

一种分析多连杆永磁操动机构动态特性的方法

汪倩, 陈德桂, 李兴文, 游一民, 孙志强

(电力设备电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学), 陕西省 西安市 710049)

A New Analytical Method of Dynamic Characteristics of Permanent Magnetic Actuator with Multi-bar Linkage

WANG Qian, CHEN De-gui, LI Xing-wen, YOU Yi-min, SUN Zhi-qiang

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: Dynamic characteristic is key to optimize the design of permanent magnetic actuator. Based on the permanent magnetic actuator with multi-bar linkage, a new analytical method that calculates dynamic characteristic is proposed. Electromagnetic field is calculated by finite element method. With the secondary development of ADAMS software, the dynamic characteristics simulation could be performed through coupling the equations of mechanical system motion with the equations of electric circuit, electromagnetic field. It demonstrates that increasing the preload of breaking spring will result in shifting the dynamic characteristics of moving contact and armature forward, and have no influence on the total breaking time, and increasing the diameter of the armature will reduce the total breaking time and the exciting current. Experiments also have been done to verify the validity of the simulation results.

KEY WORDS: high voltage apparatus; permanent magnetic actuator; dynamic characteristic; coupled problems; multi-body dynamics

摘要: 动态特性是永磁操动机构优化设计中的关键问题。文中提出了一种适用于计算多连杆永磁机构的动态特性的方法。使用有限元法计算电磁场,通过对基于多体动力学理论的仿真软件 ADAMS 进行二次开发,将永磁操动机构的机械运动方程与电路、磁场的方程进行耦合求解,实现了对永磁操动机构分合闸过程的动态特性仿真。结果表明:分闸弹簧的预压力仅会引起动触头和动铁心其运动特性的平移,而不影响分闸时间;增大永磁机构中动铁心的直径,会降低动触头的运动速度,并显著缩短整个分闸过程所需的时间,

基金项目: 国家自然科学基金项目(50507016)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50507016).

励磁线圈的电流也相对较小。相关的实验也验证了仿真结果的正确性。

关键词: 高压电器; 永磁机构; 动态特性; 耦合问题; 多体动力学

0 引言

断路器工作的可靠性直接影响到电力系统运行时的供电质量和供电可靠性,而操动机构在影响断路器开断性能方面占有重要的地位。与弹簧操作机构相比较,真空断路器的永磁操作机构结构简单,动作可靠性高,由永久磁铁产生的吸力使断路器保持在合、分闸位置,具有体积小、重量轻、结构简单、操作可靠、免维护、使用寿命长等显著优点,因此在真空断路器中的应用越来越多^[1]。

机构的传动方式可分为直动、单连杆和多连杆传动三种。B A R Mckean 和 A J W Lammers 分别提出了能够和真空断路器动作特性良好配合的单连杆式的永磁机构^[2-3]; Dullni E.分析了适用于频繁操作的机构,并着重研究了机构和断路器之间的相互作用^[4]; Li Z 对一双稳态操作机构进行了优化设计^[5]; 文献[6-10]中对永磁机构的动态特性、控制方式以及应用做了大量的研究。此外,在对其它开关电器的操作机构研究方面,文献[11-14]分析了交流接触器、低压断路器操作机构动态特性及其影响规律。

但是,以上研究均没有涉及到多连杆这一较为复杂的永磁机构。而在国内自行研究和设计的真空断路器中,由于受断路器的结构布置及其他方面的要求,永磁机构需要通过多连杆传动,本文着重研究了多连杆永磁操作机构的动态特性分析方法。

本文应用基于多体动力学理论的虚拟样机软件

ADAMS(automatic dynamic analysis of mechanical systems), 并对其进行二次开发, 将 ADAMS 中利用多体动力学理论求解的机械运动方程和永磁操动机构的电磁场、电路方程进行耦合求解, 研究了断路器分闸过程中分闸弹簧参数、永磁机构动铁心尺寸对开断性能的影响。结果表明, 这种方法可以广泛适用于各种复杂的永磁操动机构的动态特性仿真模拟, 能有效提高设计效率并优化设计结果。

