

机械式直流断路器用快速电磁斥力机构设计仿真与优化

徐党国, 彭兆伟, 黄诗洋, 宋鹏, 李亚美, 宁琳如

(国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 电磁斥力机构广泛应用为直流断路器的操作机构, 在直流开断场景下要求电磁斥力机构的动作时间尽可能的在 2 ms 时间内分断到满开距, 同时保证有较长的使用寿命。针对此问题, 文中首先分析了电磁斥力机构的基本原理, 然后利用有限元软件搭建了电磁斥力机构的仿真模型, 分析了影响电磁斥力机构驱动性能的 6 个重要参数(线圈匝数、线圈高度、线圈宽度、斥力盘高度、储能电容容量及充电电压)。之后利用 BBD 试验设计方法输出 54 组样本, 导入 BP 神经网络预测模型中, 结合 NSGA-II 算法对电磁斥力机构进行了结构优化。仿真结果表明: 线圈匝数为 36 匝, 线圈高度 5 mm, 线圈宽度 1.52 mm, 斥力盘厚度 8.87 mm, 储能电容容量 5 000 μF , 充电电压 1 400 V 时, 电磁斥力机构的线圈电流降低了 14%, 2 ms 运动位移达到了 13.64 mm, 在满足约束条件的情况下, 明显提高了机构的驱动性能, 为快速机械开关的开断要求提供了合理的机构参数。

关键词: 电磁斥力机构; NSGA-II 算法; BP 神经网络; 优化设计

Design Simulation and Optimization of Fast Electromagnetic Repulsion Mechanism for Mechanical DC Circuit Breaker

XU Dangguo, PENG Zhaowei, HUANG Shiyang, SONG Peng, LI Yamei, NING Linru

(Electric Power Research Institute of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: The electromagnetic repulsion mechanism is widely used as the operating mechanism of DC circuit breaker. In the DC breaking scenario, the action time of the electromagnetic repulsion mechanism is required to break to the full opening distance within 2 ms as much as possible, while ensuring a long service life. To address this issue, this paper first analyzes the basic principle of electromagnetic repulsion mechanism, then builds a simulation model of electromagnetic repulsion mechanism using finite element software, and analyzes six important parameters (coil turns, coil height, coil width, repulsion disc height, energy storage capacitor capacity and charging voltage) that affect the driving performance of electromagnetic repulsion mechanism. After that, 54 sets of samples are outputted by BBD experimental design method, imported into the BP neural network prediction model and combined with NSGA-II algorithm to optimize the structure of electromagnetic repulsion mechanism. The simulation results show that with 36 turns of coil, 5 mm coil height, 1.52 mm coil width, 8.87 mm repulsion disc thickness, 5 000 μF energy storage capacitor capacity and 1 400 V charging voltage, the coil current of the electromagnetic repulsion mechanism is reduced by 14% and the 2 ms motion displacement reaches 13.64 mm, which, under the condition of satisfying the constraints The driving performance of the mechanism is obviously improved, which provides reasonable mechanism parameters for the opening and closing requirements of the fast mechanical switch.

Key words: electromagnetic repulsion mechanism; NSGA-II algorithm; BP neural network; optimization design

0 引言

快速机械开关由于具有开关速度快、耐压能力强、导通流量大等特点, 目前已经成为直流电力系统中的研究重点^[1]。操作机构作为快速机械开关中的关键性元件影响其多项性能, 且操作机构结构相对复杂, 采用元件多, 快速机械开关出现的各种故障基本上都发生在操作机构上^[2]。由于电磁斥力机构具有开关速度快、结构简单、可靠性高等优点, 能够更好的满足机械开关快速分闸要求^[3-4], 从而被用于直流断路器的操作机构。

早在 20 世纪 60 年代加拿大学者 Samir Basu 和 K.D.Srivastava 等人首次提出了线圈—斥力盘

式电磁斥力机构的工作原理^[5-7]。线圈—线圈式电磁斥力机构由日本学者小山健一提出, 将斥力盘更换为盘装线圈作为驱动部件中的可运动部分, 即为双线圈式快速斥力机构^[8]。基于以上两种理论, 日本富士电机公司和三菱公司分别研制出线圈—斥力盘式和双线圈式电磁斥力机构, 同时投入断路器进行使用^[9-10]。文[11]使用电磁斥力机构在混合式直流断路器中研究其动作性能, 实现了 1 250 V/275 A 以下的故障电流分断。目前, 各高校也对快速斥力机构展开不同研究。分析电磁斥力机构的驱动特性、优化参数、提高能量转换效率的方法主要集中在数值分析和解析分析两方面^[12]。前者通过有限元软件建立的二维仿真模型进行相应的数值计算, 或研制基于电磁斥力机构

的试验样机进行大量试验分析数据，并对影响电磁斥力机构驱动特性的各个因素(斥力盘直径、线圈匝数、电阻率等)进行分析，从而对电磁斥力机构进行优化^[13-19]。后者主要有3种方法，分别是将电磁斥力机构的运动过程解耦，改进模型结构，结合编程算法对有限元模型进行优化^[20-27]。但以上研究主要是设定权重函数将多目标优化转化为单目标优化，未考虑对电磁斥力机构的相关参数直接进行多目标算法优化，使仿真结果同时满足两个甚至多个目标函数的最优解。

针对上述问题，文中主要采用 Box-Behnken 试验设计方法建立样本点，采用编程软件和有限元仿真元件，结合 BP 神经网络预测模型和 NSG A-II 算法对“线圈—盘”式(coil-plate repulsion mechanism, CPRM)电磁斥力机构的驱动性能进行优化设计。有效增大 2 ms 位移，同时减小线圈电流，提高其分断时间以及使用寿命。

