第 51 卷 第 6 期：3076-3088 高电压技术 Vol.51, No.6: 3076-3088
2025 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2025
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20241351

基于复合斥力盘的电磁斥力机构运动特性

翟晨乐[1]，王亦堃[1]，马　星[1]，杨　飞[1]，孙晋茹[1]，官玮平[2]
（1. 西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室，西安 710049;
2. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院，合肥 230000）

摘　要：电磁斥力机构(electromagnetic repulsion mechanism，ERM)作为断路器中快速斥力开关的重要组成部分，其动作速度对短路电流的顺利开断具有重要影响。为了进一步提高电磁斥力机构的分闸速度，结合铜高电导率和镁合金低密度的特点提出了一种应用“铜-镁合金”复合斥力盘的电磁斥力机构。基于有限元耦合场仿真分析了复合斥力盘厚度、内外径等参数对运动特性的影响，对复合斥力盘结构进行了优化。之后对比分析了“铜-镁锆合金”复合斥力盘、镁锆合金斥力盘和铝合金斥力盘的关键运动指标，发现复合电磁斥力机构的动作速度、驱动效率相较于普通金属斥力机构均显著上升。最后搭建样机，试验对比了普通合金斥力盘和复合斥力盘的运动曲线。试验结果表明“铜-镁合金”复合斥力盘相较于铝合金斥力盘运动特性提升明显。当电容预充电电压为 750 V 时，“铜-镁锆合金”复合斥力盘相较于普通的铝合金斥力盘在前 1.5 ms 内平均速度提升了 14%。

关键词：快速斥力开关；电磁斥力机构；“铜-镁合金”复合斥力盘；运动特性；多物理场耦合仿真

Motion Characteristics of Electromagnetic Repulsion Mechanism Based on Composite Repulsion Disk

ZHAI Chenle[1], WANG Yikun[1], MA Xing[1], YANG Fei[1], SUN Jinru[1], GUAN Weiping[2]
(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi’an Jiaotong University, Xi’an 710049, China;
2. Electric Power Research Institute of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230000, China)

Abstract：Electromagnetic repulsion mechanism(ERM) is an important part of a fast repulsion switch. Its action speed has a great influence on the breaking of short-circuit current. To improve the opening speed of the electromagnetic repulsion mechanism, an electromagnetic repulsion mechanism using “copper-magnesium alloy” composite repulsion disk was proposed. The repulsive disk combines the high conductivity of copper and the low density of magnesium alloy. Based on the finite element coupling field simulation, the influences of the thickness, inner and outer diameters of the composite repulsive disk on the motion characteristics were analyzed. The structure of the composite repulsion disk was optimized. Then the key performance indexes of “copper-magnesium alloy” composite repulsive disk, magnesium-zirconium alloy repulsive disk and aluminum alloy repulsive disk were analyzed by simulation calculation. It is verified that the motion characteristics of the composite repulsive disk are significantly improved compared with the ordinary repulsive disk. Finally, a prototype is built. The motion characteristics of the ordinary repulsive disk and the composite repulsive disk are compared. The experimental results show that the motion characteristics of the “copper-magnesium alloy” composite repulsive disk are significantly improved compared with the ordinary aluminum alloy repulsive disk. The average speed of “copper-magnesium alloy” composite repulsive disk is 14% higher than that of the aluminum alloy repulsive disk in 1.5 ms, when the capacitor voltage is 750 V.

Key words：fast repulsion switch; electromagnetic repulsion mechanism; “copper-magnesium alloy” composite repulsive disk; motion characteristic; multi-physics coupling simulation

基金资助项目：国家重点研发计划(2022YFB2403600)；国家自然科学基金(U22B20121)；陕西省“三秦学者”创新团队项目(西安交通大学先进直流电力装备关键技术及其产业化示范创新团队)(编号略)；陕西省资助项目(2022KXJ-142)。
Project supported by National Key R&D Program of China(2022YFB2403600), National Natural Science Foundation of China(U22B20121), Shaanxi Province “Sanqin Scholars” Innovation Team Project (Demonstration Innovation Team of XJTU for the Key Technology of Advanced DC Power Equipment and Its Industrialization), Shaanxi Province Project(2022KXJ-142).

0　引言

近年来，直流电力系统因其输送容量大、线路损耗小、供电质量高、便于接入等优点受到了广泛的关注与发展[1-4]。然而，直流系统发生短路故障时，短路电流峰值高、上升速度快，故障电流上升率可达 15 kA/ms，部分特殊系统可以达到 30 kA/ms[5]。因此要求断路器在极短的时间内开断短路电流。目前直流断路器的研究主要集中在机械式直流断路器和混合式直流断路器[6-7]。这 2 种直流断路器都要求其中的机械开关在 1.5 ms 内至少达到有效耐压开距，具备 3~5 ms 内完成分闸操作的能力[8]。电磁斥力机构采用电磁感应涡流原理，具有励磁时间短、反应速度快等优点，能够实现短时快速运动[9-12]，在高压直流领域拥有较好的应用前景。优化电磁斥力机构运动特性和驱动效率，有利于提升断路器开断能力，减少生产和运维成本。斥力盘作为电磁斥力机构的核心部件，担负着为整体机构提供动能、驱动触头快速分离的作用[13-15]。优化斥力盘材料及结构能够有效提升电磁斥力机构运动特性。

目前计算电磁斥力机构运动特性研究主要通过有限元仿真方法开展。文献[16]利用有限元仿真软件在二维瞬态场中搭建了电磁斥力机构的轴对称模型，通过改变机构的结构参数和驱动回路参数研究其主要参数对分闸运动特性的影响，最后实现分闸时间为 0.5 ms、满行程时间为 1.6 ms。文献[17]先利用有限元仿真软件对不同参数情况下电磁斥力机构的运动特性进行计算，又把电路的驱动效率当作目标函数，利用粒子群优化算法优化了机构的结构参数。文献[18]重点研究了励磁线圈和金属盘之间的耦合系数，并将耦合系数作为主要优化目标，在 MAPLE 软件上对电磁斥力机构运动特性进行编程计算。最后得到了励磁线圈和金属盘的结构参数与它们之间耦合系数的关系。文献[19]利用神经网络算法，将电流峰值、电磁斥力峰值、2 ms 时刻位移值和速度值作为目标函数，拟合了斥力机构各结构参数与目标函数的关系，从而对斥力机构的结构进行了优化设计，最终机构的分闸时间达到 1.63 ms，平均分闸速度为 6.13 m/s。文献[20]分析了磁场分布对电磁斥力机构的影响，指出空间漏磁较大是造成其效率低下的主要原因。最后，为了提高电磁斥力机构的驱动效率，在原有空心线圈结构基础上，计算并分析了添加不同导磁材料对机构运动特性及出力效率的影响，以减小空间漏磁。

电磁斥力机构正朝着高速化和轻型化的方向发展，这也意味着电磁斥力机构在分合闸时受到的冲击力逐步升高，如果斥力盘内部应力过大，斥力盘会发生形变和断裂，因此对电磁斥力机构各零部件进行结构强度设计和优化具有重要意义。文献[21]重点研究了斥力盘在分闸运动中的振动现象，提出增加斥力盘的厚度和内径来降低斥力盘内部的应力分布的优化方法。文献[22]通过有限元仿真，得出系统刚度和振动频率与斥力盘厚度、连杆半径以及斥力盘与连杆连接处的倒角之间呈正相关的关系，发现增大斥力机构的系统刚度和振动频率可以显著减小斥力机构各部件的应力峰值。

结合上述研究结果可知，为提升电磁斥力机构运动速度，需要采用高导电率、低密度、高强度的斥力盘，现有材料难以同时满足上述 3 个特点。为了兼顾斥力盘的运动速率和结构强度，文献[23]基于 Von Mises 屈服准则设计了一种“铝-钢”新型复合式斥力盘，发现使用了复合斥力盘后斥力机构的效率从 1.75%提升至 3.46%。文献[24]基于计算和仿真分析提出了一种“铜-铝”新型复合式斥力盘。该研究得出斥力盘内部的涡流损耗和励磁线圈内部的电阻损耗是制约电磁斥力机构驱动效率进一步提高的主要因素。文献[25-26]基于微型电磁斥力机构设计了一种“铜-铝”新型复合斥力盘。通过仿真研究得出采用内圈厚、外圈薄的结构设计能在一定程度上减轻斥力盘内部的应力分布同时不降低机构效率的结论，但是该高速机构带动负载过小。

