

## 带永磁的差动式继电器的优化设计

刘陵顺<sup>1</sup>, 刘茂恺<sup>2</sup>

(1. 海军航空工程学院, 山东 烟台 264001; 2. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**【摘要】** 文章对带永磁的差动式磁系统建立了优化设计数学模型, 给出了等效磁路及回路计算方法, 分析了优化变量的变化对性能指标的影响。

**【关键词】** 永磁磁系统; 优化设计

## 1 引言

继电器传统的设计方法是经验设计法, 设计工作量大, 性能价格比低。而优化设计是指应用优化理论及计算机技术对各种设计参数进行全面分析综合, 确定出最优设计方案, 使设计出的电磁系统的某些目标函数最优。

本文用带永磁的差动式磁系统代替原产品的纯电磁线圈的磁系统, 采用复合形法对该磁系统进行了优化设计, 优化后的各项性能指标较原产品均有明显改善, 取得了令人满意的结果。

## 2 优化设计方案

继电器优化设计包括建立数学模型和确定优化算法两大部分。

磁系统优化设计数学模型可表示为:

$$\begin{cases} \min f(x) & x \in E^N \\ S. t & g_i(x) \leq 0 \quad (i=1, 2, \dots, m) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\min f(x)$  为目标函数极小值, 一般取电磁系统的体积最小、重量最轻、磁效率最高等, 其中体积和重量均包括线圈和导磁体两部分之和。

$g_i(x) \leq 0$  为  $m$  个约束函数, 一般包括边界约束和工作性能约束, 边界约束是指设计变量的尺寸约束, 工作性能约束包括电磁力约束、线圈温升约束、导磁体的磁感应强度约束等。

$x$  为设计变量, 表示为  $(x_0, x_1, \dots, x_n)^T$ , 一般选择对目标函数影响较大的变量为设计变量。

根据以上理论, 结合磁系统示意图(图1)和簧片力矩图(图2), 可确定相应的数学模型, 其中该继电器的安装尺寸为半个晶体管。

(1) 目标函数: 为了保证继电器高的灵敏度和可靠性, 最重要的是提高单位线圈所产生的电磁力矩, 并用这个指标评价磁系统的优劣, 称其为磁效率。

$$= M_d / IW \quad (2)$$

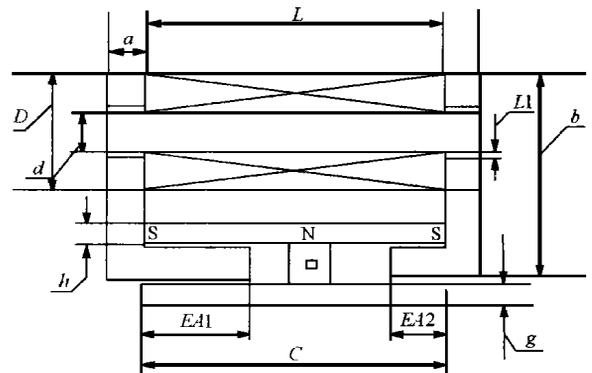


图1 带永磁的差动式磁系统结构图

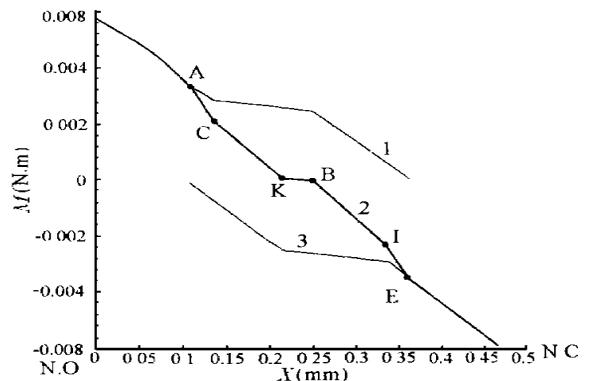


图2 簧片力矩曲线图

其中  $M_d = M_1 - M_2$  为衔铁左右部分的合成电磁力矩,  $M_1$  为吸合极面产生的电磁力矩,  $M_2$  为释放极面产生的电磁力矩,  $IW$  为吸合安匝数。