1 快速电磁斥力机构工作原理

快速机械开关结构示意图 1，主要包含真空灭弧室、绝缘拉杆、电磁斥力机构、缓冲装置和保持装置 5 部分。CPRM 在快速机械开关中提供驱动力，工作原理见图 2，利用涡流原理，通过外电路中预充电电容器组放电产生一个脉冲电流，该脉冲放电电流通过励磁线圈在斥力盘中感应出反向涡流，形成电磁斥力带动绝缘拉杆运动，进行开关分合闸操作。其中外电路由储能电容 C、续流二极管 VD 和晶闸管 VT 构成。

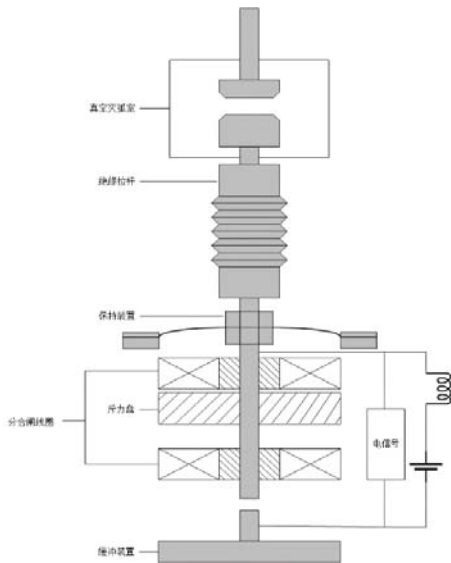


图 1 快速机械开关结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fast mechanical switch structure

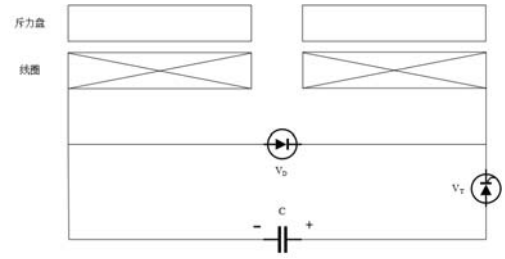


图 2 CPRM 结构示意图

Fig. 2 CPRM structure schematic

电磁斥力机构等效电路图见图 3，其中线圈和斥力盘的等效电路分别满足式(1)、(2)^[28]：

$$U_C = L_1 \frac{di_1}{dt} + i_1 R_1 - \frac{d}{dt} M i_2 \quad (1)$$

$$0 = L_2 \frac{di_2}{dt} + i_2 R_2 - \frac{d}{dt} M i_1 \quad (2)$$

式(1)、(2)中： L_1 和 L_2 ， i_1 和 i_2 ， R_1 和 R_2 分别为线圈和斥力盘的自感，感应电流，电阻； M 为线圈和斥力盘的互感； U_C 为储能电容的初始电压。

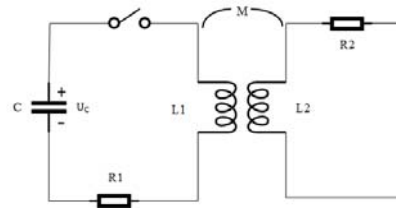


图 3 CPRM 等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of CPRM

在电磁斥力机构动作过程中应满足能量守恒定律，其中外电路提供的能量 dE 应等于电磁斥力机构所做功 dA 、磁场能量变化 dw 以及热损耗 dQ 之和。即

$$dE = dA + dw + dQ \quad (3)$$

式(3)中， dE 、 dw 、 dQ 的表达式为

$$\begin{cases} dE = i_1^2 R_1 dt + i_2^2 R_2 dt + i_1 L_1 di_1 + i_2 L_2 di_2 + \\ \quad i_1 M di_2 + i_2 M di_1 + 2i_1 i_2 dM \\ dw = i_1 L_1 di_1 + i_2 L_2 di_2 + i_1 M di_2 + i_2 M di_1 + i_1 i_2 dM \\ dQ = i_1^2 R_1 dt + i_2^2 R_2 dt \end{cases} \quad (4)$$

由式(3)、(4)可得

$$dA = i_1 i_2 dM \quad (5)$$

因此机构的电磁斥力为

$$F = \frac{dA}{dz} = \frac{i_1 i_2 dM}{dz} \quad (6)$$

2 电磁斥力机构仿真和分析

2.1 仿真模型

利用软件对 CPRM 进行仿真模型的建立, 具体模型见图 4。CPRM 为一个二维轴对称模型, 在瞬态场求解器中建立运动域, 以此限制斥力盘在既定的行程中运动, 同时对线圈添加图 5 所示的外部电路作为激励源。