综上所述，复合斥力盘可有效提高电磁斥力机构的运动速度和驱动效率，但是目前的研究主要针对结构和材料较为单一的“铝-钢”或“铜-铝”斥力盘所开展，针对新材料和复合结构的研究还比较少。因此，本文结合铜材料电导率高和镁合金材料密度小的特点，设计并优化了一种“铜-镁合金”复合斥力盘，提高了电磁斥力机构的分闸运动特性，最后通过试验验证了设计的有效性。

1　仿真及试验平台

1.1　电磁斥力机构基本结构

快速斥力开关结构图如图 1 所示，其中斥力机构主要包括拉杆、斥力盘、分合闸线圈、双稳弹簧、缓冲器等部件。当机构处于合闸状态时，双稳弹簧将会通过连杆为机构提供 1 个保持力确保机构处于

可靠的合闸状态。当机构需要分闸动作时斥力盘和线圈间产生电磁斥力，带动连杆和动触头向下运动，进行分闸动作。当连杆底部越过双稳弹簧平衡位置，双稳弹簧的合力由向上转为向下，带动机构继续进行分闸动作。

1.2 数学模型

本文所采用的有限元仿真耦合了电磁场计算、感应涡流计算、励磁电路放电计算、机械运动计算等多个计算模块，能比较全面地描述和分析电磁斥力机构动作的主要物理过程。相关方程[25]如下所述。

1）瞬态时变电磁场方程

应用位函数的库仑规范 $\nabla \cdot \boldsymbol{A}=0$，确保解的唯一性，涉及到瞬态时变电磁场的方程为：

$$\boldsymbol{B}=\nabla \times \boldsymbol{A} \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{J}=0 \tag{2}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{B}=\mu \boldsymbol{J} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{E}=-\frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial t}-\nabla \phi+\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{J}=\sigma \boldsymbol{E} \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{A}$ 为磁矢位；$\boldsymbol{J}$ 为电流密度；$\boldsymbol{B}$ 为磁通密度；$\boldsymbol{E}$ 为电场强度；ϕ 为电位；$\boldsymbol{v}$ 为斥力盘的运动速度；μ 为介质的磁导率；σ 为介质的电导率；t 为时间。

2）运动学方程

电磁斥力机构主要由斥力盘中所产生的电磁斥力驱动，对洛伦兹力进行求和即可得到斥力盘的电磁斥力。由此得到运动学方程为：

$$\boldsymbol{F}=\int_{\Omega} \boldsymbol{J} \times \boldsymbol{B} \mathrm{d} \Omega \tag{6}$$

$$\boldsymbol{F}-\boldsymbol{F}_{\mathrm{s}}=m \frac{\mathrm{d}^2 \boldsymbol{s}}{\mathrm{d} t^2} \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{F}$ 为金属盘受到的轴向电磁斥力；Ω 为积分体空间；$\boldsymbol{F}_{\mathrm{s}}$ 是运动阻力；m 为各个运动部件的质量和；$\boldsymbol{s}$ 为金属盘的轴向位移。

3）励磁电路方程

将励磁线圈和斥力盘看成一个整体，等效成电阻与电感串联的模型。则斥力机构的驱动电路如图 2 所示，其中，C 为励磁电路放电电容，VT 为可控晶闸管，D 为续流二极管，R_1、L_1 为电容侧线路中的电阻和电感，R_2、L_2 为励磁线圈侧线路中的电阻和电感，R、L 为励磁线圈和斥力盘等效的阻抗。

在电磁斥力机构分合闸动作时，电容对励磁线圈放电，a 点电压高于 b 点，续流二极管 D 不导通。根据能量守恒，系统中的磁能等于等效电感 L 中储存的能量，线圈和斥力盘中消耗的焦耳热等于等效电阻 R 中消耗的热量。结合回路定理得到电路方程[25]为：

$$\frac{1}{2} i^2 L=\frac{1}{2} \int_{\Omega} \boldsymbol{B} \cdot \boldsymbol{H} \mathrm{d} \Omega \tag{8}$$

$$i^2 R=\int_{\Omega} \boldsymbol{E} \cdot \boldsymbol{J} \mathrm{d} \Omega \tag{9}$$

$$u_{\mathrm{c}}=(L+L_1+L_2) \frac{\mathrm{d} i}{\mathrm{d} t}+(R+R_1+R_2) i \tag{10}$$

$$i=-C \frac{\mathrm{d} u_{\mathrm{c}}}{\mathrm{d} t} \tag{11}$$

式中：i 为线圈中的励磁电流；$\boldsymbol{H}$ 为磁场强度；C 为电容容值；u_{c} 为电容电压。

电路中需要求解的外部参数如表 1 所示。

4）弹性力学方程

弹性力学方程囊括斥力盘应力、应变、位移之间的关系，其中运动微分方程[26]为：

$$\rho \frac{\partial^2 \boldsymbol{u}}{\mathrm{d} t^2}=\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_k+\boldsymbol{F}_v \tag{12}$$

式中：$\boldsymbol{u}$ 为位移矢量；ρ 为材料密度；$\boldsymbol{F}_v$ 为斥力盘受到的微元力；$\boldsymbol{\sigma}_k$ 为柯西应力张量。

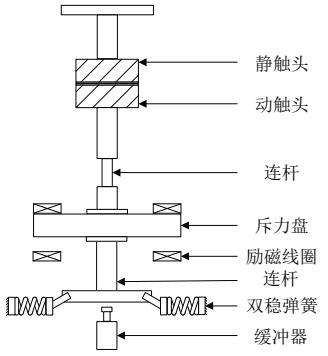


图 1 快速斥力开关结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of fast repulsion switch structure

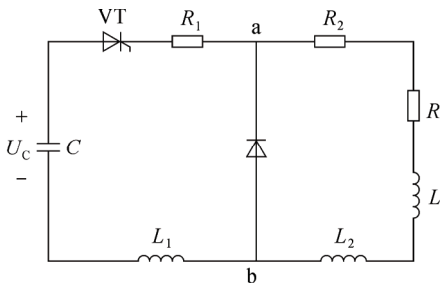


图 2 斥力机构外接电路示意图

Fig.2 Schematic diagram of external circuit of repulsion mechanism

表 1 电路外部参数表

Table 1 External parameters of circuit

参数	R_1/mΩ	R_2/mΩ	L_1/μH	L_2/μH
数值	4	3	2	1.5

同时，本文引入驱动效率[20]的概念从而更准确地评价电磁斥力机构的分闸性能。电磁斥力机构的效率定义为：

$$\eta=\frac{mv^2/2}{CU_0^2/2}=\frac{mv^2}{CU_0^2} \tag{13}$$

式中：m 为电磁斥力机构可动部分的总质量；v 为斥力盘在 1.5 ms 时的瞬时速度；U_0 为放电电容的预充电压值。

1.3　斥力盘运动特性仿真方法

电磁斥力机构的运动涉及到电容充放电、电磁感应、机械运动等一系列的复杂物理过程，这些物理过程相互耦合，运用普通计算的方法计算复杂且存在收敛性问题[27]。本文将有限元仿真分析电磁斥力机构动作过程中的应力应变情况。具体的仿真流程如图 3 所示。首先根据外接电路方程在电磁仿真中引入外接激励电路，耦合电、磁、力场分析得到斥力盘体积力密度。之后将求得的体积力密度导入瞬态动力学分析中，分析斥力盘运动过程中的应力、应变、位移。

综合考虑了体积和成本限制、结构强度、机械寿命、开关的速度需求和实际工程应用中的绝缘需要，确定了电磁斥力机构的设计参数，如表 2 所示。

1.4　电磁斥力机构试验平台

在仿真基础上，本文搭建了电磁斥力机构运动特性试验平台，进一步验证复合斥力盘对电磁斥力机机构运动特性的提升效果，如图 4 所示。试验电路由电容的充放电回路、分合闸线圈励磁回路和控制测量回路组成。充放电回路中，交流 220 V 电源通过接触器 K_1、调压器 T、升压变压器 B 和整流单元 D_1 后为电容提供合适的充电电压，K_1、T、B 和 R_1 共同构成直流稳压电源；充电电阻 R_1 和充电接触器 K_2 通过直流电源向电容充电；放电电阻 R_2 和放电接触器 K_3 构成回路对电容进行放电操作；励磁回路中，电容器电容 C 通过开通晶闸管 VT 对励磁线圈电感 L 进行放电操作，用续流二极管 VD 延续励磁线圈电感 L 中的电流，以对斥力机构进行分闸操作。控制与测量回路中，通过上位机控制晶闸管 VT 的通断；通过高速摄影仪拍摄斥力盘得到行程曲线；通过示波器和罗氏线圈得到励磁电流数据。

