

电磁斥力机构效率优化

何莹辉^{1,2}, 陈立学^{1,2}, 李颖卓^{1,2}, 徐晟钦^{1,2}, 邹昕阳^{1,2}, 孙立康^{1,2}

(1. 强电磁技术全国重点实验室(华中科技大学), 武汉 430074;

2. 脉冲功率技术教育部重点实验室(华中科技大学电气与电子工程学院), 武汉 430074)

摘要: 电磁斥力机构(electromagnetic repulsion mechanism, EMRM)是实现断路器快速开断的重要设备, 受限于涡流斥力的驱动原理, 机构效率较低。为此结合频域分析, 提出了一种频域参数解析计算的电磁斥力机构效率优化方法。首先, 建立了机构有限元仿真模型, 对比分析了斥力盘固定、运动情况下的电流与电磁力, 发现运动过程互感变化对电流、电磁力影响小, 解析分析中互感可简化为常数。然后, 比较了不同方法计算等效参数用于解析分析的准确性, f_ω 频域参数可较好解析电流。进一步分析了频率、线圈结构对互感梯度的影响, 提出互感梯度可简化为线性减小的结论, 获取了电磁力解析式。最后, 在频域参数解析计算基础上提出了电磁斥力机构效率优化方法, 对该研究斥力机构参数进行了优化, 并通过有限元仿真计算验证了优化方法的有效性。

关键词: 断路器; 电磁斥力机构; 频域参数; 解析计算; 效率优化

Efficiency Optimization of Electromagnetic Repulsion Mechanism

HE Yinghui^{1,2}, CHEN Lixue^{1,2}, LI Yingzhuo^{1,2}, XU Shengqin^{1,2}, ZOU Xinyang^{1,2}, SUN Likang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Key Laboratory of Pulsed Power Technology Ministry of Education, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The electromagnetic repulsion mechanism (EMRM) is an important device to realize the rapid breaking of circuit breakers. Due to the driving principle of eddy current repulsion, the efficiency of the mechanism is low. In this paper, an efficiency optimization method of electromagnetic repulsive force mechanism based on the analysis of frequency domain parameters is proposed. Firstly, the finite element simulation model of the mechanism is established, and the current and electromagnetic force are compared and analyzed when the repulsive disk is fixed and moves. It is found that the mutual inductance changes during the motion process have a negligible influence on the current and electromagnetic force, and the mutual inductance can be simplified to a constant in the analytical analysis. Then, the accuracy of equivalent parameters calculated by different methods for analytical analysis is compared. Moreover, f_ω frequency domain parameters can be used to analyze current better. The influence of frequency and coil structure on mutual inductance gradient is further analyzed. The conclusion that mutual inductance gradient can be simplified as linear reduction is put forward, and the analytical formula of electromagnetic force is obtained. Finally, the efficiency optimization method of the electromagnetic repulsion mechanism is proposed on the basis of the analytic calculation of the parameters in the frequency domain, and the parameters of the repulsion mechanism are optimized in this paper.

Key words: circuit breaker; electromagnetic repulsive force mechanism; frequency domain parameters; analytical calculation; efficiency optimization

0 引言

随着电力系统的发展, 发电与输电功率不断增大, 短路时电流逐渐增大, 为保护电力设备, 在系统短路时须快速切除故障回路, 对断路器开断的快

速性提出了更高要求。传统操动机构开断短路电流的时间长达几十毫秒^[1-3], 难以满足要求。基于涡流斥力原理的电磁斥力机构具有响应时间短、刚分速度快、结构简单的优点^[4-6], 良好匹配断路器对操动机构的速度需求, 在快速机械开关领域得到了广泛应用。

电磁斥力机构基于涡流斥力原理, 驱动过程涉及电磁能量转换, 效率较低。为提高效率, 国内外

学者进行了大量研究。在材料与结构优化方面, 文献[7-9]研究了线圈外壳材料、结构对斥力机构驱动效率的影响, 提出选择低电导率高磁导率材料、在铁芯上径向开槽和选取叠片铁芯可以有效改善磁路, 提高电磁斥力机构的效率。文献[10]研究了线圈外半径与轴向厚度之比对线圈和斥力盘间电磁耦合系数的影响, 提出线圈外半径与轴向厚度合理取值为 9~12。文献[11]研究了线圈、斥力盘尺寸对互感和互感梯度的影响, 发现线圈与斥力盘内外径一致时互感和互感梯度较大。文献[12]分析了电磁斥力机构的能量转换过程并比较了“铜-铝”复合盘与纯铝盘结构的效率, 发现复合盘结构可有效优化电磁斥力机构驱动过程, 提高驱动效率。上述研究可为电磁斥力机构优化设计提供了一定的指导原则。

在斥力机构解析分析中, 文献[13]推导了忽略线圈与斥力盘电阻时斥力盘电磁力解析式, 指出电容储能一定的情况下, 采用小容量、高电压驱动电容更有利于在运动初期形成足够的电气绝缘间隙。文献[14]分析了等效电感、电阻与线圈结构参数的解析式, 在保持电源参数与等效电感一定的情况下获取了电阻较小的线圈结构参数, 提高了驱动效率。文献[15-16]在斥力盘等效线圈串联、互感随时间变化率为常数等假设下推导了斥力机构电磁斥力解析式, 分析了线圈内径、匝数、宽度、高度对驱动效率的影响规律。文献[17]推导了最大电磁斥力与线圈结构参数的关系, 通过磁场优化给出了一定电场能量下线圈最佳外形。文献[18-19]进一步研究了电磁斥力有效做功与电源参数的关系, 从“场优化”和“路优化”两方面给出了线圈结构参数与电源参数优化配置方法。文献[20]提取 3 个斥力机构操动特性特征参量, 结合参量给出了一种提高操动机构效率的参数优化方法。然而, 现有的解析分析中采用的参数为静态参数, 未考虑激励频率和电流分布对参数的影响, 与斥力机构驱动过程中的时变参数存在较大差别, 且分析中多忽略了电阻的影响, 由此分析的最优参数与全局最优参数存在一定区别。

本文推导了电磁斥力机构的数学模型, 比较了不同方法计算的等效参数用于解析分析的准确性, 获得了基于频域参数的线圈电流、斥力盘电流、电磁力解析式。在此基础上提出了基于频域参数解析计算的电磁斥力机构效率优化方法, 采用该方法优化了电磁斥力机构的线圈结构和电源参数, 通过有

