

# 双向线盘式电磁斥力机构结构与磁场分析

王丽娜<sup>1</sup>, 刘阳<sup>2</sup>, 赵智忠<sup>2</sup>

(1. 河北轨道运输职业技术学院铁道机车车辆学院, 河北省 石家庄市 052160;  
2. 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室(河北工业大学), 天津市 北辰区 300401)

## Structural Design and Magnetic Field Analysis of Bidirectional Coil-plate Electromagnetic Repulsion Mechanism

WANG Lina<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>2</sup>, ZHAO Zhizhong<sup>2</sup>

(1. Railway Locomotive and Rolling Stock College, Hebei Vocational and Technical College of Rail Transportation, Shijiazhuang 052160, Hebei Province, China;  
2. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment (Hebei University of Technology), Beichen District, Tianjin 300401, China)

**ABSTRACT:** HVDC circuit breaker is a key component of a flexible HVDC transmission system. In order to solve the problems of different periodicities and low driving efficiencies of the multiple breaks of the operating mechanism in the mechanical switch, the bidirectional repulsion mechanism is designed, which may make full use of the magnetic field energy on the upper and lower sides of the driving coil. Firstly, by adopting the finite element simulation method, the bidirectional repulsive mechanism is preferably selected through the comparative analysis between the bidirectional coil-plate repulsive mechanism and the bidirectional coil-coil repulsive mechanism. Then, the geometric parameters of the bidirectional coil-plate repulsive mechanism of the repulsive mechanism are analyzed. Finally, in order to further improve the driving efficiency of the mechanism and control the bounce of the gate, the influence of different magnetic structures and parameters around the driving coil on the motion characteristics is analyzed, and the electromagnetic buffer is designed. The results show that the multi-break mechanical switch adopts a bidirectional coil-plate repulsive mechanism, which realizes the multi-break single-mechanism operation, simplifies the operating mechanism, and improves the driving efficiency of the operating mechanism.

**KEY WORDS:** fast mechanical switch; bidirectional electromagnetic repulsion mechanism; multiple breaks; soft magnetic material; electromagnetic buffers

**摘要:** 高压直流断路器是柔性高压直流输电系统的关键部

件,为了解决其机械开关中操动机构的多断口不同周期性、驱动效率等问题,设计了双向斥力机构,能够充分利用驱动线圈上下两侧的磁场能量。首先,采用有限元仿真方法,通过对双向线盘式斥力机构和双向线圈式斥力机构的对比分析,优选出双向线盘式斥力机构;然后,对双向线盘式斥力机构几何参数进行分析;最后,为了进一步提高机构的驱动效率并控制分闸弹跳,分析了驱动线圈周围不同导磁结构及参数对运动特性的影响,设计了电磁缓冲器。结果表明:多断口机械开关采用双向线盘式斥力机构,实现了多断口单机构操动,简化了操动机构,提高了操动机构的驱动效率。

**关键词:** 快速机械开关;双向电磁斥力机构;多断口;导磁材料;电磁缓冲器

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2022.2035

## 0 引言

随着分布式新能源的大规模并网发电,柔性高压直流输电作为解决新能源并网及消纳问题的关键技术得到了快速的发展<sup>[1-2]</sup>,而高压直流断路器作为柔性高压直流输电系统中的重要部件,是保障成功开断的关键。现有高压直流断路器主要是机械式直流断路器和混合式直流断路器<sup>[2]</sup>,其开断能力主要取决于快速机械开关,要求在几毫秒内达到额定开距<sup>[3-4]</sup>,为保证速动性,快速机械开关多采用多断口串联的形式<sup>[5]</sup>。因此,研制与多断口真空断路器相匹配的操动机构至关重要。

传统操动机构难以满足高压直流断路器的要求,于是基于电磁感应涡流原理的斥力机构应运而生,其具有结构简单、机械响应时间短、刚分速度大等特点<sup>[6-8]</sup>。从结构上划分,电磁斥力机构可分为线盘式、线圈式和螺线管式电磁斥力机构<sup>[7]</sup>。文

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(No.52177139);河北省省级科技计划资助项目(No.E2021202186)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (No.52177139); Science and Technology Program of Hebei (No.E2021202186).

献[9-11]分别建立了线盘式、线圈式斥力机构的二维有限元模型,分析了斥力机构各项参数如驱动线圈结构参数、斥力盘结构参数、驱动电路电容参数等对其运动特性的影响规律。结果表明线盘式和线圈式斥力机构具有斥力峰值大、启动时间短的特点,适用于短行程,小质量的驱动结构。文献[12-14]综合了线盘式、线圈式和螺线管式的优点,设计的新型电磁斥力机构具有响应速度快、适合长行程快速驱动的特点,并进行了参数优化设计及缓冲器设计相关工作。其中,线盘式斥力机构具有结构简单,易于进一步设计研究的特点。

现有对电磁斥力机构的研究,主要集中在效率优化<sup>[15-16]</sup>、结构强度分析<sup>[17-18]</sup>、多物理场耦合<sup>[19-20]</sup>等方面。电磁斥力机构通过线圈中的脉冲电流在线圈周围产生交变的磁场从而产生电磁力。因此,对机构的磁场进行优化会提高斥力机构的性能。文献[18, 21-22]分别分析了不同导磁材料,不同导磁结构参数对电磁斥力机构驱动效率、运动特性的影响。但现有研究均没有考虑线圈产生的交变磁场存在于线圈的上下两侧,只利用了一侧的交变磁场的能量。

综上所述,本文提出一种利用线圈上下两侧磁场的新型电磁斥力机构,其适用于多断口真空断路器。首先分析了双向线盘式斥力机构的基本原理,建立了其数学模型和仿真模型,通过双向线盘式斥力机构和双向线圈式斥力机构的对比分析,证明了双向线盘式电磁斥力机构优越性。然后分析了机构结构参数和驱动电路参数对运动特性的影响,确定机构的各项参数。最后对驱动线圈周围进行磁场设计,设计了电磁缓冲器并分析了不同导磁结构和结构参数对运动特性的影响。

### 1 双向线盘式斥力机构设计

双向线盘式斥力机构基本结构如图1所示,由驱动电路、驱动线圈、斥力盘1和斥力盘2组成。驱动电路由放电电容 $C$ 、大功率晶闸管 $VT$ 和续流二极管 $VD$ 组成。双向线盘式斥力机构的基本工作原理如下:当晶闸管 $VT$ 接收到触发信号时,放电电容 $C$ 向线圈放电,产生一个峰值较大且作用时间较短的电流。因此,线圈周围产生一个交变磁场,斥力盘1与斥力盘2中感应出涡流在磁场作用下产生电磁斥力,并通过连杆带动曲柄臂迅速打开或关闭开关触点。

本文设计的双向线盘式斥力机构适用于160 kV高压直流断路器,其机械开关的断开状态和导通状

态示意图2所示,可以充分利用线圈上下两侧的磁场能量。机械开关主要由真空断路器、双向线盘式斥力机构、双稳弹簧保持机构和驱动电路等组成。其中4个断路器分层布置,高、低两层各布置2个,均采用开距为20 mm的40.5 kV的快速机械开关,由双向线盘式斥力机构驱动。