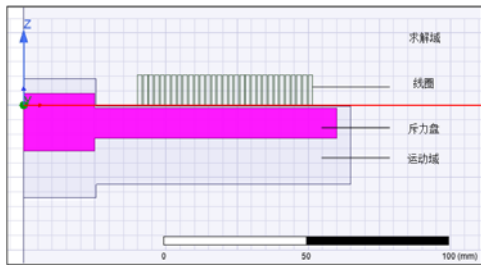


图 4 CPRM 二维仿真模型

Fig. 4 Two-dimensional simulation model of CPRM

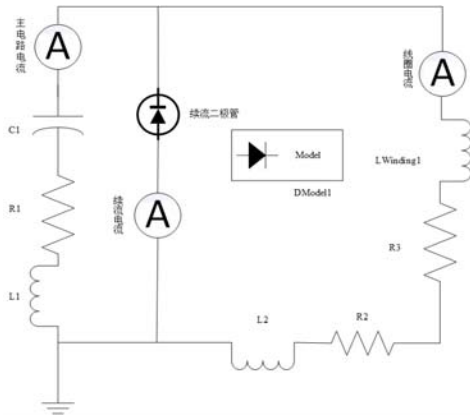


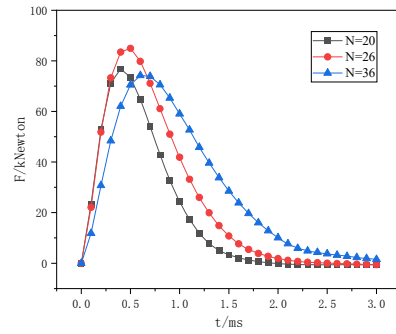
图 5 CPRM 仿真模型外接电路图

Fig. 5 External circuit diagram of CPRM simulation model

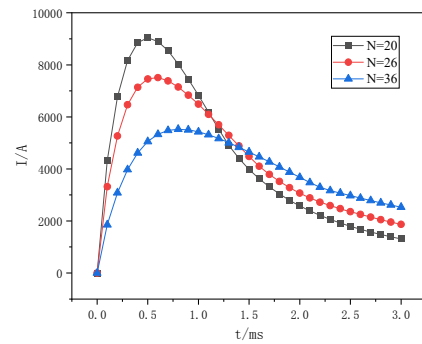
2.2 仿真分析

2.2.1 线圈匝数

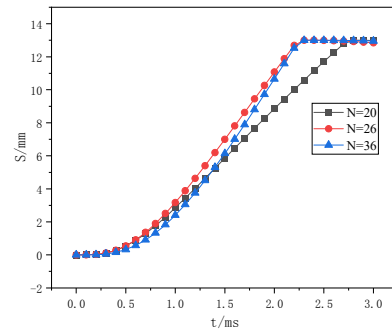
仿真选取线圈匝数 N 为 20、26、36 匝, 仿真结果见图 6, 随着线圈匝数的增加, 电磁斥力峰值和运动速度峰值逐渐增加。但匝数为 36 匝时, 电磁斥力达到饱和后峰值已经出现减小。由此可知初始参数设置线圈匝数不应过大, 至少应大于 20 匝且小于 36 匝。



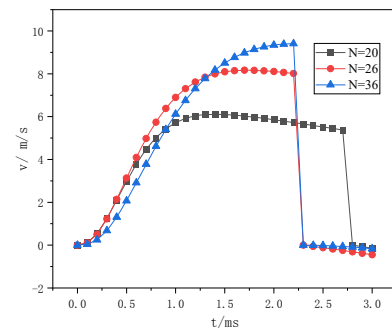
(a) 电磁斥力



(b) 线圈电流



(c) 位移



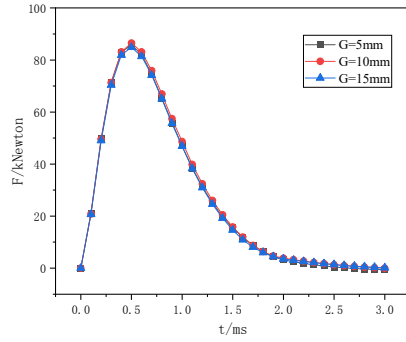
(d) 速度

图 6 线圈匝数对 CPRM 的影响

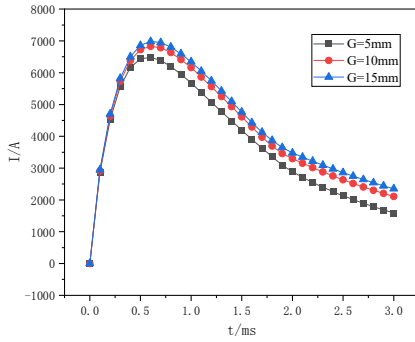
Fig. 6 The effect of the number of coils on CPRM

2.2.2 线圈高度

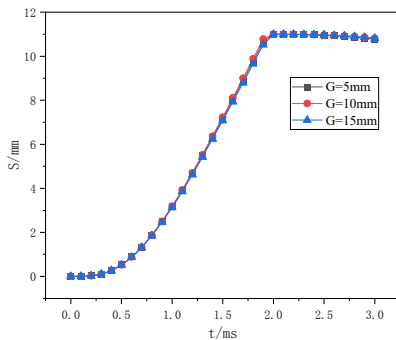
线圈高度 G 分别选取 5、10、15 mm 进行仿真，结果见图 7，由仿真结果可知线圈高度对电磁斥力和 2 ms 运动位移的影响很小，但线圈高度增加，线圈电流随之增大。因此线圈高度要选取适中，不应过大。



