

# 电磁继电器动态特性快速算法及其在优化中的应用

翟国富<sup>1</sup>, 王其亚<sup>1</sup>, 程贤科<sup>2</sup>, 陈志君<sup>2</sup>

- (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. 桂林航天电子有限公司, 广西壮族自治区 桂林市 541002)

## Fast Algorithm of Dynamic Characteristics of Electromagnetic Relay and Its Application on Optimization

ZHAI Guo-fu<sup>1</sup>, WANG Qi-ya<sup>1</sup>, CHENG Xian-ke<sup>2</sup>, CHEN Zhi-jun<sup>2</sup>

- (1. Military Apparatus Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China;
2. G & A Technologies Co., Ltd., Guilin 541002, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China)

**ABSTRACT:** Electromagnetic system (EMS) is the important part of electromagnetic relay (EMR). Considering the contradiction of efficiency and accuracy of solving EMS, a method integrating advantages of magnetic equivalent circuit (MEC) method and finite element method (FEM) was presented to quickly calculate the dynamic characteristics of EMR. The fast calculation of dynamic characteristics of EMR could be accomplished by this method, when dimension parameters of EMS varied. The accuracy of solutions using the proposed method was verified by comparing with the results of FEM. Moreover, adopting geometry dimensions as design variables, taking increasing the contacts' breaking velocity and decreasing closing velocity as goals, the EMS was optimized by genetic algorithm (GA), and the optimized results were finally given.

**KEY WORDS:** electromagnetic relay (EMR); optimization of electromagnetic system (EMS); fast algorithm; genetic algorithm (GA); dynamic characteristics

**摘要:** 电磁系统是电磁继电器的重要组成部分。针对电磁系统计算速度与准确性相矛盾的问题,综合磁路法的快速性和有限元法的准确性优点,提出一种用于电磁继电器动态特性计算的算法。该算法能够实现电磁系统尺寸参数变化后的继电器动态特性快速计算。在与有限元法计算结果对比、验证该方法计算结果准确性的基础上,采用遗传算法,以电磁系

统几何尺寸为优化变量,以增大吸合过程触点分断速度、减小触点闭合速度为目标,对电磁继电器动态特性进行优化,并给出了优化结果。

**关键词:** 电磁继电器; 电磁系统优化; 快速算法; 遗传算法; 动态特性

## 0 引言

电磁系统(electromagnetic system, EMS)是电磁继电器(electromagnetic relay, EMR)的两大系统之一,其优化研究对提高电磁继电器的性能和可靠性具有重要意义。电磁系统的计算通常有磁路法和磁场有限元法 2 种方法。磁路(magnetic equivalent circuit, MEC)模型简单、求解速度快,但精度较低;磁场有限元模型精度高,但求解速度慢。而电磁系统的优化过程往往需要对其模型进行反复多次静态、动态特性计算,因此,寻求一种快速、准确求解电磁系统的方法成为对其优化的前提和关键。

根据磁路模型能解析表达变量与函数关系以及求解速度快的特点,近年来,一些学者采用在磁路法基础上发展的磁阻网络方法(reluctance network method)对电磁机构进行相关的分析和优化工作<sup>[1-5]</sup>,但该方法建模过程复杂,为得到较为准确的结果,需要很强的建模技巧<sup>[6]</sup>。一些文献综合磁路法(magnetic equivalent circuit, MEC)和有限元法(finite element method, FEM)的优点,将空间映射(space mapping)技术应用于电磁机构的优化领域<sup>[7-8]</sup>。该方法通过建立磁路模型(即近似模型)与有限元模型

基金项目: 工信部国防科工局民用航天“十一五”预先研究项目资助(B1220062302)。

Supported by Civil Aerospace Eleventh Five-Year Advanced Research Project of National Defense Science and Industry Bureau of MIIT (B1220062302).