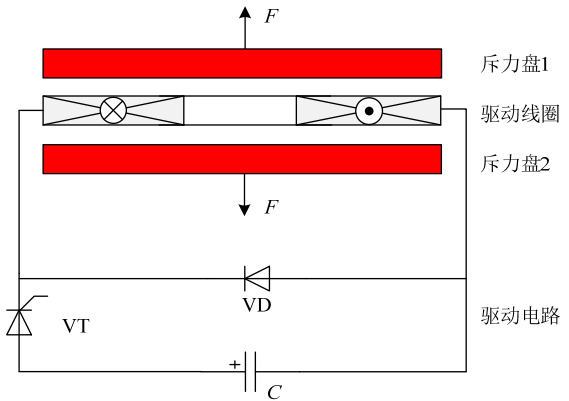


图1 双向线盘式斥力机构示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of bidirectional coil-plate repulsion mechanism

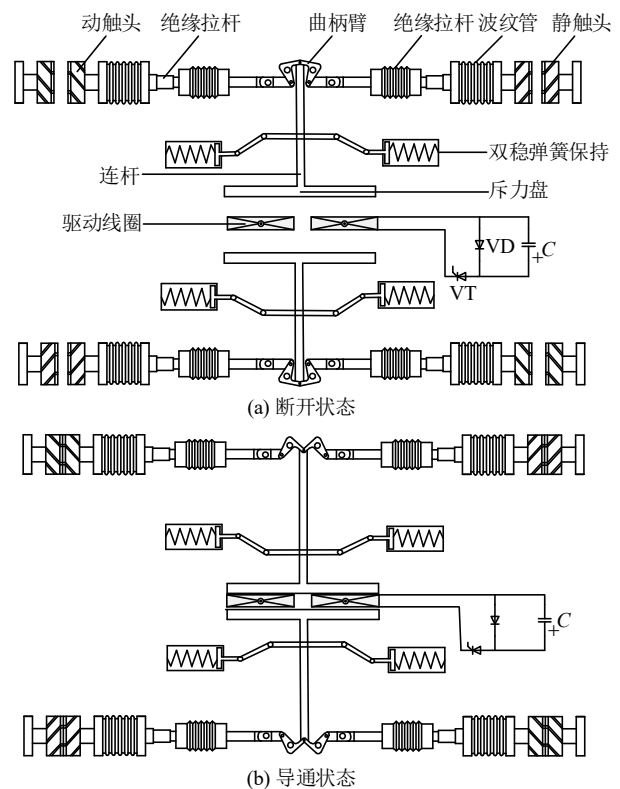


图2 快速机械开关断开与导通状态示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of fast mechanical switch disconnect and conduction state

160 kV快速真空断路器连接拓扑图如图3所示,其中 $CB$ 为机械开关, $C_0$ 为均压电容, $R_0$ 为阻尼电阻, $MOV$ 为避雷器。由于多断口真空断路器在开断过程后瞬态恢复电压分配不均匀,需要在4个断口处并联电容器使得各断口均压。

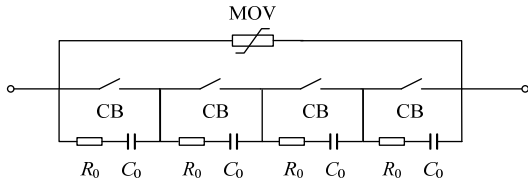


图3 160 kV快速真空断路器连接拓扑图

Fig. 3 160 kV fast vacuum circuit breaker connection topology

## 2 双向线盘式斥力机构建模

### 2.1 数学模型

双向线盘式斥力机构与传统线盘式斥力机构的原理几乎相同, 主要区别是增加了一个斥力盘, 更加充分地利用了线圈上下两侧的磁场能量。双向线盘式斥力机构的等效原理图如图4所示: 在图4中, VD为续流二极管, VT为晶闸管, 控制电路的导通,  $C$ 为驱动线圈的驱动电容,  $R_c$ 为驱动电容的寄生电阻,  $L_c$ 为驱动电容的寄生电感,  $R_1$ 、 $R_2$ 和 $R_3$ 分别为斥力盘1、2的等效电阻和驱动线圈的电阻,  $L_1$ 、 $L_2$ 和 $L_3$ 分别为斥力盘1、2的自感和驱动线圈的电感,  $M_{13}$ 、 $M_{23}$ 和 $M_{12}$ 分别为驱动线圈与斥力盘1、斥力盘2之间的互感及斥力盘1和斥力盘2的互感。

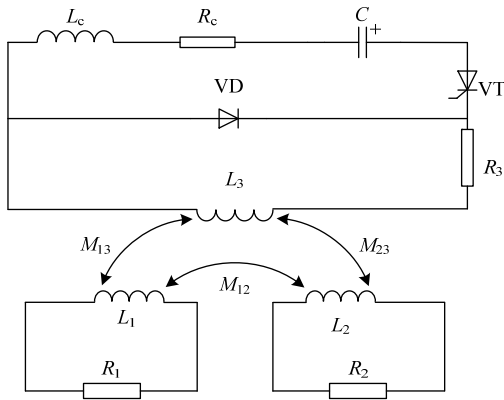


图4 等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuit diagram

根据能量守恒可得: 储能电容提供的总能量 $dE_c$ 等于磁场变化能量 $dE_m$ 、机构热损耗 $dQ$ 与机械做功 $dW$ 的和, 即

$$dE_c = dE_m + dQ + dW \quad (1)$$

其中磁场变化能量为

$$E_m = \frac{1}{2} i_1^2 L_1 + \frac{1}{2} i_2^2 L_2 + \frac{1}{2} i_3^2 L_3 + i_1 i_2 M_{12} + i_1 i_3 M_{13} + i_2 i_3 M_{23} \quad (2)$$

式中 $i_1$ 、 $i_2$ 与 $i_3$ 分别为斥力盘1、2的与驱动线圈的电流。

机构热损耗为

$$dQ = i_1^2 R_1 dt + i_2^2 R_2 dt + i_3^2 R_3 dt \quad (3)$$

储能电容提供的总能量为

$$dE_c = u_1 i_1 dt + u_2 i_2 dt + u_3 i_3 dt \quad (4)$$

式中 $u_1$ 、 $u_2$ 与 $u_3$ 分别为斥力盘1、2的与驱动线圈的电压。

励磁与上下感应回路的电压方程为

$$\begin{cases} u_1 = \frac{d\phi_1}{dt} + i_1 L_1 + i_1 R_1 \\ u_2 = \frac{d\phi_2}{dt} + i_2 L_2 + i_2 R_2 \\ u_3 = \frac{d\phi_3}{dt} + i_3 L_3 + i_3 R_3 \end{cases} \quad (5)$$

