

继电器静态吸力(矩)特性有限元仿真中 永磁体等效模型研究

翟国富¹, 王其亚¹, 杨文英¹, 梁慧敏¹, 王皞²

(1. 哈尔滨工业大学军用电器研究所, 黑龙江省 哈尔滨市 150001;

2. 厦门宏发电声有限公司, 福建省 厦门市 361021)

Investigation of Permanent-magnet Equivalent Model for Simulation of Relay's Static Force (Torque) Characteristics by Finite Element Method

ZHAI Guofu¹, WANG Qiya¹, YANG Wenyi¹, LIANG Huimin¹, WANG Hao²

(1. Military Apparatus Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China;

2. Xiamen Hongfa Electroacoustic Co., Ltd., Xiamen 361021, Fujian Province, China)

ABSTRACT: Permanent-magnet (PM) is the key part of the relay. Aiming at the problem of the non-uniform magnetization for the PM with nonlinear demagnetization curve after charging magnetism and demagnetizing, a method partitioning the PM along the magnetization direction and the vertical direction of magnetization according to the condition of the specific magnetization of the PM was presented. Using this method, the demagnetization model of the PM was built, the state of the PM magnetization was simulated under one demagnetizing magnetic field intensity, and the recoil line and its initial point of each partition of the PM were obtained. Then the characteristic of the recoil line of each partition was used as its material for the equivalent model of the PM to calculate the static force (torque) characteristics under the demagnetizing magnetic field. Finally, the static torque characteristics of simulation and experiment were compared and the validity of the equivalent model presented was verified.

KEY WORDS: relay; finite element method (FEM); permanent-magnet (PM); equivalent model; static force (torque) characteristics

摘要: 永磁体是含永磁继电器的关键部件。针对去磁曲线为非线性的永磁体, 充、退磁后各部分磁化不均匀的问题, 提出根据具体磁化情况沿磁化及垂直于磁化方向进行永磁分块等效的方法。该方法首先建立永磁的退磁模型, 仿真某一退磁场作用下永磁的退磁状态, 据此求得各永磁小块的回复线起始点及回复线, 然后将各小块永磁体回复线特性作为其材料属性, 进行该退磁场下的继电器静态吸力(矩)特性仿真的永磁模型等效。最后通过继电器静态吸力矩特性的仿真与实验结果对比, 验证了所提等效模型的正确性。

关键词: 继电器; 有限元法; 永磁; 等效模型; 静态吸力(矩)特性

0 引言

永磁体是含永磁继电器的关键部件。在含永磁继电器的装配调试过程中, 需对永磁体进行相应的充磁和退磁, 充、退磁后的永磁模型等效问题一直是制约含永磁继电器仿真设计的难点。永磁体充磁过程中充磁电流的大小影响其磁化程度^[1-2], 最终影响继电器吸力特性的大小。通常情况下, 为充分利用永磁磁能, 在充磁过程中都将永磁体饱和磁化, 而后进行不同程度的退磁处理。退磁后的永磁体将工作于回复线上^[3], 为此有文献针对回复线起始点的求解进行了相关研究^[4-7], 这些研究均采用磁路的方法, 求解精度较低, 且将永磁体视为一整体, 认为永磁仅工作于一条回复线上。实际上, 永磁体在充、退磁后, 由于空间磁导的不同, 永磁体内部各部分磁化程度也各不相同。文献[8]采用有限元法根据磁能相等原理给出了永磁体平均回复线起始点的求解方法, 利用通过平均回复线起始点的回复线来表征永磁体的材料属性。文献[9-11]根据永磁体磁化程度的不同, 提出将永磁沿磁化方向分段的思想。实际上, 永磁磁化程度不仅沿磁化方向不同, 在垂直于磁化方向的截面内差异也很大。文献[12]通过理论分析、仿真及实验对永磁沿磁化方向不同段工作于不同回复线的结论进行论证。以上研究成果对含永磁继电器的仿真设计有一定帮助, 但仍没

