计算为动触头沿开距方向的分量，初始结构下触头各部分的电动斥力计算结果如表 3 所示。合闸时触头间的电动斥力主要由触头片因电流流向相反而产生的斥力与杯座流向相同而产生的洛伦兹力组成，导电杆及支撑盘部位的电动力的数值较小。



(a) 动触头电流密度分布



(b) 动触头磁场分布



(c) 动触头沿开距方向电动斥力分量分布

图 3 动触头部分电动力计算相关结果图

Fig.3 Diagram of the results relating to the electrodynamic calculation of the moving contact section

表 3 触头各部件电动力计算结果

Table 3 Electrodynamic calculations for each component of the contact

部件	触头片	杯座	支撑盘	导电杆	合力
电动力/N	−459.21	241.60	−3.96	15.42	−206.15

2 径向基 RBF 神经网络模型

2.1 输入输出变量选择

由 1.3 节的仿真结果可知，触头片及杯座的斜槽结构变化导致电流在触头上流通路径的改变，进而改变触头间隙中心平面的磁场特性以及合闸时触头系统所受的电动斥力，影响触头的开断性能与工作稳定性。本文选取触头片开槽长度 L_1、宽度 L_2、径向偏转角度 θ_1、杯座斜槽高度 h 及斜槽上下旋转角度 θ_2 作为 RBF 模型的输入，触头的结构优化参数如图 4 所示。

杯状纵磁触头产生的纵向磁场会控制电弧由聚集状态向扩散状态的转变，当电流过零时，由于涡流效应导致中心点磁场过零时刻滞后于电流，磁滞时间越长，真空断路器成功开断的可能性越低。结构的变化会影响合闸时触头受到的电动斥力，电动斥力过大会导致触头出现弹跳现象，影响真空断路器工作稳定性。因此，本文选择电流峰值时刻纵向磁场的最大值 M、磁滞时间 T 以及电动力的大小 F 分别作为 RBF 模型的输出。

2.2 样本实验设计

CCD 试验能以较少的实验次数反映自变量与因变量之间的关系，减少了试验成本，被广泛应用于各种优化设计中。为研究带铁芯杯状纵磁触头各结构参数变化时其中心平面磁场特性以及电动力情况，本文基于 CCD 实验方法设计了 50 组试验样本并进行相应仿真计算，部分实验样本及相关结果如表 4 所示。

2.3 径向基神经网络 RBF 模型构建

为研究触头结构参数与磁场特性及电动斥力间的多维、非线性关系，实现对触头的结构优化，构建如图 5 所示的 RBF 神经网络模型来实现回归预测。触头片开槽长度 L_1、宽度 L_2、开槽偏转角 θ_1

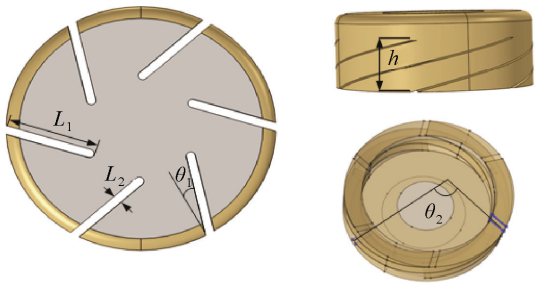


图 4 触头结构优化参数

Fig.4 Structural optimization parameters of contact

及杯座斜槽高度 h 和斜槽上下旋转角度 θ_2 作为输入层参数，隐含层中神经元个数与训练集样本个数相等，输出层参数分别为纵向磁场最大值 M、磁滞时间 T 以及电动力 F。

基于编程软件实现 RBF 模型的训练与预测，从表 4 的试验样本中随机选取 40 组数据作为模型的训练集，剩余的 10 组数据用来检测模型的准确度。图 6、7 分别为 RBF 模型各输出预测值与期望值的对比图及预测误差。

在编程软件中计算各 RBF 模型相关评价指标，得到的结果如表 5 所示。

由图 6、图 7 及表 5 中结果可知，所构建的 RBF 模型的相关系数均接近于 1，电动力 F 和磁滞时间 T 的预测值与期望值的误差较小，纵磁最大值 M 的均方根误差(root mean square error, RSME)为 3.0567，考虑到样本纵向磁场的数值范围，其相对误差很小，故而认为所构建的 RBF 神经网络预测模型的拟合度高，能较好地对纵向磁场最大值 M、磁滞时间 T 以及电动力 F 进行预测。