式中 $\phi_1$ 、 $\phi_2$ 与 $\phi_3$ 分别为斥力盘1、2的与驱动线圈的磁链。

励磁与上下感应电流的磁链方程为

$$\begin{cases} \phi_1 = i_1 L_1 + i_2 M_{12} + i_3 M_{13} \\ \phi_2 = i_2 L_2 + i_1 M_{12} + i_3 M_{23} \\ \phi_3 = i_3 L_3 + i_1 M_{13} + i_2 M_{23} \end{cases} \quad (6)$$

对式(2)求微分后代入(1)中, 将式(3)代入(1)中, 并将式(5)(6)代入(4)后代入(1)中, 得到了电磁斥力的表达式, 其中斥力盘1的电磁斥力表达式为

$$F_1 = \frac{i_1 i_2 dM_{12}}{dZ_1} + \frac{i_2 i_3 dM_{23}}{dZ_3} \quad (7)$$

斥力盘2的电磁斥力表达式为

$$F_2 = \frac{i_1 i_3 dM_{13}}{dZ_2} + \frac{i_2 i_3 dM_{23}}{dZ_3} \quad (8)$$

式中: $F_1$ 、 $F_2$ 为斥力盘1与斥力盘2的电磁斥力; $Z_1$ 为驱动线圈与斥力盘1的位移; $Z_2$ 为驱动线圈与斥力盘2的位移; $Z_3$ 为斥力盘1与斥力盘2之间的距离。

双向电磁斥力机构可以产生斥力盘1与斥力盘2上的两个电磁斥力, 充分利用了驱动线圈周围的磁场能量, 使机构能够应用于多断口真空断路器。

### 2.2 仿真模型

本文设计的160 kV高压直流断路器所用的快速机械开关的保持装置采取双稳弹簧保持机构, 双向线盘式斥力机构与真空灭弧室配合使用, 在分闸和合闸时, 双稳弹簧保持机构需提供1~2 kN的分合闸保持力。

双稳弹簧保持机构力学曲线如图5所示: 机构处于合闸位时, 保持机构工作在1处, 提供合闸保持力 $F_3$ ; 当机构运动到行程的一半10 mm时, 保持机构工作在2处; 机构处于分闸位时, 保持机构工作在3处, 提供分闸保持力 $-F_3$ 。因此, 根据图5可以推导出保持机构在机构分合闸时保持机构提

供的力  $F_4$  和位移  $Z$  的关系, 即

$$F_4 = -F_3 \cos\left(Z \frac{\pi}{2 \times 0.01}\right) \quad (9)$$

由于电磁斥力机构的运动过程涉及到放电、电磁感应和机械运动, 为了更好地了解双向线盘式斥力机构的运动特性, 本文采用有限元仿真软件 ANSYS Maxwell 建立双向线盘式斥力机构二维仿真模型, 考虑保持机构的保持力对双向线盘式斥力机构的影响, 在仿真模型中将保持装置的保持力添加到运动部分的负荷中。因此, 仿真模型图如图 6 所示。

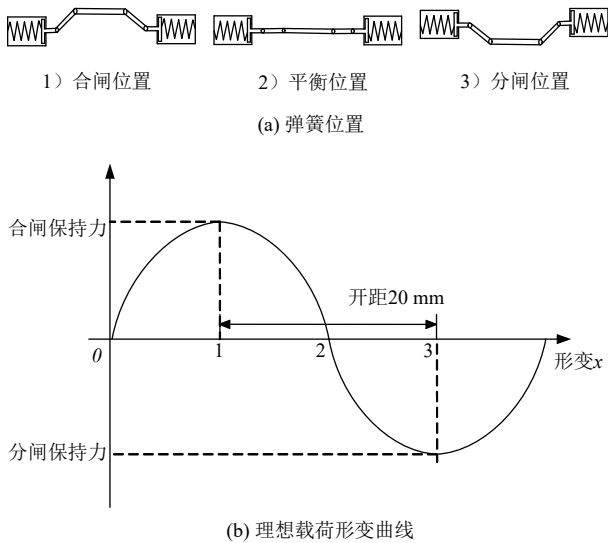


图 5 双稳弹簧保持机构力学曲线

Fig. 5 Bistable spring maintains the mechanical curve of the mechanism

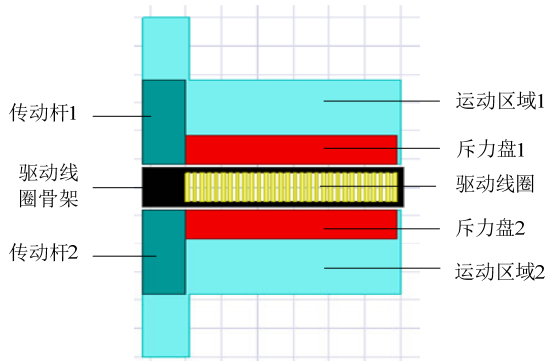


图 6 仿真模型图

Fig. 6 Simulation model diagram

### 3 双向线盘式斥力机构分析

#### 3.1 双向线盘式斥力机构优势分析

采用传统斥力机构进行驱动时, 4 个真空断路器需要 4 个操动机构同时动作。根据图 2 可知, 双向线盘式斥力机构可带动 4 个真空断路器同时动作, 既保持了开关的一致性又提高了驱动效率。双向线盘式斥力机构与传统斥力机构驱动电

路参数对比如表 1 所示。当机构的分闸末速度相同时, 双向线盘式斥力机构的驱动能量仅为传统斥力机构的驱动能量的 50.83%, 可以大幅度提高机构的驱动效率, 实现单机构操动多断口快速机械开关。

参数	双向线盘式斥力机构	传统线盘式斥力机构
峰值速度/(m/s)	9	9
驱动电路	C: 3 500 $\mu$ F, U: 1 800 V	C: 3 000 $\mu$ F, U: 1 300 V
电路个数	1	4
电容能量/J	5 670	11 154

为了比较双向线盘式斥力机构与双向线圈式斥力机构的驱动特性, 分别对两种结构进行了仿真分析。将斥力盘替换为运动线圈时, 便构成了双向线圈式斥力机构, 保持运动线圈参数与驱动线圈参数相同, 两结构参数如表 2 所示。

双向线盘式		双向线圈式	
参数	数值	参数	数值
线圈材料	铜	线圈材料	铜
驱动线圈内半径/mm	30	驱动线圈内半径/mm	30
驱动线圈外半径/mm	90	驱动线圈外半径/mm	90
驱动线圈绕线高度/mm	10	驱动线圈绕线高度/mm	10
驱动线圈绕线宽度/mm	1	驱动线圈绕线宽度/mm	1
斥力盘材料	铜	运动线圈内半径/mm	30
斥力盘厚度/mm	10	运动线圈外半径/mm	90
斥力盘内半径/mm	30	运动线圈绕线高度/mm	10
斥力盘外半径/mm	90	运动线圈绕线宽度/mm	1
线圈匝数	30	线圈匝数	30
开距/mm	20	开距/mm	20
电容容量/ $\mu$ F	3 500	电容容量/ $\mu$ F	3 500
预充电压/V	1 800	预充电压/V	1 800