(即准确模型)间的映射关系, 并利用磁路模型优化结果, 以求得有限元模型的优化结果。采用该方法优化电磁机构的关键是建立磁路与有限元模型的映射关系<sup>[9-10]</sup>, 而这种关系, 尤其在铁磁区域饱和的情况下, 很难准确获得。在提高计算精度和加快计算速度方面, 一种简化矩量法(simplified magnetic moment method)和磁阻网络法结合的方法也曾被提出, 以用于变压器模型的瞬态计算<sup>[11-12]</sup>, 但该方法过于复杂。国内方面, 许多文献偏重于研究各种优化算法的改进对电器优化问题的作用<sup>[13-18]</sup>, 在优化过程中, 大多直接采用商用有限元软件对电磁问题进行求解<sup>[19-20]</sup>。电磁系统优化归根结底是优化继电器的动态特性, 但综合考虑触点分断及闭合速度, 减轻触点烧蚀, 延长继电器电寿命的电磁系统优化问题, 目前尚未见相关文献。

本文综合磁路法和有限元法各自的优点, 提出一种基于修正系数的方法, 即利用有限元计算结果修正磁路计算结果, 用于电磁继电器动态特性的快速计算。在此基础上, 以电磁系统几何尺寸为优化变量, 建立以增大吸合过程触点分断速度、减小吸合过程触点闭合速度为目的的目标函数, 采用遗传算法对电磁继电器的动态特性进行优化。

## 1 修正系数法

所谓的修正系数是指同一电磁系统模型的有限元计算结果与磁路计算结果的比值, 即

$$\eta(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{f_{\text{FEM}}(x_1, x_2, \dots, x_n)}{f_{\text{MEC}}(x_1, x_2, \dots, x_n)} \quad (1)$$

式中:  $f_{\text{FEM}}$  和  $f_{\text{MEC}}$  分别为有限元法和磁路法计算结果(如吸力矩、磁链等);  $x_1, x_2, \dots, x_n$  为影响电磁系统计算结果的几何尺寸, 在获知该系数的前提下, 仅需对电磁系统进行磁路计算即可得到准确的计算结果, 从而加快计算速度。因此, 该方法实施的关键是求取几何尺寸改变后的修正系数。

对于实际的电磁系统物理模型, 函数  $f_{\text{FEM}}(x_1, x_2, \dots, x_n)$  和  $f_{\text{MEC}}(x_1, x_2, \dots, x_n)$  为关于几何尺寸  $x_1, x_2, \dots, x_n$  在其取值范围内的可微函数。根据式(1)的定义, 修正系数函数  $\eta(x_1, x_2, \dots, x_n)$  也为几何尺寸  $x_1, x_2, \dots, x_n$  的可微函数。因此,  $\eta(x_1, x_2, \dots, x_n)$  在  $n$  维空间点  $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$  的全微分可表示为

$$d\eta|_{(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)} = \frac{\partial \eta}{\partial x_1}(x_1 - x_1^*) + \frac{\partial \eta}{\partial x_2}(x_2 - x_2^*) + \dots + \frac{\partial \eta}{\partial x_n}(x_n - x_n^*) \quad (2)$$

式中  $\frac{\partial \eta}{\partial x_1}, \frac{\partial \eta}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial \eta}{\partial x_n}$  分别为修正系数在点  $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$  处的偏导数。

取点  $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$  邻域内一点  $(x_{1r}, x_{2r}, \dots, x_{nr})$ , 其偏导数可近似表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial \eta}{\partial x_1} \approx [\eta(x_{1r}, x_2^*, \dots, x_n^*) - \eta(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)] / (x_{1r} - x_1^*) \\ \frac{\partial \eta}{\partial x_2} \approx [\eta(x_1^*, x_{2r}, \dots, x_n^*) - \eta(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)] / (x_{2r} - x_2^*) \\ \vdots \\ \frac{\partial \eta}{\partial x_n} \approx [\eta(x_1^*, x_2^*, \dots, x_{nr}) - \eta(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)] / (x_{nr} - x_n^*) \end{cases} \quad (3)$$