1 建立模型

目前, 由于弹簧操动机构事故率较高, 有用永磁操动机构代替弹簧操动机构的需求, 但设计要求最好不要引起结构上很大的改动。本文所研究的多连杆永磁操动机构即属于这种情况, 因此, 操动机构仍保持原来的水平位置。

由于本文中提出的永磁操动机构具有多级传动, 并且对多个零部件之间的相对位置要求比较严格, 而 ADAMS 软件在造型方面的功能比较欠缺, 因此采用专业的三维造型软件 SolidWorks 来建立模型, 如图 1 所示。然后通过 SolidWorks 与 Adams 的图形接口, 可将模型文件成功导入, 在模型的基础上根据实际的运动过程添加转动、平动以及碰撞等约束以完成动态特性仿真。

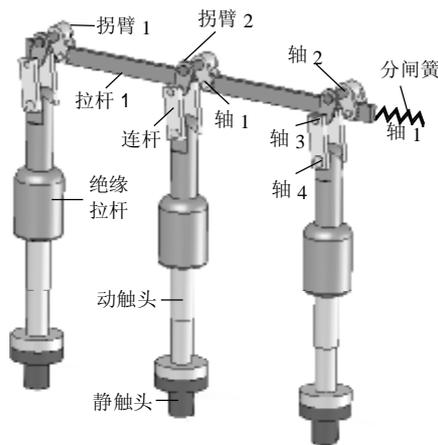


图 1 永磁机构分析模型

Fig. 1 Analysis model of the permanent magnetic actuator

从图 1 可以看出, 传动机构的动铁心与拉杆 1 相连, 通过多连杆的组合传动, 操动真空灭弧室中动触头的运动。断路器在分闸过程的动作为: 永磁机构分闸线圈通电产生电磁力, 驱动永磁机构的动铁心运动, 动铁心通过一个绝缘拉杆和拉杆相连, 使拉杆作水平方向运动, 压缩分闸弹簧并带动拐臂 1 和拐臂 2 绕轴 2 顺时针转动, 而拐臂 2 带动轴 3, 轴 3 又带动连杆和轴 4, 最终释放绝缘拉杆

上的触头压簧使真空灭弧室的动触头向上运动完成分闸动作。合闸过程的动作原理与分闸过程相似。本文主要分析机构的分闸过程。

值得指出的是, 本文研究的永磁机构已在西安交通大学思源智能电器有限公司生产, 型号为 YCC30, 并应用于 ZN65 和 ZN9L 真空断路器中。

2 分析方法

2.1 电磁场计算

在动态特性分析时, 需要对永磁机构励磁线圈和永久磁铁产生的电磁场进行静态特性计算。求解电磁场, 一般使用磁路法或有限元法。一方面, 磁路法计算不规则的磁场时容易产生较大的误差; 另一方面, 随着大型有限元分析软件, 如 ANSYS、QuickField、Ansoft 等的不断发展与成熟, 计算功能日趋完善, 效率也大幅度提高。因此本文在计算中使用有限元方法计算电磁场。图 2 为模型在 QuickField 软件中的剖分图。

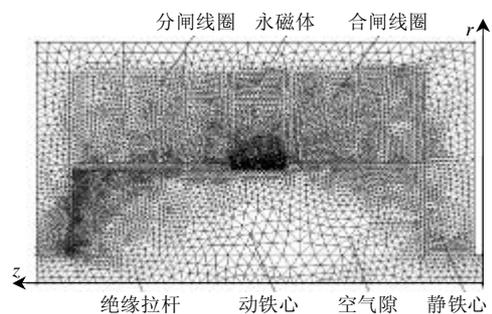


图 2 模型在 QuickField 软件中剖分图

Fig. 2 Meshed model in quick field software

对于图 2 所示的轴对称场, 线圈电流垂直于 (r, z) 坐标面, 假定线圈中的电流密度 J 在线圈中均匀分布

$$J = NI/S \tag{1}$$

式中 N 和 S 分别为励磁线圈的匝数、截面积; I 为励磁电流值。

在有限元计算时, 每个单元上的电流密度 j 和矢量磁位 A 满足泊松方程

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r m_z} \cdot \frac{\partial(rA)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{m_r} \cdot \frac{\partial A}{\partial z} \right) = -j + \left(\frac{\partial H_{cr}}{\partial z} - \frac{\partial H_{cz}}{\partial r} \right) \tag{2}$$