形成处理永磁问题的行之有效的办法。

对去磁曲线几乎是直线段的永磁材料(如钕铁硼),其回复线与去磁曲线重合^[13],但对磁感应强度 B 与磁场强度 H 为非线性的去磁曲线(目前继电器中永磁材料多为此类材料),不同的磁化程度会导致永磁体各部分的回复线起始点及工作回复线的不同,而很多文献在进行永磁机构的仿真分析时,都未提及永磁材料属性及相关的处理方法^[14-18]。本文针对去磁曲线为非线性的永磁材料,以某平衡力式继电器为对象,采用 ANSYS 软件,研究永磁体充磁后在不同退磁场作用下的等效模型,根据所得等效模型计算继电器静态吸力矩特性,并将计算结果与实验结果进行比较以验证模型的正确性。

1 磁场基本方程及有限元模型

1.1 磁场基本方程

根据麦克斯韦方程组,含永磁的继电器静态磁场的基本方程可表示如下:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_m \quad (1)$$

$$\mathbf{J}_m = \nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0} \mathbf{M} \right) \quad (2)$$

$$\mathbf{A} = \nabla \times \mathbf{B} \quad (3)$$

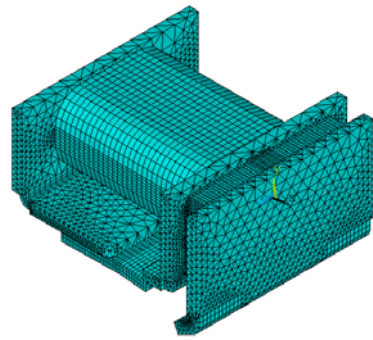
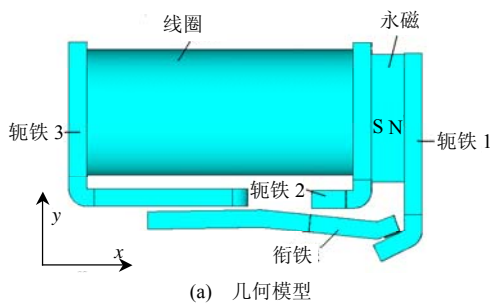
$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M} \quad (4)$$

式中: \mathbf{J}_0 为线圈电流密度; \mathbf{J}_m 为永磁体内等效磁化电流密度; \mathbf{M} 为永磁体的磁化强度; μ 为求解区域的磁导率; μ_0 为真空磁导率。

本文利用 ANSYS 软件基于单元边的有限元方法求解满足式(1)~(4)的磁场,在区域边界近似认为磁力线与边界平行。

1.2 研究对象

图 1(a)、(b)分别为本文所研究的平衡力式继电器电磁系统的几何模型和有限元模型。该继电器的磁路部分由衔铁、轭铁 1、轭铁 2、轭铁 3、铁心和永磁组成,线圈额定电压 28 V,电阻 283 Ω 。当线圈未上电时,衔铁在永磁产生的吸力矩作用下处于



(b) 有限元模型

图 1 平衡力式继电器电磁系统模型

Fig. 1 Model of electromagnetic system of counterbalance relay

释放位置(如图 1(a)所示),衔铁与轭铁 1 贴合;当线圈加电产生的电磁力矩大于永磁产生的力矩时,衔铁由释放位置转动到与轭铁 2 贴合的位置即吸合位置。

图 2 为实测继电器永磁体得到的去磁曲线和局部磁滞回线。在该永磁体的去磁曲线中, B 与 H 为非线性关系,且其局部磁滞回线的磁导率(即回复磁导率)为 $1.7\mu_0$ 。磁路中,铁磁物质采用的是电工纯铁(DT4C),其 $B-H$ 曲线如图 3 所示。