(2) 优化变量: 经过分析, 选择对目标函数影响较大的长极面  $EA1$ 、短极面  $EA2$ 、垫片厚度  $DETA$ 、磁钢厚度  $h$ 、衔铁厚度  $g$ 、线圈安匝  $IW$  等六个参数作为优化变量, 其它参数对目标函数的影响较小或可用这六个参数表示。

(3) 约束函数:

磁感应强度约束: 导磁体材料为电工纯铁, 其磁感应强度的选取应稍高于磁化曲线的膝点, 一般选择在  $\mu_{max}$  处, 这样可降低导磁体的磁压降, 由此取

$B_0 = 1.5 T$ , 导磁体整个工作过程的磁感应强度均应低于  $1.5 T$ 。

电磁力与簧片力约束: 电磁力与簧片力配合的好坏, 是衡量继电器性能优劣的基本条件之一。要求在吸合电压下, 电磁力应稍高于簧片力, 由图 2 选择  $A、B、I$  为参考点; 在释放电压下, 簧片力应稍高于电磁力, 选择  $C、K、E$  为参考点。

(4) 优化算法: 由于本磁系统数学模型为非线性, 其目标函数无法用  $x^T$  直接表示, 难以对其求导计算, 故选择复合形法。

### 3 等效磁路及其计算

#### 3.1 气隙磁导的计算

在继电器磁系统中有两种气隙: 工作气隙与非工作气隙, 其中工作气隙磁压降占主要比例, 其计算准确度将影响整个计算结果。气隙磁导采用磁场分割法计算, 其实质是用理想的磁力线将整个气隙分割成若干具有规则形状的磁通管, 求出它们的磁导后, 再根据串并联关系进行处理, 将得到整个气隙磁导。该方法易于实现, 精度可以满足工程需要。

#### 3.2 永磁材料的选取与等效

本系统采用铁铬钴 2J85 为磁钢材料, 本材料易加工, 充磁要求在产品装配后进行, 可避免点焊对磁钢产生去磁作用, 使磁钢的工作点高。

在磁路等效中, 可将磁钢看作一个恒定磁势  $(IW)_m$  与线性磁阻  $R_m$  的串联而成。

$$(IW)_m = H_c L \tag{3}$$

$$R_m = L / S \tag{4}$$

式中,  $H_c$  为虚拟矫顽力, 如图 3, 为  $C$  点回复系数,  $\mu_{rec}$ ,  $L$  为长度,  $S$  为截面积。  $(IW)_m$  及  $R_m$  的计算是一个回复迭代的过程。