式中 H_c 为永磁体的矫顽力。

这样, 就可以求得励磁线圈中每匝导线通过的磁链 ψ , 作用在铁心上由励磁线圈和永久磁铁共同产生的磁场力 F 为

$$y = 1/S \cdot 2n \int rA \cdot ds \quad (3)$$

$$F = \frac{1}{2} \int [H(B \cdot n) + B(H \cdot n) - n(H \cdot B)] \cdot ds \quad (4)$$

式中 n 为单位法向量。

根据以上分析，可以计算出随着工作气隙 x 和线圈励磁电流 i 变化的磁链和静态吸力数值，也即两张 $y=y(x, i)$ 及 $F=F(x, i)$ 的数据网格。此外，通过分析静态特性的有限元计算电磁场分布结果，还可以对永磁操动机构的动静铁心进行初步的优化设计。

当永磁机构励磁线圈由电容器组供电，忽略铁心中产生的涡流，可以列出如下的电路方程

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = U_C - i \cdot R \\ \frac{dU_C}{dt} = -\frac{i}{C} \\ y|_{t=0} = 0 \\ U_C|_{t=0} = U_{C0} \\ i|_{t=0} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中： y 、 i 、 R 分别为励磁线圈中通过的磁链、电流、电阻； U_C 为给分合闸线圈供电的电容两端的电压； U_{C0} 为初始电压； C 为电容容量。

因为有限元方法求出的静态特性数据网格是 $y=y(x, i)$ 和 $F=F(x, i)$ 的关系，所以用 Runge-Kutta 法求解式(5)的过程中，需要在对数据网格进行插值运算前，先进行数据网格的变换。设 t 时刻的位移为 x_t ，由 $y=y(x, i)$ 可以推出 $x=x_t$ 条件下的 $y=y(i)$ ，即 $i=i(y)$ 数据表。这样在 $t+\Delta t$ 时刻，就可以用插值法计算通过线圈的磁链值 y 时的电流值 i ，再由 $F=F(x, i)$ 插值求得 $t+\Delta t$ 时刻的电磁吸力 F 的数值。

2.2 机械运动计算

ADAMS 软件以多体系统动力学为理论基础，能方便地建立参数化的实体模型，并通过多体系统动力学方程进行求解计算。多体动力学是在经典力学基础上发展起来的新的学科分支，它以多个物体(刚体或柔性体)连接构成的系统为研究对象，主要研究适用于计算机分析的动力学模型的建模方法，建立有效稳定的数值算法，以便实现计算机的自动建模。

ADAMS 采用多体动力学理论中的拉格朗日乘子法建立系统运动方程^[15]

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right)^T - \left(\frac{\partial T}{\partial q} \right)^T + j_q^T r + q_q^T m = Q \\ j(q, t) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中： T 为系统动能； q 为系统广义坐标列阵； Q 为广义力列阵； r 对应于完整约束的拉氏乘子列阵； m 对应于非完整约束的拉氏乘子列阵。

ADAMS 通过对以上由微分方程组和约束方程组构成的多体系统动力学方程的求解，即可求得系统中各部分的位移，速度和加速度等物理量。

2.3 耦合求解

若仿真计算整个永磁机构的动态过程，还必须对 ADAMS 进行二次开发，以将 ADAMS 软件中的机械运动方程和电路、电磁场方程进行耦合求解。由于 ADAMS 软件具有灵活的外挂程序接口，用户可以将其作为样机分析的二次开发平台，自行开发自定义程序模块。