表 4　中心复合设计部分实验及结果

Table 4　Central composite design partial experiments and results

样本	L_1/mm	L_2/mm	θ_1/(°)	h/mm	θ_2/(°)	M/mT	F/N	T/ms
1	12	4.0	15	18	120	314	179.97	0.9610
2	20	1.0	15	18	90	249	230.02	0.8515
3	12	4.0	25	14	120	328	129.95	1.2830
4	16	4.0	20	16	105	305	172.85	0.9782
5	12	4.0	15	14	120	297	173.64	1.2016
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
47	12	1.0	15	14	90	215	246.30	1.2753
48	16	2.5	20	16	105	299	176.10	1.0350
49	20	4.0	25	18	90	302	178.98	0.7998
50	20	1.0	25	18	120	355	106.64	1.0706

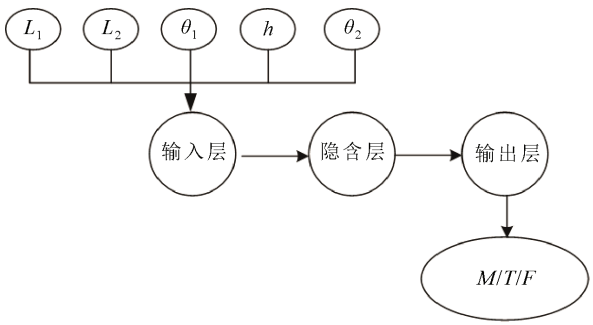


图 5　RBF 神经网络预测模型

Fig.5　RBF neural network prediction model

3　基于 MOGWO 算法的触头结构优化

MOGWO 算法因收敛性能强、参数少、易实现等优点被广泛应用于各种优化设计中[23-25]。本文将通过 MOGWO 算法对带铁芯杯状纵磁触头的结构进行优化设计，以提高触头的工作性能为目标，选取最佳的结构参数。