那么, 点  $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$  邻域内的任一取值点  $(x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$  对应的修正系数可近似表示为

$$\eta(x'_1, x'_2, \dots, x'_n) = \eta(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) + d\eta'|_{(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)} \quad (4)$$

式中:

$$d\eta'|_{(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)} = \frac{\partial \eta}{\partial x_1}(x'_1 - x_1^*) + \frac{\partial \eta}{\partial x_2}(x'_2 - x_2^*) + \dots + \frac{\partial \eta}{\partial x_n}(x'_n - x_n^*) \quad (5)$$

由式(1)~(5)可知, 已知修正系数在点  $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$  处的值及其近似偏导数, 可求得该点邻域内的点  $(x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$  对应的修正系数  $\eta(x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$ 。该方法将点  $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$  邻域的几何尺寸取值点  $(x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$  对应的磁路计算结果  $f_{\text{EMC}}(x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$ , 使用修正系数  $\eta(x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$  加以修正, 得到与有限元结果相近的计算结果, 实现电磁系统准确结果的快速计算。

## 2 电磁继电器动态特性的快速算法

### 2.1 电磁系统模型及修正系数求取

图 1 为本文研究的电磁系统的几何模型, 其中线圈电压为 28 V, 电阻为 980  $\Omega$ 。选取图中对电磁吸力矩影响较大的 6 个几何尺寸  $x_1 \sim x_6$  作为优化变量, 其中  $x_3 = x_4$ 、 $x_5 = x_6$ 。

该电磁系统的磁路模型如图 2 所示。各几何尺寸的取值范围分别为  $x_1 \in [1.0, 1.2]$  mm,  $x_2 \in [4.0, 4.5]$  mm,  $x_3 = x_4 \in [5.0, 6.0]$  mm,  $x_5 = x_6 \in [4.5, 5.5]$  mm, 在其各自取值范围内用于有限元计算以求取修正系数的取值点如表 1 所示。

为实现几何尺寸在各自取值范围内的电磁系统快速、准确计算, 需根据表 1 各尺寸取值点对电磁系统分别建立磁路模型和有限元模型。如对于几何尺寸  $x_1$  的取值点  $x_{n0}$ , 建立该点对应的磁路和有限元模型时, 其余几何尺寸  $x_n (n=2, \dots, 6)$  保持其各自

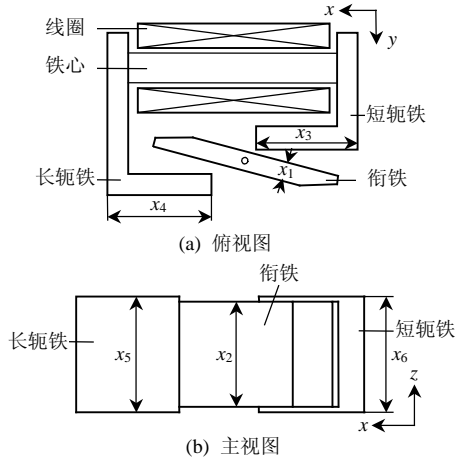


图1 电磁系统几何模型及优化变量

Fig. 1 Geometry model of EMS and design variables

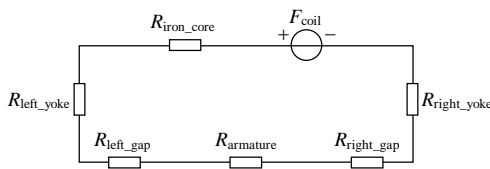


图2 磁路模型  
Fig. 2 EMC model

表1 几何尺寸在其取值范围内的有限元法计算点  
Tab. 1 Points calculated of geometry dimensions within their respective ranges by FEM