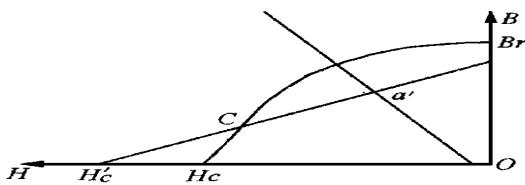


图 3 永磁体的去磁及回复线图

软磁材料选取电工纯铁, 其磁滞损耗小, 饱和磁感应强度较高。

#### 3.3 等效磁路

磁路计算是磁系统设计的基础, 磁系统采用等效网络法既可满足工程需要, 又可降低计算量, 等效网络图如图 4。

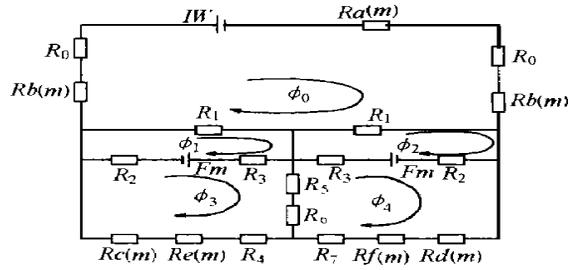


图 4 差动式磁系统等效磁路图

图中,  $R_A [m]$  为铁芯磁阻,  $R_b [m]$  为扼铁磁阻,  $R_c [m]$ 、 $R_d [m]$  分别为右、左磁极磁阻,  $R_e [m]$ 、 $R_f [m]$  分别为左、右衔铁磁阻,  $R_0$  为铁芯与轭铁之间的非气隙磁阻,  $R_1$ 、 $R_3$  为磁钢磁阻,  $R_2$  为磁钢与轭铁之间的非气隙磁阻,  $R_4$ 、 $R_7$  为左、右气隙磁阻,  $R_5$  为漏磁阻,  $R_6$  为转轴中心气隙磁阻。

列写网络回路方程:

$$\begin{cases} (R_A [m] + 2(R_b [m] + R_1 + R_0)) \phi_0 - R_1 \phi_1 - R_1 \phi_2 = - IW \\ - R_1 \phi_0 + (R_1 + R_2 + R_3) \phi_1 - (R_2 + R_3) \phi_3 = - F_m \\ - R_1 \phi_0 + (R_1 + R_2 + R_3) \phi_2 - (R_2 + R_3) \phi_4 = F_m \\ - (R_2 + R_3) \phi_1 + (R_2 + R_3 + R_4 + R_c [m] + R_5 + R_6 + R_e [m]) \phi_3 - (R_5 + R_6) \phi_4 = F_m \\ - (R_2 + R_3) \phi_2 - (R_5 + R_6) \phi_3 + (R_2 + R_3 + R_5 + R_6 + R_7 + R_f [m] + R_d [m]) \phi_4 = - F_m \end{cases} \tag{5}$$

此回路方程采用高斯迭代法求解。

导磁体磁阻采用逐次逼近法求解。即首先令所有导磁体的磁阻为零, 代入回路方程组求出支路磁通  $\phi(i)$ , 由  $\phi(i)$  除以导磁体的截面积, 可得磁感应强度  $B_i$ , 由  $B_i$  查磁化曲线可得  $H_i$ , 然后由  $H_i L_i = \phi(i) R(i)$  求出  $R_i = \frac{H_i L_i}{\phi(i)}$ , 代入回路方程组, 利用高斯迭代再次求出新的  $\phi(i)$ , 直到  $\frac{\phi(i+1) - \phi(i)}{\phi(i)} <$  为止。为一小的正数, 用以控制计算精度。此时的  $\phi(i)$  即为所求磁通, 这样可把复杂磁路的求解归结为一组方程组的求解。

### 4 计算结果分析

4.1 经过优化计算, 磁效率为  $0.1105 N \cdot mm / A$ , 临界动作安匝为  $38.7 A$ , 临界释放安匝为  $5.5 A$ , 额定工作安匝为  $57 A$ , 储备系数为  $1.5$ , 线圈消耗功率为  $69.5 mW$  而原继电器 (非永磁) 磁效率为  $0.0132 N \cdot mm / A$ , 额定工作安匝为  $204 A$ , 线圈消耗功率为