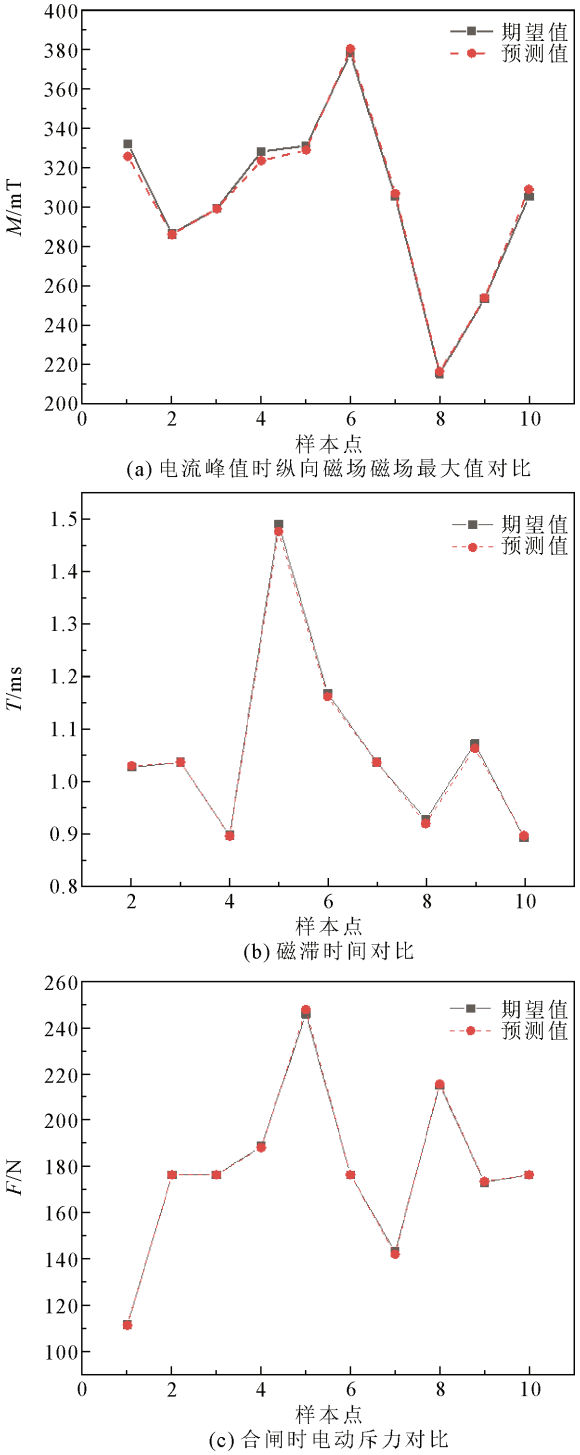


图 6　RBF 模型预测与期望输出对比

Fig.6　Comparison between RBF model prediction and expected output

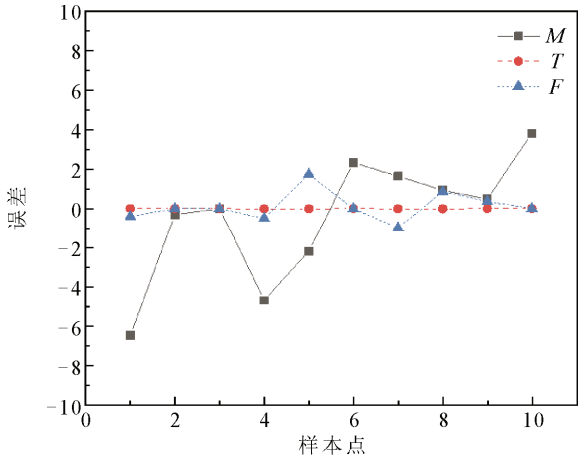


图 7 RBF 模型预测误差

Fig.7 Prediction error of RBF model

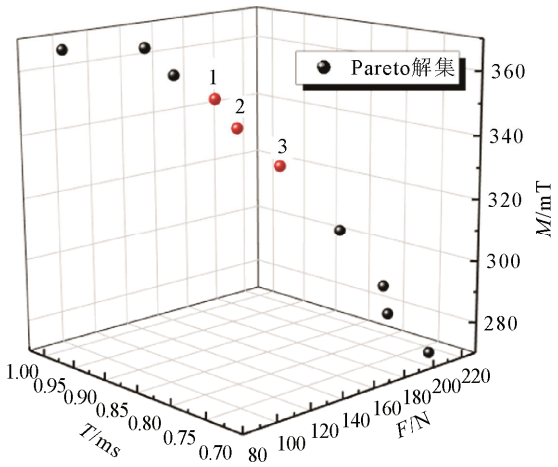


图 8 Pareto 前沿非支配解集

Fig.8 Pareto frontier non-dominated solution set

表 5 各 RBF 模型的相关评价指标结果

Table 5 Relevant evaluation index results of each RBF model

RBF 模型	均方根误差 RSME	相关系数 R^2
M	3.0567	0.9949
T	0.0075	0.9985
F	0.7311	0.9995

表 6 优质解相关参数取值及对应结果

Table 6 Quality solutions for relevant parameters and corresponding results

方案	L_1/mm	L_2/mm	θ_1/(°)	h/mm	θ_2/(°)	M/mT	F/N	T/ms
1	19.74	3.94	19.9	18.00	119.2	355.0	124.90	0.8412
2	19.40	3.99	17.7	17.77	119.8	345.2	136.97	0.8387
3	19.73	3.91	16.3	17.79	117.2	333.7	150.51	0.8092

3.1 目标函数的选择

选择开槽长度 L_1、宽度 L_2、径向偏转角 θ_1 及斜槽高度 h 和斜槽旋转角度 θ_2 作为优化变量，纵向磁场最大值 M、磁滞时间 T 以及电动力 F 为优化目标，优化变量的取值范围为：

$$\begin{cases} 12\ \text{mm} \le L_1 \le 20\ \text{mm} \\ 1\ \text{mm} \le L_2 \le 4\ \text{mm} \\ 15° \le \theta_1 \le 25° \\ 14\ \text{mm} \le h \le 18\ \text{mm} \\ 90° \le \theta_2 \le 120° \end{cases} \tag{11}$$

3.2 触头优化结果与分析

MOGWO 算法经过 200 次迭代得到图 8 所示的 Pareto 非支配解集。剔除单一目标取最优值的解集点，综合考虑纵向磁场最大值、磁滞时间及电动斥力，最终选取解集中红色的解进行比较，其对应的参数结构取值及优化目标值如表 6 所示。采用归一化去量纲的方法对优化效果进行评价，选取最优的结构参数解。