几何尺寸	$x_{nj}(j=0,1,\dots,p_n-1,p_n,\dots,m_n)$
$x_1$	1.0, 1.1, 1.2 ( $x_1^*=1.1$ )
$x_2$	4.0, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 ( $x_2^*=4.2$ )
$x_3$	5.0, 5.2, 5.4, 5.6, 5.8, 6.0 ( $x_3^*=5.4$ )
$x_4$	5.0, 5.2, 5.4, 5.6, 5.8, 6.0 ( $x_4^*=5.4$ )
$x_5$	4.5, 4.7, 4.9, 5.1, 5.3, 5.5 ( $x_5^*=4.9$ )
$x_6$	4.5, 4.7, 4.9, 5.1, 5.3, 5.5 ( $x_6^*=4.9$ )

的取值  $x_n^*(n=2,\dots,6)$  不变。以此类推可以建立表 1 中其它各取值点对应的磁路和有限元模型,由式(1)求这些取值点的修正系数,由式(3)求  $x_n^*(n=2,\dots,6)$  于点  $x_{nj}(j=0,1,\dots,p_n-1,p_n,\dots,m_n)$  的修正数的近似偏导数,则由式(4)、(5)可得  $\forall x'_n \in [a_n, b_n](n=2,\dots,6)$  对应的修正系数  $\eta_n(x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$ 。

2.2 动态特性的快速求解

忽略铁心涡流的情况下,电磁继电器吸合过程的动态特性方程组为

$$\begin{cases} d\psi/dt = U - Ri(\psi, \alpha) \\ d\omega/dt = [M_x(\psi, \alpha) - M_f(\alpha)]/J \\ d\alpha/dt = \omega \\ \psi|_{t=0} = 0, \omega|_{t=0} = 0, \alpha|_{t=0} = \alpha_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\psi$ 、 $U$ 、 $R$ 、 $i$  分别为线圈磁链、电压、电阻和电流;  $\alpha$ 、 $\omega$  分别为衔铁角位移和角速度;  $M_x$ 、 $M_f$  分别为衔铁受到的吸力矩和反力矩;  $J$  为衔铁系统的转动惯量;  $\alpha_0$  为释放位置处的衔铁角位移。

式(6)求解的关键是求取  $M_x(\psi, \alpha)$  和  $i(\psi, \alpha)$ 。为实现几何尺寸在其取值范围内快速准确的动态计算,本文根据表 1,对各参数的每一取值点,采用 FLUX3D 软件进行有限元计算,建立其对应的  $M_x$  和  $\psi$  关于  $i$ 、 $\alpha$  的数据表格<sup>[21]</sup>。在此基础上,对几何尺寸在其取值范围内的任一取值点  $(x'_1, x'_2, x'_3, x'_4, x'_5, x'_6)$ ,由磁路计算结果及式(4)得到的修正系数,构造  $M_x$  和  $\psi$  关于  $i$ 、 $\alpha$  的数据表格。最后通过 4 阶龙格库塔及插值方法完成式(6)的求解。修正系数法(compensation factor method, CFM)能实现几何尺寸在其取值范围内变化时的动态特性快速计算,图 3 为该方法的计算流程。

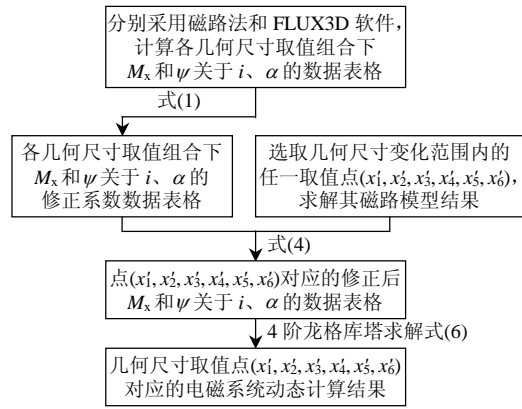


图3 修正系数法求动态特性流程图  
Fig. 3 Flow chart of solving dynamic characteristics by CFM

2.3 结果比较

在几何尺寸取值范围内,任取  $x_1 = 1.03 \text{ mm}$ ,  $x_2 = 4.24 \text{ mm}$ ,  $x_3 = x_4 = 5.85 \text{ mm}$ ,  $x_5 = x_6 = 4.86 \text{ mm}$ ,采用修正系数法和 FLUX3D 动态求解功能分别计算继电器的动态特性,结果如图 4 所示。从对比曲线可以看出,两种方法求得的结果非常接近,吸合时间的误差仅为 1.3%。表 2 为两种方法的计算效率

