

# 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

武 瑾, 庄劲武, 袁志方

(海军工程大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430033)

**摘要:**针对现有电磁斥力机构等效计算方法无法有效应用的问题,提出了一种电磁耦合双线圈模型的等效计算方法。等效模型主要包括驱动回路与感应回路两部分,在基本电路方程之外,引入了电磁斥力与机械运动的计算。通过合理的简化,对等效模型中集肤深度、线圈电阻、线圈自感、线圈互感等参数进行辨识。在此基础上,以某型 1 000 V/400 A 电磁斥力机构样机为算例,采用时域迭代的离散算法较为系统地分析了两线圈内径、径向厚度以及斥力线圈匝数、轴向厚度等对机构效率和动子行程的影响规律。所得到的规律性认识可有效指导电磁斥力机构的优化设计。

**关键词:**断路器;电磁斥力机构;电磁耦合双线圈模型;机构效率;动子行程;数学模型

**中图分类号:**TM 56

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2019.06.029

## 0 引言

在地铁、轻轨、船舶等直流电网中,随着系统容量的不断增大,一种将机械开关与固态开关相结合的混合型直流限流断路器应运而生<sup>[1-3]</sup>。固态开关无弧且动作迅速,为了快速抑制短路电流的上升,需要缩短机械开关的响应即刚分时间,提高动触头运动初期的分闸速度,因此,基于涡流感应原理的电磁斥力机构逐渐取代了传统的触头操动机构,它与固态开关配合使用,可以有效地提高断路器分断短路电流的能力。

电磁斥力机构的驱动原理是一个涉及电磁场、电路、机械运动等的复杂动态过程。为了优化电磁斥力机构设计,文献[4-6]借助有限元软件建立了电磁斥力机构的仿真模型,定性分析了结构尺寸、电容容量、预充电压等已知参数对脉冲电流、电磁斥力以及斥力盘运动速度等的影响;文献[7-8]对斥力盘进行同轴圆环形线圈的等效,将机构电与磁的动态过程转化为简单的电路方程组,并编程实现了机构的求解,同时结合该方法,进一步分析了电磁斥力机构结构参数对互感、互感导数以及电流、力的影响;文献[9-10]以电磁斥力机构效率为优化目标,分析了动子质量、线圈内外径、电阻、电感等对效率的影响。事实上,除动子质量和初始能量外,电磁斥力的大小、峰值时间、作用时间共同决定了电磁斥力机构效率和动子行程,而力的产生、结束与很多因素有关,包括驱动回路的等效电阻与电感、脉冲电流衰减

的时间常数、互感随开距变化率等,这些最终将由电磁斥力机构的结构参数决定<sup>[11-15]</sup>。由于电磁斥力机构的工作过程涉及复杂的场域问题,且中间参量时变、未知变量数目繁多,为此现阶段采用 Ansoft 等有限元商业软件进行求解分析是一种主流且实用的做法。有限元商业软件在为设计者提供便捷服务的同时,出于商业保密等诸多考虑,一般情况下均不会提供内部程序源代码,所以用户很难直观地观察变量与变量之间的数学关系,这也给指导工程实践带来了局限。

因此,本文尝试采用解析法对电磁斥力机构的运动过程进行分析,通过合理简化,构建数学模型并获取机构变量的解析式,进而直观呈现各变量间的数学关系,从而更直接地指导工程实践。本文的主要工作是在电磁斥力机构等效的电磁耦合双线圈模型的基础上(详见文献[5]),结合模型参量的数学表达式和仿真算法,以提高机构效率、增加动子行程为优化指标,分析两线圈内径、径向厚度以及斥力线圈匝数、轴向厚度等对上述指标的影响。

## 1 机构的电磁耦合双线圈模型

电磁斥力机构工作原理图如图 1 所示。电磁斥力机构主要是利用放电脉冲电流通过圆盘状斥力线圈时,与附近金属斥力盘中感应出的涡流即感应电流产生斥力作用,从而推动动触头快速动作。通常,

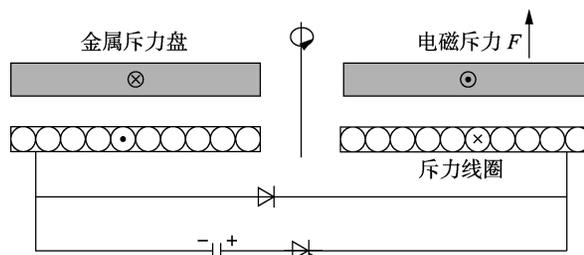


图 1 电磁斥力机构工作原理图

Fig.1 Working principle of ERM

收稿日期:2018-08-31;修回日期:2019-05-14

基金项目:中国博士后科学基金第 10 批特别资助项目(2017T100798);中国博士后科学基金第 60 批面上资助项目(2016M603009)

Project supported by the Special Financial Grant from China Postdoctoral Science Foundation(2017T100798) and the Class General Financial Grant from China Postdoctoral Science Foundation(2016M603009)