2　复合斥力盘结构设计及优化

2.1　斥力盘内应力应变特性分析

电磁斥力机构动作初期，斥力盘受到巨大的电磁斥力，斥力盘外圈会先于内圈动作，斥力盘发生弹性形变。斥力盘因为发生弹性形变而产生巨大的内部应力，而当内部应力超过材料的屈服强度后，斥力盘就会发生不可逆的塑性形变，最后彻底断裂，造成严重的后果。为了防止斥力盘发生塑性形变，在设计复合斥力盘前必须对电磁斥力机构进行应力应变试验和仿真。本文分别对 T2 铜、镁锆合金、镁锂合金 3 种不同材料的斥力盘进行瞬态应力应变仿真，观察其在电磁斥力作用下的弹性形变和应力应变情况，从而对新型复合斥力盘的设计提供指导。

图 5 反映了斥力盘在动作过程中的应力应变情况。图 5(a)为斥力盘边缘振动位移图，可见：杨氏模量最小、质量最轻的镁锂合金斥力盘边缘振动位移最大，在 0.4 ms 时达到了最大值 0.5 mm；T2 铜盘因为杨氏模量大、质量大，所以震动位移最小、周期最长，最大边缘位移只有 0.2 mm；镁锆合金斥

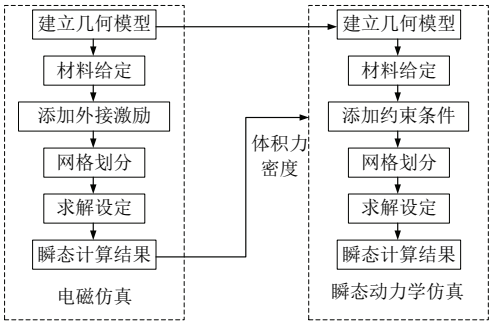


图 3　多物理场耦合分析流程

Fig.3　Multi-physics coupling process

表 2　机构部件基本参数

Table 2　Basic parameters of institutions

基本参数	数值	基本参数	数值
金属盘内径/mm	50	线圈内径/mm	50
金属盘外径/mm	170	线圈外径/mm	170
金属盘厚度/mm	15	线圈厚度/mm	15
初始间隙/mm	2	线圈匝数/匝	19
电容电压/V	750	储能电容容值/μF	4 700

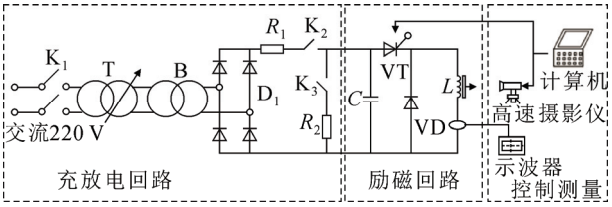


图 4　试验回路原理图

Fig.4　Schematic diagram of experimental circuit

力盘的杨氏模量介于两者之间，振动位移也介于两者之间。3 种不同材料斥力盘的最大应力曲线如图 5(b)所示，可以发现：3 种材料的斥力盘中 T2 铜盘受到的电磁斥力最大，所以它的内部应力也最大，达到了 190 MPa，远远超过铜材料的屈服强度 60 MPa；镁锂合金受到的电磁斥力最小，所以它的最大内部应力也最小，只有 150 MPa，轻微超过镁锂合金的屈服强度 110 MPa；镁锆合金的最大应力值为 180 MPa，未超过镁锆合金的屈服强度 200 MPa，符合斥力盘材料的强度要求。

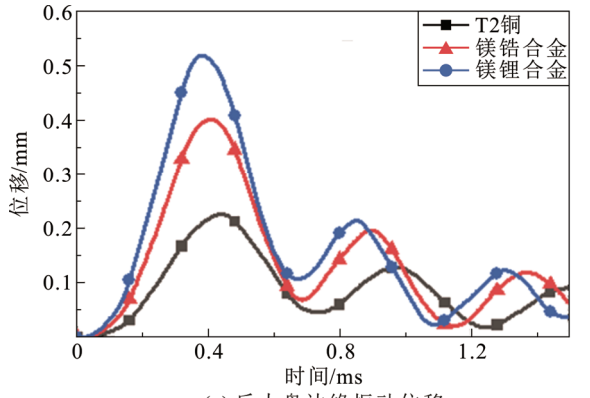
图 6 反映了斥力盘横截面上的应力分布情况。经过观察发现：斥力盘的最大内部应力集中在斥力盘与连杆的交界处，应力大小沿着盘的径向逐渐减小，因此，在设计斥力盘时要首先考虑斥力盘内圈的强度。3 种斥力盘中，铜盘的大部分区域应力已经超过了铜材料的屈服强度，而镁锆合金斥力盘则符合斥力盘的强度要求。

2.2 复合斥力盘结构设计

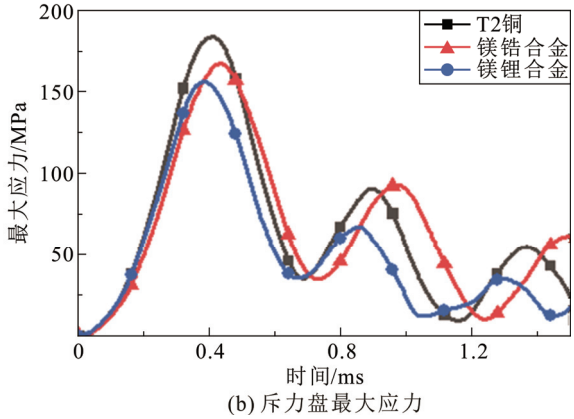
在满足斥力盘强度要求的情况下，电磁斥力机构运动速率与斥力盘所用材料的密度和电导率有关。其中密度影响电磁斥力机构运动部分的质量，电导率影响斥力盘所产生的电磁斥力的大小。表 3 为相关材料基本参数表。

从表 3 中可以看出，铜、铜铬合金拥有较高的电导率，但是其实密度是铝合金密度的 3 倍，会对运动速度产生较大影响。镁锂合金、镁锆合金虽然密度足够小，但是其电导率分别仅为铜的 14%、31%，无法提供足够的动力。选择电导率高、密度小的斥力盘材料可以大幅提高电磁斥力机构的动作速度，但是，目前没有一种材料同时具有高电导率和小密度的特性。因此，本文结合铜材料的高电导率和镁合金材料的轻质量和高强度的特点，提出一种新型“铜-镁合金”复合斥力盘，复合斥力盘具体结构如图 7 所示。

利用铜具有高电导率的优点，设计铜片接近励磁线圈进行励磁感应，同时斥力盘主体部分为比强度高、密度小的镁合金材料，以提高电磁斥力机构



(a) 斥力盘边缘振动位移



(b) 斥力盘最大应力

图 5 斥力盘应力、应变

Fig.5 Stress and strain of repulsive force disk

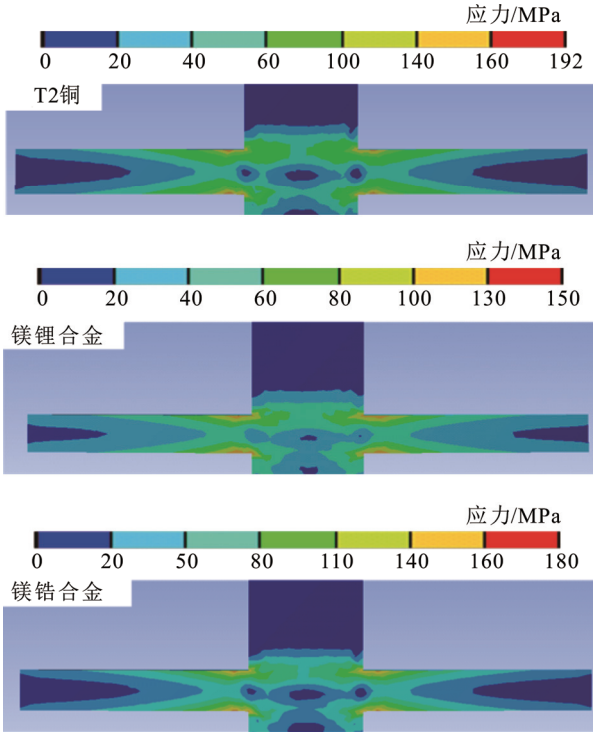


图 6 内部应力分布图

Fig.6 Internal stress distribution

表 3 材料基本参数

Table 3 Material basic parameters

材料	电导率/(MS·m^{-1})	密度/(kg·m^{-3})	屈服强度/MPa
铝合金	32	2 810	455
T2 铜	58	8 300	60
铜铬合金	47	8 900	310
镁锂合金	8	1 400	110
镁锆合金	18	1 800	200