限元仿真验证了优化方法的有效性和准确性。

1 电磁斥力机构

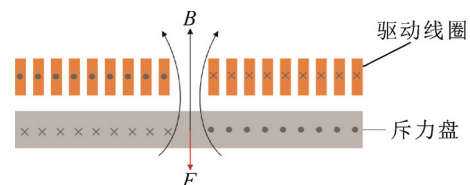
1.1 工作原理

电磁斥力机构由机械结构和外电路组成, 示意图如图 1 所示, 其中 B 为磁感应强度, F 为机构受到的轴向电磁力, C_0 为预充电电容, S 为晶闸管, D 为续流二极管, L_c 、 R_c 为线圈电感与电阻。灭弧室动触头导杆与斥力盘相连, 驱动线圈连接到外电路中。晶闸管 S 导通时, 电容 C_0 放电, 脉冲电流流过驱动线圈, 在空间中产生时变磁场, 斥力盘中感应出涡流, 在涡流斥力作用下运动, 带动动触头运动, 完成开断。

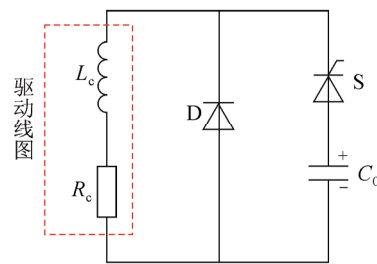
1.2 数学模型

电磁斥力机构的等效电路如图 2 所示, 其中, U_0 为预充电电压, R_p 、 L_p 为斥力盘等效电感、电阻, M 为线圈与斥力盘间互感, i_c 、 i_p 分别为线圈电流与斥力盘电流。

电容电压为 u_c , 在电容放电阶段, 回路电压方程为:



(a) 电磁斥力机构截面图



(b) 外电路

图 1 电磁斥力机构示意图

Fig.1 Schematic diagram of EMRM

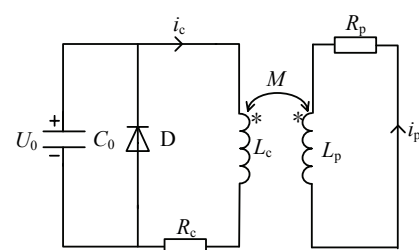


图 2 等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit diagram

$$\begin{cases} u_c(t) = L_c \frac{di_c(t)}{dt} + R_c i_c(t) - M \frac{di_p(t)}{dt} \\ 0 = L_p \frac{di_p(t)}{dt} + R_p i_p(t) - M \frac{di_c(t)}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

对式(1)进行傅里叶变换并整理可得:

$$\begin{aligned} u_c(\omega) &= (R_c + \frac{\omega^2 M^2 R_p}{\omega^2 L_p^2 + R_p^2}) i_c(\omega) + \\ & j\omega i_c(\omega) (L_c - \frac{\omega^2 M^2 L_p}{\omega^2 L_p^2 + R_p^2}) \end{aligned} \quad (2)$$

电路的等效电阻 R_{eq} 、等效电感 L_{eq} 为:

$$\begin{cases} R_{eq} = R_c + \frac{\omega^2 M^2 R_p}{\omega^2 L_p^2 + R_p^2} \\ L_{eq} = L_c - \frac{\omega^2 M^2 L_p}{\omega^2 L_p^2 + R_p^2} \end{cases} \quad (3)$$

驱动电路工作频率较大, 不含 ω^2 的因式可忽略^[14-15], 由此可得:

$$\begin{aligned} R_{eq} &= R_c + \frac{M^2 R_p}{L_p^2} \\ L_{eq} &= L_c - \frac{M^2}{L_p} \end{aligned} \quad (4)$$

根据等效电阻 R_{eq} 、等效电感 L_{eq} 可将电路简化为 RLC 回路, 线圈电流为:

$$i_c(t) = \frac{U_0}{\omega_d L_{eq}} e^{-\alpha t} \sin \omega_d t \quad (5)$$

式中: $\omega_d = \sqrt{\frac{1}{L_{eq} C_0} - \left(\frac{R_{eq}}{2L_{eq}}\right)^2}$; $\alpha = \frac{R_{eq}}{2L_{eq}}$ 。联立式(1)、

(5)可得斥力盘电流为:

$$\begin{aligned} i_p &= \frac{M}{\sqrt{(R_p - \alpha L_p)^2 + (\omega L_p)^2}} \frac{U_0}{\omega_d L_{eq}} \sqrt{\frac{1}{L_{eq} C_0}} \cdot \\ & (e^{-\alpha t} \sin(\omega_d t - \varphi - \theta) + e^{-\frac{R_p}{L_p} t} \sin(\varphi + \theta)) \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $\varphi = \arctan(\frac{\omega_d L_p}{R_p - \alpha L_p})$; $\theta = \arctan(\frac{\omega_d}{\alpha})$ 。在续

流阶段, 回路电压方程为:

$$\begin{cases} L_c \frac{di_c(t)}{dt} + R_c i_c(t) - \frac{dM i_p(t)}{dt} = 0 \\ L_p \frac{di_p(t)}{dt} + R_p i_p(t) - \frac{dM i_c(t)}{dt} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

由此可得续流阶段线圈电流与斥力盘电流为:

$$i_c(t) = i_{c0} e^{-\tau_c(t-t_0)}, \quad t > t_0 \quad (8)$$

$$i_p(t) = i_{p0} e^{-\tau_p(t-t_0)}, \quad t > t_0 \quad (9)$$

式中: i_{c0} 、 i_{p0} 为续流时刻线圈电流与斥力盘电流;

$t_0 = \frac{\pi - \theta}{\omega_d}$ 为续流时刻; $\tau_c = \tau_p = \frac{R_{eq}}{L_{eq}}$ 为电流衰减速率。斥力盘的电磁力 F 为:

$$F = -i_c i_p \frac{dM}{dz} \quad (10)$$

式中: dM/dz 为轴向互感梯度, 由式(5)、(6)、(8)、(9)、(10)即可计算斥力盘所受的电磁斥力。

2 电磁斥力机构的建模仿真

2.1 几何模型

电磁斥力机构具有二维轴对称特性, 在 Comsol Multiphysics 建立其二维轴对称模型如图 3 所示, 相关尺寸参数如表 1 所示。在驱动过程中, 斥力盘主要受到与线圈重合区域电磁力推动, 且斥力盘与线圈外径一致时效率较高, 因此斥力盘几何模型可简化为与线圈内外径一致的金属盘。在线圈与斥力盘外侧布置半径为 200 mm、高度为 200 mm 的圆柱形空气域。