由于希望纵向磁场的值越大越好，故磁场最大值 M 的优化评价值 k_M 可表示为：

$$k_{\mathrm{M}} = \frac{M_{\min} - M_{(x)}}{M_{\max} - M_{\min}} \tag{12}$$

式中：$M_{(x)}$、$M_{\max}$、$M_{\min}$ 分别为纵向磁场最大值中的任意值、最大值和最小值。

对于磁滞时间与电动斥力，希望越小越好，其评价值 k_T、k_F 可表示为：

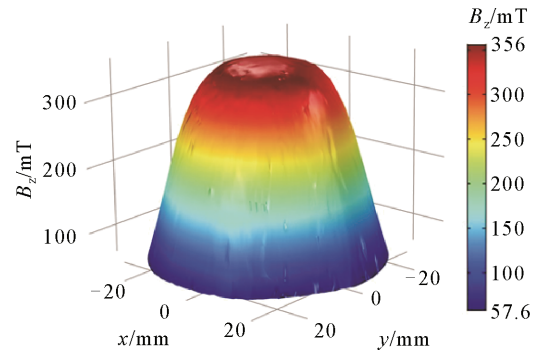
$$k_{\mathrm{T}} = \frac{T_{(x)} - T_{\max}}{T_{\max} - T_{\min}} \tag{13}$$

$$k_{\mathrm{F}} = \frac{F_{(x)} - F_{\max}}{F_{\max} - F_{\min}} \tag{14}$$

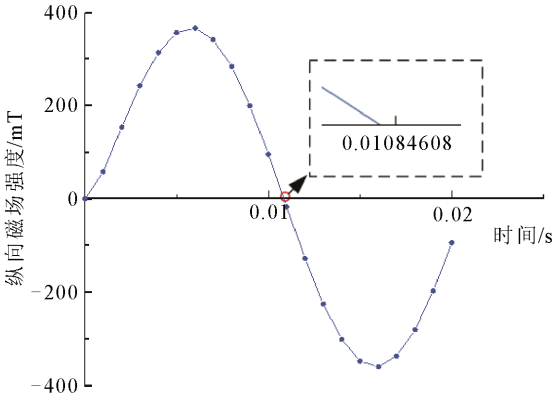
式中：$T_{(x)}$、$T_{\max}$、$T_{\min}$ 分别表示磁滞时间的任意值、最大值和最小值；$F_{(x)}$、$F_{\max}$、$F_{\min}$ 分别为电动斥力的任意值、最大值以及最小值。

通过对比发现，最终选取优化方案 1 作为优化结果，其参数结构下的相关仿真计算结果如图 9、表 7 所示。

由图 9 及表 7 中的结果可知，最优结构参数下的有限元仿真结果与表 6 中的预测输出结果间的误差很小，具有较好的准确性。优化后中心平面纵向磁场最大值由 6.775 mT/kA 增大至 8.9 mT/kA，提升了约 31.37%；中心点处的磁滞时间约为 0.8461 ms，较优化前减小了 0.1154 ms。合闸时刻动、静触头间产生的电动斥力由优化前的 206.15 N 减小为 124.89 N。可以发现，结构优化后触头间隙中心平面具有更好的磁场特性且动、静触头间的电动斥力



(a) 优化后电流峰值时刻纵向磁场三维分布图



(b) 优化后中心点处纵向磁场强度随时间变化的关系

图 9　优化后的中心平面纵向磁场特性相关结果

Fig.9　Results related to the longitudinal magnetic field characteristics in the center plane after optimization

表 7　优化后的电动力计算结果

Table 7　Electrodynamic repulsion force calculation results after optimization

部件	触头片	杯座	支撑盘	导电杆	合力
电动力/N	−454.77	318.56	−5.72	17.03	−124.89

明显减小，大大提高了真空灭弧室触头的工作性能。

4　结论

本文通过有限元仿真软件建立了带铁芯式杯状纵磁触头的磁场与电动斥力三维计算模型，利用多目标灰狼算法和 RBF 神经网络对其结构进行了优化，得到以下结论：

1）触头间的电动斥力主要由触头片、杯座两部分共同构成，触头其余部件的电动力数值较小；电流峰值时刻，中心平面纵向磁场最大值位于开槽之间的区域而不是中心点，电流过零时中心点处的纵向磁场最大，磁滞时间最长。