的动作速度和效率。在制作过程中，首先将镁合金材料制成带有环形凹槽的盘状结构，随后将环形铜片嵌入凹槽中，最后用铆钉固定铜片与镁合金盘。为了进一步提高“铜-镁合金”复合斥力盘性能，本文对影响其运动速度和效率的关键影响因素进行研究，以确定复合斥力盘的优化结构尺寸。

2.3　复合斥力盘结构优化

2.3.1　铜片厚度

电磁斥力机构的开断速度主要取决于斥力盘所提供的电磁斥力，在复合斥力盘中，电磁斥力主要来源于铜片中所感应的涡流。通过分析不同厚度铜片中的涡流情况能够更好地优化复合斥力盘的运动特性。当电磁斥力机构分闸运动 0.4 ms 时斥力盘内部的感应涡流如图 8 所示。

从图 8 中可以看出，由于铜片的电导率较大，铜片内部的感应涡流密度远大于镁合金内部的感应涡流密度。此外，1.2 mm 铜片内的感应密度也大于 2 mm 铜片内部的感应涡流密度，这是因为铜片的厚度增加导致了电流的分散，总电流增大但电流密度减小。

图 9 为不同铜片厚度的复合斥力盘内部感应涡流情况。如图 9(a)所示，1.2、2 mm 和 3 mm 斥力盘内部的总感应涡流大小相差不大，都为 7.5 kA 左右。当铜片厚度为 1.2 mm 时，铜片内部感应涡流为 4 kA，占整个复合斥力盘总感应涡流的 53%，因为此时铜片还未达到集肤深度，所以镁合金基体也承

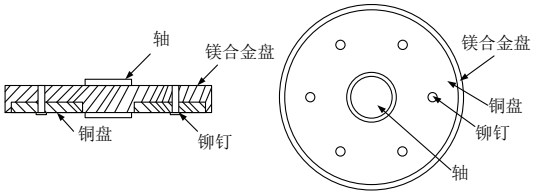


图 7　“铜-镁合金”复合斥力盘结构图

Fig.7　Structure diagram of copper-magnesium alloy' composite repulsive disk

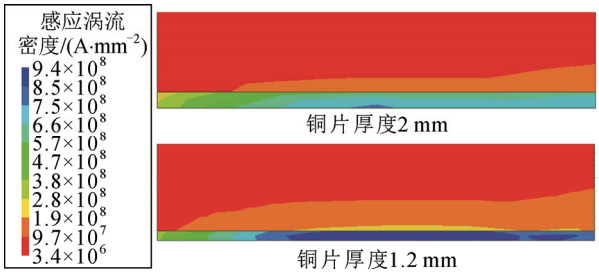


图 8　感应涡流密度分布

Fig.8　Induction eddy current density distribution

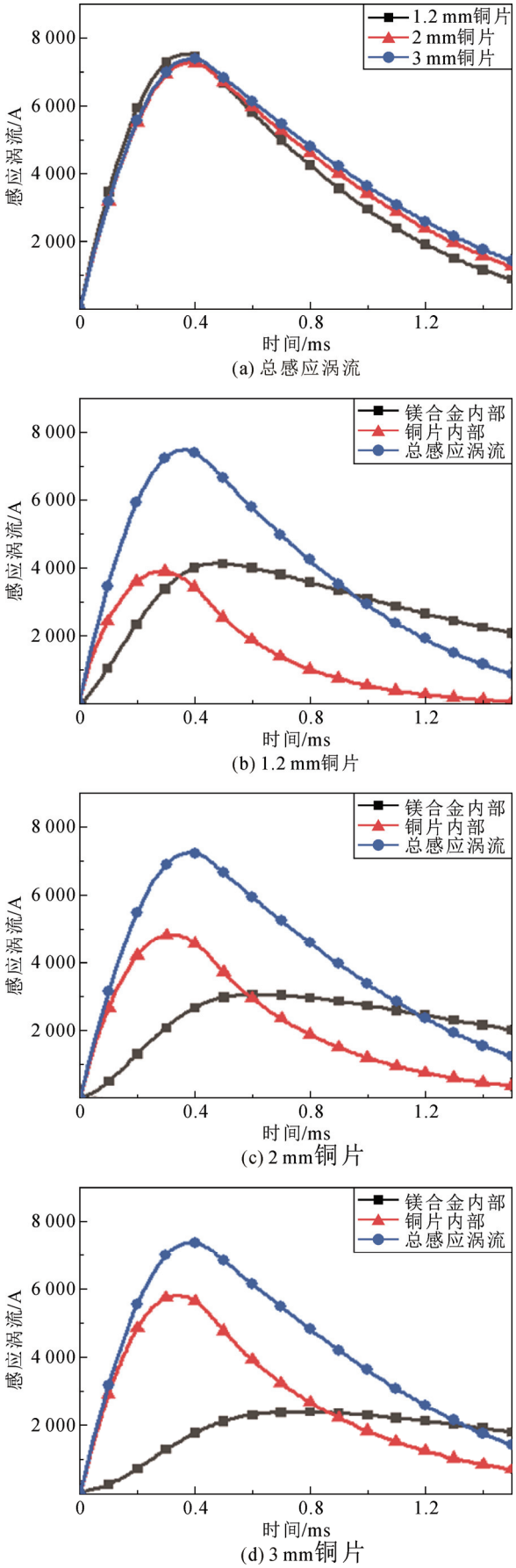


图 9　斥力盘感应涡流

Fig.9　Repulsion disk induced eddy current

担了很大的电流。随着铜片厚度的增加，铜片内部感应涡流占总感应涡流的占比也越来越大，铜片将承受更大的电磁力，当铜片厚度达到 3 mm 时，此时铜片内部电流将增大为 6 kA，占复合斥力盘总感应涡流的 80%。占整个复合斥力盘受力的 80%将加载至铜片上，因此铜片厚度的选取要综合考虑铜片的通流能力和所受电磁斥力。

铜片厚度对“铜-镁合金”复合斥力盘运动特性的影响如图 10 所示。从图 10 中可以看出，随着铜片厚度的不断增加，斥力盘中的励磁电流、电磁斥力和运动速度都在逐渐增加，但是当铜片厚度>2 mm 后，整体增加趋势明显变缓。铜的厚度主要影响斥力盘中的等效电阻，随着铜片厚度的增加，斥力盘的等效电阻减小，斥力盘内流过的感应涡流迅速增大，斥力盘受到的电磁力也逐渐升高。然而，当铜片的厚度>2 mm 后，电磁力的升高却有限，这是因为此时铜片厚度已经达到了此时电容放电频率下的集肤深度，厚度的增加对斥力盘内感应涡流的影响很小。

2.3.2 铜片内外径

铜片内外径直接影响到斥力盘与线圈感应产生电磁斥力的大小及分布情况。铜片内外径对“铜-镁合金”复合斥力盘运动特性的影响如图 11 所示。

当铜片内径<80 mm 时，随着铜片内径的下降，斥力盘所受电磁斥力的变化并不明显；而当铜片内径>80 mm 时，斥力盘受到的电磁斥力随着铜片内径的增加而降低，这是因为铜片内圈的感应涡流过低所致。如图 8 所示，1.2 mm 铜片外圈的涡流电流密度达到 $9.4\times10^{8}\ \mathrm{A/mm^2}$，而铜片内圈的感应涡流密度只有 $4.7\times10^{8}\ \mathrm{A/mm^2}$，数值相差 1 倍。所以当铜片内径<80 mm 时对电磁斥力机构动作的速度和位移影响不大。

当铜片外径<160 mm 时，斥力盘受到的电磁斥力随着铜片外径的增大而增大，而当铜片外径>160 mm 时，因为此时铜片内部的感应涡流已接近饱和，电磁斥力将不再发生变化，斥力盘的速度和位移也在 160 mm 后基本不再增加。