2.2 物理场设置

在 Comsol Mutiphysics 中采用电路、磁场、固体力学、动网格接口对电磁斥力机构进行建模, 各物理场的耦合关系如图 4 所示, 其中 x_{grid} 为网格位移。电路模型采用节点法进行建模, 模型如图 5 所示, 其中电容为 3 mF, 预充电电压为 950 V。磁场

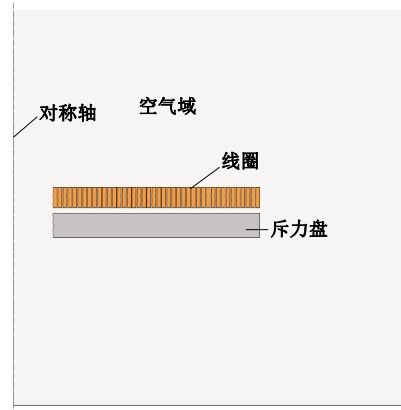


图3 电磁斥力机构几何模型

Fig.3 Geometric model of EMRM

表1 几何参数

Table 1 Geometric parameters

参数	数值
线圈内径/mm	20
单匝线圈宽度/mm	2
线圈高度/mm	10
线圈匝数	42
斥力盘高度/mm	12
线圈与盘初始间距/mm	3

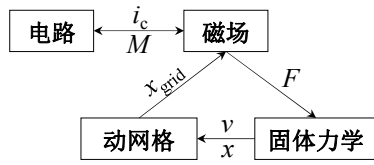


图4 物理场耦合关系

Fig.4 Coupling relationship of physical field

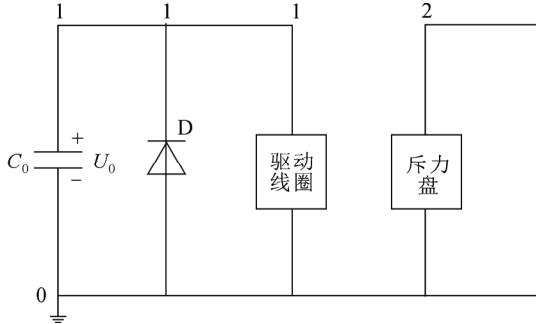


图5 电路模型

Fig.5 Circuit model

接口中, 将线圈域设置为单导线并勾选线圈组, 由此可准确计算趋肤效应对线圈电流分布的影响。固体力学接口中, 给斥力盘添加 5 kg 附加质量以反映动触头的影响。动网格接口中, 将线圈域设置为固定网格, 并将固体力学接口计算的斥力盘位移指定为斥力盘网格的位移。仿真中使用的材料参数如表 2 所示。

2.3 仿真结果

斥力盘固定和运动时的线圈电流和电磁力如图 6 所示, 从图 6 中可以看出, 2 种状态下电流和电磁力差异不大, 说明斥力盘运动造成的互感变化对电流、电磁力影响较小, 可在解析分析中将互感简化为常数。

斥力盘固定和运动时互感梯度变化如图 7 所示, 0~1 ms 时 2 种情况互感梯度差异较小, 1 ms 后斥力盘运动对互感梯度影响较大。考虑运动时斥力盘与线圈互感梯度受到电流分布和间距的影响, 斥力盘固定时互感梯度只受到电流分布的影响, 在 0~1 ms 内斥力盘运动速度慢、位移小, 因此 2 种情况的互感梯度差异小; 1 ms 后斥力盘速度较快, 间距增大, 间距对互感、互感梯度的影响显著, 互感梯度差异增大。

在初始运动阶段, 2 种情况的互感、互感梯度差异小, 电路等效参数接近, 因此电流、电磁力差异不大。1 ms 后, 互感梯度差异变大, 但此时电路处于续流状态, 线圈电流和斥力盘电流幅值减小,

表 2 材料参数

Table 2 Material parameter

计算域	材料	电导率/ (S·m ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)	杨氏模 量/GPa	泊松比
线圈	铜	5.8×10 ⁷	8 960	70	0.33
斥力盘	铝	2.3×10 ⁷	2 850	110	0.35
空气	空气	10 ⁻³			

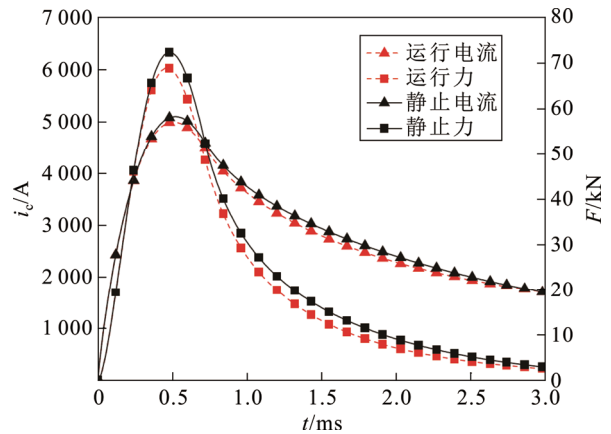


图6 不同情况下的线圈电流、电磁力

Fig.6 Coil current and electromagnetic force under different conditions

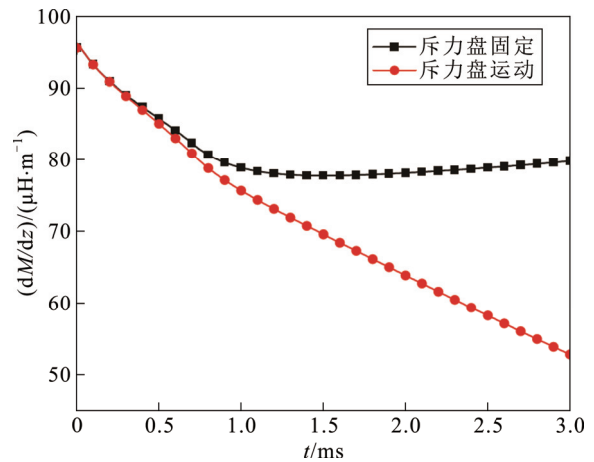


图7 斥力盘与线圈互感梯度

Fig.7 Mutual inductance gradient between repulsion disk and coil

且对于斥力盘固定情况互感大, 由式(3)可知电路等效电阻大, 等效电感小, 电流衰减速度更快。在电流幅值衰减、衰减速度差异和互感梯度差异的综合作用下, 2 种情况的电流、电磁力差值先增大后减小, 但总体差值不大。因此斥力盘运动带来的互感变化较大, 但对电流、电磁力影响不大, 在解析分析时可互感可简化为常数。