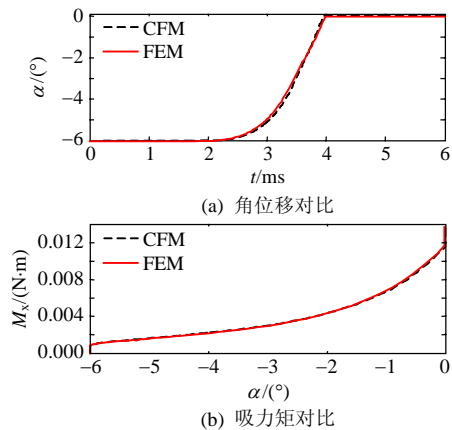


图4 修正系数法与有限元法计算结果比较  
Fig. 4 Comparison of solutions by CFM and FEM

表 2 计算效率比较

Tab. 2 Comparison of computational efficiency

求解方法	时间迭代步数	网格数	计算时间/s
有限元法	128	(90 000, 120 000)	44 204
修正系数法	1 000	—	<10

比较，修正系数法的计算效率远远高于有限元法，计算环境为 Core2 Q8200 2.33 GHz PC。

### 3 以电磁系统尺寸参数为变量的动态特性优化

#### 3.1 优化目标及优化方法

触点的分断与闭合速度是影响触点分断燃弧和闭合弹跳进而影响继电器电寿命的重要因素。为减轻电弧和弹跳对触点的损伤，要求尽量增大触点分断速度、减小触点闭合速度，而在吸合过程中，增大分断速度与减小闭合速度是相互矛盾的。因此，本文在实现动态特性快速计算的基础上，以式(7)为优化目标函数，以图 1 中 6 个几何尺寸  $x_1, \dots, x_6$  为优化变量，对电磁系统进行优化。由式(7)可知， $\omega_1$  越大， $\omega_2$  越小，则目标函数  $f(\omega_1, \omega_2)$  越小。该优化过程以吸合电压和吸合时间为约束条件，如式(8)所示。

$$f(\omega_1, \omega_2)_{\min} = \sqrt{[\omega_{1\max}(\mathbf{X}) - \omega_1(\mathbf{X})]^2 + [\omega_{2\min}(\mathbf{X}) - \omega_2(\mathbf{X})]^2} \quad (7)$$

$$\text{约束条件: } U_{\text{pickup}} \leq 16 \text{ V}, t_{\text{pickup}} \leq 6 \text{ ms} \quad (8)$$

式中： $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_{1\max}$ 、 $\omega_{2\min}$  分别为吸合过程触点分断速度、闭合速度、分断速度最大值和闭合速度最小值； $\mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]$ ； $U_{\text{pickup}}$  为吸合电压； $t_{\text{pickup}}$  为吸合时间。

对式(7)所示的目标函数，很难给出其准确的解析表达式，因此本文选择随机优化算法中的遗传算法对该目标函数进行优化。遗传算法是受生物进化和遗传学说启发而发展起来的优化方法，通过复制、交叉和变异操作完成最优问题的求解，尤其适合不能明确给出目标函数解析表达式问题的寻优。

本文先采用遗传算法分别以吸合过程触点分断速度最大和闭合速度最小为目标函数，求得式(7)中的  $\omega_{1\max}$  和  $\omega_{2\min}$ ；然后再次采用遗传算法对式(7)进行优化。