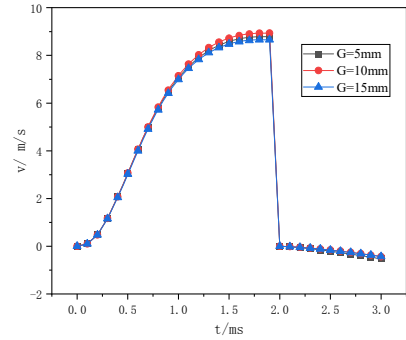
(a) 电磁斥力



(b) 线圈电流



(c) 位移



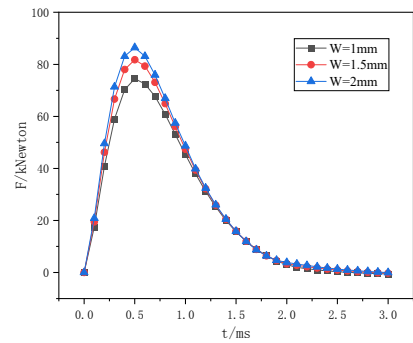
(d) 速度

图 7 线圈高度对 CPRM 的影响

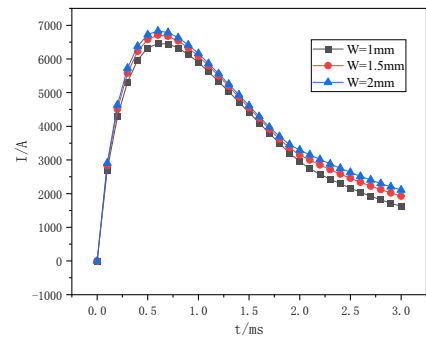
Fig. 7 Effect of coil height on CPRM

2.2.3 线圈厚度

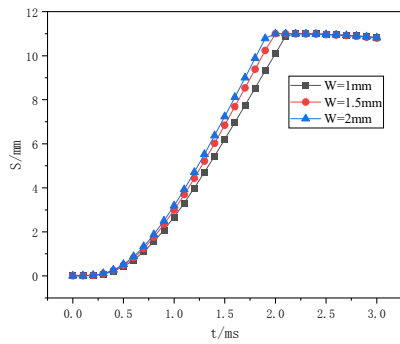
线圈厚度 W 分别选取 1、1.5、2 mm，仿真结果见图 8，图 8 中表明随着线圈厚度增加，机构的电磁斥力峰值、线圈电流、2 ms 运动位移和运动速度峰值均不断增加。



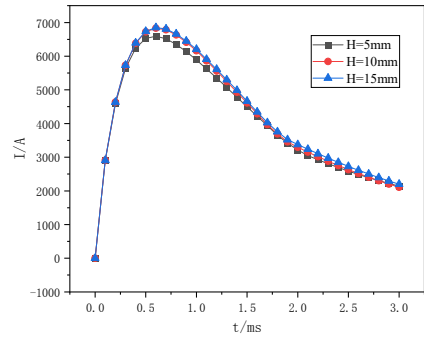
(a) 电磁斥力



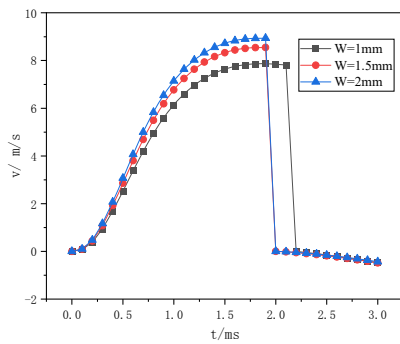
(b) 线圈电流



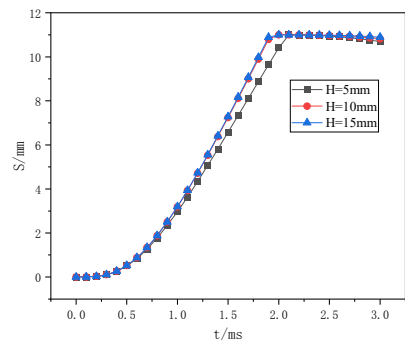
(c) 位移



(b) 线圈电流



(d) 速度



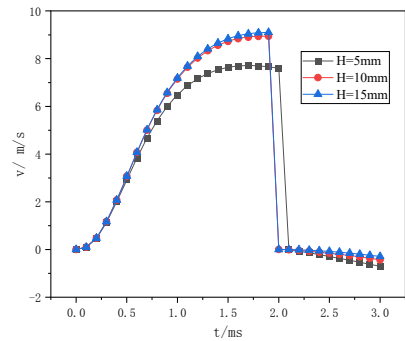
(c) 位移

图 8 线圈厚度对 CPRM 的影响

Fig. 8 Effect of coil thickness on CPRM

2.2.4 斥力盘厚度

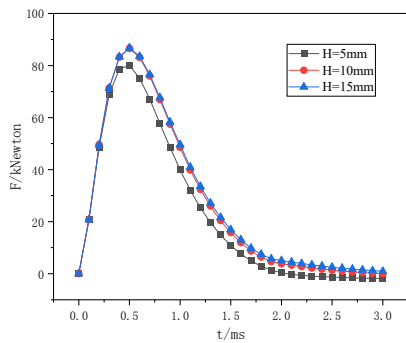
斥力盘厚度 H 在仿真中选取 5、10、15 mm，仿真结果见图 9，其中电磁斥力峰值、运动速度峰值、2 ms 运动位移及线圈电流都随斥力盘厚度的增加而增大。但由于斥力盘厚度不断增加，运动物体质量也会增加，如果运动质量过大将限制速度；斥力盘厚度过小，在分合闸过程中斥力盘无法承受电磁斥力将会导致斥力盘损坏，因此斥力盘厚度的初始值选取应在 5~15 mm 区间内较为合理。



(d) 速度

图 9 斥力盘厚度对 CPRM 的影响

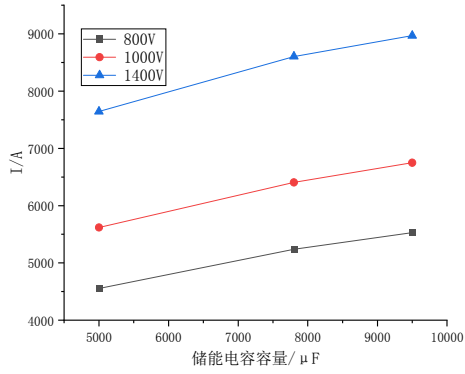
Fig. 9 Effect of repulsive disk thickness on CPRM