双向线盘式斥力机构与双向线圈式斥力机构的仿真结果如图 7 所示, 从图 7 中可以看出, 当驱动电路参数采取: 电容容量为 3 500  $\mu$ F, 预充电压为 1 800 V 时, 双向线盘式斥力机构的上下斥力盘斥力峰值比双向线圈式斥力机构提高了 7.6%, 上下斥力盘分闸速度提高了 27.85%, 总行程时间由 3.06 ms 缩短至 2.54 ms。当电容器的能量为 5670 J 时, 双向线盘式斥力机构与双向线圈式斥力机构的最大速度分别为 9.08 m/s 和 7.11 m/s, 最大动能分别为 676 J 和 414 J, 两机构的驱动效率分别为 11.92% 和 7.31%。因此, 在综合考虑两结构的运动特性及驱动效率的情况下, 双向线盘式斥力机构拥有更好的驱动特性, 出力更好, 运动速度更快。



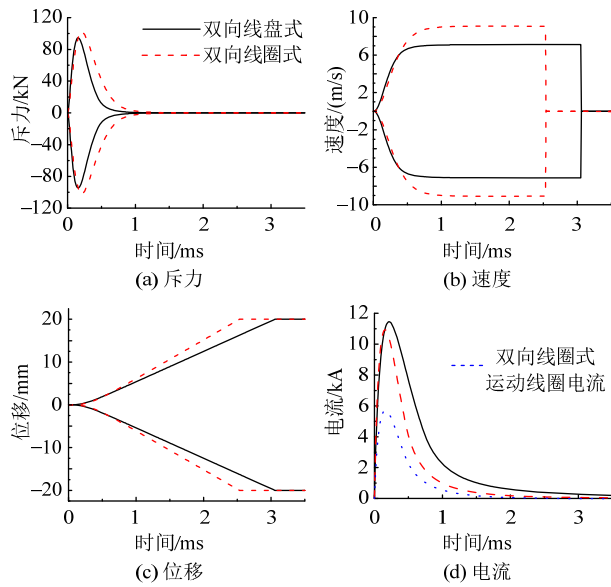


图7 双向线盘式与双向线圈式斥力机构仿真结果对比  
 Fig. 7 Comparison of simulation results of bidirectional coil-plate and bidirectional coil-coil repulsive mechanism

3.2 双向线盘式斥力机构运动特性仿真分析

3.2.1 线圈参数的影响

从结构上划分，线圈结构参数可以分为线圈绕线高度、线圈绕线宽度、线圈匝数。线圈绕线高度和宽度对斥力机构电磁斥力和位移的影响如图 8、9 所示，线圈匝数对斥力机构运动特性的影响如表 3 所示。

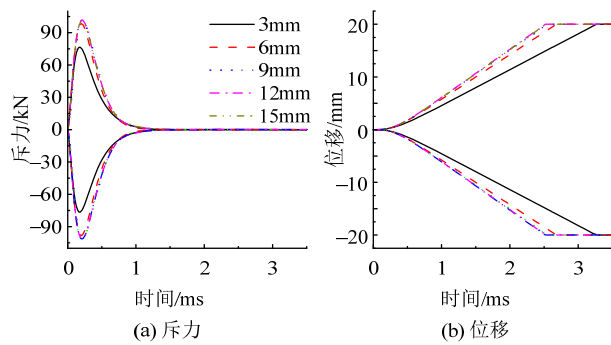


图8 线圈绕线高度对运动特性的影响  
 Fig. 8 Influence of winding height on the motion characteristics

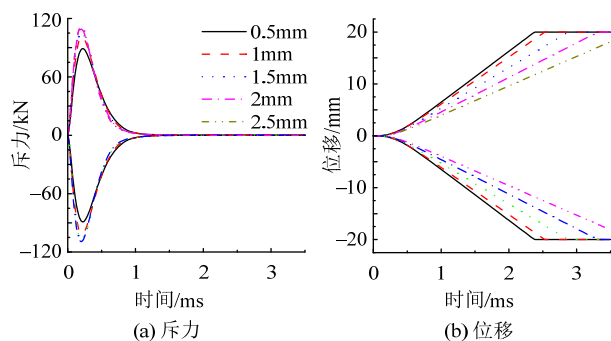


图9 线圈绕线宽度对运动特性的影响  
 Fig. 9 Influence of coil winding width on motion characteristics

表3 线圈匝数对运动特性的影响  
 Table 3 Influence of coil turns on the motion characteristics

匝数	斥力盘半径改变			斥力盘半径不变		
	斥力峰值/kN	峰值速度/(m/s)	全行程时间/ms	斥力峰值/kN	峰值速度/(m/s)	全行程时间/ms
30	101.34	9.07	2.54	101.34	9.07	2.54
32	103.51	9.30	2.50	101.14	9.62	2.43
34	104.77	9.45	2.48	98.04	9.86	2.40
36	105.89	9.58	2.47	92.88	10.36	2.36
38	106.75	9.66	2.47	86.06	10.60	2.36
40	107.39	9.70	2.47	78.99	10.75	2.39

由图 8 可知，随着线圈高度的增加，其电磁斥力先增大后保持不变，在线圈高度为 7mm 时达到极值。当线圈高度较小的时候，机构的运动特性主要取决于线圈电阻，在线圈高度较大时，主要取决于集肤效应和机构的可动部分质量的影响。由于保持斥力盘与线圈盘的尺寸相同，随着线圈宽度的增加，其斥力盘的半径也增加，电磁斥力随着线圈宽度的增加而增加，但由于运动部分质量的影响，并没有提高其运动特性。综上所述。在考虑线圈的流通能力下，线圈高度选为 13mm，宽度选为 1 mm。

在线圈匝数变化时，根据斥力盘半径是否变化可以分为两类。当斥力盘半径随线圈匝数改变时，即斥力盘尺寸与线圈盘尺寸保持相同，随着线圈匝数的增加，其电磁斥力峰值几乎不变，提高了机构峰值速度和全行程时间。当斥力盘半径保持 90 mm 不变时，增大线圈匝数，其电磁斥力峰值虽然减小，但其峰值速度却增大，全行程时间在 36 匝时达到了 2.36 ms，再次增加线圈匝数，机构的全行程时间并没有减小。综上所述，机构的线圈选取为 36 匝，斥力盘半径不变。

3.2.2 斥力盘参数的影响

从结构上划分，斥力盘结构参数可以分为斥力盘厚度、斥力盘外半径。此外斥力盘的材料对机构的运动特性也有很大影响。斥力盘厚度、斥力盘外半径及斥力盘材料对斥力机构运动特性的影响分别如图 10—12 所示。

根据图 10 可知，随着斥力盘厚度的增加，当厚度大于 6 mm 时，斥力峰值几乎不变化，主要是因为斥力盘上的感应电流存在集肤效应，感应电流主要存在于靠近线圈一侧的 4 mm 深处。此外，由于厚度的增加导致运动部分质量的增加，机构的峰值速度减小，全行程时间增加。