3 电磁斥力机构解析分析

3.1 等效参数计算

在解析分析中, 斥力盘可等效为短路线圈, 其划分方式对电流、电磁力计算的影响小^[20]。为简化模型, 将斥力盘等效为 1 匝线圈。忽略趋肤效应的影响时, 线圈与斥力盘电阻为:

$$\begin{cases} R_c = \rho_c \frac{N\pi D_{av}}{S_c} \\ R_p = \rho_p \frac{\pi D_{av}}{S_p} \end{cases} \quad (11)$$

式中: ρ_c 、 ρ_p 分别为线圈、斥力盘的电阻率; N 为线圈匝数; D_{av} 为线圈和斥力盘平均直径; S_c 为单匝线圈截面积; S_p 为斥力盘截面积。线圈与斥力盘自感与匝数、平均半径和线圈外形比例相关, 可由电感计算手册公式^[21]计算, 即:

$$\begin{cases} L_c = \frac{\mu_0 N^2 D_{av}}{4\pi} \phi_1 \\ L_p = \frac{\mu_0 D_{av}}{4\pi} \phi_2 \end{cases} \quad (12)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; ϕ_1 、 ϕ_2 是与线圈外形比例相关的系数, 可根据尺寸查表获取。线圈与斥力盘的互感的计算式为:

$$M = \frac{1}{2} (L_{cdp} + L_d - L_{cd} - L_{dp}) \frac{N}{S_c S_p} \quad (13)$$

式中: 下标 c、d、p 分别表示为线圈、线圈与斥力盘间隙虚构线圈、斥力盘线圈, 互感可由各区域自感计算得到, 具体过程详见文献^[21]。

由式(4)、(11)、(12)、(13)可获取由静态参数计算的电路等效电阻 R_{eq1} 、等效电感 L_{eq1} 。

文献^[15-16]中考虑了驱动过程中斥力盘电流趋肤效应的影响, 斥力盘电阻为:

$$\begin{cases} R_p = \rho_p \frac{N\pi D_{av}}{h\delta} \\ \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega_i \mu_0 \sigma_p}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: h 为斥力盘厚度; δ 为趋肤深度, 可由电流频率 ω_i 、材料电导率 μ_0 、材料电导率 σ_p 进行计算。由式(4)、(11)、(12)、(13)、(14)可得到考虑趋肤效应的电路等效电阻 R_{eq2} 、等效电感 L_{eq2} 。

现有解析分析中多基于上述 2 种方法计算电路等效电阻电感, 忽略了电流分布和激励频率对参数的影响, 本文基于频域角度获取参数进行分析。保持斥力盘静止, 为线圈添加不同频率的电流激励,

电路等效电感、电阻随激励频率的变化如图 8 所示。根据等效电感、电阻可计算斥力机构工作频率为:

$$f_d = \frac{\omega_d}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_{cq}(f)C_0} - \left(\frac{R_{cq}(f)}{2L_{cq}(f)}\right)^2} = g_1(f) \quad (15)$$

f_d 随激励频率 f 变化曲线 $f_d=g_1(f)$ 和 $f=f$ 的交点即为斥力机构工作频率, 进而可得知等效电感 R_{eq3} 、 L_{eq3} 。

文献^[22]指出电容放电为励磁过程, 与频域达到稳定的状态不同, 在电流逐渐透入斥力盘过程中, 电路工作频率约为 $2f_d$, 可由此确定等效电感为 L_{eq4} 。随着电流透入, 工作频率快速下降到 f_d , 结合式(14), 可取 $2f_d$ 下等效电阻的 $1/\sqrt{2}$ 作为实际等效电阻 R_{eq4} 。电流透入过程工作频率 f_ω 为:

$$f_\omega = 2f_d = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{1}{L_{cq}(f)C_0} - \left(\frac{R_{cq}(f)}{2L_{cq}(f)}\right)^2} = g_2(f) \quad (16)$$

f_d 、 f_ω 、 f 随激励频率的变化如图 9 所示, f_d 与 f 相交于 365 Hz, f_ω 与 f 相交于 750 Hz, 上述 4 种方法计算的电路等效电感与电阻如表 3 所示。

3.2 电流解析分析

将等效电感、电阻参数代入式(5)可得无续流支路时线圈电流, 不同参数计算的线圈电流与仿真电流如图 10 所示。从图 10 中可以看出, 根据方法 1、2 得到参数计算的线圈电流与仿真电流存在较大偏差, 这 2 种等效参数计算方法忽略了电流分布的影响, 按照电流均匀分布对参数进行计算, 等效电感、电阻值偏小。对比 f_d 频域参数计算电流与斥力盘静止时仿真电流可知, 在前半个周期 f_d 频域参数计算电流频率低于仿真计算电流, 半周期后两电流曲线基本一致, 这是由于斥力盘电流从表层向内透入,

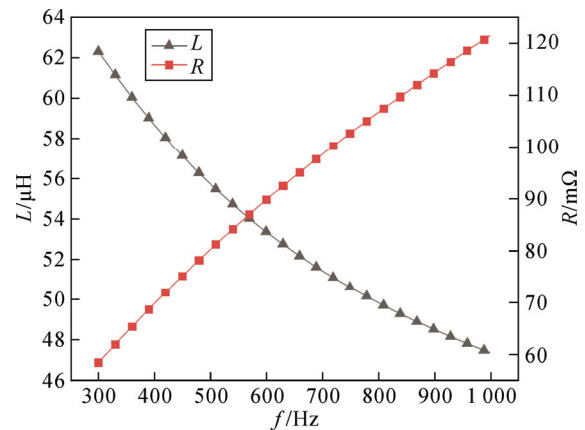


图 8 不同频率下的电路等效电感、电阻

Fig.8 Equivalent inductance and resistance of the circuit at different frequencies

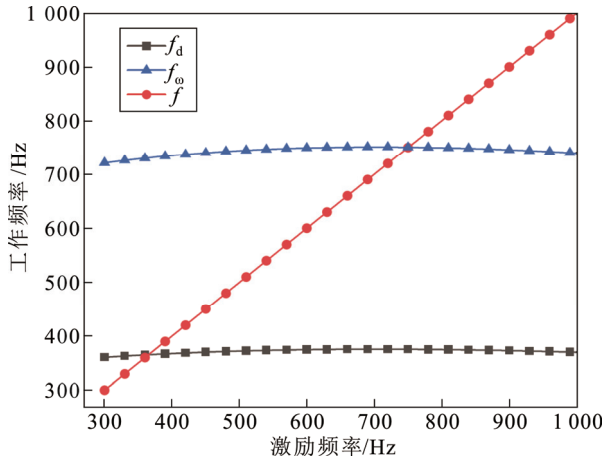


图9 不同频率下的 f_d 、 f_ω

Fig.9 The f_d and f_ω curves at different frequencies

表3 等效电感与电阻

Table 3 Equivalent inductance and resistance

计算方法	$L_{eq}/\mu\text{H}$	$R_{eq}/\text{m}\Omega$
1	34.27	36.87
2	34.27	38.62
3	59.86	65.83
4	50.60	72.56