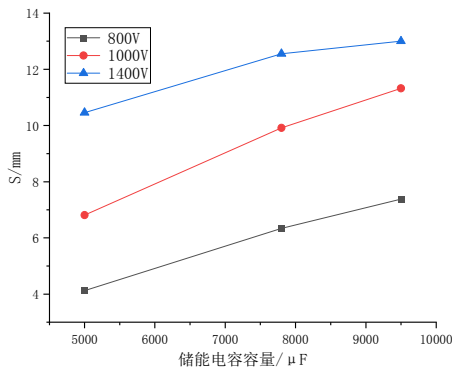
(a) 电磁斥力

2.2.5 储能电容容量及充电电压

储能电容容量和充电电压对机构的影响见图 10。根据仿真结果可知，当储能电容容量和充电电压增大时，会产生较大的线圈电流，电磁斥力峰值和 2 ms 运动位移增大，但为了提高元器件使用寿命，应当适当减小线路电流，延长元器件使用寿命。



(a) 线圈电流峰值



(b) 2 ms 运动位移

图 10 储能电容容量和充电电压对 CPRM 的影响

Fig. 10 Effect of energy storage capacitor capacity and charging voltage on CPRM

以上对单一参数的仿真结果不能得出对 CPRM 参数优化的整体设计和全局最优解, 但为初始值选取和后续仿真提供了重要依据, 在后续优化过程中应综合考虑上述所有因素对机构的影响, 通过多目标优化算法寻找最优解

3 BP 神经网络模型

文中采用 BBD 试验设计选取数据样本点数, 根据上述对单一影响因素的仿真结果, 选取 6 个因素, 2 个优化目标; 之后通过 BP 神经网络建立快速斥力机构的预测模型; 最后采用 NSGA-II 算法对预测模型进行多目标优化设计, 得到 pareto 最优解集, 并从中选取一个最优解和初始值进行对比分析, 最终确定快速斥力机构优化参数。

3.1 基于 BBD 试验的样本设计

Box-Behnken 试验(BBD)是在相同因素的情况下, 相对于 CCD 试验样本数更少也更经济的一种试验。BBD 试验不需要连续进行多次试验,

常用于研究因素的非线性影响问题上。文中采用 BBD 试验设计方法建立了 54 组试验样本, 将数据导入快速斥力机构仿真模型中, 进行相应计算得到两个优化目标的数值。

3.2 BP 神经网络模型构建

BP 神经网络预测模型分为输入层、隐含层和输出层 3 个部分, 具体模型见图 11。图 11 中输入层参数包括线圈匝数 N 、线圈高度 G 、线圈宽度 W 、斥力盘厚度 H 、储能电容容量 C 和充电电压 V 。隐含层神经元个数 n 为 8 个。输出层参数包括线圈电流 I 和 2 ms 运动位移 s 。

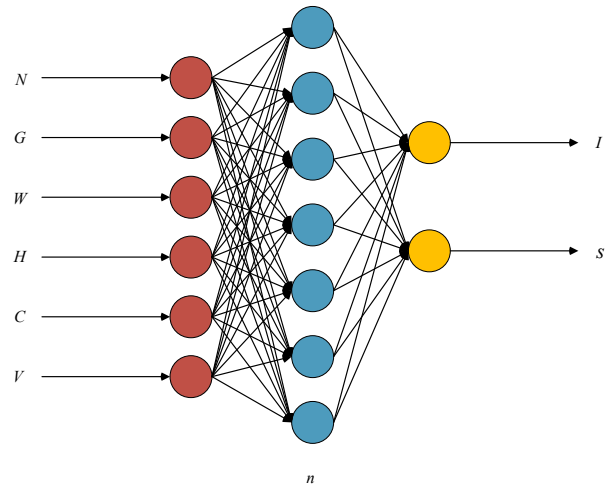
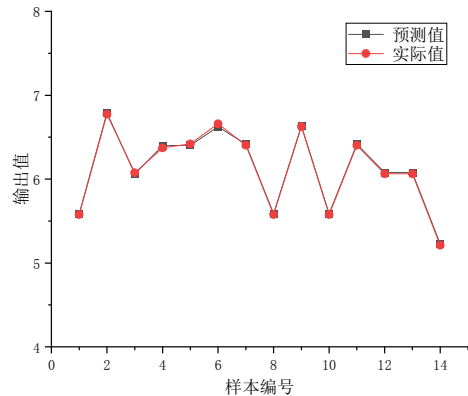


图 11 BP 神经网络模型

Fig. 11 BP neural network model

3.3 BP 神经网络模型训练与预测

文中通过编程建立了 BP 神经网络预测模型, 将 54 组样本点导入神经网络模型, 选取其中的前 40 组数据作为神经网络模型的训练集, 其他数据作为测试集用来测试模型的准确性。BP 神经网络预测模型输出值与实际值的对比见图 12。