斥力线圈可以看作是由多个导电圆截面相同、半径不同的同轴圆环线圈串联而成。脉冲电流由斥力线圈外接线路中的电容放电产生,为了延长力的作用时间,斥力线圈两端并联 1 个二极管,构成续流回路。

文献[11,14]将斥力盘等效为多个导电截面相同、半径不同的同轴圆环线圈,这些线圈紧密排列且相互独立。为了进一步降低解析难度,论文提出假设“斥力盘的等效线圈模型中,多匝共轴圆环线圈串行联接”,即“斥力盘线圈”。借助 Ansoft 有限元软件,建立斥力盘等效线圈并联与串联这 2 种连接方式下电磁斥力机构的二维轴对称仿真模型,通过脉冲电流与电磁斥力随时间变化曲线的波形对比,可以论证该假设的合理性,该部分内容文献[5]中已进行了论述,本文是在前期模型已得到验证的基础上继续开展的优化工作,限于篇幅,模型的正确性不再赘述。

基于此,电磁斥力机构可等效为 2 个圆盘状线圈回路间的相互作用,如图 2 所示。图中,左侧是由储能电容  $C$  与斥力线圈构成的驱动回路,用于产生脉冲电流  $i_a$ ,斥力线圈电阻与自感分别记作  $R_a$ 、 $L_a$ ;右侧是由“斥力盘线圈”构成的感应回路,用于产生感应电流  $i_x$ ，“斥力盘线圈”电阻与自感分别记作  $R_x$ 、 $L_x$ ;由于斥力线圈与斥力盘开距小,且斥力盘为金属导体,则两圆盘状线圈间必然存在磁耦合, $M$  为其间互感,在电磁斥力机构动作过程中,斥力盘会逐渐远离斥力线圈,因此  $M$  是随开距、时间变化的中间变量。

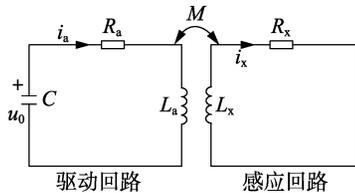


图 2 电磁斥力机构等效的电磁耦合双线圈模型

Fig.2 Electromagnetic coupling double-coil model equivalent to ERM

根据图 2 可得到电磁斥力机构驱动回路与感应回路的 2 个基本电路方程为:

$$i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + M \frac{di_x}{dt} + i_x \frac{dM}{dt} = u_c(t) \quad (1)$$

$$i_x R_x + L_x \frac{di_x}{dt} + M \frac{di_a}{dt} + i_a \frac{dM}{dt} = 0 \quad (2)$$

其中,  $u_c(t) = u_0 - \frac{1}{C} \int_0^t i_a(x) dx$ ,  $u_0$  为预充电压。

为了求解机构变量,还需建立机构电磁斥力的解析式及机械运动方程,即:

$$F = i_a i_x \frac{dM}{dz} \quad (3)$$

$$\begin{cases} a_{cc} = F/m \\ v = \int a_{cc} dt \\ s = \int v dt \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $m$ 、 $a_{cc}$ 、 $v$ 、 $s$  分别为机构动子的质量、加速度、速度、行程。

## 2 基于电磁耦合双线圈模型的解析与仿真

### 2.1 模型参数的获取

根据电磁耦合双线圈模型,可获取机构的双线圈结构尺寸,如图 3 所示。图中,  $n$  和  $N$  分别为斥力线圈和“斥力盘线圈”的匝数;  $a$  和  $A$  分别为斥力线圈和“斥力盘线圈”的轴向厚度;  $d_2$ 、 $r$  和  $z$  分别为两线圈的内径、径向厚度及其间的开距;  $b$  为两线圈间的初始开距。

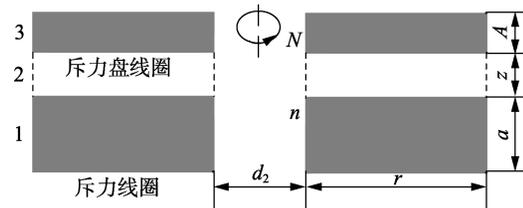


图 3 电磁斥力机构双线圈结构

Fig.3 Electromagnetic coupling double-coil structure of ERM

构建斥力盘等效线圈模型时,取其内径、径向厚度与斥力线圈一致<sup>[9,11]</sup>。本文中,斥力盘等效线圈由  $N$  匝横截面为矩形的导线绕制而成,截面宽度  $x$  可任意设置,但需保证  $x_w N = r$  不变,而截面高度即轴向厚度由斥力盘的集肤深度确定,即:

$$A = \sqrt{\frac{2}{\omega_x \mu_x \sigma_x}}$$

其中,  $\omega_x$  为信号角频率;  $\mu_x$  为材料磁导率;  $\sigma_x$  为材料电导率。

根据图 3 所示的已知参数,可推导出斥力线圈电阻  $R_a$  和“斥力盘线圈”电阻  $R_x$  分别如式(5)和式(6)所示。

$$R_a = \frac{\rho_a n (r + d_2)}{r_0^2} \quad (5)$$

$$R_x = \frac{\rho_x \pi N (r + d_2)}{xA} \quad (6)$$

其中,  $\rho_a$ 、 $\rho_x$  分别为斥力线圈、斥力盘材料的电阻率;  $r_0$  为斥力线圈导电圆截面的半径。

文献[15]提供了求解两同轴且具有矩形截面的圆盘状线圈间互感的方法和多项式,根据电磁斥力机构的实际应用环境和工程需要,借助 MATLAB 曲面拟合,推出斥力线圈自感  $L_a$ 、“斥力盘线圈”自感  $L_x$  和两线圈的互感的简化解析式分别如式(7)一