在 ADAMS 中进行动力学仿真时，ADAMS 自动建立和调用多体动力学方程，并调用 ADAMS 二次开发接口与用户自定义的程序模块通信。耦合求解永磁机构动态特性的程序流程如图 3 所示。

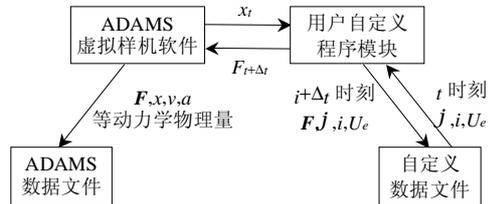


图 3 求解流程图

Fig. 3 Flow diagram of the solution method

在计算中，ADAMS 通过二次开发接口将 t 时刻的永磁机构动铁心的位移值传入用户自定义的程序模块，程序模块也从自定义数据文件中读入 t 时刻的磁链 y 、电流 i 、电容电压 U_C ，由此可以在程序模块中求解 $t+\Delta t$ 时刻的动铁心上的磁场力 F (励磁线圈和永久磁铁共同作用产生的)、磁链 y 、电流 i 、电容电压 U_C 等物理量。程序模块计算完成后，再通过返回值将 $t+\Delta t$ 时刻的磁场力 F 传回 ADAMS 软件，并将磁场力 F 、磁链 y 、电流 i 、电容电压 U_C 等数据写入自定义数据文件，以备下次调用。ADAMS 软件同时输出模型各部分的受力、位移、速度、加速度等动力学物理量。通过一定时间内的多步迭代运算，即可仿真出整个永磁机构动态过程的各个机械和电路、磁场的物理量随时间的变化。

3 实验方法及结果

为了验证仿真结果的正确性，对设计的产品进行了相关的实验研究。

图 4 为实验原理图。电容的充电电压为 110 V，通过合、分闸控制器来控制永磁机构合、分闸线圈的工作。永磁机构通过绝缘拉杆来驱动机构的运动。分别在水平拉杆和绝缘拉杆上固定位移传感器，以测试动铁心和绝缘拉杆的运动，并用存储式

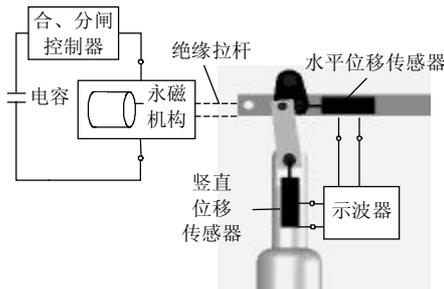


图 4 实验原理图

Fig. 4 Experimental schematic diagram

数字示波器存储其运动信号。

图 5 所示为 5 组实验结果中的一组典型实验波形。从图中可以看出，由于绝缘拉杆在 A 点之前已经运动过了超程距离，开始带动动触头一起运动，因此有一个碰撞过程。此外，在运动到位以后，绝缘拉杆和拉杆也均有一定的碰撞弹跳。

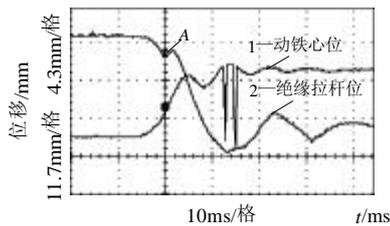


图 5 典型实验波形

Fig.5 A typical experimental waveform

4 计算结果及分析

4.1 基本设计参数下的仿真及实验结果

本文研究的永磁机构的基本设计参数为：电容电压 110V，电阻值 1.24Ω，电容值 0.1F，动铁心直径为 62mm，分闸簧的刚度系数为 $5.8 \times 10^{-4} \text{N/mm}$ ，预压力为 650N。

图 6 为动铁心位移的仿真和实验结果。从图中

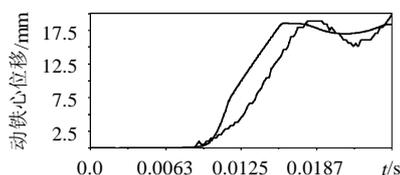


图 6 动铁心位移的仿真和实验结果

Fig.6 Simulation and experimental results of the distance of armature

可以看出，实验和仿真的结果比较吻合，由于摩擦力等的影响，仿真结果中的动铁心的运动速度较实验稍高。此外，在分闸线圈通电后的一段时间内动触头并未开始动作，这是因为励磁线圈中的电流正在上升以使磁路中产生足够的分闸力。