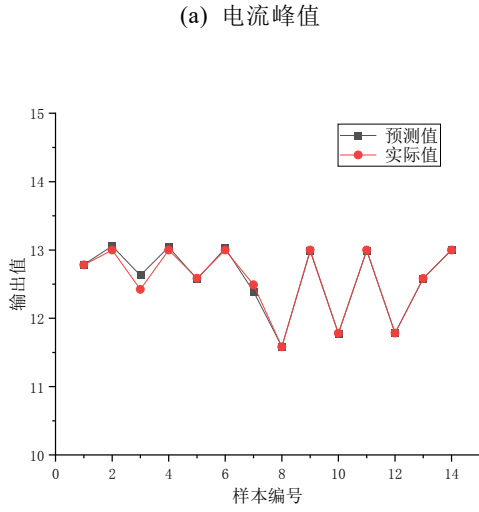


图 12 BP 神经网络模型预测与实际输出对比
Fig. 12 BP neural network model prediction vs. actual output

由图 12 可以得知：BP 神经网络模型的预测值和实际值误差极小。通过式(7)对均方根误差进行了计算，神经网络模型输出值 I 的 $RMSE$ 值为 0.017 0， s 的 $RMSE$ 值为 0.064 6，两个输出值的均方误差值都较小，证明该 BP 神经网络模型可以较好地快速斥力机构的线圈电流和 2 ms 运动位移进行预测

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y - Y')^2} \quad (7)$$

式(7)中： $RMSE$ 为样本点的均方根误差； N 为样本点的数量； Y 为 BP 神经网络模型的实际值； Y' 为 BP 神经网络模型的预测值。

4 基于 NSGA-II 电磁斥力机构参数优化

4.1 NSGA-II 优化算法

NSGA-II 是由 NSGA 算法改进而来，采用快速非支配排序、精英策略和拥挤度的方法，具有减少计算时间、扩大搜索空间等优点，确保种群个体地多样性，保证了优秀个体更大概率的保留。

NSGA-II 算法的基本流程见图 13。

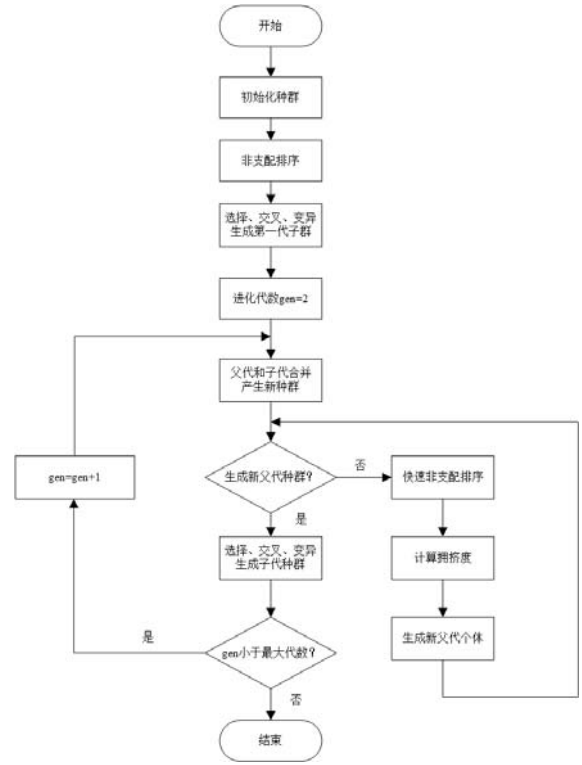


图 13 NSGA-II 算法基本流程图

Fig. 13 Basic flow chart of NSGA-II algorithm

4.2 优化设计

4.2.1 约束条件和目标函数

根据快速机械开关和 CPRM 的优化设计要求，提出相关的结构参数和控制参数的约束条件：

线圈匝数(匝)： $20 \leq x_1 \leq 40$

线圈绕组高度(mm)： $5 \leq x_2 \leq 15$

线圈绕组厚度(mm)： $1 \leq x_3 \leq 2$

斥力盘厚度(mm)： $5 \leq x_4 \leq 15$

储能电容容量(μF)： $5000 \leq x_5 \leq 10000$

充电电压(V)： $800 \leq x_6 \leq 1400$

为了满足样机开断性能的要求，选择线圈电流的幅值和 2 ms 时间下的位移作为目标函数。在分闸过程中，希望线圈电流越小越好，最大不能大于 7 000 A，而 2 ms 运动位移能够满足开距的要求，不能小于 11 mm。

4.2.2 仿真和优化结果

在 NSGA-II 算法设置 100 个个体，经过 200 次迭代后得出 Pareto 前沿面，见图 14。根据优化目标，与初始值对比后最终选取满足目标函数约束条件的一个最优解，即图 14 中黑色数据点。最优解与初始值的参数对比见表 1，仿真结果同 2.2 节中的 3 个参数，分别是电磁斥力、线圈电流、

运动速度和 2 ms 运动位移。

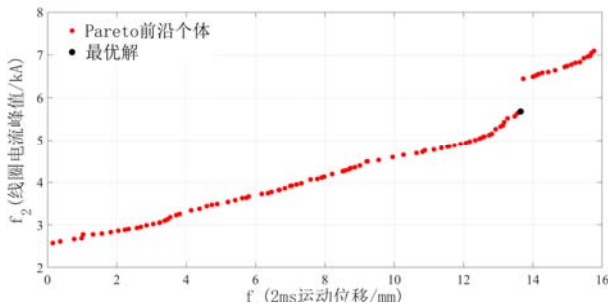


图 14 Pareto 前沿面

Fig. 14 Basic flow chart of NSGA-II algorithm

表 1 优化前后 CPRM 参数对比

Table 1 Comparison of CPRM parameters before and after optimization

项目	初始参数	优化参数	标准化参数
线圈匝数/匝	29	36	36
线圈高度/mm	10	5	5
线圈厚度/mm	2.00	1.52	1.50
斥力盘厚度/mm	10	8.87	9
储能电容容量/ μF	10 000	5 000	5 000
充电电压/V	1 000	14 00	1 400
电磁斥力峰值/kN	86.50	108.87	108.54
线圈电流峰值/kA	6.83	5.85	5.84
2ms 运动位移/mm	11.68	13.64	13.61
运动速度峰值(m/s)	8.94	9.71	9.70