(9)所示。

$$L_a = \frac{\mu_0}{2} \times 0.898 \ 7n^2 \frac{(r+d_2)^{1.442}}{a^{0.105} r^{0.337}} \quad (7)$$

$$L_x = \frac{\mu_0}{2} \times 0.898 \ 7N^2 \frac{(r+d_2)^{1.442}}{A^{0.105} r^{0.337}} \quad (8)$$

$$M_0 = [(a+z+A)^{1.895} + z^{1.895} - (a+z)^{1.895} - (b+A)^{1.895}] \times \frac{\mu_0}{4} \times 0.898 \ 7 \frac{(r+d_2)^{1.442}}{r^{0.337}} \frac{nN}{aA} \quad (9)$$

## 2.2 电磁斥力机构解析

在基本电路方程式(1)、(2)中,未知变量包括脉冲电流  $i_a$  与感应电流  $i_x$ ,定值参数有斥力线圈、“斥力盘线圈”的电阻与自感,即  $R_a$ 、 $R_x$  与  $L_a$ 、 $L_x$ 。如2.1节所述,斥力线圈、“斥力盘线圈”间互感  $M$  与开距  $z$  有关,则时间的推移将引起开距的变化,从而影响互感的变化,即互感  $M$  为时变参数。另外,  $dM/dt$  为另一个时变系数,且有:

$$\frac{dM}{dt} = v \frac{dM}{dz} \quad (10)$$

由式(10)可见,随着时间的推移,电磁斥力机构动子速度的增加使得互感随时间变化率并非定值,这些都给变量求解增加了不少难度。

为了进一步简化电磁斥力机构的等效模型,求解  $i_a$  与  $i_x$  的解析式,本文对电磁斥力机构在混合型直流限流断路器中的大量应用案例进行分析与研究后,提出如下假设。

假设1:在电磁斥力作用时间内,当电磁斥力机构动子的平均速度小于 3 m/s 时,互感  $M$  的变化满足  $|M-M_0| < 0.1M_0$ ,因此可将  $M$  记作初始开距下的互感  $M_0$ 。

假设2:在电磁斥力作用时间内,当电磁斥力机构动子的平均速度小于 3 m/s 时,互感随时间的变化率  $dM/dt$  可近似为常数,记作  $\lambda$ ,且满足式(11)。

$$\Delta M \leq 0.05 \left( \frac{L_x}{M_0} R_a + \frac{M_0}{L_x} R_x \right) \Delta t \quad (11)$$

其中,  $\Delta t$  为电磁斥力的作用时间;  $\Delta M$  为  $\Delta t$  内互感的减小量。

上述2条假设的合理性已在文献[5]中进行了专题论述,限于篇幅,本文不再赘述。基于假设1、2,可推导出电磁斥力机构驱动回路的等效电阻  $R_{eq}$ 、等效电感  $L_{eq}$  以及感应电流与脉冲电流比的解析式分别如式(12)~(14)所示。

$$R_{eq} = R_a + \frac{M_0^2}{L_x^2} R_x \quad (12)$$

$$L_{eq} = L_a - \frac{M_0^2}{L_x} \quad (13)$$

$$\frac{i_x}{i_a} = -\frac{M_0}{L_x} \quad (14)$$

上升阶段的电流是由一个简单的二阶振荡电路产生,而下降阶段的电流则是由斥力线圈与二极管构成的续流回路产生。

最后,为了求解电磁斥力,  $dM/dz$  可通过对解析式(9)求关于  $z$  的偏微分获取。

## 2.3 电磁斥力机构仿真

基于电磁耦合双线圈模型的机构仿真程序流程如图4所示,模型以基本电路方程式(1)与(2)、电磁斥力解析式(3)、机械运动方程式(4)为基础。由于斥力线圈、“斥力盘线圈”间互感是随开距、时间变化的中间变量,程序的实现采用时域迭代的离散算法。