#### 3.2 优化结果

以 200 为种群数量，150 为进化代数，0.5 为交叉概率，0.1 为变异概率，得到分别以分断速度最大和闭合速度最小为目标函数的进化过程曲线，如图 5 所示。由图可得， $\omega_{1\max}$  为 6492°/s， $\omega_{2\min}$  为 6526°/s。图 6 为将优化得到的  $\omega_{1\max}$  和  $\omega_{2\min}$  代入目

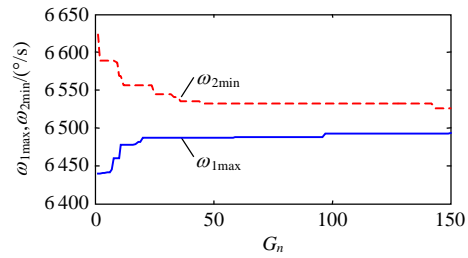


图 5 触点速度随进化代数的变化关系  
Fig. 5 Velocities of contacts vs. generation

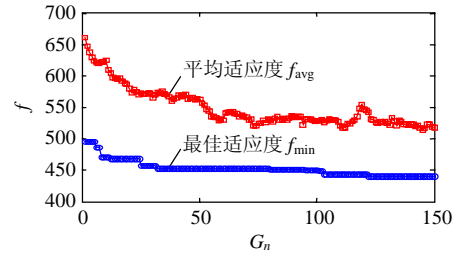


图 6 目标函数值随进化代数的变化关系  
Fig. 6 Object function vs. generation

标函数，采用遗传算法得到的目标函数随进化代数  $k$  的变化曲线。从曲线可得最优目标函数值为 440.3，对应的触点分断速度为 6107°/s，闭合速度为 6793°/s。

图 7 为优化前后衔铁的速度曲线。优化后，触点的分断、闭合速度比优化前分别增大 3.2% 和减小 10.1%。由图 7 可见，在静合触点分断后、动合触点闭合前，衔铁有一段时间处于减速状态，在增大分断速度的同时，控制了闭合速度的增长。表 3 为不同目标函数下优化得到的优化变量取值。

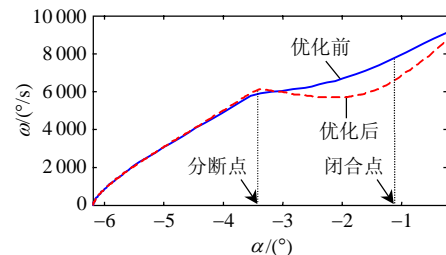


图 7 优化前后衔铁速度曲线  
Fig. 7 Curve of armature's velocity before and after optimization

表 3 不同目标函数下的优化变量取值  
Tab. 3 Values of design variables for different object functions

目标函数	$x_1 \in [1.0, 1.2]$ mm	$x_2 \in [4.0, 4.5]$ mm	$x_3(x_4) \in [5.0, 6.0]$ mm	$x_5(x_6) \in [4.5, 5.5]$ mm
$\omega_{1\max}$	1.004 71	4.050 98	5.992 16	4.613 73
$\omega_{2\min}$	1.178 82	4.003 92	5.000 00	5.496 08
$f(\omega_1, \omega_2)_{\min}$	1.000 00	4.009 80	5.243 14	5.433 33

## 4 结论

1) 提出了一种基于修正系数的电磁继电器动

态特性快速算法。该方法既有磁路法的快速性，又有有限元法的准确性优点。

2) 以动态特性快速算法为基础，采用遗传算法，完成了以电磁系统尺寸参数为变量的触点分断及闭合速度的优化。优化前后的速度曲线对比表明，优化后速度曲线在增大分断速度(增大3.2%)的同时控制了闭合速度的增长(减小10.1%)。

