基于正交试验设计的电磁继电器关键调整参数及优化方法

王其亚[1] 翟国富[1] 程贤科[2] 陈志君[2]
（1. 哈尔滨工业大学军用电器研究所 哈尔滨 150001 2. 桂林航天电子有限公司 桂林 541002）

摘要 在电磁继电器调试阶段，调整参数的工艺控制直接影响继电器的反力特性，从而使吸、反力配合发生改变，最终影响到继电器的触点分断速度，分断速度的变化对继电器的电寿命产生重要影响。本文以调整参数（包括衔铁行程、返簧预压力矩、静合压力、触点间隙和动合超程）为因素，触点分断速度为指标，进行五因素四水平正交试验设计，分析、研究影响分断速度的关键参数。研究结果表明衔铁行程、触点间隙和动合超程为影响静合触点分断速度的关键参数，动合超程为影响动合触点分断速度的关键参数。最后在此基础上提出调整参数的优化方法。

关键词：正交试验设计 电磁继电器 反力特性 分断速度 关键调整参数
中图分类号：TM5

Key Adjusted Parameters and Optimum Method of Electromagnetic Relay Based on Orthogonal Experimental Design

Wang Qiya[1] *Zhai Guofu*[1] *Cheng Xianke*[2] *Chen Zhijun*[2]
（1. Harbin Institute of Technology Harbin 150001 China 2. G & A Technologies Co., Ltd. Guilin 541002 China）

Abstract On the stage of electromagnetic relay's being adjusted, the technical control of adjusted parameters directly affects relays' characteristics of reaction force, and changes the match of attractive force and reaction force. It eventually influences the breaking velocity of relay's contacts. And the change of contacts' breaking velocity has a great effect on relays' electrical lifespan. Taking adjusted parameters (including armature's maximum angular displacement, initial return spring's force, normally closed contacts' force, contacts' gap and normally open contacts' over travel) as factors and breaking velocities as targets, this paper does the orthogonal experimental design of five factors and four levels, analyzes and investigates the key adjusted parameters influencing breaking velocities. The research results indicate that α_{arm_max}, δ_{gap} and $\delta_{NO_contacts}$ are the key factors affecting breaking velocity of NC contacts, $\delta_{NO_contacts}$ is the key factor affecting breaking velocity of NO contacts. Then, based on the above work, optimum method of adjusted parameters is presented.

Keywords：Orthogonal experimental design, electromagnetic relay, reaction force characteristics, breaking velocity, key adjusted parameters

1 引言

电磁继电器吸、反力特性配合技术是关系其性能和可靠性的关键技术。在继电器调试阶段，其电

民用航天科研预先研究项目（ B1220062302）。
收稿日期 2008-01-22 改稿日期 2008-10-03

磁系统及接触系统中簧片形状已经确定，因此吸、反力特性中的吸力特性基本确定，反力特性的改变主要通过调试调整参数实现。

调整参数是指在完成继电器部分组件（如接触系统组件、继电器整机的内部组件）装配后按照技术要求进行调试的参数，其包括衔铁行程、返簧预压力矩、静合压力、触点间隙和动合超程。继电器在调试过程中，调整参数的调试控制对反力特性有很大影响，图 1 为调整参数调试前后的反力曲线、图中$\Delta\delta$、ΔF_1、ΔF_2、$\Delta\delta_3$、$\Delta\delta_4$分别为衔铁行程、返簧预压力、静合压力、触点间隙及动合超程增量。