412mW,可见,优化后的带永磁系统的磁效率和灵敏度均得到很大提高。计算出的电磁力矩与簧片力矩配合曲线如图5。

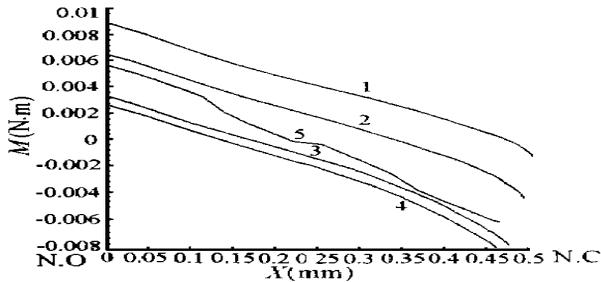


图5 电磁力矩与簧片力矩配合曲线图

#### 4.2 优化变量的调整对电磁力矩的影响

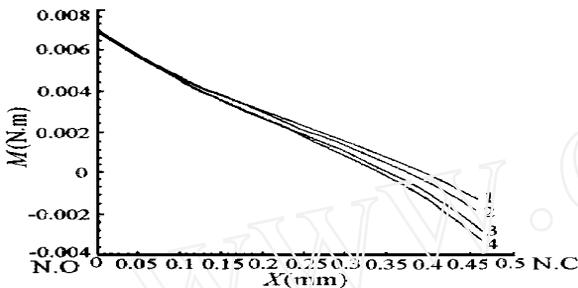


图6 参数EA1对电磁力矩的影响

1)长极面EA1的调整:电磁力矩变化曲线图如图6,曲线1、2、3、4分别为EA1=2.7mm、2.4mm、2.0mm、1.7mm的电磁力矩曲线,EA1减小时,电磁力矩随行程的增大而下降得更明显,由此可见,长、短极面的长度差别越大,衔铁的吸合越容易,释放越难。

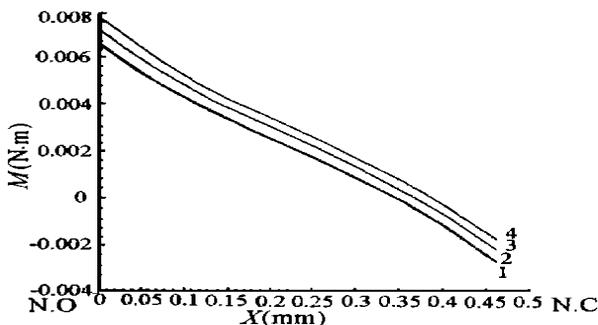


图7 参数EA2对电磁力矩的影响

2)短极面EA2的调整:如图7,曲线1、2、3、4分别为EA2=1.8mm、1.7mm、1.4mm、1.2mm的电磁力矩曲线,EA2减小时,力矩上升,结论与1)相同。

3)垫片厚度DETA的调整:如图8,曲线1、2、3、4分别为DETA=0.15mm、0.13mm、0.08mm、0.05mm

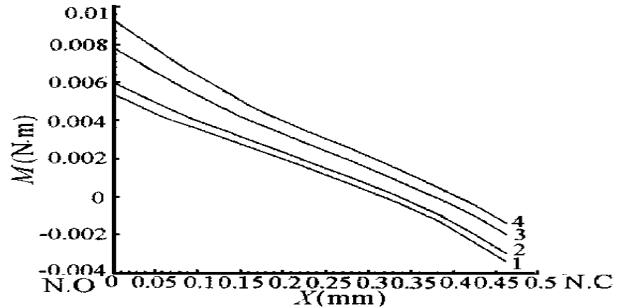


图8 参数DETA对电磁力矩的影响

的电磁力矩曲线,DETA减小时,曲线上升,而且随衔铁行程的减小,力矩上升幅度增大,故垫片的减小对释放不利。

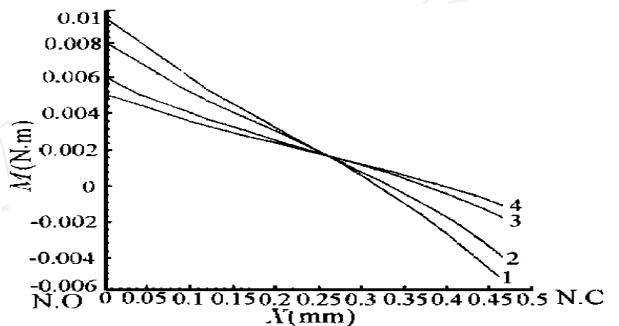


图9 参数h对电磁力矩的影响

4)磁钢厚度的调整:如图9,曲线1、2、3、4分别为h=2.5mm、2.2mm、1.7mm、1.5mm的电磁力矩曲线,h减小时,在衔铁行程的前半部分,力矩曲线越低,在衔铁行程的后半部分,力矩曲线增高。