2）通过 CCD 与有限元仿真软件相结合的方法得到相关仿真数据并建立了以触头片开槽长度、宽度、径向偏转角度、杯座斜槽高度和斜槽旋转角度为输入，纵向磁场最大值、磁滞时间、合闸时电动斥力分别为输出的 RBF 神经网络模型。所构建的模型具有较好的准确度，能较好地对触头间隙中心平面磁场特性、触头间电动斥力进行预测。

3）结合 RBF 神经网络模型，采用 MOGWO 算法对触头结构进行优化。结果表明，当触头片开槽长度为 19.74 mm、宽度为 3.94 mm、径向偏转角度为 19.9°、杯座斜槽高度为 18.0 mm、斜槽旋转角度为 119.2°时，触头具有更好的磁场特性且动、静触头间的电动斥力明显减小，真空灭弧室触头的工作性能得到提升。

参考文献　References

[1] 周文俊，邱　睿，高克利，等. 环保气体绝缘强度预测模型研究现状[J]. 高电压技术，2023，49(3)：895-906.
ZHOU Wenjun, QIU Rui, GAO Keli, et al. Research status of the insulation strength prediction models for the eco-friendly gases[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 895-906.

[2] 王　凯，周　然，张博雅，等. 环境友好型 HFO-1336mzz(E)混合气体在负荷开关中的灭弧性能仿真研究[J]. 高电压技术，2023，49(3)：1038-1045.
WANG Kai, ZHOU Ran, ZHANG Boya, et al. Simulation study on the arc extinguishing performance of eco-friendly HFO-1336mzz(E) mixture gas in a load switch[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1038-1045.

[3] 程　显，田小倩，葛国伟，等. 环保型罐式多断口真空断路器电场分析与优化[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3200-3207.
CHENG Xian, TIAN Xiaoqian, GE Guowei, et al. Electric field analysis and optimization of 126 kV environmental protection gas insulated tank circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3200-3207.

[4] 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.

[5] 邹积岩，梁德世，黄翀阳，等. 110 kV 直流真空断路器模块串联开断的同步控制[J]. 高电压技术，2020，46(8)：2627-2634.
ZOU Jiyan, LIANG Deshi, HUANG Chongyang, et al. Synchronous control of module series connection interruption in 110 kV DC vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2627-2634.

[6] 王　丹，王立军，王智炜，等. 金属蒸气作用下弧后等离子体扩散过程的二维粒子模拟[J]. 中国电机工程学报，2021，41(15)：5391-5400.
WANG Dan, WANG Lijun, WANG Zhiwei, et al. Two-dimensional particle simulation of the post-arc plasma decay process in metal vapor[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15): 5391-5400.

[7] 黄翀阳，刘晓明，曹云东，等. 双断口直流真空断路器非同期开断电弧特性分析[J]. 中国电机工程学报，2022，42(9)：3480-3489.
HUANG Chongyang, LIU Xiaoming, CAO Yundong, et al. Analysis of vacuum arc characteristics with double-break DC-VCB on asynchronous[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3480-3489.

[8] 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)：26-28，37.
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, 37.

[9] 刘志远，王仲奕，王季梅，等. 杯状纵磁触头纵向磁场滞后时间研究[J]. 高压电器，2004，40(2)：87-90.
LIU Zhiyuan, WANG Zhongyi, WANG Jimei, et al. Study on phase shift time of cup-type axial magnetic field contact[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(2): 87-90.

[10] 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)：161-165，169.
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, 169.

[11] 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)：81-88，98.
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, 98.

[12] 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 输变电年会论文集. 南京：中国电机工程学会，中国电工技术学会，2010：35-41.
XIE Fei, YE Zhaoping, XIU Shixin. Effect of contact sheet slotting method on magnetic field characteristics of cup-shaped longitudinal magnetic contacts[C] // Proceedings of the 2010 Annual Conference on Power Transmission and Transformation. Nanjing, China: Chinese Society for Electrical Engineering, China Electrotechnical Society, 2010: 35-41.

[13] 李兴文，陈德桂，刘洪武，等. 触头间电动斥力的三维有限元分析[J]. 高压电器，2004，40(1)：53-55.
LI Xingwen, CHEN Degui, LIU Hongwu, et al. 3-D finite element analysis of electro-dynamic repulsion forces acting on contacts[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(1): 53-55.