系统等效电感逐渐增大, 电流完全透入后电路工作频率为 f_d 。采用 f_ω 频域参数计算的线圈电流在前1/4周期与仿真电流十分接近, 考虑到实际电路存在续流支路, 可采用 f_ω 频域参数解析计算续流前的线圈电流。

在续流阶段, 电路工作频率逐渐降低, 由式(3)可知, 电路等效电感逐渐增大, 等效电阻逐渐减小。当 $t \rightarrow \infty$ 时, $L_{eq}=L_c$, $R_{eq}=R_c$, 因此续流阶段线圈电流衰减的系数 τ_c 是1个时变参数, 从 R_{eq4}/L_{eq4} 逐渐减小为 R_c/L_c 。同理, 对于斥力盘, 在续流阶段, 其电流衰减系数从 R_{eq4}/L_{eq4} 逐渐衰减为 R_p/L_p , 因此可将电流衰减系数衰减为:

$$\begin{cases} \tau_c = \sqrt{\frac{R_{eq4} R_c}{L_{eq4} L_c}} \\ \tau_p = \sqrt{\frac{R_{eq4} R_p}{L_{eq4} L_p}} \end{cases} \quad (17)$$

将 f_ω 频域参数代入到式(6)、(9)、(17)可得到斥力盘的解析计算电流, 斥力盘和线圈解析计算与仿真电流如图11所示。从整个驱动过程来看, 解析计算的斥力盘电流与仿真值偏差较小, 采用频域参数解析斥力盘、线圈电流是十分准确的。

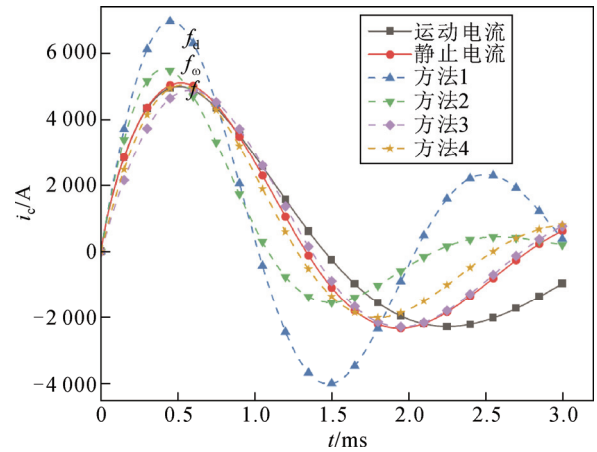


图10 不同参数计算的线圈电流

Fig.10 Coil current calculated with different parameters

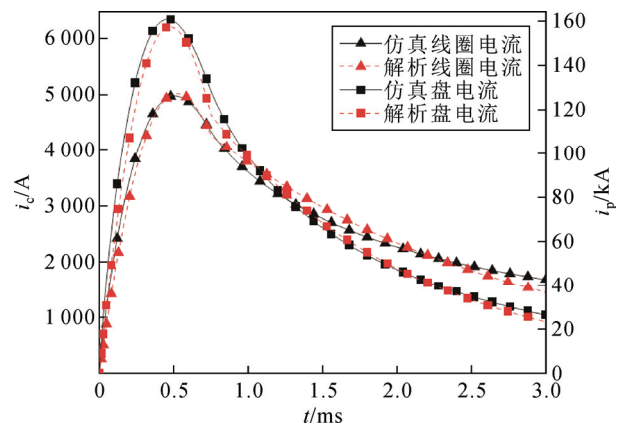


图11 解析计算与仿真电流

Fig.11 Analytical calculation and simulation of current

3.3 电磁力解析分析

电磁力的解析分析须考虑互感梯度的变化, 斥力盘运动过程中互感梯度变化如图7所示, 断路器开距较小, 互感梯度随时间变化可近似为线性减小, 即:

$$\frac{dM}{dz} = \left. \frac{dM}{dz} \right|_{t=0} (1-kt) \quad (18)$$

式中: $\left. \frac{dM}{dz} \right|_{t=0}$ 为0时刻的互感梯度; k 为衰减系数;

$\left. \frac{dM}{dz} \right|_{t=0}$ 与线圈外形比例和匝数相关, 根据仿真数据可拟合出其计算式为:

$$\left. \frac{dM}{dz} \right|_{t=0} = \left[\begin{matrix} 2.39 \times 10^{-5} N(106.2 - 1.663 \times 10^4 D_{av}^{-1.482}) \\ (104.6 - 33 \left(\frac{h_c}{D_{av}}\right)^{0.73}) (4.43 + 3.45 \left(\frac{dr}{D_{av}}\right)^{-1.45}) \end{matrix} \right] \quad (19)$$

式中： h_c 为线圈高度； dr 为线圈区域总宽度。不同电容、线圈宽度、高度下归一化互感梯度的变化如图 12 所示，激励频率和线圈结构对互感梯度波形影响较小，互感梯度衰减系数可视为常数，取 $k=150$ Hz。由式(10)、(18)、(19)解析计算电磁力与仿真电磁力如图 13 所示，解析计算电磁力误差较

小，验证了频域参数用于解析计算的准确性。

4 电磁斥力机构效率优化

4.1 效率优化

电磁斥力机构效率多定义为末动能与电容初始储能之比，但从功能来看该机构须在额定时间达到固定开距，应注重其末位移而非末速度。对于本结构须在 3 ms 完成 20 mm 开距，本文以其末位移对应的平均速度来定义其效率，即：

$$\eta = \frac{\frac{1}{2}m\left(\frac{x_s}{t_s}\right)^2}{\frac{1}{2}C_0U_0^2} = \frac{mx_s^2}{C_0U_0^2t_s^2} \quad (20)$$

式中： m 为机构运动部分总质量； $t_s=3$ ms，为额定开断时间； x_s 为机构末位移。运动过程中，斥力机构运动方程为：

$$\begin{cases} a = \frac{F}{m} \\ v = \int a dt \\ x = \int v dt \end{cases} \quad (21)$$