3) 本文的研究为电磁系统最优设计、延长继电器电寿命提供了快速可行的方法。该方法已应用于某型号电磁继电器长寿命设计中，使该型号继电器的电寿命大幅提高，由原来28V、5A负载下的2万次提高到目前的10万次。

## 参考文献

- [1] Delale A, Albert L, Gerbaud L, et al. Automatic generation of sizing models for the optimization of electromagnetic devices using reluctance networks[J]. IEEE Transaction Magnetics, 2004, 40(2): 830-833.
- [2] Peloux B D, Gerbaud L, Wurtz, F, et al. Automatic generation of sizing static models based on reluctance networks for the optimization of electromagnetic devices[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4): 715-718.
- [3] Coutel C, Wurtz F, Bignon J, et al. Constrained optimisation of a linear actuator: comparison of two methods to deal with implicit parameters in the analytical model[C]. IEMD'99, Paris, France, 1999.
- [4] Nakamura K, Ichinokura O. Dynamic simulation of PM motor drive system based on reluctance network analysis[C]. 13th Power Electronics and Motion Control Conference, Tokyo, Japan, 2008.
- [5] Nakamura K, Fujio S, Ichinokura O. A method for calculating iron loss of an SR motor based on reluctance network analysis and comparison of symmetric and asymmetric excitation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(10): 3440-3442.
- [6] Chillet C, Voyant J Y. Design-oriented analytical study of a linear electromagnetic actuator by means of a reluctance network[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(4): 3004-3010.
- [7] Choi H S, Kim D H, Park I H, et al. A new design technique of magnetic systems using space mapping algorithm[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(5): 3627-3630.
- [8] Encica L, Makarovic J, Lomonova E A, et al. Space mapping optimization of a cylindrical voice coil actuator[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2006, 42(6): 1437-1444.
- [9] Echeverría D, Lahaye D, Encica L, et al. Manifold-mapping optimization applied to linear actuator design[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4): 1183-1186.
- [10] Encica L, Paulides J J H, Lomonova E A, et al. Aggressive output space-mapping optimization for electromagnetic actuators[J]. IEEE Transaction Magnetics, 2008, 44(6): 1106-1109.
- [11] Janet F, Coulomb J L, Chillet C, et al. Simplified magnetic moment method applied to current transformer modeling[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(2): 818-821.
- [12] Janet F, Coulomb J L, Chillet C, et al. Magnetic moment and reluctance network mixed method applied to transformer's modeling[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(5): 1428-1431.
- [13] 刘晓明, 闻福岳, 曹云东, 等. 基于改进遗传算法的 SF<sub>6</sub> 断路器匀场设计[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(33): 99-103.
- [14] 曹云东, 刘晓明, 刘冬, 等. 动态神经网络法及在多变量电器优化设计中的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 112-116.
- [15] 刘帼巾, 陆俭国, 苏秀苹, 等. 神经网络法优化接触器电磁系统[J]. 电工技术学报, 2007, 22(1): 62-66.
- [16] 刘晓明, 闻福岳, 朱冬梅. 基于改进模拟退火法的电器优化设计[J]. 沈阳工业大学学报, 2007, 29(6): 610-612, 622.
- [17] 刘晓明, 石玉侠, 黄丹宇. 基于多变量优化的真空灭弧室绝缘设计[J]. 沈阳工业大学学报, 2006, 28(3): 265-268.
- [18] 曹云东, 王尔智, 刘晓明, 等. Tabu 算法的改进及其在气压力 SF<sub>6</sub> 断路器中的应用[J]. 电工技术学报, 2000, 15(4): 32-35.
- [19] 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.
- [20] 金立军, 袁征, 庄火庚, 等. 船用直流接触器电磁铁的优化设计[J]. 低压电器, 2007, (11): 6-9.
- [21] 费洪俊, 张冠生. 电磁机构动态分析与计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993: 4-19.



翟国富

收稿日期: 2009-12-07.

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, gzfzhai@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.

(责任编辑 张玉荣)