根据 3.2.1 小节可知，仿真模型的线圈盘匝数选为 36，如图 11 所示，斥力盘外半径由 80 mm 增加到 100 mm，电磁斥力峰值逐渐增大，当斥力盘

外半径大于线圈盘外径时，其斥力峰值增加幅度较小。随着半径从 80 mm 增加到 85 mm，线圈磁场没有得到充分的利用，机构的全行程时间由 2.42 ms 缩短至 2.37 ms。当半径从 86 mm 增加到 92 mm，此时斥力盘中的磁场已经饱和，全行程时间保持 2.36ms 不变。当半径从 93 mm 增加到 100 mm，此时由于半径的增加，机构运动部分质量增加，导致全行程时间由 2.36 ms 延长至 2.45 ms。因此，在考虑斥力盘的机械强度的情况下，斥力盘厚度选为 8 mm，外半径选为 90 mm。

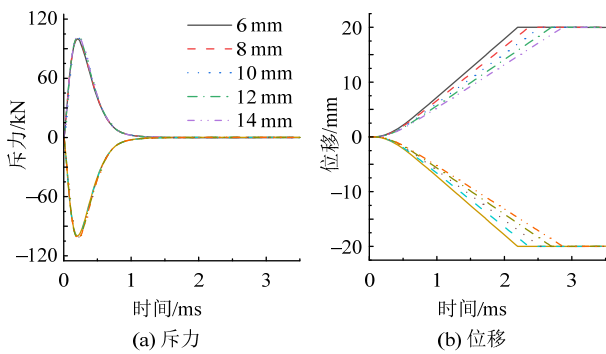


图 10 斥力盘厚度对运动特性的影响

Fig. 10 Influence of repulsion disc thickness on motion characteristics

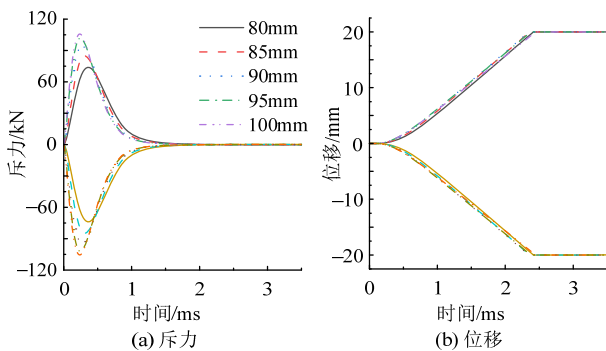


图 11 斥力盘半径对运动特性的影响

Fig. 11 Influence of repulsion disc radius on motion Characteristics

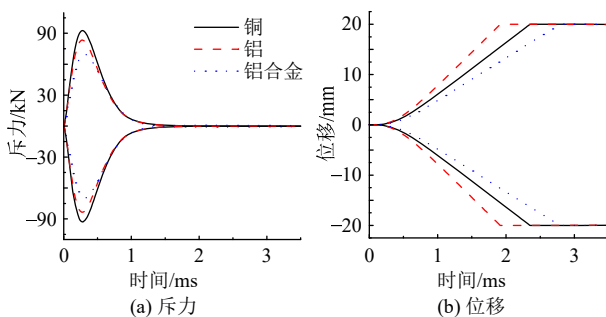


图 12 斥力盘材料对运动特性的影响

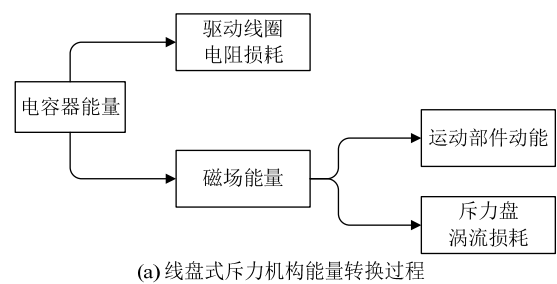
Fig. 12 Influence of repulsion on material motion characteristics

根据图 12 可知，当斥力盘材料分别选取为铜、铝和铝合金时，其电磁斥力峰值主要受材料的电阻率影响，电磁斥力峰值越大；其全行程时间受材料

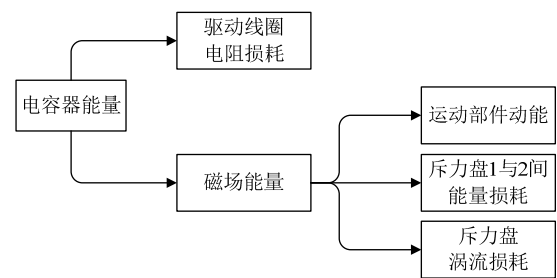
的密度的影响，密度越小，全行程时间越短。斥力机构斥力盘材料的选取需要综合考虑斥力机构的运动特性和斥力盘的屈服强度等要素的综合影响，因此斥力盘材料选取为铜。

### 3.2.3 斥力盘 1 与 2 之间吸力的影响

当驱动电路放电后，斥力机构的能量转换过程如图 13 所示，电容器能量分别转换为电路放电过程中驱动线圈的电阻损耗和磁场能量；磁场能量转换为运动部件的动能和斥力盘的涡流损耗；相较于线盘式斥力机构的能量转换，双向线盘式两个斥力盘之间的电磁吸力会造成机构能量的损耗，降低斥力机构的驱动效率。



(a) 线盘式斥力机构能量转换过程



(b) 双向线盘式斥力机构能量转换过程

图 13 斥力机构能量转换过程  
Fig. 13 Energy conversion process of repulsion mechanism

通过仿真分析得出，受电磁吸力的影响，在驱动电路参数相同时，线盘式斥力机构的最大动能为 1031 J，驱动效率为 18.18%，而双向线盘式斥力机构的最大动能为 867 J，驱动效率为 15.34%，斥力机构驱动效率降低了 2.84%。

### 3.2.4 驱动电路参数的影响

电容量与预充电电压对斥力机构运动特性的影响如表 4、5 所示。增大电容量与预充电电压导致线圈电流峰值增大，使机构的斥力峰值和前 10 mm 行程的平均速度明显增加。但增大电容量对运动特性的影响较小，增大预充电电压会显著提高机构的运动特性。电压每增加 200 V，前 10 mm 行程内机构的平均分闸速度提高约 1 m/s。综上所述，在考虑斥力机构运动特性、机械特性与电容体积的前提下，驱动电容选为 3 500  $\mu$ F，预充电电压选为 1 800 V。

根据以上分析，可得双向线盘式斥力机构的各项参数如表 6 所示，通过单一变量法分析后，各项参数得到优化，提升了斥力机构的运动特性和驱动效率。

**表 4 电容容量对斥力机构动态性能影响**  
**Table 4 Influence of capacitance on dynamic performance of repulsion mechanism**

电容容量/ $\mu\text{F}$	斥力峰值/ $\text{kN}$	电流峰值/ $\text{kA}$	全行程时间/ $\text{ms}$	前 10mm	
				所用时间/ $\text{ms}$	平均速度/ $\text{m/s}$
2 400	86.36	10.54	3.45	1.86	5.38
3 000	95.25	11.08	2.86	1.58	6.33
3 600	102.34	11.50	2.48	1.41	7.09
4 200	108.23	11.85	2.23	1.30	7.69
4 800	113.25	12.14	2.05	1.22	8.20