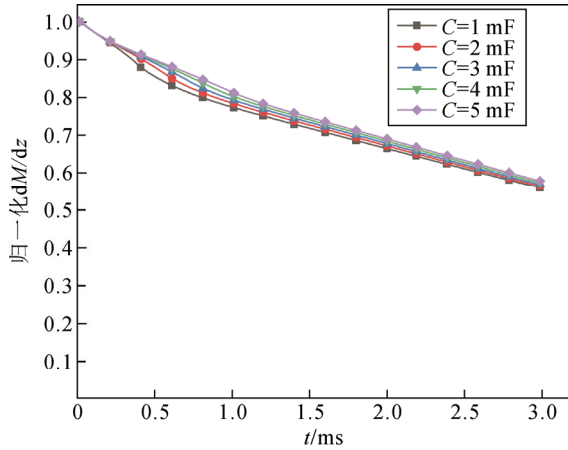
式中： a 、 v 、 x 分别为斥力机构运动的加速度、速度与位移。通过频域参数解析计算可优化参数，提高电磁斥力机构的效率，优化流程如下所述。

1) 确定优化参数

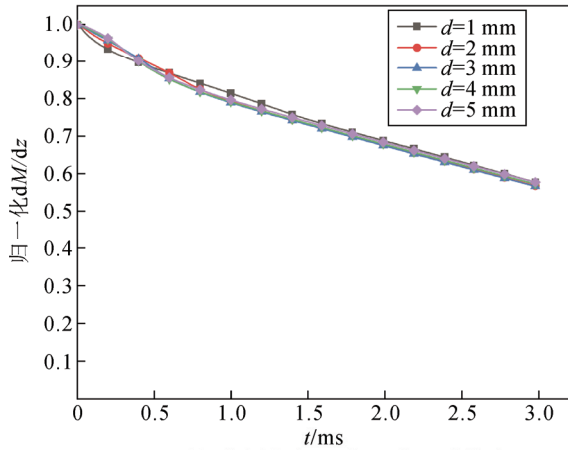
根据实际情况选取优化参数，如：线圈尺寸、线圈匝数、储能电容、储能电压、斥力盘尺寸等。

2) 参数范围限定

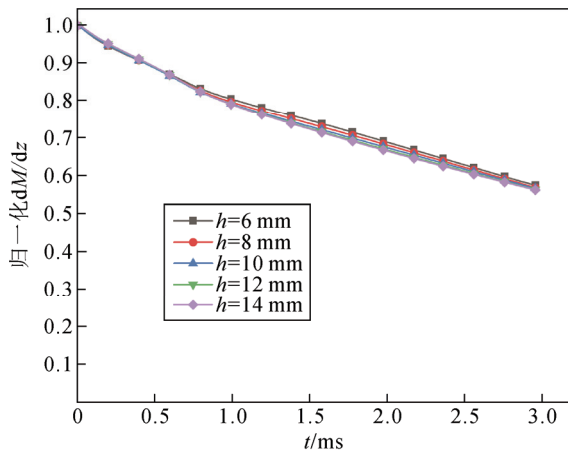
结合参数规格等要求确定参数范围，如：根据线圈规格、通流密度确定线圈截面尺寸、根据设备



(a) 不同电容C下归一化互感梯度



(b) 不同线圈宽度d下归一化互感梯度



(c) 不同线圈高度h下互感梯度

图 12 不同条件下互感梯度变化

Fig.12 Changes of mutual inductance gradient under different conditions

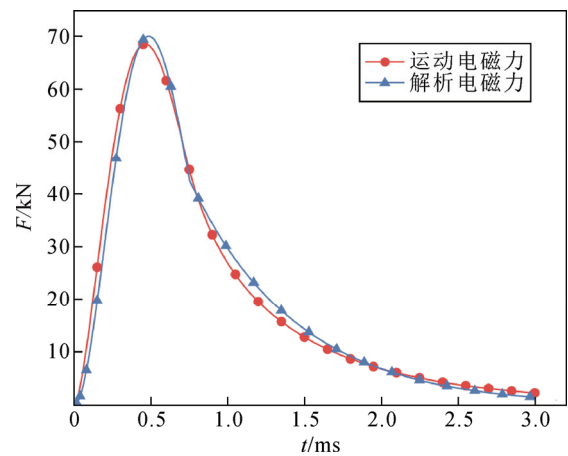


图 13 仿真计算与解析计算电磁力

Fig.13 Simulation and analytical calculation of electromagnetic force

体积和储能能量要求确定电容与初始电压范围等。

3) 频域解析分析

选取合理步长, 获取各参数在限定范围内取值。对多参数大范围的取值进行频域仿真, 获取频域参数, 将频域参数代入到解析式获取末位移, 分析比较末位移获取最优参数配置方案。

基于频域参数解析计算的电磁斥力机构效率优化方法从波形上趋近仿真结果, 相较于提取参数式的优化方法关联性更强。在优化过程中, 同步考虑了激励频率、线圈结构及两者耦合作用对参数的影响, 优化结果更准确。此外, 相较于有限元分析, 频域参数解析计算速度快, 可进行多参数大范围的参数扫描, 获取全局最优解。此方法也可与有限元算法、优化算法相结合, 如在优化算法中将解析位移设为目标函数进行优化, 或采用此方法确定参数全局最优解范围再采用有限元仿真进行参数扫描, 保证了优化的快速性与准确性。

斥力盘尺寸由机械强度决定, 本文在斥力盘尺寸一定的情况下, 对线圈结构和电源参数进行优化, 提高机构驱动效率。考虑设备小型化要求, 电容值选取不能过大, 取 $C_0 \leq 5 \text{ mF}$, 线圈单位面积载流能力有限, 限定单匝线圈截面积 $S_c \geq 20 \text{ mm}^2$ 。

保持电容初始储能 $0.5C_0U_0^2$ 一定, 改变激励频率和线圈高度, 不同频率与线圈高度下解析计算的机构末位移如图 14 所示。从图 14 中可以看出, 线圈高度一定时, 存在最优的激励频率, 使得末位移最大, 即电源参数配置中存在最优的电容与初始电压配置。电容较小时激励频率低, 机构加速过程慢; 电容较大时激励频率高, 但末速度小, 末位移会减小。激励频率一定时, 较小的线圈高度对应的机构末位移更大, 从磁场角度来看, 线圈高度减小, 电流与磁场分布更集中, 斥力盘与线圈间隙磁场更强, 电磁耦合程度更高。考虑到趋肤深度与载流密度等要求, 线圈高度不能太小。对于不同线圈高度, 末位移最大时的激励频率不同, 即不同线圈对应的最优电源参数不同。