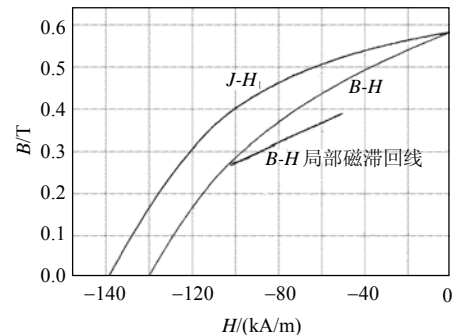


图 2 永磁体的去磁曲线和局部磁滞回线

Fig. 2 Demagnetization curve and local hysteresis loop of permanent-magnet

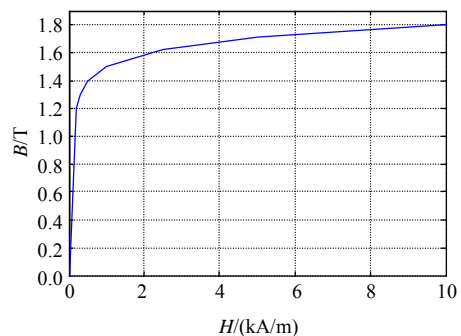


图 3 铁磁材料(DT4C) $B-H$ 特性曲线

Fig. 3 $B-H$ curve of ferromagnetic material

2 永磁体分块等效

2.1 永磁分块

实际上永磁体由于外部磁导的不同,在其内部

沿磁化及垂直于磁化方向的截面内磁化不均匀,甚至变化很大。图4为以图2所示的去磁曲线作为继电器模型中永磁体的材料属性仿真得到的*B*的云图(仿真模型中衔铁处于释放位置(0°),线圈电压为0V)。根据以上分析可知,为建立精确的永磁体模型,需根据永磁体的具体磁化情况对其沿磁化方向和垂直于磁化方向分块。

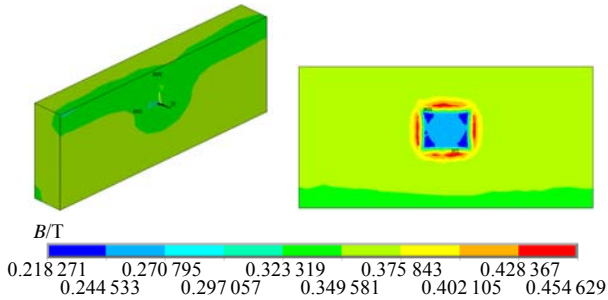


图4 永磁体内*B*的云图
Fig. 4 Nephogram of *B* in PM

图5为根据图4所示永磁体内*B*的云图分布将永磁在垂直于磁化和沿磁化方向分割成的48个永磁小块模型,每个小块的磁化较为均匀。在进行吸力(矩)特性仿真时,将根据每块小永磁体的磁化程度赋予不同的材料属性。

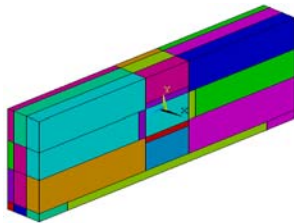


图5 分块后的永磁体
Fig. 5 PM after partition

2.2 回复线起始点的求取

永磁体使用时,都要进行相应的充、退磁处理,以达到充分利用磁能且使永磁能够稳定工作的目的。生产中先进行永磁体的充磁(一般充磁电流产生的磁场很大以使永磁体达到深度饱和,因此仿真中充磁过程可以不予考虑,仅模拟永磁的退磁程度),充磁后在继电器调试时,再由工人在退磁机上对继电器的永磁体进行退磁。退磁后的永磁体工作于回复线上^[3],且由于其内部磁化状态的不均匀,导致各永磁小块的回复线起始点各不相同。在仿真继电器静态吸力(矩)特性时,各永磁小块回复线起始点的求取成为永磁模型等效的关键。由于退磁机两极面尺寸比继电器尺寸大很多,而且退磁机在两极面处产生的退磁场比较均匀,因此在仿真分析永磁退磁程度时,在继电器外建一个大线圈(其内部磁场近

似均匀),线圈轴线与永磁体的磁化方向平行,其产生的磁感应强度的方向与永磁的磁化方向相反。用该线圈产生的磁场模拟退磁机对永磁的退磁作用,模型中用去磁特性曲线表征永磁体的材料属性。图6为在ANSYS中建立的继电器的退磁模型,外面的大线圈即为去磁线圈。