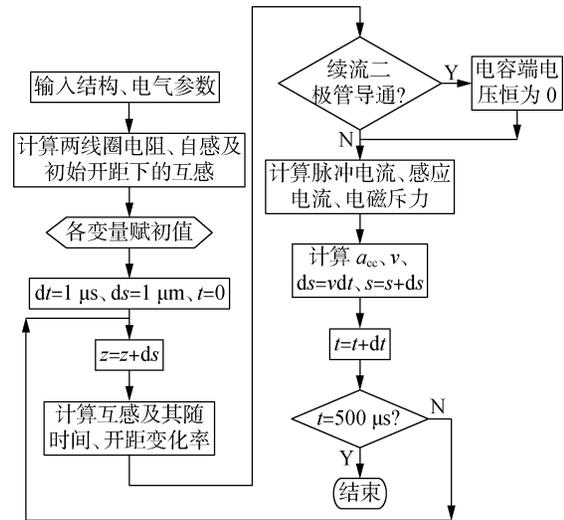


图4 电磁斥力机构仿真流程图

Fig.4 Simulation flowchart of ERM

图4中,  $t$  为动子运动总的时间,可根据需要自行设置;  $dt$  为时间步长,为了提高计算精度,取其为 1  $\mu\text{s}$ 。在每个给定的时间步长内,电磁斥力机构互感、电流、力等变量的求解均与这段时间内位移的增量有关,因此当程序运行到第1个时间步长时,必须给定一个位移步长。由于动子在第1个时间步长内的位移几乎可以忽略不计,所以不妨将最初的位移增量  $ds$  设置为 1  $\mu\text{m}$ ,然后通过电磁斥力解析式(3)和机械运动方程式(4)的计算获取新的位移增量,并自动将其代入下一个时间步长,如此循环,直至程序运行完毕。

## 3 电磁斥力机构结构参数的优化分析

通常,电磁斥力机构效率的高低决定着其设计的优劣,若将电磁斥力机构动子在电磁斥力作用时间内获取的最大速度记作  $v_{\max}$ ,则电磁斥力机构效率可定义为动子最大动能与储能电容初始能量的比,即:

$$\eta = \frac{0.5mv_{\max}^2}{0.5Cu_0^2} \times 100\% \quad (15)$$

此外,根据电磁斥力机构在混合型直流限流断路器中的具体应用,它还有一个优化设计指标,即动、静触头在某一时刻形成的开距大小,能够承受触头两端产生的过电压。

现以 1 000 V/400 A 混合型直流限流断路器用 电磁斥力机构样机为研究算例。该样机的斥力线圈材料为铜、斥力盘材料为铝,电气参数如表 1 所示。表中各个参数值主要是根据混合型直流限流断路器的性能需求、尺寸规格等确定。

表 1 直流 1 000 V/400 A 机构样机电气参数

Table 1 Electrical parameters of DC 1 000 V/400 A ERM prototype

参数	参数值	参数	参数值
斥力线圈匝数	20	初始开距/mm	1.8
斥力线圈内径/mm	30	动子质量/kg	0.45
斥力盘外径/mm	80	储能电容/ $\mu\text{F}$	100
斥力盘厚度/mm	4	预充电压/V	1 500

为了进一步从解析角度分析电磁斥力机构的结构参数,对于图 3,定义  $r = \kappa d_2$  ( $\kappa \leq 1$ ),同时将斥力线圈改为由双层导电截面为矩形的线圈串联而成,则有:

$$R_a = \frac{\kappa+1}{\kappa} \frac{\rho_a \pi n^2}{a} \quad (16)$$

$$R_x = \frac{\kappa+1}{\kappa} \frac{\rho_x \pi N^2}{A} \quad (17)$$

$$L_a = \frac{\mu_0}{2} \times 0.898 \ 7 n^2 \frac{(1+\kappa)^{1.442}}{\kappa^{0.337}} \frac{d_2^{1.105}}{a^{0.105}} \quad (18)$$

$$L_x = \frac{\mu_0}{2} \times 0.898 \ 7 N^2 \frac{(1+\kappa)^{1.442}}{\kappa^{0.337}} \frac{d_2^{1.105}}{A^{0.105}} \quad (19)$$

$$M_0 = [(a+b+A)^{1.895} + b^{1.895} - (a+b)^{1.895} - (b+A)^{1.895}] \times \frac{\mu_0}{4} \times 0.898 \ 7 \frac{(1+\kappa)^{1.442}}{\kappa^{0.337}} d_2^{1.105} \frac{nN}{aA} \quad (20)$$

$$\frac{dM}{dz} = [(a+z+A)^{1.895} + z^{0.895} - (a+z)^{0.895} - (z+A)^{0.895}] \times \mu_0 \times 0.425 \ 8 \frac{(1+\kappa)^{1.442}}{\kappa^{0.337}} d_2^{1.105} \frac{nN}{aA} \quad (21)$$

若忽略驱动回路的等效电阻,则脉冲电流峰值  $i_{aM}$ 、峰值时间  $t_p$  以及电磁斥力峰值  $F_M$  的表达式可简化为:

$$i_{aM} = u_0 \sqrt{\frac{C}{L_{eq}}} \quad (22)$$

$$t_p = \frac{\pi}{2} \sqrt{CL_{eq}} \quad (23)$$

$$F_M = i_{aM} i_{xM} \frac{dM}{dz} = -u_0^2 \frac{C}{L_{eq}} \frac{M_0}{L_x} \frac{dM}{dz} \quad (24)$$