线圈宽度一定时, 较小的线圈高度有利于增大机构末位移, 因此单匝线圈截面积 $S_c > 20 \text{ mm}^2$ 的线圈对应机构末位移小于等宽度时截面积 $S_c = 20 \text{ mm}^2$ 的线圈, 只须对线圈截面积 $S_c = 20 \text{ mm}^2$ 线圈结构进行设计。线圈宽度一定时, 非密绕线圈比相同匝数、宽度更大的密绕线圈电阻更大、效率更低, 因此仅考虑密绕线圈, 由此可确定不同线圈宽度下的线圈

匝数。保证线圈区域总宽度一定, 线圈间距为 0.5 mm 左右, 选取线圈宽度 \times 高度 \times 匝数为 1) $1 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 71$ 匝; 2) $1.5 \times 13.5 \text{ mm} \times 52$ 匝; 3) $2 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 42$ 匝; 4) $2.5 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 35$ 匝; 5) $3 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 30$ 匝的 5 种线圈进行仿真分析。

电容初始储能一定时, 电容越小, 激励频率越大, 电磁力峰值越大。而机构机械强度有限, 限定电流在 0.5 ms 后达到峰值, 时域频率 $f < 500 \text{ Hz}$, 频域激励频率 $f_0 = 2f \leq 1000 \text{ Hz}$ 。

不同线圈在不同激励频率下解析位移如图 15 所示, 随着线圈宽度增加, 线圈匝数减少, 等效电感减小, 在 $C_0 \leq 5 \text{ mF}$ 的限定下线圈工作频率范围减小。从图 15 中可以看出, 线圈宽度越大, 机构末位移越大, 综合考虑线圈宽度与匝数影响, 最优线圈结构在 4 与 5 号线圈间。为获取全局最优解, 只须进一步比较匝数为 31、32、33、34、35 的 4 号线圈与匝数 < 30 的 5 号线圈特性。对不同匝数的 4 号线圈和 5 号线圈进行频域参数解析分析, 位移如图 16 所示。

从图 16 中可以看出 30 匝 $3 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ 线圈下机构末位移较大, 线圈结构可选取 $3 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 70$ 匝。在此线圈参数下机构末位移随工作频率先增大后减小, 当工作频率为 930 Hz 时机构位移最大, 根据式(16)可计算得电容为 4 mF , 由初始储能一定可得初始电容电压 822.72 V 。由频域参数解析计算的线圈与电源最优参数: 线圈宽度 \times 高度 \times 匝数为 $3 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 30$ 匝, 电容 $C_0 = 4 \text{ mF}$, 初始电压 $U_0 = 822.72 \text{ V}$ 。

4.2 仿真验证

保证电容初始储能不变, 改变电容值, 对图 15 的 5 种线圈结构进行仿真分析, 并与图 15 的解析结

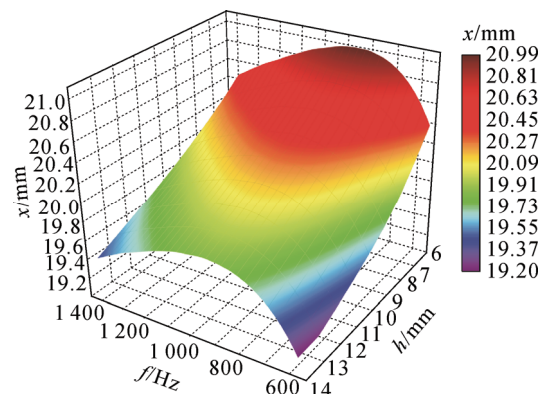


图 14 不同情况下斥力机构末位移

Fig.14 Last position shift of repulsive mechanism under different conditions

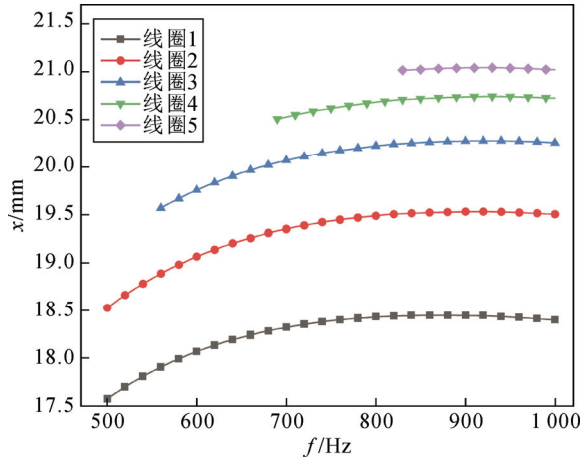


图 15 不同情况下机构末位移

Fig.15 Last position shift of the mechanism under different circumstances

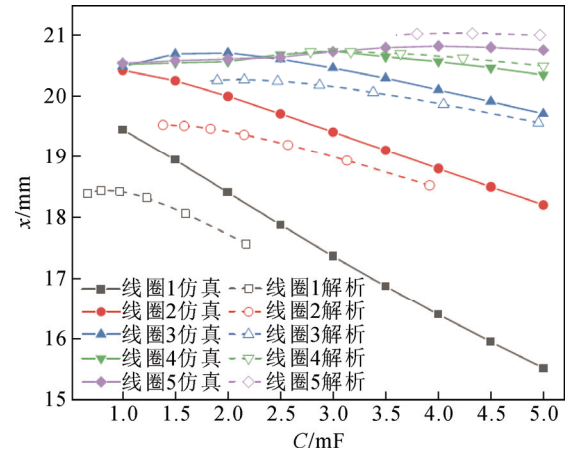
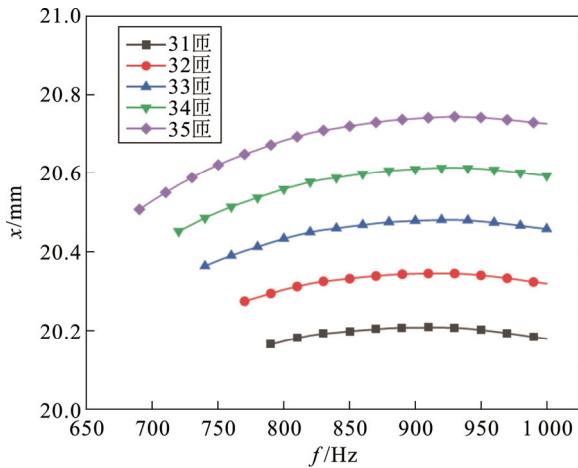
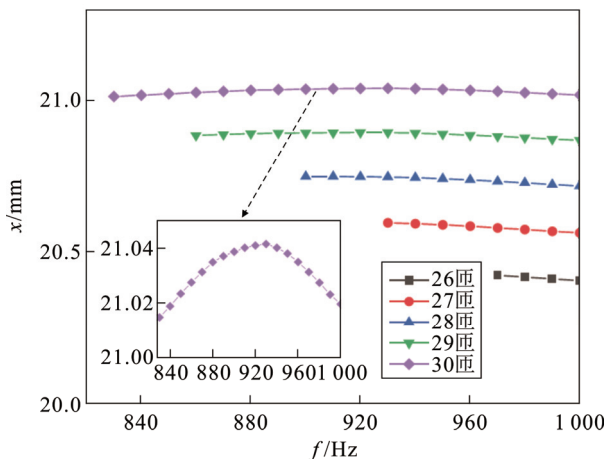