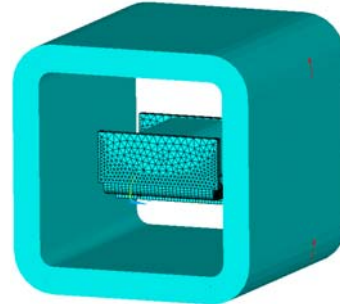


图6 永磁的退磁模型
Fig. 6 Demagnetization model of PM

计算得到永磁体内部磁化状态后,各永磁小块的回复线起始点(\bar{H}_i, \bar{B}_i)($i=1, \dots, 48$)可计算如下:

$$\bar{H}_i = (\sum_{j=1}^{N_i} H_j V_j) / V_i \tag{5}$$

$$\bar{B}_i = (\sum_{j=1}^{N_i} B_j V_j) / V_i \tag{6}$$

式中: V_i 为第*i*块永磁体的体积; N_i 为第*i*块永磁体中的有限单元总数; H_j 、 B_j 和 V_j 分别为第*i*块永磁体中第*j*($j=1, \dots, N_i$)单元的磁场强度、磁感应强度和体积。

图7给出了去磁线圈安匝分别为4000、5000和6000A时,计算得到的各永磁小块回复线起始点在去磁曲线上的位置。由图7可见,去磁安匝越大,起始点在去磁曲线上的位置越低,且由于永磁体磁化的不均匀,同一去磁安匝下各永磁小块的起始点在去磁曲线上呈“带状”分布。当去磁安匝大于4000A时,回复线起始点沿去磁曲线被退到第3象限,永磁在去磁线圈产生的磁场作用下被

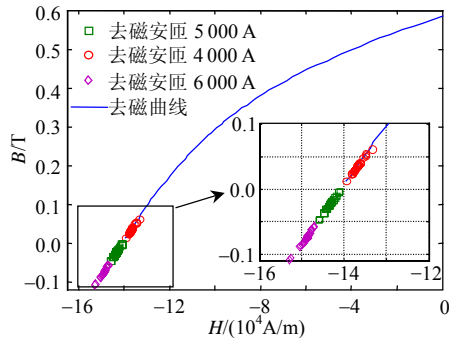


图7 不同去磁安匝下的回复线起始点
Fig. 7 Initial points of recoil lines for different demagnetizing ampere turns

反向磁化。

求得某一去磁安匝作用下各永磁小块回复线起始点后，根据测得的回复线斜率 $1.7\mu_0$ 就可得到每块永磁体的回复线，将各回复线作为各块永磁的材料属性即完成继电器静态吸力(矩)特性仿真的永磁模型等效。

3 仿真结果及实验验证

3.1 静态吸力矩特性仿真结果

图 8(a)、(b)分别为永磁体采用去磁曲线和将永磁分块后使用去磁安匝为 5 000 A 得到的每块永磁体的回复线作为其材料属性，计算得到的继电器静态吸力矩特性曲线。从图 8 可以看出，线圈电压为 0 V 或额定的 28 V 时，这 2 种方法的计算结果相差很大。可见，去磁曲线为非线性的永磁材料不能与去磁曲线为直线段的永磁一样，使用其去磁曲线作为仿真模型中的材料属性进行吸力矩特性的计算，对去磁曲线为非线性的永磁材料需进行分块处理。

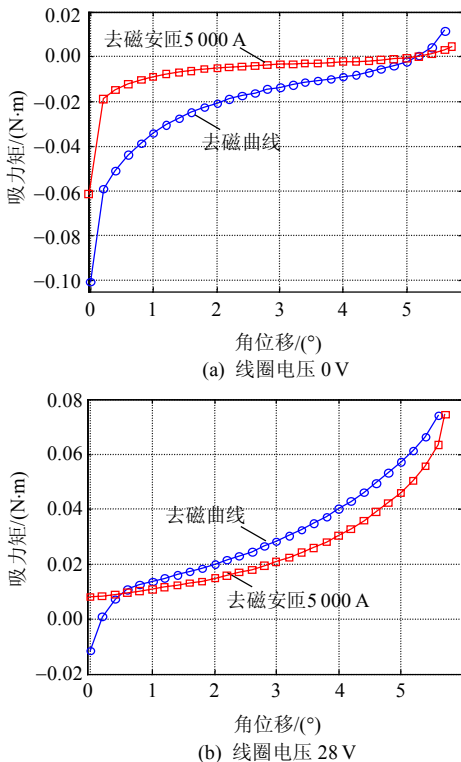


图 8 静态吸力矩特性对比

在仿真永磁的退磁过程时，去磁线圈取不同的安匝数(即产生不同的退磁场)，分块后的各小永磁体将会有不同的回复线起始点，从而得到不同的静态吸力矩特性。去磁安匝分别为 4 000、5 000 和 6 000 A 时，采用永磁分块等效方法计算得到的静态吸力矩特性曲线如图 9 所示，由图 9 可知，去磁