其中,  $i_{xM}$  为  $i_x$  的峰值。

从上述解析式可以看出,斥力线圈和“斥力盘线圈”的内径、径向厚度、匝数、轴向厚度以及开距的大小会对电阻、电感值有一定的影响,从而影响电磁斥力机构动子的效率和行程。

然而,在对大量算例进行演算后发现,“斥力盘线圈”匝数的变化虽然使感应电流发生了变化,但对电磁斥力及动子的运动行程没有影响。

此外,“斥力盘线圈”是对斥力盘的等效,其轴向厚度由驱动回路的电容放电频率决定,而它的变化并不能等效为斥力盘厚度的变化。事实上,斥力盘的厚度不能小于“斥力盘线圈”的轴向厚度,且斥力盘的厚度必须可以承受脉冲斥力的冲击,另外,由于动子质量的约束,斥力盘不能无限厚。

### 3.1 两线圈的内径

令图 3 中其他参数不变,仅改变斥力线圈与“斥力盘线圈”的内径,假设  $d_2$  的取值范围为 [30, 50] mm。

由于径向厚度不变,随着内径的增大,  $\kappa$  随之减小,由式(12)、(16)、(17)、(19)、(20)可以推得,驱动回路的等效电阻随着内径的增大而增大,当内径增大到原来的  $K$  倍时,等效电阻变为原来的

$\left(1 + \frac{K-1}{\kappa+1}\right)$  倍,  $\kappa$  值越小,倍数越大。由(13)、(18)—(20)推导得,驱动回路等效电感中的变系数为  $\frac{(1+\kappa)^{1.442}}{\kappa^{0.337}} d_2^{1.105}$ , 当内径增大到原来的  $K$  倍时,等效

电感变为原来的  $\left(1 + \frac{K-1}{\kappa+1}\right)^{1.442}$  倍,  $\kappa$  值越小,倍数越

大。由式(21)可知,互感随开距的变化率有着与等效电感同样的变系数,则  $dM/dz$  与  $L_{eq}$  的变化规律基本一致。因此由式(24)可简单地推导出:内径增大后,电磁斥力峰值基本无变化。

通常情况下,电磁斥力与脉冲电流上升期的时间是一样的,但由基本电路方程式(1)可知,当脉冲电流下降趋缓时,斥力盘会感应出与斥力线圈同向的电流,这时脉冲力由斥力变为吸力,电磁斥力作用时间结束。在对大量算例进行演算后发现,经过  $\tau \sim 2\tau$  ( $\tau = L_{eq}/R_{eq}$ , 为脉冲电流衰减期的时间常数)的时间,电磁斥力即由峰值迅速衰减到 0。由式(12)、(13)推导得,  $\tau$  随着内径的增大而增大,当内径增大到原来的  $K$  倍时,  $\tau$  变为原来的  $\left(1 + \frac{K-1}{\kappa+1}\right)^{1.442}$  倍,  $\kappa$

值越小,倍数越大。

电磁斥力的大小和作用时间共同决定了电磁斥力机构动子的行程和效率。随着内径的增大,电磁

斥力峰值基本不变,峰值时间增大,作用时间增长,电磁斥力机构效率得到提高。两线圈内径对电磁斥力机构效率和动子行程的影响如图 5 所示。由图可见,就 1 000 V/400 A 的样机而言,内径由 30 mm 增大到 50 mm 后,动子获取的最大速度以及在 300  $\mu$ s 时刻的行程有了一定的提高,但并不明显。这主要由三方面原因引起:①根据两线圈内径  $d_2$  的取值范围 [30, 50] mm,  $K$  最大为 5/3;②径向厚度与内径的比值  $\kappa$  较大,为 2/3;③电磁斥力的作用时间仅为 300  $\mu$ s,因此内径增大后,电磁斥力增长的作用时间不足以使电磁斥力机构效率和动子行程有大幅提升。

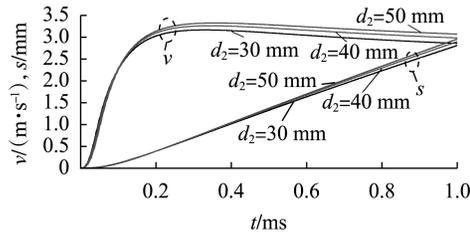


图 5 两线圈内径对电磁斥力机构效率和动子行程的影响  
Fig.5 Influences of inner diameters on velocity and displacement curves

### 3.2 斥力线圈的匝数

令图 3 中其他参数不变,仅改变斥力线圈的匝数,相应地,斥力线圈导电截面的宽度会有变化,但由式(16)一(21)可以看出,宽度这一变量被隐去,分析时可以不予考虑。