根据数据分析，选取其中一组最优解作为样机实验的依据，和初始值进行对比分析。对比结果见表 1，其中变化量为优化后参数与优化前参数之差。由于实际生产中没有相应规格的元件，对优化后参数做标准化处理，作为样机实验的优化参考值。

由表 1 可知，优化后的参数改善了电磁斥力机构的动态特性，2 ms 运动位移提高了 1.96 mm，线圈电流峰值降低了 14%，达到了增大 2 ms 运动位移、减小线圈电流的多目标优化要求。同时，在满足结构参数和控制参数的约束条件下，电磁斥力机构的能量转换效率得到了提高，从而提升快速机械开关的整体性能。标准化后同样满足快速机械开关的实际要求，该标准化参数可行。

5 结论

文中通过有限元仿真软件建立了 CPRM 仿真模型，利用编程软件建立 BP 神经网络预测模型，最后使用 NSGA-II 算法进行寻优，达到了优化电磁斥力机构驱动性能的目的，得到如下结论：

1)通过有限元软件建立电磁斥力机构的二位仿真模型，并对单一变量进行仿真分析，可知线圈匝数、线圈高度、线圈宽度、斥力盘厚度、储能电容容量和充电电压这 6 个参数对机构的驱动性能有一定影响。电磁斥力机构线圈电流过大会导致冲击力过大造成元件损坏，因此要减小线圈电流，但同时需要增大分闸位移提高机构性能。

2)采用 BBD 试验设计得到 54 组样本点，结合 BP 神经网络建立电磁斥力机构的预测模型，选取上述 6 个参数作为输入，线圈电流和 2 ms 运动位移作为输出，仿真结果为：BP 神经网络预测模型误差较小，准确性可靠，能够较好进行预测。

3)为了提高电磁斥力机构的驱动性能，通过 NSGA-II 算法对上述模型进行多目标优化。仿真结果为：线圈 36 匝、高 5 mm、宽 1.52 mm、斥力盘厚度 8.87 mm、储能电容容量 5 000 μF 和充电电压 1 400 V 时，电磁斥力机构的 2 ms 运动位移提升了 0.96 mm，同时线圈电流减小了 0.98 kA，提高了机构的驱动性能。

参考文献：

- [1] DONG Enyuan, LIU Meiwei, LI Zhibing, et al. Structure optimization on high-speed electromagnetic repulsion mechanism[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 3026(532): 611-615.
- [2] 陈振生. 快速可控型真空断路器的特性及应用[J]. 电气技术, 2005(10): 35-40.
CHEN Zhensheng. Characteristics and application of fast controllable vacuum circuit breaker[J]. Electrical Engineering, 2005(10): 35-40.
- [3] 娄杰, 李庆民, 孙庆森, 等. 快速电磁推力机构的动态特性仿真与优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 23-29.
LOU Jie, LI Qingmin, SUN Qingsen, et al. Dynamic characteristics simulation and optimal design of the fast electromagnetic repulsion mechanism[J]. Proceedings

-
- of the CSEE, 2005, 25(16): 23-29.
- [4] 娄杰, 李庆民, 肖茂友, 等. 基于快速开关的串联谐振型故障限流器的仿真[J]. 高电压技术, 2006, 32(5): 80-83.
LOU Jie, LI Qingmin, XIAO Maoyou, et al. Simulation of series resonant fault current limiter based on fast switching[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(5): 80-83.
- [5] BASU S, SRIVASTAVA K D. Electromagnetic forces on a metal disk in an alternating magnetic field[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, PAS-88(8): 1281-1285.
- [6] BASU S, SRIVASTAVA K D. Analysis of a fast acting circuit breaker mechanism part II: Electrical aspects[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1972, PAS-91(3): 1203-1211.
- [7] BASU S, SRIVASTAVA K D. Analysis of a fast acting circuit breaker mechanism part I: Electrical aspects[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1972, PAS-91(3): 1197-1203.
- [8] KOYAMA K. Development of 24 kV-rated high speed circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Power and Energy, 2001, 121(9): 1187-1192.
- [9] GENJI T, NAKAMURA O, ISOZAKI M, et al. 400 V class high-speed current limiting circuit breaker for electric power system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(3): 1428-1435.
- [10] TAKEUCHI T, KOYAMA K, TSUKIMA M. Electromagnetic analysis coupled with motion for high-speed circuit breakers of eddy current repulsion using the tableau approach[J]. Electrical Engineering in Japan, 2005, 152(4): 8-16.
- [11] JUNGBLUT R, SITTIG R. Hybrid high-speed DC circuit breaker using a charge-storage diode[C]//Industrial and Commercial Power System Technical Conference.[S.l.]: IEEE, 1998: 95-99.
- [12] 何俊佳, 袁召, 经鑫, 等. 电磁斥力机构研究综述[J]. 高电压技术, 2017, 43(12): 3809-3818.
HE Junjia, YUAN Zhao, JING Xin, et al. Review of research on repulsion mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 3809-3818.
- [13] BISSAL A, J M G J. Engdahl.comparison of two ultra-fast actuator concepts[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(11): 3315-3318.
- [14] 武瑾, 庄劲武, 王晨, 等. 电磁斥力机构数学模型的简化与求解[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24): 175-182.
WU Jin, ZHUANG Jinwu, WANG Chen, et al. Simplification and solution of mathematical model of electromagnetic repulsion mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24): 175-182.
- [15] YUAN Zhao, HE Junjia, PAN Yuan, et al. Research on ultra-fast vacuum mechanical Switch driven by repulsive force actuator[J]. The Review of Scientific Instruments, 2016, 87(12): 125103.
- [16] 温伟杰, 李斌, 李博通, 等. 电磁斥力机构的参数匹配与优化设计[J]. 电工技术学报, 2018, 33(17): 4102-4112.
WEN Weijie, LI Bin, LI Botong, et al. Parameters matching and optimal design of the electromagnetic repulsion mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(17): 4102-4112.
- [17] 姜东飞, 谢文刚, 宫瑞磊. 基于有限元法的电磁斥力机构仿真分析与设计[J]. 高压电器, 2018, 54(8): 109-113.
JIANG Dongfei, XIE Wengang, GONG Ruilei. Simulation analysis and design of the electromagnetic repulsion mechanism based on finite element method[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(8): 109-113.
- [18] 武瑾, 庄劲武, 袁志方. 基于电磁耦合双线圈模型电磁斥力机构结构参数的优化分析[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(6): 205-211.
WU Jin, ZHUANG Jinwu, YUAN Zhifang. Optimization analysis of structural parameters of electromagnetic repulsion mechanism based on electromagnetically coupled double coil model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(6): 205-211.
- [19] 张修雅. 电磁斥力机构能量转换效率优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
ZHANG Xiuya. Research on Energy Conversion Efficiency Optimization of Electromagnetic Repulsion Mechanism[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [20] TSUKIMA M, TAKEUCHI T, KOYAMA K, et al.