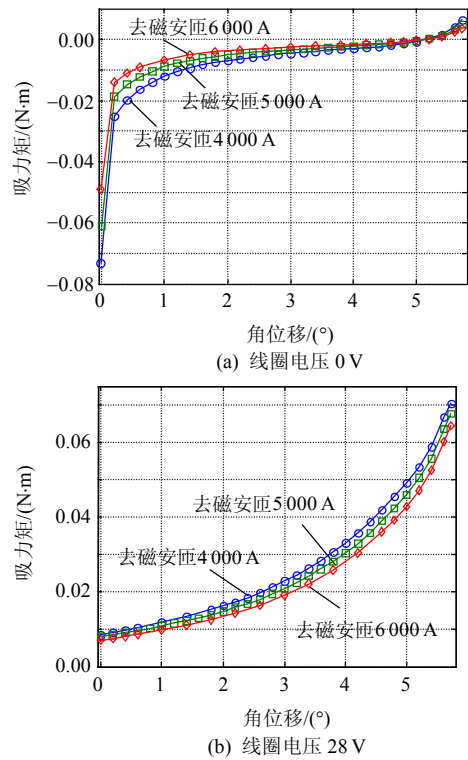


图 9 不同去磁安匝下的静态吸力矩特性比较

Fig. 9 Comparison of static torque characteristics for different demagnetizing ampere turns

安匝越大，对永磁的退磁作用越大，吸力矩越小。

3.2 仿真与实验对比

为验证本文提出的永磁等效模型正确性，采用一种基于悬臂梁式力传感器和直线光纤位移传感器的继电器静态吸力特性测试设备，对所研究的继电器静态吸力矩特性进行了测试^[19]，测试设备如图 10 所示。

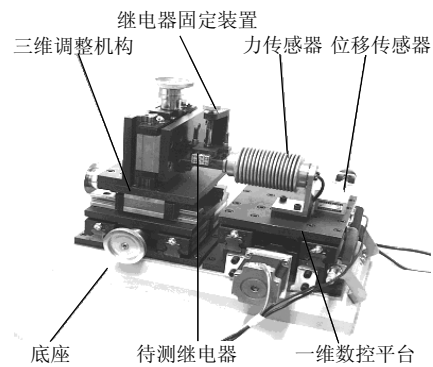


图 10 静态吸力特性测试设备

Fig. 10 Test equipment of static force characteristics

继电器在装配调试过程中，永磁退磁时退磁场的大小是工人根据经验调整的，在继电器加工完成后已无法得到。为进行仿真值与实测值的对比，则以实测值为基准，改变去磁线圈安匝数的大小，按照本文提出的永磁分块等效方法，计算不同去磁安

匝下的吸力矩特性。当在某一去磁安匝下计算结果与实测结果较为一致时,则认为该去磁安匝下去磁线圈产生的去磁场近似等于继电器调试时退磁机产生的退磁场大小。经过不断改变去磁线圈安匝及采用永磁等效的方法计算每一去磁安匝下的吸力矩特性发现,当去磁安匝约为 5 000 A 时,计算结果与实测结果较为吻合。图 11 为仿真与实测结果的对比图,原始实测曲线为衔铁位移与吸力关系曲线,根据测试时的力臂将其转化为衔铁角位移与吸力关系曲线,图 11(a)的实测曲线力臂约为 7 mm,图 11(b)的实测曲线力臂约为 6.5 mm。由图 11 可知,实测值与仿真值较为吻合,除 0 V 释放位置误差较大外,两者误差在±10%以内。实验结果验证了本文提出的永磁分块等效模型的正确性。