[14] 黄蔚偈，兰太寿，刘向军. 基于 ANSYS 有限元法的接触系统电动力分析[J]. 电气开关，2013，51(4)：18-21，24.
HUANG Weijie, LAN Taishou, LIU Xiangjun. Analysis of electric of contact system based on ANSYS finite element method[J]. Electric Switchgear, 2013, 51(4): 18-21, 24.

[15] 郑 楠，苏秀苹，乔延华，等. 断路器触头结构中电动斥力仿真分析研究[J]. 电器与能效管理技术，2016(8)：32-35，68.
ZHENG Nan, SU Xiuping, QIAO Yanhua, et al. Study on electrodynamic repulsion force simulated analysis of circuit breaker contact structure[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2016(8): 32-35, 68.

[16] 于国飞，袁仲林，郑 翔. 高压直流继电器触头间电动斥力分析[J]. 电器与能效管理技术，2020(9)：13-17.
YU Guofei, YUAN Zhonglin, ZHENG Xiang. Analysis of electric-dynamic repulsion force between contacts of high voltage DC relay[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2020(9): 13-17.

[17] 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.

[18] 范文玲. 基于改进型 RBF 神经网络的矿用电缆剩余寿命研究[D]. 西安：西安科技大学，2018.
FAN Wenling. Prediction of cable life of coal mine based on improved RBF neural network[D]. Xi'an, China: Xi'an University of Science and Technology, 2018.

[19] 王佶宣，邓 斌，王 江. 基于经验模态分解与 RBF 神经网络的短期风功率预测[J]. 电力系统及其自动化学报，2020，32(11)：109-115.
WANG Jixuan, DENG Bin, WANG Jiang. Short-term wind power prediction based on empirical mode decomposition and RBF neural network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(11): 109-115.

[20] 梁志峰，董 存，吴 骥，等. 组合辐射衰减因子预报与 RBF 神经网络的光伏短期功率预测方法[J]. 电网技术，2020，44(11)：4114-4120.
LIANG Zhifeng, DONG Cun, WU Ji, et al. Short-term photovoltaic power prediction method combining with radiation attenuation factor prediction and RBF neural network[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4114-4120.

[21] 杨晓丽，黄宏光，舒 勤，等. 基于 SVD 和低秩 RBF 神经网络的局部放电信号提取方法[J]. 高电压技术，2021，47(10)：3608-3616.
YANG Xiaoli, HUANG Hongguang, SHU Qin, et al. Partial discharge signal extraction method based on SVD and low rank RBF neural network[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3608-3616.

[22] 乔雪涛，周世涛，李优华，等. 基于 RBF 神经网络模型的数控车床主轴箱优化设计[J]. 制造技术与机床，2023(5)：98-104.
QIAO Xuetao, ZHOU Shitao, LI Youhua, et al. Optimization design of CNC lathe spindle box based on RBF neural network model[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2023(5): 98-104.

[23] 胡开元，王雷刚. 基于响应面法与灰狼优化算法的壳体拉深成形模具优化设计[J]. 锻压技术，2022，47(6)：244-250.
HU Kaiyuan, WANG Leigang. Optimization design on shell deep drawing die based on response surface methodology and grey wolf optimization algorithm[J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47(6): 244-250.

[24] 宋玉生，刘光宇，朱 凌，等. 改进的灰狼优化算法在 SVM 参数优化中的应用[J]. 传感器与微系统，2022，41(9)：151-155.
SONG Yusheng, LIU Guangyu, ZHU Ling, et al. Application of improved GWO algorithm in SVM parameter optimization[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(9): 151-155.

[25] 王玉芳，曾亚志，蒋亚飞. 基于自适应灰狼优化算法的柔性作业车间调度问题[J]. 现代制造工程，2022(7)：1-10.
WANG Yufang, ZENG Yazhi, JIANG Yafei. Flexible job shop scheduling problem based on adaptive grey wolf optimization algorithm[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2022(7): 1-10.



丁 璨
1982—，男，博士，讲师
研究方向为高压电器设计、模拟及实验
E-mail: dingcan@ctgu.edu.cn

DING Can
Ph.D.



袁 召(通信作者)
1985—，男，博士(后)，副研究员
研究方向为电气设备设计、仿真模拟与优化
E-mail: hustyuanzhao@qq.com

YUAN Zhao
Post-doctorate
Associate professor
Corresponding author

收稿日期 2023-06-30 修回日期 2023-11-17 编辑 余洋洋