不同铜片内外径的运动特性结果如图 12 所示。当铜片内径<80 mm 时，电磁斥力机构的运动特性数据都相差不大，50~84 mm 范围的驱动效率仅下降了 3%。当铜片外径<160 mm 时，铜片外径对电磁斥力机构的开断速度和位移影响逐渐减小，外径为 160~170 mm 的铜片驱动效率仅提升 2%。在铜片

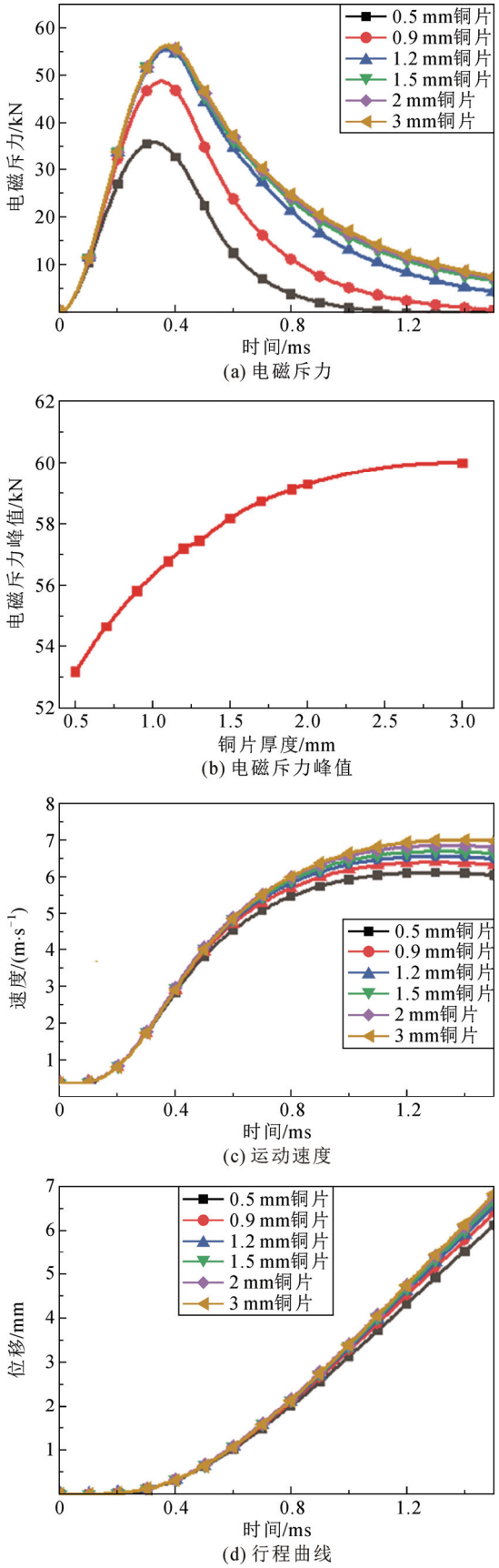


图 10 不同铜片厚度的运动特性

Fig.10 Motion characteristics of different copper sheet thickness

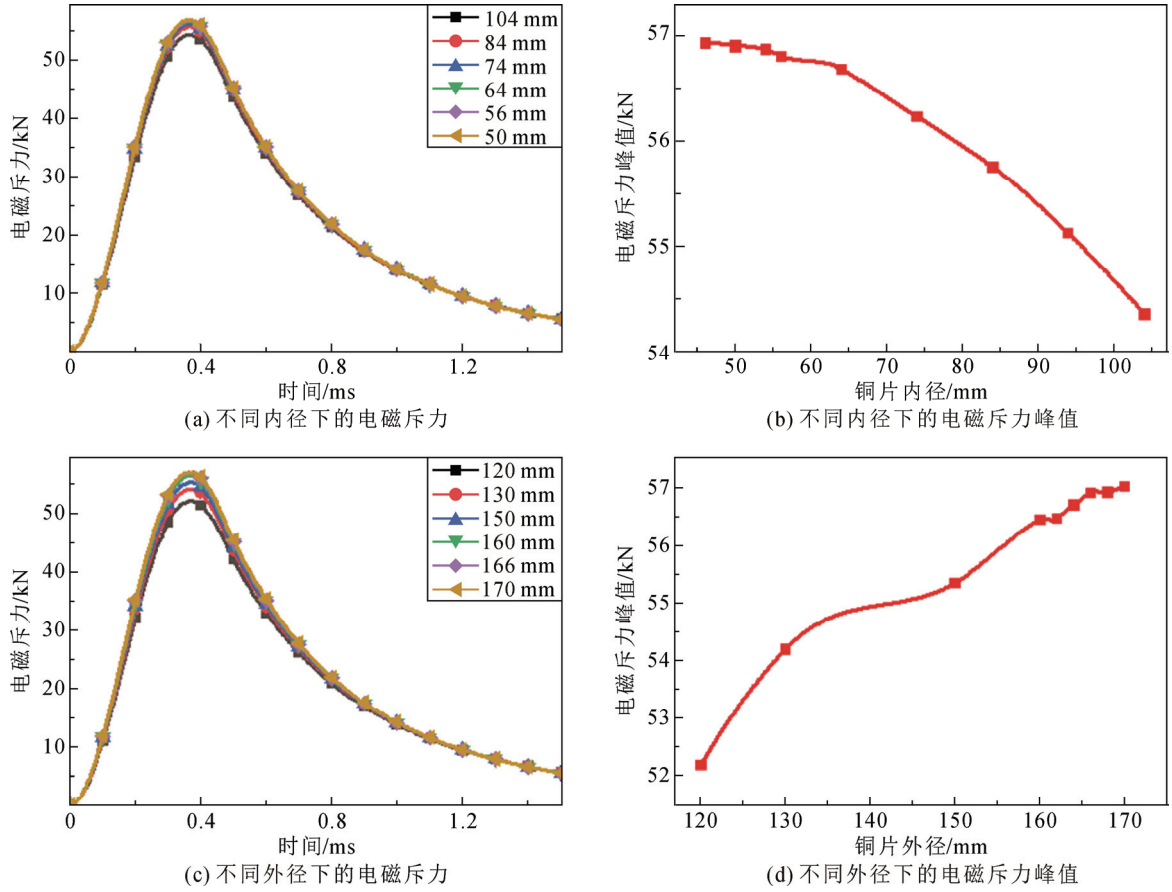


图 11　电磁斥力随铜片内外径变化

Fig.11　Repulsion changes with the inner and outer diameter of the copper sheet

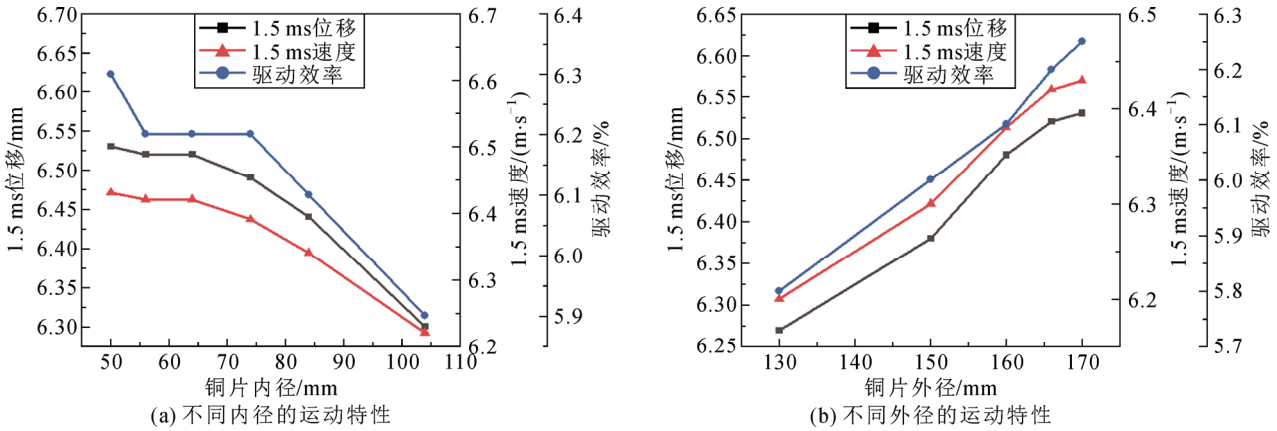


图 12　不同铜片内外径的运动特性

Fig.12　Motion characteristics of different copper inner and outer diameters

厚度一定的情况下，当铜片外径较大时，斥力质量会增加，影响运动特性。所以在电磁斥力不受太大影响的情况下，应尽可能地减小斥力盘的外径，从而减小斥力盘质量。但是，减小铜片的外径会导致斥力盘内圈受到的电磁斥力加大，从而增大斥力盘与连杆交界处的应力集中。