图 7 所示为绝缘拉杆位移的仿真和实验曲线，绝缘拉杆的速度和动触头的位移曲线。从图中可以看出，仿真和实验的绝缘拉杆位移曲线较为接近，同样由于摩擦力等的影响，仿真结果中的位移曲线上升较快。从绝缘拉杆的速度曲线和动触头的位移曲线可以看出，在 A 点，也就是约 11ms 时绝缘拉杆走完超程，开始带动动触头一起运动时，速度有一个明显的速度跌落，此后，速度又开始上升，在 B 点，也即绝缘拉杆运动到位后一段时间，位移和速度曲线均有一定的波动，这是由于机械碰撞造成的结果。

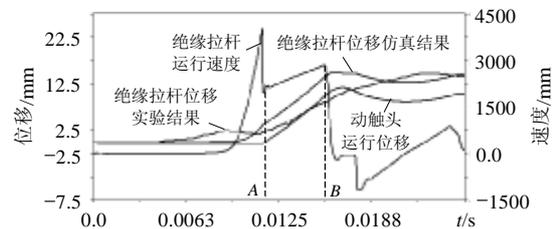


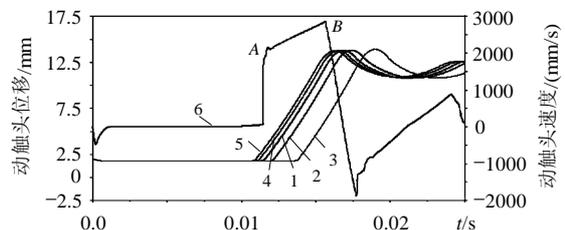
图 7 绝缘拉杆位移的仿真和实验与速度以及动触头位移的仿真结果

Fig.7 Simulation and experimental results of the distance, simulation result of velocity of insulation bar and distance of movable contact

4.2 分闸弹簧预压力对动态特性的影响

分闸弹簧力预压力的基本设计参数为 650 N，在其基础上改变 $\pm 5\%$ ， $\pm 10\%$ 后，仿真分析了该预压力对操动机构动态特性的影响。

图 8 中 1-5 分别为 650、617.5、585、682.5 和 715 N 预压力时动触头的运动位移，6 为 650N 预压力下动触头的运动速度仿真结果。图 9 为不同预压力下动铁心的位移仿真结果。



动触头位移：1— $F_0=650\text{N}$ ；2— $F_0=617.5\text{N}$ ；3— $F_0=585\text{N}$ ；4— $F_0=682.5\text{N}$ ；5— $F_0=715\text{N}$ ；6—715N 时的动触头速度。

图 8 分闸弹簧预压力对动触头运动的影响

Fig.8 The influence of preload of the open spring on the motion of movable contact

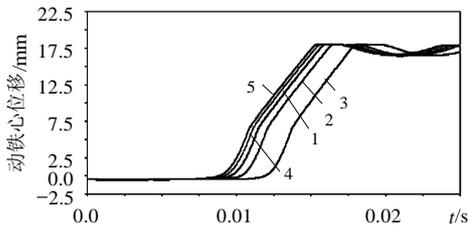


图9 分闸弹簧预压力对动铁心运动的影响
Fig.9 The influence of preload of the open spring on the motion of armature

从图中可以看出,随着预压力的减小,动铁心和动触头开始运动的时间不断延后,这是因为永磁机构分闸所需的力是由励磁线圈通电产生的电磁吸力、永磁体的力和分闸簧的预压力一起提供的。由于预压力的减小,在抵消与原来相同的合闸保持力时只能依靠电流上升所引起的电磁吸力的增加,这样就会引起动铁心开始运动时刻的延后,以及相应地推迟动触头的运动。