图 17 解析计算与仿真计算位移

Fig.17 Analytical calculation and simulation calculation of displacement



(a) 不同匝数的2.5 mm×8 mm线圈



(b) 不同匝数的3 mm×7 mm线圈

图 16 不同线圈匝数下机构末位移

Fig.16 End shift of the mechanism under different coil turns

果进行对比, 不同线圈在不同电源参数下的仿真与解析位移如图 17 所示。从图 17 中可以看出解析位

移与仿真位移的变化趋势具有很好的一致性, 根据仿真结果采用 3 mm×7 mm×70 匝的线圈, 电容 $C_0=4$ mF、电压 $U_0=822.72$ V 时机构末位移最大, 与解析分析一致。解析位移与仿真位移存在一定的误差, 这是由于解析计算中将互感梯度简化为线性函数, 忽略了不同结构、频率下互感梯度变化的差异性。从整体上看, 解析计算与仿真计算趋势具有良好的 consistency, 可以反映不同线圈结构、电源参数对机构末位移的影响, 解析分析可用于参数优化, 提高机构效率。

5 结论

1) 斥力盘运动造成互感、互感梯度变化较大, 但对电流、电磁力的影响小, 解析分析中可将互感简化为常数。

2) f_ω 频域参数反映了激励频率、电流分布、截面尺寸对电磁参数的影响, 将 f_ω 频域参数运用于解析计算得到的电流、电磁力更准确。

3) 频域参数解析计算速度快, 可对多个参数进行大范围扫描, 获取全局最优解, 基于频域参数解析计算的电磁斥力机构效率优化方法优化结果更准确, 为全局最优解。

参考文献 References

[1] 于宁, 曾建斌, 游一民, 等. 真空断路器弹簧操动机构的优化[J]. 高压电器, 2024, 60(3): 25-31.
YU Ning, ZENG Jianbin, YOU Yimin, et al. Optimization of spring operating mechanism for vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(3): 25-31.
[2] RO J S, HONG S K, JUNG H K. Characteristic analysis and design of

- a novel permanent magnetic actuator for a vacuum circuit breaker[J]. IET Electric Power Applications, 2013, 7(2): 87-96.
- [3] HUANG Y L, WANG J J, ZHANG W C, et al. A motor-drive-based operating mechanism for high-voltage circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2602-2609.
- [4] 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.
- [5] AL-DWEIKAT M, CUI J, SUN S, et al. A review on thomson coil actuators in fast mechanical switching[J]. Actuators, 2022, 11(6): 154.
- [6] 王 蕾, 管 臣, 李欣悦, 等. 快速真空开关电磁斥力机构瞬态动力学研究[J]. 高压电器, 2022, 58(9): 72-77.
WANG Lei, GUAN Chen, LI Xinyue, et al. Study on transient dynamic characteristics of electromagnetic repulsion mechanism for fast vacuum switch[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 72-77.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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 Technology, 2012, 32(12): 35-37.
- [11] 李庆民, 刘卫东, 钱家骊. 电磁推力机构的一种分析方法[J]. 电工技术学报, 2004, 19(2): 20-24, 40.
LI Qingmin, LIU Weidong, QIAN Jiali. An analytical method for electromagnetic repulsion mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(2): 20-24, 40.
- [12] 王丽娜, 刘 阳, 赵智忠. 双向线圈式电磁斥力机构结构与磁场分析[J]. 电网技术, 2023, 47(9): 3924-3933.
WANG Lina, LIU Yang, ZHAO Zhizhong. Structural design and magnetic field analysis of bidirectional coil-plate electromagnetic repulsion mechanism[J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3924-3933.
- [13] 江壮贤, 庄劲武, 王 晨, 等. 电磁斥力机构中驱动电容参数对触头初始电气间隙的影响[J]. 船电技术, 2012, 32(2): 1-4.
JIANG Zhuangxian, ZHUANG Jinwu, WANG Chen, et al. Effect of the driving capacitor of electro-magnetic repulsion mechanism on the initial gap of contact[J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2012, 32(2): 1-4.
- [14] 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, China: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [15] 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 the mathematical model to electromagnetic repulsion mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24): 175-182.
- [16] 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 ERM based on electromagnetic coupling double-coils model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(6): 205-211.
- [17] 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, China: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [18] 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-coil electromagnetic repulsive actuators[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 4207-4212.
- [19] YUAN Z, He J J, PAN Y, et al. Research on ultra-fast vacuum mechanical switch driven by repulsive force actuator[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(12): 125103.
- [20] 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.
- [21] 卡兰塔罗夫, 采伊特林. 电感计算手册[M]. 陈汤铭, 译. 北京: 机械工业出版社, 1992: 1-4.
Калантаров П Л, Цейтлин Л А. Расчет индуктивностей справочная книга[M]. CHEN Tangming, translated. Beijing, China: China Machine Press, 1992: 1-4.
- [22] LEQUESNE B, HOLP T, SCHMALZ S C, et al. Frequency-domain analysis and design of Thomson-coil actuators[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(2): 1765-1774.



HE Yinghui

何莹辉

2001—, 男, 硕士生

主要从事真空开关及其操动机构运动特性研究

E-mail: 1803062646@qq.com



CHEN Lixue

陈立学(通信作者)

1984—, 男, 博士, 教授, 博导

主要从事脉冲功率计算和高压电器相关研究

E-mail: chenlixue@hust.edu.cn

Ph.D., Professor

Corresponding author

收稿日期 2024-05-21 修回日期 2025-01-17 编辑 曾文君