2.4　复合斥力盘优化结果验证

通过对复合斥力盘运动特性影响因素的研究，选定斥力盘结构参数并建立“铜-镁锆合金”复合斥力盘有限元电磁仿真模型。在此基础上，对比复合斥力盘、镁锆合金斥力盘和 7075 铝合金斥力盘的励磁电流、电磁斥力、动作速度和位移等关键性能指

标，分析复合斥力盘在运动特性方面的提升效果。复合斥力盘参结构参数如表 4 所示，其他机构部件参数与表 2 一致。

“铜-镁锆合金”复合斥力盘与普通斥力盘运动特性对比如图 13 所示。普通镁合金斥力盘因为密度比 7075 铝合金更小，而它们的电导率相当，所以它的运动速度相较于铝合金斥力盘稍微有所增加，在加装铜片后，斥力盘的等效电阻显著减小，斥力盘内部流过的感应电流迅速增大，所以斥力盘受到的电磁斥力也上涨明显，如图 13(b)所示，斥力盘的电磁斥力峰值从 48 kN 上涨至 56 kN，增加 17%。此外，因为斥力盘内部等效电阻的减小，励磁回路的等效电阻也相应减小，励磁回路电流上升。电磁斥力机构的动作电流和运动速度都随着电磁斥力的上升而提升，斥力盘在 1.5 ms 时的位移由 5.39 mm 升至 6.34 mm。斥力盘在 1.5 ms 时的瞬时动作速度由 5.50 m/s 升至 6.15 m/s，上升了 12%。

“铜-镁锆合金”斥力盘相对于普通的 7075 铝合金斥力盘运动特性提升显著，如表 5 所示，“铜-镁合锆金”复合电磁斥力机构相较于普通 7075 铝合金斥力机构驱动效率由 4.5%提升至 5.7%。

3 复合斥力盘样机试验

3.1 仿真与试验结果对比

结合仿真所得结论，制作试验样机，普通斥力盘和复合斥力盘结构如图 14 所示。

在控制复合斥力盘和机构参数不变的情况下，将仿真结果与试验结果进行比对。取充电电压为 750 V，斥力盘分别选用普通铝合金斥力盘、“铜-镁锆合金”复合斥力盘。得到仿真与试验的行程曲线对比曲线如图 15 所示。从图 15 中可以看出，仿真结果和试验结果的波形整体较相符。对比仿真和试验结果，铝合金在 1.5 ms 内的位移分别为 5.10、5.39 mm；“铜-镁锆合金”复合斥力盘在 1.5 ms 内的位移分别为 5.80、6.34 mm。2 种斥力盘的仿真行程曲线相对平滑，而试验行程曲线存在一定的波动。这是因为仿真过程中以斥力盘中心的位移作为机构

表 4 复合斥力盘结构参数表

Table 4 Structure parameters of composite repulsive disk

基本参数	数值/名称	基本参数	数值/名称
金属盘厚度/mm	15	分闸行程/mm	20
铜片厚度/mm	1.2	铜片外径/mm	166
铜片内径/mm	50	铜片结构	单面铜片

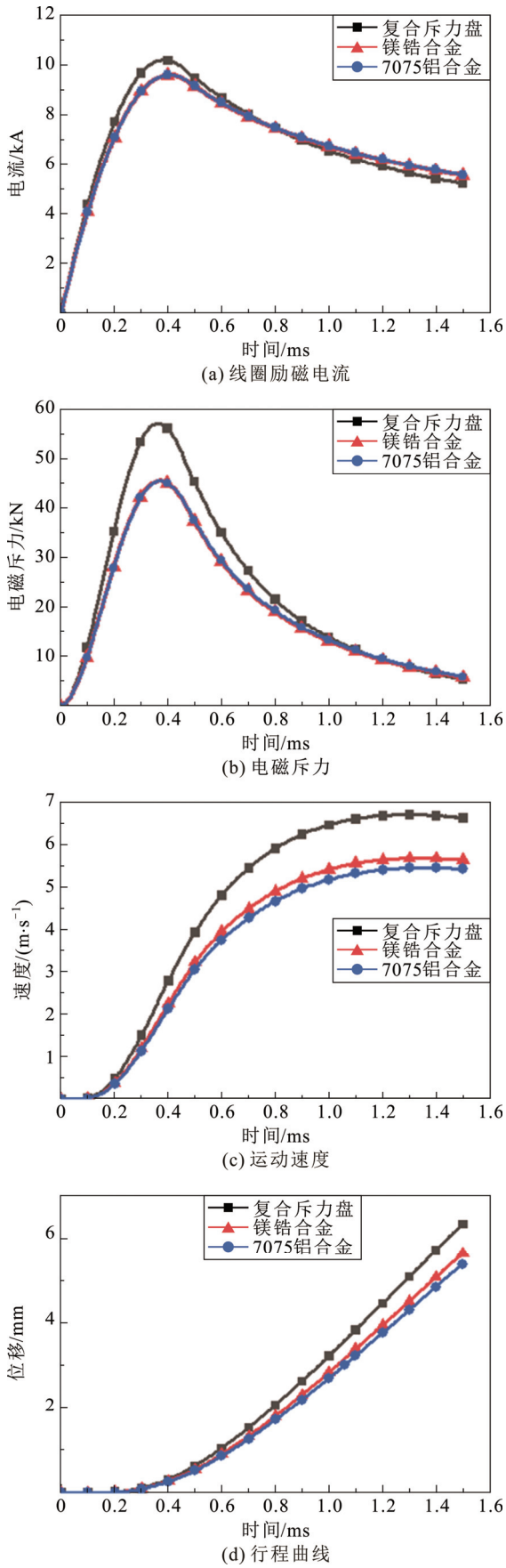


图 13 复合盘与镁合金盘运动特性对比

Fig.13 Comparison of motion characteristics between composite disk and magnesium alloy disk

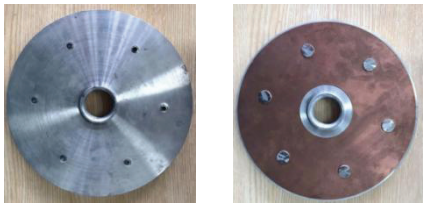
表 5　“铜-镁锆合金”斥力盘的运动特性结果

Table 5　Motion characteristics of “copper-magnesium alloy” repulsive disk

斥力盘材料	1.5 ms 内的位移/mm	1.5 ms 内的速度/(m·s^{-1})	驱动效率/%
镁锆合金	5.64	5.60	4.8
7075 铝合金	5.39	5.50	4.5
铜-镁锆合金	6.34	6.15	5.7



(a) 普通斥力盘正面　(b) 普通斥力盘背面



(c) 复合斥力盘正面　(d) 复合斥力盘背面

图 14　斥力盘结构图

Fig.14　Diagram of repulsion disk structure

的行程，而试验过程中只能测量斥力盘边缘的位移。同时在电磁斥力机构动作初期，斥力盘外圈受到的电磁斥力较内圈更大，所以斥力盘外圈会先于内圈动作，斥力盘边缘会发生振动，导致行程曲线存在波动。

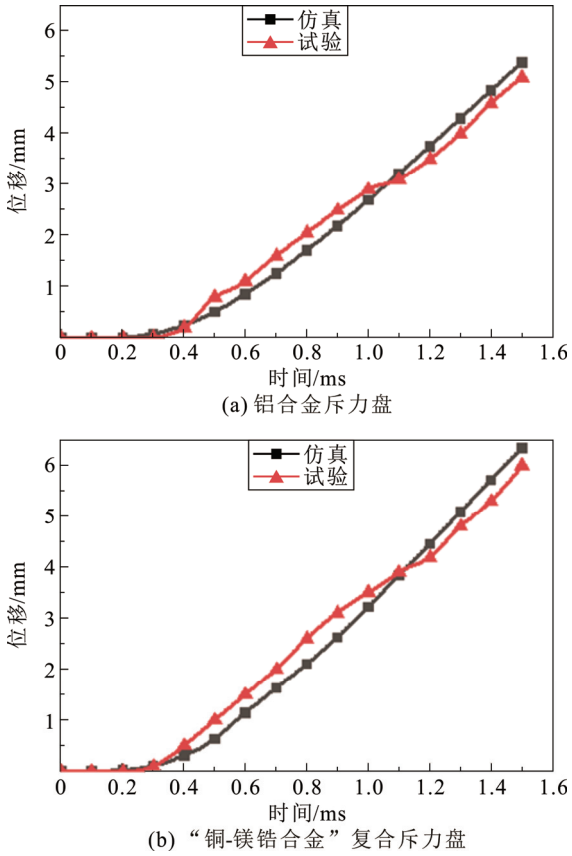
3.2　5 种斥力盘运动特性比较

为了进一步分析复合斥力盘的运动特性，分别在电磁斥力机构中安装铝合金斥力盘、镁锂合金斥力盘、镁锆合金斥力盘、“铜-镁锂合金”复合斥力盘和“铜-镁锆合金”复合斥力盘 5 种斥力盘，测量其在不同预充电压下的运动特性。