**表 5 预充电压对斥力机构动态性能影响**  
**Table 5 Influence of precharge voltage on dynamic performance of repulsion mechanism**

预充电压/ $\text{V}$	斥力峰值/ $\text{kN}$	电流峰值/ $\text{kA}$	全行程时间/ $\text{ms}$	前 10mm	
				所用时间/ $\text{ms}$	平均速度/ $\text{m/s}$
1 400	63.16	9.03	3.85	2.09	4.78
1 600	81.26	10.25	3.07	1.70	5.88
1 800	101.23	11.44	2.54	1.44	6.94
2 000	122.90	12.61	2.16	1.25	8.00

**表 6 双向线盘式斥力机构参数**  
**Table 6 Parameters of bidirectional coil-plate repulsion mechanism**

参数	数值	参数	数值
线圈材料	铜	斥力盘外半径/ $\text{mm}$	90
驱动线圈内半径/ $\text{mm}$	30	斥力盘厚度/ $\text{mm}$	8
驱动线圈外半径/ $\text{mm}$	102	初始间隙/ $\text{mm}$	1
驱动线圈绕线高度/ $\text{mm}$	13	行程/ $\text{mm}$	20
驱动线圈绕线宽度/ $\text{mm}$	1	可动部分质量/ $\text{kg}$	8.2
线圈匝数	36	电容量/ $\mu\text{F}$	3 500
斥力盘内半径/ $\text{mm}$	30	预充电压/ $\text{V}$	1 800

### 4 改进措施

为了提高机构的运动特性，可在机构中加装导磁材料，进一步利用线圈周围的磁场能量。根据文献[21-22]可知机构中所加导磁材料应选相对磁导率高，电导率低材料。因此本文选取电工纯铁为导磁材料，对比了导磁材料结构、导磁材料厚度对机构运动特性的影响。此外，为了防止在分合闸过程中机构发生机械碰撞，本文设计了电磁缓冲器，并对其进行磁路设计，能够有效降低机构的末速度和分闸弹跳。

#### 4.1 导磁材料的影响

##### 4.1.1 导磁材料结构影响

为了进一步提高驱动线圈与上下斥力盘之间的磁场利用率，本文提出了 2 种不同的导磁结构，

导磁材料位置示意图如图 14 所示。添加的导磁材料均在线圈盘周围，没有增加机构的运动部分质量。根据第 3 节可知，机构上下斥力盘的各项运动参数相同，本节进行分析时，只展示一侧的各项运动参数。

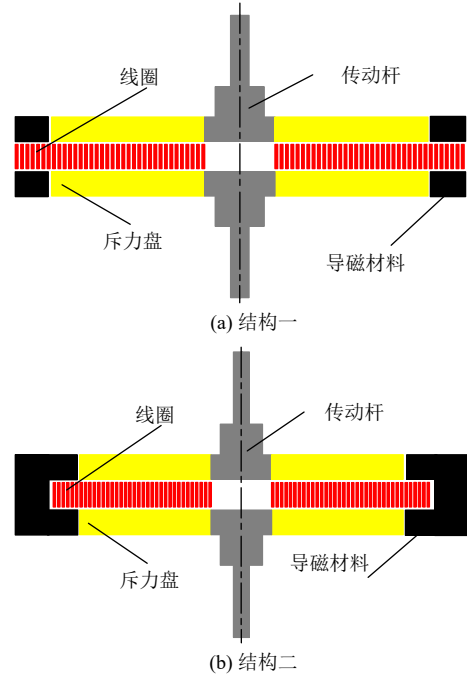


图 14 导磁材料位置示意图

Fig. 14 Schematic diagram of the location of the magnetic material

不同导磁结构对斥力机构运动特性的影响如图 15 所示。在 0.5 ms 时刻，改进前后磁感应强度示意图如图 16 所示。根据图 15 和 16 可知，添加导磁材料后，电容放电电流减小，线圈周围的磁感应强度明显提高，进一步提高了磁场能量的利用

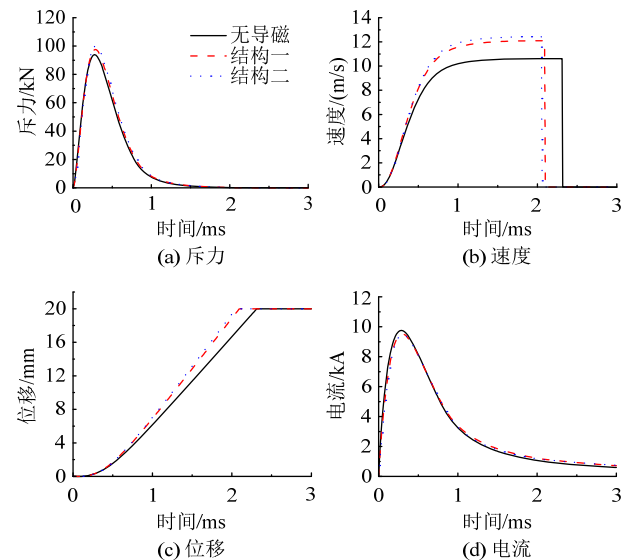


图 15 导磁材料不同位置时的运动特性

Fig. 15 Motion characteristics of the magnetic material at different positions

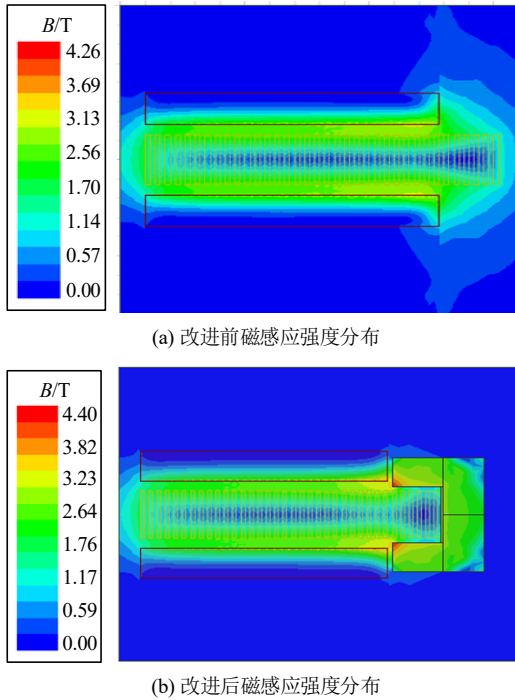


图 16 改进前后磁感应强度示意图

Fig. 16 Improved schematic of the front and rear magnetic induction intensity

率。因此，机构的斥力峰值与斥力峰值作用时间反而有所提升。在添加导磁材料后，结构二具有最优的运动特性，峰值速度 12.64 m/s，全行程时间 2.04 ms。因此，在考虑导磁材料制造难度与成本的情况下，导磁材料结构选取为结构二。

#### 4.1.2 导磁材料厚度影响

添加导磁材料后，机构的运动特性有所提高。导磁材料的结构能够有效提高驱动线圈与两侧斥力盘的磁感应强度。为了进一步提高机构的运动特性，在保持其他参数不变的情况下，分析了线圈外侧磁回路有效高度  $H$  和线圈外侧磁回路有效厚度  $T$  对机构运动特性的影响。导磁材料结构二示意图如图 17 所示。