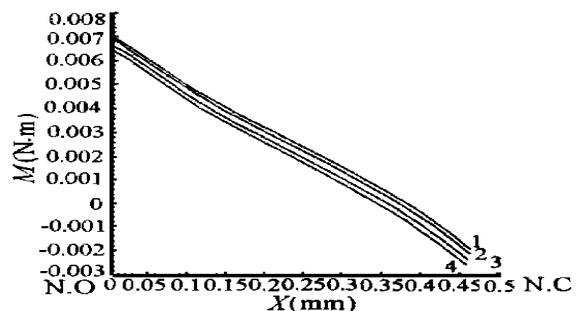


图10 参数g对电磁力矩的影响

5)衔铁厚度的调整:如图10,曲线1、2、3、4分别为g=1.9mm、1.7mm、1.4mm、1.2mm的电磁力矩曲线,g减小时,曲线均匀下降。

6)线圈安匝的调整:如图11,曲线1、2、3、4分别为IW=60A、45A、30A、20A的电磁力矩曲线,IW减小时,力矩曲线成比例地下降。

(下转第41页)

出现的技术问题,一般又不如从事现场工作的科技人员那样具有丰富的经验。除了加强相互交流、各自取长补短外,尚需应用不同行业间通用的“黑箱”理论,简而言之,你可以(或可能)不了解黑箱内的具体结构,但是你必须详细了解这个黑箱的输入与输出方式。因此,从本质上讲,微机保护与综合自动化装置的设计要点,就是解决好它的输入与输出问题,具体的说,就是完成它的输入、输出接口电路

与相关的逻辑接口电路。从这个意义上说,“黑箱”理论是值得我们借鉴的。

收稿日期:1999-02-05

作者简介:陈代云(1943-),男,本科,高工,从事继电保护设计工作;李隽鸿(1972-),女,工程师,从事继电保护的设计工作。

## DISCUSSION ON THE DESIGN KEY OF SUBSTATION AUTOMATION SYSTEM

CHEN Dai-yun, LI Jun-hong

(Design Department of Yibin Power Bureau, Sichuan Yibin 644002, China)

**Abstract** Along with the quick development of science and technology, the substations which use microprocessor-based protections and automatic systems are built all over the country. The substation construction mode according to electromagnetic relaying and conventional operational way is being given up. To suit the tend, the paper discusses the design key of the substation automatic system for reference.

**Key words** microprocessor-based protection; integral automatic device; interface circuit

(上接第33页)

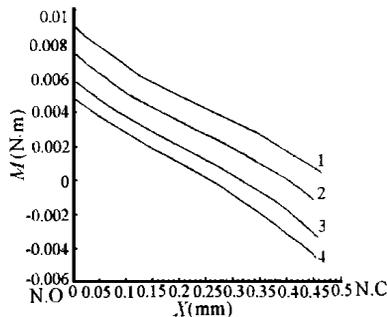


图 11 参数  $l/w$  对电磁力矩的影响

制作了相关的通用计算软件,优化后的永磁磁系统的性能指标与原产品相比有了很大改善,采用优化设计与计算机辅助设计相结合的方法,可以减少设计的误差与盲目性,缩短生产周期,提高产品的性能价格比。

### [参考文献]

- [1] 任耀先. 电磁铁优化设计. 机械工业出版社, 1986.
- [2] 费鸿俊等. 电磁机械动态分析与计算. 机械工业出版社, 1993.

收稿日期:1999-01-20

作者简介:刘陵顺(1969-),男,硕士,讲师,从事电机、电器的理论与控制研究工作。

## 5 总结

本文是对带永磁磁系统的优化设计的有益探索,

## OPTIMAL DESIGN ABOUT THE DIFFERENTIAL RELAY WITH PERMANENT MAGNET

LIU Ling-shun<sup>1</sup>, LIU Mao-kai<sup>2</sup>

(1. Naval Aeronautical Engineering Academy, yantai 264001, China; 2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract** In this paper, the Mathematics model of optimal design about differential permanent magnet system is set up. The equivalent magnet road and circuit mathematic method are given. The influence on the function target with the optimal variation change is analysed.

**Keyword** permanent magnet system; optimal design