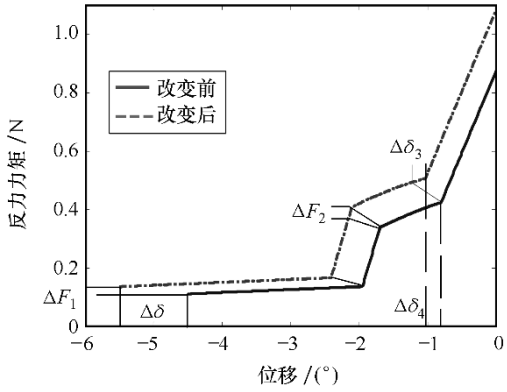


图 1 调整参数调试前后的反力曲线

Fig.1 Curves of reaction before and after adjusted parameters changed

反力曲线的改变导致吸、反力特性配合的变化，最终影响电磁继电器的动态特性。而继电器动作过程中，其触点分断速度是影响电弧烧蚀、触点电寿命的重要因素[1-2]。因此，在调试阶段，要保证触点分断速度的一致性，首先必须确定影响分断速度的重要调整参数，即关键调整参数，然后对其加以严格的工艺控制。

正交试验设计法是实现多参数分析设计的重要手段之一，被广泛应用于电气、机械、医药等领域[3-6]。在继电器设计、优化领域，文献 [3]采用六因素三水平多目标的正交设计，分析并研究了极化磁系统的参数优化设计方法。文献 [4]应用该方法对极化继电器磁钢进行了优化设计。以上研究（文献[3-4]）仅限于对继电器的具体零件参数进行正交试验设计，考察零件尺寸参数变化对继电器吸力等的影响。本文针对电磁继电器调整参数，以动态过程中的触点分断速度为指标进行正交试验设计，确定影响分断速度的关键参数，并在此基础上提出确定最佳调试参数的方法，为生产工艺过程控制提供理论依据。

2 电磁继电器动态数学模型

2.1 研究对象

图 2 和图 3 为某型号电磁继电器的部分结构。在继电器调试过程中，衔铁行程由限位挡控制，返簧预压力矩通过调节推动器实现，静合静簧与动簧的静合压力和触点间隙由三类簧片的安装位置、角度确定，动合超程由推动器端部的玻璃球位置决定。

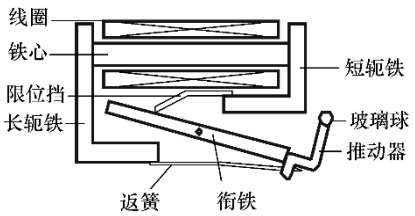


图 2 继电器内部部分结构

Fig.2 Sketch plan of relay's partial inner structure

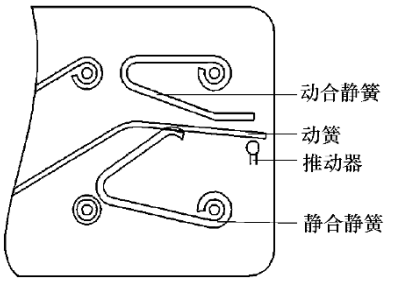


图 3 触簧系统部分结构示意图

Fig.3 Sketch plan of partial structure of reeds' system

2.2 动态数学模型

触点分断速度通过求解动态方程组得到。式（1）为描述电磁继电器吸合过程的状态方程组。

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}t}=U-Ri(\psi,\alpha)\\ \dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\dfrac{M_x(\psi,\alpha)-M_f(\alpha)}{J}\\ \dfrac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{d}t}=v\\ \psi\big|_{t=0}=\psi_0=0,\ v\big|_{t=0}=v_0=0,\ \alpha\big|_{t=0}=\alpha_0\end{cases}\tag{1}$$

式中 t——时间；

ψ,U,R,i——线圈磁链、电压、电阻和电流；

α,v——衔铁角位移、角速度；

M_x,M_f,J——衔铁受到的吸力矩、反力矩和衔铁系统的转动惯量；

ψ_0——吸合过程初始时刻的线圈磁链；

α_0,v_0——初始时刻的衔铁角位移和角速度。

释放过程中衔铁由吸合位置释放时，线圈回路

的电流过渡时间相对于衔铁转动时间可以忽略不计，衔铁仅在反力作用下回到释放位置。该过程的状态方程组为

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=-\dfrac{M_f(\alpha)}{J}\\ \dfrac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{d}t}=v\\ v\big|_{t=0}=v_1=0,\alpha\big|_{t=0}=\alpha_1\end{cases}\tag{2}$$