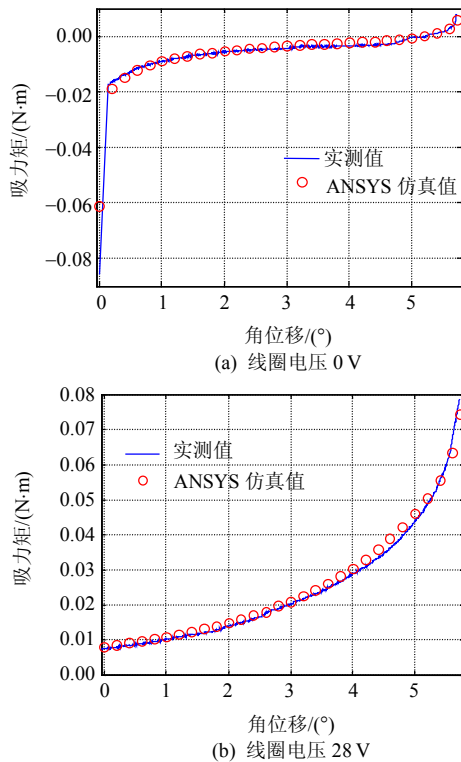


图 11 仿真与实测结果对比
Fig. 11 Comparison of results of calculation and experiment

4 结论

1) 针对去磁曲线为非线性、工作在回复线上的永磁体,提出永磁分块等效模型。

2) 去磁安匝越大,对永磁的退磁作用越大,永磁回复线起始点越低,静态吸力矩越小。

3) 继电器静态吸力矩仿真结果与实测结果较吻合(误差在±10%以内),验证了本文提出的永磁分块等效模型的正确性。

参考文献

- [1] Atsushi N, Kenji K, Yoshihiro K, et al. 3-D finite element analysis of electromagnets with permanent magnet taking into account magnetizing process[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33(2): 2057-2060.
- [2] Yoshihiro K, Tadashi Y, Noriyo M, et al. Analysis of magnetizing process using discharge current of capacitor by 3-D finite-element method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(2): 1145-1148.
- [3] 佟为明, 梁慧敏, 刘宁滨, 等. 永久磁铁的两种工作状态[J]. 机电元件, 1998, 18(4): 2-5, 15.
- [4] Tong Weiming, Liang Huimin, Liu Ningbin, et al. Two operation states of permanent magnet[J]. Electromechanical Components, 1998, 18(4): 2-5, 15(in Chinese).
- [5] 佟为明, 梁慧敏, 刘宁滨, 等. 极化磁系统永久磁铁回复线的求法[J]. 电气电子教学学报, 1999, 21(2): 25-28.
- [6] Tong Weiming, Liang Huimin, Liu Ningbin, et al. The solution for recoil line of permanent magnet in polarized magnetic system [J]. Journal of Electrical & Electronic Engineering Education, 1999, 21(2): 25-28(in Chinese).
- [7] 佟为明, 刘宁滨, 刘茂凯, 等. 极化磁系统永磁工作点的求解[J]. 低压电器, 2000(4): 12-16.
- [8] Tong Weiming, Liu Ningbin, Liu Maokai, et al. The solution of operating point for the polarized magnet system[J]. Low Voltage Apparatus, 2000(4): 12-16(in Chinese).
- [9] 佟为明, 王宇红, 李凤阁, 等. 决定于极化磁系统工作状态的永磁回复线起始点的探讨[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(6): 75-79.
- [10] Tong Weiming, Wang Yuhong, Li Fengge, et al. Exploration of the starting point of recoil line of permanent magnet decided by the working status of the polarized magnetic system[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(6): 75-79(in Chinese).
- [11] 佟为明, 李凤阁, 赵志衡. 单永磁极化磁系统的永磁工作点图解法统一模型与分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 129-133.
- [12] Tong Weiming, Li Fengge, Zhao Zhiheng. Diagrammatized method unified model and analyzing of the permanent magnet's working point in the polarized magnetic system with single permanent magnet [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 129-133(in Chinese).
- [13] 梁慧敏, 翟国富, 罗福彪. 基于有限元法的极化磁系统永磁回复线起始点的虚拟设计[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 147-152.
- [14] Liang Huimin, Zhai Guofu, Luo Fubiao. Virtual design of permanent magnet reversion line's starting point in polarized magnetic system based on finite element[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9): 147-152(in Chinese).
- [15] 梁慧敏, 任万滨, 王思民, 等. 基于三维有限元法的极化磁系统静态吸力特性分析[J]. 机电元件, 2005, 25(3): 3-7.
- [16] Liang Huimin, Ren Wanbin, Wang Simin, et al. The characteristic analysis of static attractive torque of polarized magnetic system based on 3D FEM[J]. Electromechanical Components, 2005, 25(3): 3-7(in Chinese).
- [17] 王思民. 极化磁系统中永磁体处理方法的改进[J]. 青岛科技大学学报: 自然科学版, 2007, 28(3): 234-236.
- [18] Wang Simin. Improvement in calculating method of polarized magnetic system[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2007, 28(3): 234-236(in Chinese).
- [19] 梁慧敏, 崔浩, 叶雪荣, 等. 基于永磁分段模型的继电器静态吸