线圈外侧磁回路有效厚度与高度对运动特性的影响如图 18、19 所示。当  $0\text{ mm} < T < 11\text{ mm}$  时，磁场没有饱和，此时增加有效厚度，机构的峰值速度与全行程时间明显提升。全行程时间由 2.08 ms 缩短至 2.02 ms。当  $12\text{ mm} < T$  时，磁场饱和，此时增加有效厚度，机构的磁感应强度不会再增加，各项运动参数也几乎不变。当  $0\text{ mm} < H < 14\text{ mm}$  时，随着有效高度的增加，电磁斥力峰值逐渐增大，全行程时间由 2.14 mm 缩短至 1.98 ms，机构的驱动效率获得了明显的提升。当  $15\text{ mm} < H$  时，由于斥力机构的行程为 20 mm，机构运动到后期，驱动线圈与两侧的斥力盘的磁场耦合能力减弱，再次增加有效高度，不会提升机构的各项运动参数。

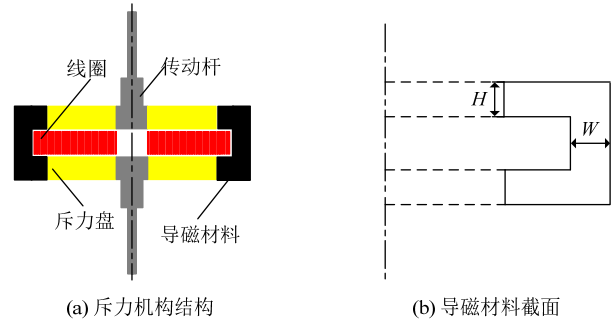


图 17 斥力机构导磁材料示意图

Fig. 17 Schematic diagram of the magnetic conductive material of the repulsive mechanism

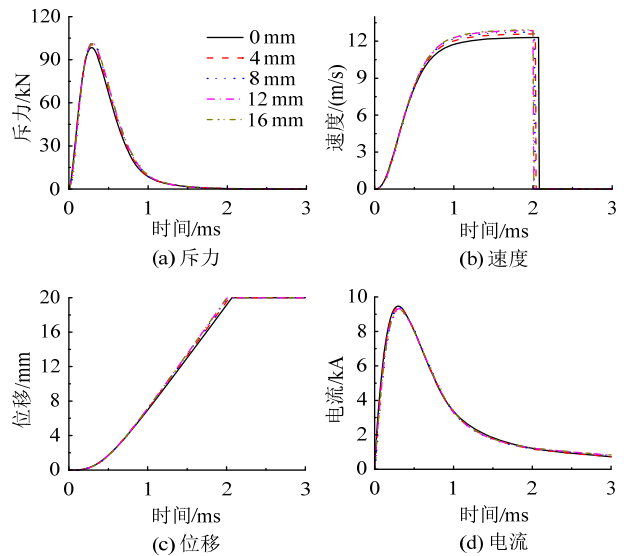


图 18 有效厚度对运动特性的影响

Fig. 18 Influence of effective thickness on motion characteristics

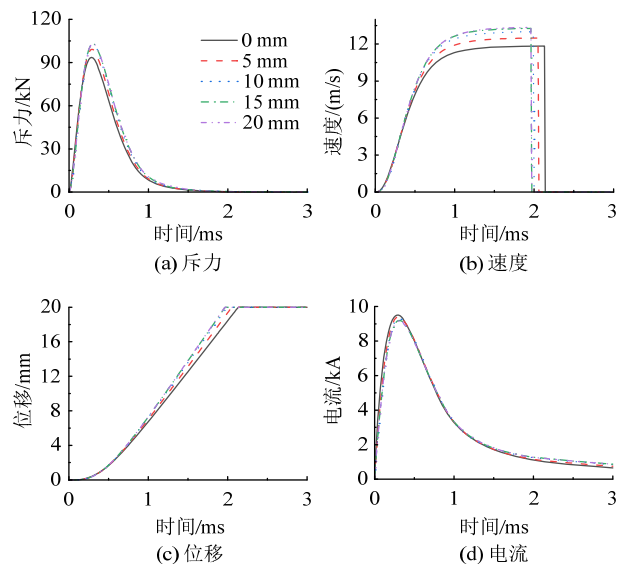


图 19 有效高度对运动特性的影响

Fig. 19 Influence of effective height on motion characteristics

综上所述，机构的导磁材料应选取结构二，线圈外侧磁回路有效高度选为 15 mm，线圈外侧磁回路有效厚度选为 12 mm。



## 4.2 电磁缓冲器

高压直流断路器往往要求在几毫秒内分闸，其分闸速度快，对开关的缓冲器设计提出了较高的要求，缓冲器需在短时间内吸收机构的动能。在设计缓冲器后，对 4.1 节提出的导磁结构进行改进，设计了如图 20 所示的导磁外壳，既提高了缓冲线圈的磁场能量利用率，又对斥力机构提供了保护和固定，提高了其稳定性。

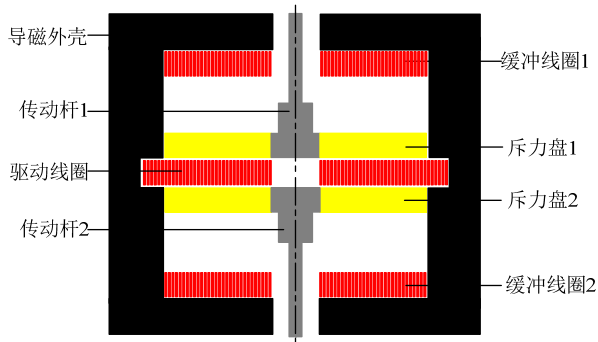


图 20 双向线盘式斥力机构导磁外壳示意图

Fig. 20 Schematic diagram of the BCPRM magnetic conductive housing

此外根据 3.2 和 3.1 节可知，影响电磁斥力机构的主要参数为驱动电路中预充电压与电容容量。在斥力盘运动到 15 mm 时缓冲投入，缓冲驱动电路初始参数为：电容容量为 3 500  $\mu\text{F}$ ，预充电压为 1 800 V。采用单一变量法对缓冲驱动电路进行分析，其驱动电路参数对缓冲器性能影响如表 7 所示。当电容容量与预充电压参数过大时，缓冲斥力过大，使机构反向运动，导致分闸失败。因此在综合考虑两参数的影响下，选取为缓冲驱动电路电容容量 2 000  $\mu\text{F}$ ，缓冲驱动电路预充电压 1 800 V。

表 7 缓冲驱动电路参数对缓冲器性能影响  
Table 7 Influence of buffer drive circuit parameters on buffer performance

缓冲驱动电路 预充电压/V	全行程 时间/ms	末速度/ (m/s)	缓冲驱动电路 电容容量/ $\mu\text{F}$	全行程 时间/ms	末速度/ (m/s)
1 000	2.20	9.75	2 000	2.27	4.91
1 200	2.21	8.77	2 500	2.28	4.01
1 400	2.22	7.52	3 000	2.30	2.90
1 600	2.25	5.50	3 500	2.33	1.49
1 800	2.33	1.49	4 000		分闸失败
2 000		分闸失败	4 500		分闸失败