而且,随着预压力的减小,动触头和动铁心的运动曲线不断向后平移,而整个分闸过程所需要时间并没有明显的变化。

4.3 动铁心直径对动态特性的影响

在4.1所述的基本设计参数基础上,仅将永磁机构中动铁心的直径由62mm增加到80mm,在相同的机构参数以及永磁机构控制单元条件下,以分析动铁心直径对机构动态特性的影响。

图10~12分别为不同动铁心直径下,动铁心位移、动触头位移和速度,以及线圈电流的仿真结果。从图中可以看出,当动铁心直径由62mm增加到80mm后,会造成动触头和动铁心的开始运动时刻显著提前;另一方面,动铁心直径的增大使得其质量也增加,这就会使动触头的运动速度有一定程度的降低,也有可能影响机构的分断性能。然而,较大的动铁心直径会导致电磁吸力的相对增大以及相应的动铁心动作时间提前,这均有利于减小电流上升的速度和电流峰值。这表明增加直径尺寸对于减小线圈的发热和优化线圈参数以及控制单元的

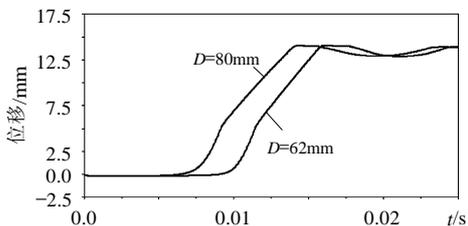


图10 动铁心直径对动铁心运动的影响
Fig.10 The influence of the diameter on the motion of armature

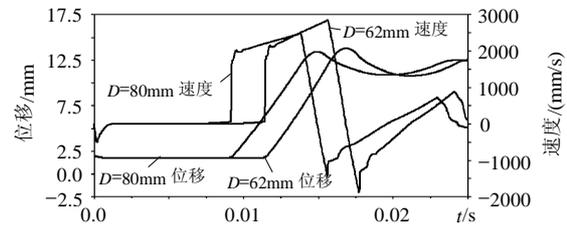


图11 动铁心直径对动触头运动的影响
Fig.11 The influence of the diameter on the motion of movable contact

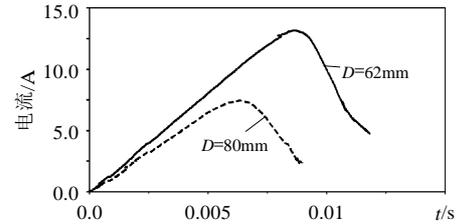


图12 动铁心直径对线圈电流的影响
Fig.12 The influence of the diameter on the winding current

参数设计等都有积极作用。

此外,图11中动触头在运动到位后有一定的碰撞,引起速度和位移曲线的波动。

5 结论

(1) 应用多体动力学仿真软件ADAMS,并对其进行二次开发,提出了一种能够有效分析复杂多连杆永磁机构动态特性的方法。

(2) 分闸弹簧的预压力对动触头和动铁心的起始运动时刻有较为显著的影响,会引起其运动特性的平移。

(3) 增大永磁机构中动铁心的直径,虽然会降低动触头的运动速度,但是可以使动、静触头打开的时刻提前,并显著缩短整个分闸过程所需的时间;更重要的是励磁线圈的电流相对较小,对降低线圈发热和控制单元的参数设计非常有利。

参考文献

- [1] 游一民, 郑军, 罗文科. 永磁机构及其发展的动态[J]. 高压电器, 2001, 37(1): 44-47.
You Yimin, Zheng Jun, Luo Wenke. Features and tendency to develop of permanent magnet actuator[J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(1): 44-47(in Chinese).
- [2] Mckean B A R, Reuber Dr C. Magnets & vacuum-the perfect match[C]. Proceedings of trends in distribution switchgear conference, London, UK, 1998: 73-79.
- [3] Lammers A J W, Leufkens P P, Schoonenberg G C. MV vacuum switchgear based on magnetic actuators[C]. Proceedings of trends in distribution switchgear conference, London, UK, 1998: 86-90.
- [4] Dullni E. A vacuum circuit breaker with permanent magnetic actuator for frequent operations[C]. Proceedings of 18th international