图 16 为电容电压为 500 V 时 5 种斥力盘行程曲线。镁锂合金斥力盘的动作速度明显慢于其他 4 种斥力盘，在 1.5 ms 时“铜-镁锂”和“铜-镁锆”2 种复合斥力盘的行程相对较大。当电容电压为 500 V 时，2 种复合斥力盘成功分闸，但是铝合金、镁锂合金、镁锆合金 3 种斥力盘并没有成功分闸，而是分别在最大位移为 6.5、2、6.5 mm 时弹回。这是因为当电容电压较小时，斥力盘获得的动力不足以支撑其越过双稳弹簧平衡位置。

图 17 为电容电压 600 V 时 5 种斥力盘行程曲线。当电压增大到 600 V 时，5 种斥力盘在 1.5 ms 处的位移均有了很大的提升。铝合金和镁锆合金斥力盘在速度降为 0 之前越过双稳弹簧平衡位置最终成功开断。而镁锂合金斥力盘在 1.5 ms 时的位移只有 2 mm，在 5 ms 时达到最大行程 5 mm 就被弹回。

图 18 为电容电压为 750 V 时 5 种斥力盘行程曲



(a) 铝合金斥力盘

(b) “铜-镁锆合金”复合斥力盘

图 15　仿真与试验行程曲线对比图

Fig.15　Comparison of simulation and experiment

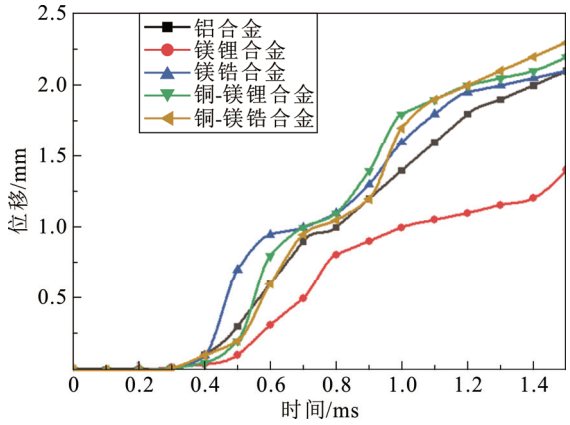


图 16　电容电压为 500 V 时行程曲线对比

Fig.16　Comparison of stroke curves at 500 V capacitor voltage

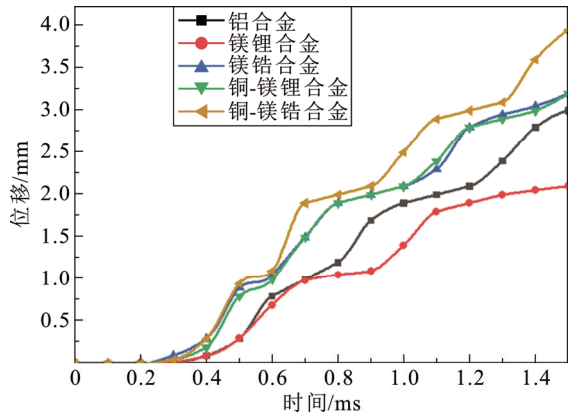


图 17 电容电压为 600 V 时行程曲线对比

Fig.17 Comparison of stroke curves at 600 V capacitor voltage

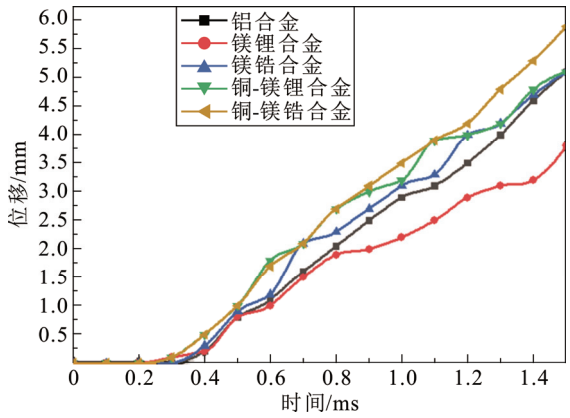


图 18 电容电压为 750 V 时行程曲线对比

Fig.18 Comparison of stroke curves at 750 V capacitor voltage

线。此时 5 种斥力盘均成功开断。当电压为 750 V 时，除镁锂合金斥力盘外，其他 4 种斥力盘在 1.5 ms 处的位移均已超过 5.5 mm，平均速度>3.7 m/s，具备 3~5 ms 内完成分闸操作的能力，满足高压直流系统需求。镁锂合金斥力盘在 1.5 ms 时的行程最小，只有 3.8 mm，1.5 ms 内的平均速度为 2.5 m/s；而嵌入铜片的“铜-镁锂合金”复合斥力盘相对于镁锂合金斥力盘在 1.5 ms 时的行程有很大提升，行程达到了 5.1 mm，1.5 ms 内的平均速度达到 3.4 m/s，相较于镁锂合金斥力盘提升了 34%。镁锆合金和铝合金行程差距不大，因为镁锆合金较铝合金更轻，镁锆合金在 1.5 ms 时的行程高出铝合金 0.2 mm。“铜-镁锆合金”复合斥力盘在 1.5 ms 时行程最大，达到了 5.8 mm，平均速度为 3.9 m/s。“铜-镁锆合金”复合斥力盘相对于普通镁锆合金斥力盘速度提升了 12%，相对于常规 7075 铝合金斥力盘速度提升了 14%。

图 19 为电容电压为 900 V 时 5 种斥力盘行程曲线。由图可见，当电压为 900 V 时，镁锂合金斥力盘在 1.5 ms 内的位移达到 5.2 mm，平均速度为 3.3 m/s，也已满足高压直流系统需求。“铜-镁锆合金”复合斥力盘在 1.5 ms 时位移明显大于其他 4 种斥力盘，已达到了 7.9 mm，前 1.5 ms 内平均速度已达到 5.3 m/s。铝合金、镁锆合金、“铜-镁锂合金”3 种斥力盘在 1.5 ms 处的位移均在 7 mm 左右，明显快于镁锂合金斥力盘。

由上述结果可知“铜-镁合金”复合斥力盘相对于普通斥力盘运动特性提升明显。当电容电压为 500 V 时，普通斥力盘会被弹回，而复合斥力盘可以越过双稳弹簧平衡位置成功分闸。当电容电压为

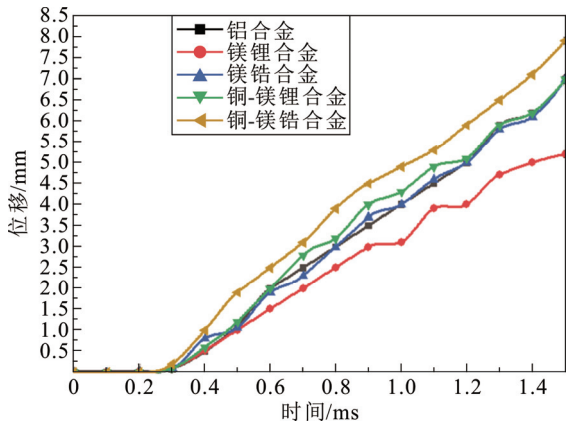


图 19 电容电压为 900 V 时行程曲线对比

Fig.19 Comparison of stroke curves at 900 V capacitor voltage

600 V 时，“铜-镁锆合金”复合斥力盘在 1.5 ms 内的平均速度达到 2.6 m/s，相较于常规 7075 铝合金斥力盘提升了 31%。当电压为 750 V 时，“铜-镁锆合金”复合斥力盘相对于普通镁锆合金斥力盘速度提升了 12%，相对于常规 7075 铝合金斥力盘速度提升了 14%。当电压为 900 V 时，“铜-镁锆合金”复合斥力盘在 1.5 ms 时的位移明显大于其他 4 种斥力盘，已达到 7.9 mm，平均速度 5.3 m/s。在相同的开断速度需求下，采用效率更高的“铜-镁锆合金”复合斥力盘能有效减小断路器驱动电路的体积，减小生产和运行成本。