- Development of a high-speed electromagnetic repulsion mechanism for high-voltage vacuum circuit breakers[J]. *Electrical Engineering in Japan*, 2008, 163(1): 34-40.
- [21] 宁少飞. 电磁斥力操作机构电磁效率优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- NING Shaofei. Research on electromagnetic efficiency optimization of electromagnetic repulsion mechanism[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [22] 袁 召, 喻新林, 魏晓光, 等. 线圈型电磁斥力机构综合优化[J]. *高电压技术*, 2015, 41(12): 4207-4212.
- YUAN Zhao, YU Xinlin, WEI Xiaoguang, et al. Comprehensive optimization of coil-type electromagnetic repulsion mechanism[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(12): 4207-4212.
- [23] 张 宁, 魏晓光, 高 冲, 等. 快速机械开关线圈型电磁斥力机构优化设计[J]. *电网技术*, 2018, 42(8): 2512-2518.
- ZHANG Ning, WEI Xiaoguang, GAO Chong, et al. Optimal design of coil-type electromagnetic repulsion mechanism for fast mechanical switch[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(8): 2512-2518.
- [24] 张修雅, 袁 召, 陈立学, 等. 电磁斥力机构能量转换效率分析[J]. *电网技术*, 2019, 43(5): 1849-1855.
- ZHANG Xiuya, YUAN Zhao, CHEN Lixue, et al. Study of energy conversion efficiency of electromagnetic repulsion mechanism[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(5): 1849-1855.
- [25] 程 显, 赵海洋, 葛国伟, 等. 快速斥力机构线圈盘磁场优化设计[J]. *高电压技术*, 2020, 46(8): 2643-2653.
- CHENG Xian, ZHAO Haiyang, GE Guowei, et al. Optimum design of coil disc magnetic field of rapid repulsion mechanism[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(8): 2643-2653.
- [26] 程 显, 赵海洋, 葛国伟, 等. 基于螺线管和线圈盘的新型混合式斥力机构分析[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(14): 2997-3006.
- CHENG Xian, ZHAO Haiyang, GE Guowei, et al. Analysis of a new hybrid repulsion mechanism based on solenoid and coil disk[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(14): 2997-3006.
- [27] 赵智忠, 刘 阳, 陈 海, 等. 双线圈和螺线管复合式电磁斥力机构运动特性分析[J]. *高电压技术*, 2023, 49(4): 1455-1465.
- ZHAO Zhizhong, LIU Yang, CHEN Hai, et al. Analysis of motion characteristics of double-coil and solenoid composite electromagnetic repulsion mechanism[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(4): 1455-1465.
- [28] 毛海涛, 陆恒云. 快速电磁斥力机构的有限元分析[J]. *高电压技术*, 2009, 35(6): 1420-1425.
- MAO Haitao, LU Hengyun. Finite element analysis of fast electromagnetic repulsion mechanism[J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(6): 1420-1425.
- 徐党国(1974—), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事交直流开关设备试验检测技术研究 (E-mail : xu.danguo@jibei.sgcc.com.cn)。
- 彭兆伟(1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事直流断路器试验技术研究 (E-mail : peng.zhaowei@jibei.sgcc.com.cn)。
- 黄诗洋(1996—), 男, 硕士, 工程师, 从事直流断路器检测技术研究 (E-mail : huang.shiyang@jibei.sgcc.com.cn)。
- 宋 鹏(1982—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事电力电子设备检测技术研究 (E-mail : song.p@jibei.sgcc.com.cn)。
- 李亚美(1989—), 男, 硕士, 工程师, 从事开关类设备试验技术研究 (E-mail : li.yamei.a@jibei.sgcc.com.cn)。
- 宁琳如(1994—), 女, 硕士, 工程师, 从事开关类设备检测技术研究 (E-mail : xu.danguo@jibei.sgcc.com.cn)。