- symposium on discharges and electrical insulation in vacuum, Switzerland, 1998: 688-691.
- [5] Li Z, Renforth L A, Auckland D K, et al. Computer aided optimal design of magnetic actuator for auto-recloser application[C]. Proceedings of trends in distribution switchgear conference, London, UK, 1998: 80-85.
- [6] 林莘, 徐建源, 高会军. 永磁操动机构动态特性计算与分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 85-88.
Lin Xin, Xu Jianyuan, Gao Huijun. Calculation and analyses of permanent magnetic actuator dynamic behavior[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 85-88(in Chinese).
- [7] 付万安, 宋宝楹. 高压断路器永磁操动机构的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 19-26.
Fu Wanan, Song Baoyun. The research of permanent magnetic operating device of high voltage circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 19-26(in Chinese).
- [8] 马少华, 王季梅. 72.5kV 高压真空断路器永磁操动机构的研究与设计[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 109-114.
Ma Shaohua, Wang Jimei. Research and design of permanent magnetic actuator for 72.5kV HV vacuum circuit breaker [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 109-114(in Chinese).
- [9] 丁富华, 邹积岩, 段雄英, 等. 采用数字信号处理器的永磁机构同步控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 39-44.
Ding Fuhua, Zou Jiyan, Duan Xiongying, et al. Synchronous control system of permanent magnetic actuator applying digital signal processor[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 39-44(in Chinese).
- [10] 丁富华, 邹积岩, 方春恩, 等. 相控真空断路器投切空载变压器的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 89-93.
Ding Fuhua, Zou Jiyan, Fang Chunen, et al. Investigations on switching idle power transformer with phising vacuum circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 89-93(in Chinese).
- [11] 李兴文, 陈德桂, 孙志强, 等. 交流接触器动态过程及触头弹跳的数值分析与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 229-233.
Li Xingwen, Chen Degui, Sun Zhiqiang, et al. Numerical analysis and experimental investigation of dynamic behavior and contact bounce of AC contactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 229-233(in Chinese).
- [12] 张敬菽, 陈德桂, 刘洪武. 低压断路器操作机构的动态仿真与优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 102-107.
Zhang Jingshu, Chen Degui, Liu Hongwu. Dynamic simulation and optimum design of low voltage circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 102-107(in Chinese).
- [13] 李兴文, 陈德桂, 向洪岗, 等. 低压塑壳断路器中电动斥力的三维有限元分析与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 150-155.
Li Xingwen, Chen Degui, Xiang Honggang, et al. 3-D Finite element nonlinear analysis and experimental investigation of electro-dynamic repulsion force in molded case circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 150-155(in Chinese).
- [14] 李兴文, 陈德桂, 汪倩, 等. 低压塑壳断路器三相短路开断特性的仿真与分析[J]. 电工技术学报, 2005, 20(10): 76-82.
Li Xingwen, Chen Degui, Wang Qian, et al. Simulation and analysis of the interruption characteristics of low voltage molded case circuit breakers under 3-phase short circuit[J]. Transactions of china electrotechnical society, 2005, 20(10): 76-82(in Chinese).
- [15] 王国强, 张进平, 马若丁, 虚拟样机技术及其在 ADAMS 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2002.

收稿日期: 2005-12-25.

作者简介:

汪倩(1981—), 硕士研究生, 主要研究方向是电器及其智能化;
陈德桂(1933—), 教授, 博士生导师, 主要研究方向是开关电弧现象及电器智能化;
李兴文(1978—), 博士研究生, 讲师, 主要研究方向是电弧电接触理论及其应用, jds20@mail.xjtu.edu.cn;
游一民(1963—), 博士, 高级工程师, 主要研究方向是高压电器;
孙志强(1978—), 博士研究生, 主要研究方向是低压电弧。

(责任编辑 韩蕾)