4 结论

1）结合铜材料的高电导率和镁合金材料的轻质量和高强度的特点，设计了“铜-镁锆合金”复合斥力盘应用于电磁斥力机构。研究了复合斥力盘的

运动参数的影响因素，结果表明，斥力盘电磁斥力和运动速度随铜片厚度增加逐渐增大，但存在饱和效应；在一定范围内，电磁斥力随着铜片内径减小以及外径增大而增大。综合影响规律，选定铜片厚度为 1.2 mm、内径 50 mm、外径 166 mm 为复合斥力盘设计参数。

2）通过仿真比较了“铜-镁锆合金”复合斥力盘、镁锆合金斥力盘和普通 7075 铝合金斥力盘三者的励磁电流、电磁斥力、动作速度和位移等关键性能指标。“铜-镁锆合金”复合电磁斥力机构相较于普通 7075 铝合金斥力机构的驱动效率由 4.5%提升至 5.7%。

3）通过样机试验，比较了 3 种普通斥力盘和 2 种复合斥力盘之间的运动特性。试验结果表明“铜-镁锆合金”复合斥力盘相较于普通铝合金斥力盘运动特性提升明显。当电容预充电电压为 750 V 时，“铜-镁锆合金”斥力盘相较于普通的铝合金斥力盘在 1.5 ms 内平均速度提升了 14%。

参考文献　References

[1] DASTGEER F, KALAM A. Efficiency comparison of DC and AC distribution systems for distributed generation[C]//Proceedings of 2009 Australasian Universities Power Engineering Conference. Adelaide, Australia: IEEE, 2009: 1-5.

[2] 郑　欢，江道灼，杜　翼. 交流配电网与直流配电网的经济性比较[J]. 电网技术，2013，37(12)：3368-3374.
ZHENG Huan, JIANG Daozhuo, DU Yi. Economic comparison of AC and DC distribution system[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3368-3374.

[3] 韩翔宇，杨　飞，陈洪斌，等. 基于真空电弧伏安特性的大电流真空多断口并联动态均流特性[J/OL]. 高电压技术，2024：1-11[2024-09-18]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520. hve. 20240758.
HAN Xiangyu, YANG Fei, CHEN Hongbin, et al. Dynamic current-sharing characteristics of high-current vacuum multi-breakers based on vacuum arc volt-ampere characteristics[J/OL]. High Voltage Engineering, 2024: 1-11[2024-09-18]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve. 20240758.

[4] HAN X Y, YANG F, CHEN H B, et al. Parallel current-sharing characteristics of vacuum multi-breakers for large-capacity generator circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(2): 1162-1173.

[5] 荣命哲，吴　翊，杨　飞. 直流开断基础及技术应用[M]. 北京：科学出版社，2021：261-262.
RONG Mingzhe, WU Yi, YANG Fei. Basic principles and technical applications of DC circuit breaking[M]. Beijing, China: Science Press, 2021: 261-262.

[6] 何俊佳，袁　召，赵文婷，等. 直流断路器技术发展综述[J]. 南方电网技术，2015，9(2)：9-15.
HE Junjia, YUAN Zhao, ZHAO Wenting, et al. Review of DC circuit breaker technology development[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(2): 9-15.

[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 research on repulsion mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 3809-3818.

[8] 梁德世. 高压直流真空开断的能量转移过程研究[D]. 大连：大连理工大学，2022.
LIANG Deshi. Research on energy transfer processes of high voltage direct current vacuum interruption[D]. Dalian, China: Dalian University of Technology, 2022.

[9] 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, 88(8): 1281-1285.

[10] ALFEROV D, BUDOVSKY A, EVSIN D, et al. DC vacuum circuit-breaker[C]//Proceedings of the 23rd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Bucharest, Romania: IEEE, 2008: 173-176.

[11] MAISTRELLO A, GAIO E, FERRO A, et al. Experimental qualification of the hybrid circuit breaker developed for JT-60SA quench protection circuit[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24(3): 3801505.

[12] 王子建. 基于快速真空开关的电弧电流转移型故障限流器[D]. 武汉：华中科技大学，2009.
WANG Zijian. Are current-transferring type fault current limiter based on high speed vacuum switch[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2009.

[13] 李庆民，刘卫东，徐国政，等. 高压快速转换开关的研制[J]. 高压电器，2003，39(6)：6-7.
LI Qingmin, LIU Weidong, XU Guozheng, et al. Research on high voltage fast transfer switch[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(6): 6-7.

[14] 史宗谦，贾申利，朱天胜，等. 真空直流断路器高速操动机构的研究[J]. 高压电器，2010，46(3)：18-22.
SHI Zongqian, JIA Shenli, ZHU Tiansheng, et al. Investigations on high-speed actuator of vacuum DC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3): 18-22.

[15] 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 the new hybrid repulsion mechanism based on series-connected solenoid and coil plate[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(14): 2997-3006.

[16] 王子建，何俊佳，陆佳政，等. 基于电磁斥力机构的 10 kV 快速真空开关[J]. 电工技术学报，2009，24(11)：68-75.
WANG Zijian, HE Junjia, LU Jiazheng, et al. 10 kV high speed vacuum switch with electromagnetic repulsion mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 68-75.

[17] 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. Research on optimization design of coil type electromagnetic repulsion mechanism for fast mechanical switch[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2512-2518.

[18] 贺开华. 电磁斥力机构中线圈外半径与轴向厚度之比的最优范围[J]. 船电技术，2012，32(12)：35-37.
HE Kaihua. The optimal range of the rate of the outer radius and the axial thickness of the coil in the electromagnetic repulsion actuator[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2012, 32(12): 35-37.

[19] 连　莹，缪希仁，庄胜斌，等. 双线圈涡流斥力快速操动机构的参

数匹配与优化设计[J]. 福州大学学报(自然科学版)，2021，49(3)：352-359.
LIAN Ying, MIAO Xiren, ZHUANG Shengbin, et al. Parameter matching and optimization design of double-coil eddy current repulsive force rapid operating mechanism[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2021, 49(3): 352-359.

[20] 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. Influences of soft magnetic materials on power efficiency of electromagnetic repulsion mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 586-593.

[21] 董润鹏，庄劲武，袁志方，等. 电磁斥力机构的弹塑性形变分析与实验[J]. 中国电机工程学报，2018，38(23)：7080-7088.
DONG Runpeng, ZHUANG Jinwu, YUAN Zhifang, et al. Elasto-plastic deformation analysis and experiment of electromagnetic repulsion mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 7080-7088.

[22] 朱哲晓，袁　召，陈立学，等. 电磁斥力机构结构应力分析与优化设计[J]. 高电压技术，2020，46(8)：2692-2699.
ZHU Zhexiao, YUAN Zhao, CHEN Lixue, et al. Structural stress analysis and optimization design of electromagnetic repulsion mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2692-2699.

[23] 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)：996-1003.
HU Xinkai, ZHUANG Jinwu, DONG Runpeng, et al. Efficiency optimization of electromagnetic repulsion mechanism prototype[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 996-1003.

[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] 吴益飞，郭佳豪，杨　飞，等. 直流快速开关高速斥力机构运动特性分析[J]. 高电压技术，2018，44(5)：1641-1650.
WU Yifei, GUO Jiahao, YANG Fei, et al. Analysis of the motion characteristics of the high speed repulsion mechanism of DC fast switch[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1641-1650.

[26] 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.

[27] 张　力，阮江军，黄道春，等. 双盘式线圈结构快速斥力机构设计与运动特性仿真研究[J]. 电工技术学报，2018，33(2)：255-264.
ZHANG Li, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Study on the design and movement characteristics simulation of a fast repulsion mechanism based on double-Coil structure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(2): 255-264.



翟晨乐
2001—，男，硕士生
主要从事大容量真空断路器机械寿命提升与预测方面的研究工作
E-mail: zhaichenle2019@stu.xjtu.edu.cn

ZHAI Chenle



杨　飞(通信作者)
1982—，男，博士，教授，博导
主要从事大容量交直流开断理论与技术、电力装备数字化设计与智能制造等方面的研究工作
E-mail: yfei2007@mail.xjtu.edu.cn

YANG Fei
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2024-08-19　修回日期　2025-02-07　　编辑　曾文君