## 5 结论

本文以双向线盘式斥力机构为研究对象，充分利用了线圈上下两侧的磁场能量。研究了双向斥力型线盘式斥力机构的各项结构参数对机构运动特性的影响；提出了在静线圈周围添加导磁材料；通过仿真分析了双向线盘式斥力机构的驱动能力。主

要结论如下。

1) 通过对线圈、斥力盘的结构参数分析可知：随着线圈参数的增大，机构的运动特性先增大后减小，应在保证线圈通流能力下选择最优的线圈参数；斥力盘参数在考虑感应电流集肤深度及机械强度的前提下应使运动部分质量最小。

2) 导磁材料添加在静线圈外侧时，能够有效利用线圈产生的磁场能量，提高斥力机构的驱动效率。因此，导磁外壳既可以机构的磁场能量利用率，又可起到保护和固定机构的作用。

3) 驱动电路参数为电容容量 3 500  $\mu\text{F}$ 、电压 1 800 V 时，斥力机构能在 1.99 ms 内运动 20 mm，当电磁缓冲器参数为电容容量 2 000  $\mu\text{F}$ 、电压 1 800 V 时，机构全行程时间 2.27 ms，末速度 4.91 m/s。其应用于 160 kV 高压直流断路器时，可实现单机构操动。

4) 后续可以考虑对机构进行电、磁、力、热等多物理场耦合，搭建双向线盘式斥力机构样机并进行相关实验。

## 参考文献

- [1] 康重庆, 杜尔顺, 郭鸿业, 等. 新型电力系统的六要素分析[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1741-1750.  
KANG Chongqing, DU Ershun, GUO Hongye, et al. Primary exploration of six essential factors in new power system[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1741-1750(in Chinese).
- [2] Chen W, Zeng R, He J, et al. Development and prospect of direct-current circuit breaker in China[J]. High Voltage, 2021, 6(1): 1-15.
- [3] 刘彬, 于海波, 许元震, 等. 面向工程应用的高效率电磁斥力机构设计及试验[J]. 高电压技术, 2020, 46(12): 4283-4290.  
LIU Bin, YU Haibo, XU Yuanzhen, et al. Design and experiment of high efficiency electromagnetic repulsion mechanism for engineering application[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4283-4290(in Chinese).
- [4] 何俊佳. 高压直流断路器关键技术研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2353-2361.  
HE Junji. Research on Key Technologies of HVDC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2353-2361(in Chinese).
- [5] 吕鹏飞. 交直流混联电网下直流输电系统运行面临的挑战及对策[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 492-502.  
LÜ Pengfei. Research on HVDC operation characteristics under influence of hybrid AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 492-502(in Chinese).
- [6] 田宇, 王利, 田阳, 等. 直流断路器用快速开关多场联合仿真优化方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 55-62.  
TIAN Yu, WANG Li, TIAN Yang, et al. Multi-field joint simulation optimization method for fast switching for DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 55-62(in Chinese).
- [7] 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 electromagnetic repulsion mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 3809-3818(in Chinese).

- [8] 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(in Chinese).
- [9] 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 electromagnetic repulsion mechanism for fast mechanical switch[J]. Power System Technology, 2018, 42 (8): 2512-2518(in Chinese).
- [10] 孟洲恬, 淡淑恒. 基于有限元和神经网络方法的电磁斥力机构结构优化设计[J]. 高压电器, 2021, 7(6): 196-202.  
MENG Zhoutian, TAN Shuheng. Optimization Design of Electromagnetic Repulsion Mechanism Structure Based on Finite Element and Neural Network Methods[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 7(6): 196-202(in Chinese).
- [11] JIANG W LIU X, CHEN H, et al. Analyses of Electromagnetic Buffer Characteristics of Operating Mechanism for Fast Vacuum Transfer Switch[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(8): 1-4.
- [12] WANG K, ZHENG X, ZOU L, et al. A New Type Electromagnetic Repulsive Mechanism for 40.5 kV Vacuum Circuit Breaker[C]//2019 5th International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology (ICEPE-ST). IEEE, 2019: 645-648.
- [13] 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(in Chinese).
- [14] 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(in Chinese).
- [15] 胡鑫凯, 庄劲武, 董润鹏, 等. 电磁斥力机构样机效率优化[J]. 高电压技术, 2020, 46(3): 997-1004.  
HU Xinkai, ZHUANG Jinwu, DONG Runpeng, et al. Efficiency optimization of electromagnetic repulsion mechanism prototype[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46 (3): 997-1004(in Chinese).
- [16] 黎嘉浩, 庄劲武, 武瑾, 等. 微型高速电磁斥力机构设计[J]. 高电压技术, 2021, 47(12): 4349-4356.  
LI Jiahao, ZHUANG Jinwu, WU Jin, et al. Design of miniature high-speed electromagnetic repulsion mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4349-4356(in Chinese).
- [17] Vilchis-Rodriguez D S, Shuttleworth R, Smith A C, et al. Design, construction, and test of a lightweight thomson coil actuator for medium-voltage vacuum switch operation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(3): 1542-1552.
- [18] 王汝凡, 王德全, 邱军, 等. 快速开关多场协同仿真下的应力与形变研究[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2913-2923.  
WANG Rufan, WANG Dequan, QIU Jun, et al. Stress and deformation study under multi-field collaborative simulation of fast switching[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2913-2923(in Chinese).
- [19] Guan C, Yao X, Ding J, et al. Study on dynamic characteristics of a repulsion mechanism in superconducting fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(8): 1-5.
- [20] 郭兴宇, 梁德世, 黄智慧, 等. 基于多场耦合的电磁斥力机构运动参数研究[J]. 高电压技术, 2022, 48(2): 626-635.  
GUO Xingyu, LIANG Deshi, HUANG Zhizhi, et al. Study on motion parameters of electromagnetic repulsion mechanism based on multi-field coupling[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 626-635(in Chinese).
- [21] 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. Optimization design of magnetic field of coil disc for fast repulsion mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2643-2653(in Chinese).
- [22] 黎小林, 朱哲晓, 陈名, 等. 导磁材料对电磁斥力机构出力效率的影响[J]. 高电压技术, 2020, 46(2): 586-593.  
LI Xiaolin, ZHU Zhexiao, CHEN Ming, et al. Effect of magnetic conductive materials on output efficiency of electromagnetic repulsion mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 586-593(in Chinese).



王丽娜

在线出版日期: 2023-03-17。

收稿日期: 2022-10-12。

作者简介:

王丽娜(1987), 女, 讲师, 研究方向为开关电器、智能电器, E-mail: wanglina3005@126.com;

刘阳(1996), 通信作者, 男, 硕士研究生, 研究方向为直流断路器, E-mail: 956344048@qq.com;

赵智忠(1965), 男, 教授, 博士, 研究方向为智能电器、传感器技术。

(编辑 李健一)