依据解析式(16)一(21),若斥力线圈的匝数增大到原来的  $K$  倍,则“斥力盘线圈”的电阻、自感不变,斥力线圈的电阻、自感变为原来的  $K^2$  倍,两线圈间互感、互感随开距的变化率变为原来的  $K$  倍。再由解析式(12)、(13)推导得:驱动回路的等效电阻、电感均变为原来的  $K^2$  倍。

特别地,若忽略驱动回路的等效电阻,由式(24)推得,电磁斥力的峰值基本不变,但是,由于等效电阻与电感的变化规律一致,随着斥力线圈匝数的增多,电阻对脉冲电流的影响越来越大,因此,电磁斥力峰值会随着斥力线圈匝数的增多而明显降低。斥力线圈匝数对动子电磁斥力的影响如图 6 所示。由图可见,对 1 000 V/400 A 样机而言,匝数由 20 减小到 10 后,电磁斥力增大了约 20%。

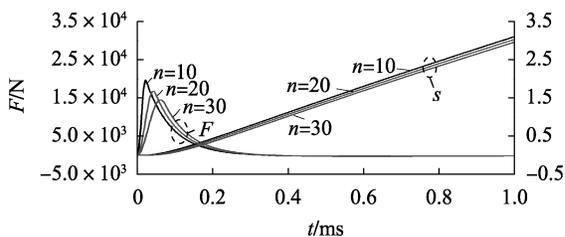


图 6 斥力线圈匝数对电磁斥力和行程的影响  
Fig.6 Influences of number of repulsion windings on electromagnetic repulsion and displacement

由式(23)可知,若斥力线圈匝数增大到原来的  $K$  倍,则脉冲斥力的峰值时间也变为原来的  $K$  倍,同时,脉冲电流衰减期的时间常数  $\tau$  不变。因此,随着斥力线圈匝数的增多,电磁斥力峰值明显降低,作用时间增长,这会适当地降低机构效率并减小动子行程,但效果并不明显。斥力线圈匝数对动子行程的影响如图 6 所示。由图 6 可见,斥力线圈匝数由 20 减少到 10 后,虽然斥力峰值明显提高,但动子行程的增加量是有限的。

电磁斥力机构工程化时,一方面考虑到斥力线圈的通流能力和线圈匝间的电动力,导电截面的宽度不能过小,另一方面考虑到斥力盘的抗冲击效果,电磁斥力不能过大。因此,对于斥力线圈的匝数应进行折中选择,就 1 000 V/400 A 机构样机而言,斥力线圈匝数为 20 匝即可。

### 3.3 两线圈的径向厚度

令图 3 中其他参数不变,仅改变两线圈的径向厚度。当  $d_2 = 30$  mm 时,径向厚度可能的取值范围为  $r \in [10, 30]$  mm ( $\kappa \in [0.3, 1]$ )。电磁斥力机构主要参数随  $\kappa$  值的变化情况如表 2 所示。由表 2 可见,随着  $\kappa$  值的增大,尽管互感随开距的变化率的绝对值有减小趋势,但驱动回路的等效电阻、电感均呈下降趋势,感应电流与脉冲电流比的绝对值也随之增大,因此电磁斥力峰值会逐渐提高。

表 2 电磁斥力机构主要参数随  $\kappa$  值的变化情况  
Table 2 Variation of main parameters of ERM along with change of value of  $\kappa$

$\kappa$	$R_{eq}/m\Omega$	$L_{eq}/\mu H$	$i_x/i_a$	$dM/dz/(H \cdot m^{-1})$
0.3	75	11.0	-0.63	-0.001 45
0.5	61	9.3	-0.70	-0.001 30
0.7	54	8.4	-0.75	-0.001 20
1.0	49	7.6	-0.79	-0.001 10

径向厚度对电磁斥力及动子行程的影响见图 7。由图可见,随着径向厚度的增加,不仅电磁斥力峰值提高,而且电磁斥力的作用时间增长,因此,电磁斥力机构动子行程增大的幅度明显,就 1 000 V/400 A 样机而言,由于电磁斥力的作用时间仅 500  $\mu$ s,则行程的增大同时也意味着机构效率的提高。

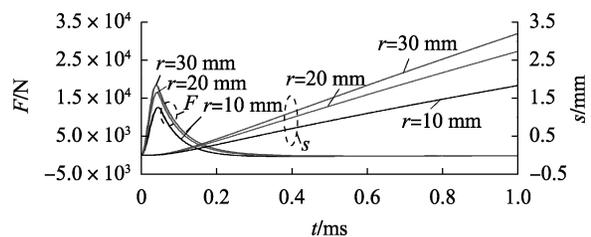


图 7 径向厚度对电磁斥力及动子行程的影响  
Fig.7 Influence of radial thicknesses of repulsion coil on repulsion and displacement