- 力特性仿真计算[J]. 低压电器, 2009(19): 1-3, 12.
Liang Huimin, Cui Hao, Ye Xuerong, et al. Simulation & calculation on static attractive torque characteristic of relay based on subsection permanent magnet model[J]. Low Voltage Apparatus, 2009(19): 1-3, 12(in Chinese).
- [12] 梁慧敏, 张荣岭, 徐俊, 等. 组装式永磁体分段回复线模型的研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(27): 133-137.
Liang Huimin, Zhang Rongling, Xu Jun, et al. Modeling of combined permanent magnet subsection recoil line[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(27): 133-137(in Chinese).
- [13] 游一民, 陈德桂, 罗文科, 等. 关于永磁机构中永磁工作点的讨论[J]. 高压电器, 2002, 38(4): 39-41, 51.
You Yimin, Chen Degui, Luo Wenke, et al. Discussion on the working point of permanent magnet in permanent magnet actuator[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(4): 39-41, 51(in Chinese).
- [14] 邹洪超, 娄建勇, 荣命哲. 单线圈单稳态永磁机构接触器三位磁场分析和电磁吸力的计算[J]. 低压电器, 2004(3): 12-15.
Zou Hongchao, Lou Jianyong, Rong Mingzhe. Electromagnetic field analysis and magnetic force calculation of contactor with permanent magnet[J]. Low Voltage Apparatus, 2004(3): 12-15(in Chinese).
- [15] 娄建勇, 荣命哲, 邹洪超, 等. 单线圈单稳态永磁式接触器机构动力学特性仿真分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 120-124.
Lou Jianyong, Rong Mingzhe, Zou Hongchao, et al. Simulation on mechanism dynamic characteristics of single coil and single stable contactor with permanent magnet[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 120-124(in Chinese).
- [16] 房淑华, 林鹤云, 蔡彬, 等. 永磁接触器磁场有限元分析及控制单元设计[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(22): 162-166.
Fang Shuhua, Lin Heyun, Cai Bin, et al. Finite element magnetic field analysis and control unit design of permanent magnet contactor [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(22): 162-166(in Chinese).
- [17] 房淑华, 林鹤云, 汪先兵, 等. 永磁安装位置对永磁接触器动态特性的影响[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 93-98.
Fang Shuhua, Lin Heyun, Wang Xianbing, et al. Effect of permanent magnet arrangement on dynamic performance of permanent magnet contactor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 93-98(in Chinese).
- [18] 汪先兵, 房淑华, 林鹤云, 等. 永磁接触器位移分段 PWM 控制及吸合过程动态特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(3): 113-117.
Wang Xianbing, Fang Shuhua, Lin Heyun, et al. Analysis of displacement subsection PWM control and dynamic characteristic for closing process of permanent magnet contactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(3): 113-117(in Chinese).
- [19] 梁慧敏, 张玉成, 翟国富. 电磁继电器静态吸反力特性测试方法的探讨[J]. 低压电器, 2003(5): 50-53.
Liang Huimin, Zhang Yucheng, Zhai Guofu. Discussing the testing method of electromagnetic relay's static electromagnetic attractive force and spring force characteristics[J]. Low Voltage Apparatus, 2003(5): 50-53(in Chinese).



翟国富

收稿日期: 2010-06-18。

作者简介:

翟国富(1964), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电器的可靠性理论与测试技术, gfzhai@hit.edu.cn;

王其亚(1982), 男, 博士研究生, 主要从事电磁继电器综合优化方面的研究, wqy_876@163.com。

(编辑 李婧妍)