将斥力线圈由 20 匝减少到 10 匝,随着径向厚

度的增加,电磁斥力机构效率和动子行程有着与上面相同的变化规律。

### 3.4 斥力线圈的轴向厚度

仅改变图 3 中斥力线圈轴向厚度  $a$ , 根据机构的工程化需求,  $a$  的取值范围为  $[1, 6]$  mm。电磁斥力机构主要参量随斥力线圈轴向厚度变化的情况如表 3 所示。由表 3 可见, 随着斥力线圈轴向厚度的增大, 驱动回路等效电阻逐渐减小, 而等效电感逐渐增大, 同时, 感应电流与脉冲电流比的绝对值随之减小, 则 2 种电流的变化趋势均不单调, 而是在中间某一值上存在最大值。

表 3 电磁斥力机构主要参量随斥力线圈轴向厚度的变化情况

Table 3 Variation of main parameters of ERM along with change axial thicknesses of repulsion coil

$a/\text{mm}$	$R_{\text{eq}}/\text{m}\Omega$	$L_{\text{eq}}/\mu\text{H}$	$i_x/i_a$	$dM/dz/(\text{H}\cdot\text{m}^{-1})$
1	105	7.3	-0.82	-0.001
2	75	7.8	-0.79	-0.001
4	55	8.5	-0.74	-0.001
6	45	9.1	-0.69	-0.001

斥力线圈的轴向厚度对电磁斥力的影响如图 8 所示。由于电流的变化趋势不单调, 且互感随开距变化率基本不变, 那么随着斥力线圈轴向厚度的增大, 电磁斥力峰值先增大后减小, 同时, 由于等效电阻与电感相反的变化趋势, 使得电磁斥力的作用时间显著增长, 因此在斥力线圈轴向厚度的变化区间内, 电磁斥力机构效率和动子行程的变化趋势均不单调, 而是在中间某一值上取得最大值。斥力线圈的轴向厚度对动子速度和行程的影响分别如图 9 (a)、(b) 所示, 对于 1 000 V/400 A 机构样机而言, 当  $a=4$  mm 时, 电磁斥力机构效率最高。

将斥力线圈由 20 匝减少到 10 匝, 随着斥力线圈轴向厚度的增大, 电磁斥力机构变量有着与上面

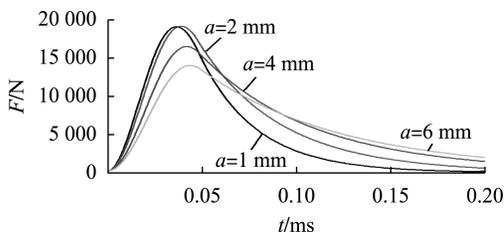
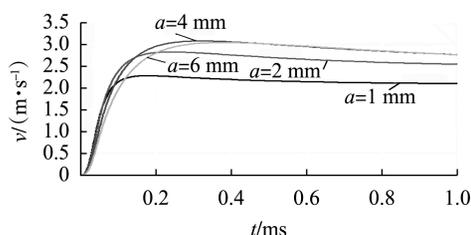
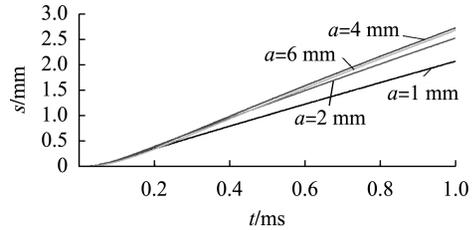


图 8 斥力线圈的轴向厚度对电磁斥力的影响

Fig.8 Influence of axial thicknesses of repulsion coil on repulsion



(a) 对速度的影响



(b) 对行程的影响

图 9 斥力线圈的轴向厚度对动子速度和行程的影响

Fig.9 Influences of axial thicknesses of repulsion coil on velocity and displacement

相同的变化规律。

## 4 结论

本文基于电磁耦合双线圈模型的解析表达式与仿真算法, 以 1 000 V/400 A 机构样机为研究算例, 分析结构参数包括两线圈内径、径向厚度以及斥力线圈匝数、轴向厚度等对电磁斥力机构效率和动子行程的影响, 得到如下结论:

(1) 在其他结构参数不变的情况下, 增大两线圈内径, 有助于提高机构效率和增加动子行程, 而提升能力与内径增大的幅度、径向厚度与内径的比以及电磁斥力的作用时间有关, 幅度越大、比越小、作用时间越长, 提升效果越明显;

(2) 在其他结构参数不变的情况下, 仅改变斥力线圈匝数, 对电磁斥力机构效率和动子行程的影响并不大, 但考虑到一方面斥力线圈的通流能力和线圈匝间的电动力, 导电截面宽度不能过小, 另一方面斥力盘的抗冲击效果, 电磁斥力不能过大, 因此线圈匝数应当选择得适中;

(3) 在径向厚度不大于两线圈内径情况下, 其他结构参数不变时, 径向厚度的增加有助于机构效率和动子行程的提升;

(4) 在斥力线圈轴向厚度  $a$  的变化范围  $[1, 6]$  mm 内, 电磁斥力机构效率和动子行程的变化趋势均不单调, 而是在中间某一值上存在最大值。

## 参考文献:

- [1] KISHIDA Y, KOYAMA K, SASAO H, et al. Development of the high speed switch and its application [C] // Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference. St. Louis, MO, USA: IEEE, 1998: 2321-2328.
- [2] FRANCK C M. HVDC circuit breakers: a review identifying future research needs [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26 (2): 998-1007.
- [3] SATPATHI K, UKIL A, POU J. Short-circuit fault management in DC electric ship propulsion system: protection requirements, review of existing technologies and future research trends [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4 (1): 272-291.
- [4] 袁志方, 庄劲武, 陈倩, 等. 开断速度对电磁斥力高速开断器介质恢复特性的影响 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35 (7): 140-

146.  
YUAN Zhifang, ZHUANG Jinwu, CHEN Qian, et al. Influence of breaking speed on dielectric recovery characteristic of high-speed electro-magnetic repulsion isolator [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(7):140-146
- [ 5 ] 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):75-182.  
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.
- [ 6 ] 袁志方,庄劲武,王晨,等. 窄缝灭弧法提升电磁斥力高速开断器电弧电压的分析与试验 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(33):139-144.  
YUAN Zhifang, ZHUANG Jinwu, WANG Chen, et al. Analysis and experimentation of increasing arc voltage in high-speed electromagnetic repulsion isolators based on arc extinguishing with a narrow slit [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(33):139-144.
- [ 7 ] LIU L, ZHUANG J, WANG C, et al. A hybrid DC vacuum circuit breaker for medium voltage: principle and first measurements [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(5):2096-2101.
- [ 8 ] LI W, JEONG Y W, KOH C S. An adaptive equivalent circuit modeling method for the eddy current-driven electromechanical system [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(6):1859-1862.
- [ 9 ] BISSAL A, MAGNUSSON J, ENGDAHL G. Electric to mechanical energy conversion of linear ultrafast electromechanical actuators based on stroke requirements [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(4):3059-3067
- [ 10 ] 袁志方,庄劲武,王晨,等. 高速开断器的 10 kV/10 kA 介质恢复试验系统关键技术研究 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6):168-173.  
YUAN Zhifang, ZHUANG Jinwu, WANG Chen, et al. 10 kV/10 kA dielectric recovery test system for high-speed isolators [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6):168-173.
- [ 11 ] LIM D K, WOO D K, KIM I W, et al. Characteristic analysis and design of a Thomson coil actuator using an analytic method and a numerical method [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(12):5749-5755.
- [ 12 ] JEAN-MARC M, ALFRED R. A DC hybrid circuit breaker with ultra-fast contact opening and integrated gate-commutated thyristors [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2):646-651.
- [ 13 ] SADEDIN D R. A study of the magnetic induction-repulsion accelerator [C] // Proceedings of the 8th IEEE International Pulsed Power Conference Digest of Technical Papers. San Diego, CA, USA: IEEE, 1991:68-72.
- [ 14 ] 王子建,何俊佳,尹小根,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, YIN Xiaogen, et al. 10 kV high speed vacuum switch with electromagnetic repulsion mechanism [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11):68-75.
- [ 15 ] 姜杰,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.
- [ 16 ] 孟君. 快速斥力机构的设计与应用研究 [D]. 济南:山东大学, 2010.  
MENG Jun. Research on structure design and application of fast repulsion mechanism [D]. Jinan: Shandong University, 2010.
- [ 17 ] ALI M. Direct current hybrid breakers: a design and its realization [D]. Eindhoven, Holland: Eindhoven University of Technology, 2000.

#### 作者简介:



武 瑾

武 瑾 (1984—), 女, 湖北武汉人, 讲师, 博士, 主要研究方向为舰船电力系统安全运行及电磁力多场耦合分析;

庄劲武 (1967—), 男, 湖北武汉人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为舰船电力系统安全运行;

袁志方 (1987—), 男, 湖南长沙人, 博士, 通信作者, 主要研究方向为电力系统自动化 (E-mail: charlie\_yuan@yeah.net)。

## Optimization analysis of structural parameters of ERM based on electromagnetic coupling double-coils model

WU Jin, ZHUANG Jinwu, YUAN Zhifang

(Department of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the existing equivalent calculation methods of ERM (Electromagnetic Repulsion Mechanism) cannot be applied effectively, an equivalent calculation method based on electromagnetic coupling double-coil model is proposed. The equivalent model mainly includes two parts, driving circuit and induction circuit. In addition to the basic circuit equations, the calculation of electromagnetic repulsion and mechanical motion is introduced. Through reasonable simplification, the skin depth, coil resistance, coil self-inductance and mutual inductance in the equivalent model are identified. On this basis, taking a prototype of a 1 000 V/400 A ERM as an example, the influence of inner diameter, radial thickness, turns of repulsion coil and axial thickness of the two coils on the mechanism efficiency and active cell travel are systematically analyzed by using the discrete algorithm of time-domain iteration. The obtained regularity knowledge can effectively guide the optimal design of ERM.

**Key words:** circuit breaker; electromagnetic repulsion mechanism; electromagnetic coupling double-coil model; mechanism efficiency; active cell travel; mathematical model