式中　v_1, α_1——释放位置初始时刻的衔铁角速度，角位移。

本文通过有限元法求得不同电流、不同衔铁转角下的电磁吸力力矩和线圈磁链后，应用四阶 Runge-Kutta 方法求解式（1）和式（2），分别得到静合触点和动合触点的分断速度，具体求解过程参见文献[7]。

3　基于正交试验设计的关键调整参数确定

本节应用正交试验方法制定调整参数的水平表及误差范围水平表，进行内、外设计，后通过信噪比（Signal Noise Ratio，SNR）计算及方差分析，找出影响静合、动合触点分断速度的关键调整参数。

3.1　可控因素水平表

正交试验设计中，以衔铁行程、返簧预压力矩、静合压力、触点间隙和动合超程五个调整参数为可控因素，分别以 *A*、*B*、*C*、*D*、*E* 表示，以静合和动合触点分断速度为指标，为控制试验次数每个因素选用 4 个水平，可控因素水平见表 1。

表 1　调整参数可控因素水平

Tab.1　Controllable factor level of adjusted parameters

水平	*A* /（°）	*B*/（×10⁻³N・m）	*C*/N	*D*/mm	*E*/mm
1	5.5	0.08	0.08	0.16	0.05
2	5.0	0.10	0.10	0.18	0.07
3	4.5	0.12	0.12	0.20	0.09
4	4.0	0.14	0.14	0.22	0.11

3.2　内设计

对可控因素水平表设计试验方案，称为内设计，相应的正交表称为内表。本试验为 5 因素（5 个调整参数）4 水平试验，因此选用 $L_{16}(4^5)$ 作为内表，共做 16 次试验，试验方案见表 2。根据正交表中每一试验的各因素水平，通过求解电磁继电器的动态特性方程（式（1）和式（2）），得到在该水平组合下的静合触点分断速度 v_{NC}、动合触点分断速度 v_{NO}。表中，η_{NC}、η_{NO} 分别为静合、动合触点分断速度信噪比，其计算方法在本文的 3.5 节给出。

3.3　制定误差因素水平

误差因素是根据内外噪声及可控因素受加工工艺分散性限制而设定的干扰因素。由于继电器调整参数数值在手工调试中存在一定的误差，因此本文根据现有产品手工调试中要求达到的参数值波动范围，确定所研究的各因素误差水平大小。参数调试过程中，衔铁行程的误差范围为 ±0.25°，返簧预压力矩的误差范围为 ±0.15×10⁻³N・m，静合压力的误差范围为 ±0.01N，触点间隙的误差范围为 ±0.01mm，动合超程的误差范围为 ±0.02mm。各误差因素均取 3 水平，分别对应于调整参数的中心值和误差范围上、下限对应的参数值。

表 2　调整参数试验方案

Tab.2　Experimental scheme of adjusted parameters

试验号	*A*	*B*	*C*	*D*	*E*	v_{NC}/（°/s）	v_{NO}/（°/s）	η_{NC}	η_{NO}
1	1	1	1	1	1	7515.3	−3772.9	77.442	69.483
2	1	2	2	2	2	6603.3	−5380	76.297	73.98
3	1	3	3	3	3	5641.4	−6989.8	74.903	76.529
4	1	4	4	4	4	4620.5	−8502.1	73.096	78.385
5	2	1	2	3	4	4507.6	−7744.1	72.861	77.605
6	2	2	1	4	3	4650.9	−6449.1	73.168	75.791
7	2	3	4	1	2	6325.1	−5787.2	75.923	74.597
8	2	4	3	2	1	6512.6	−4253.2	76.159	70.594
9	3	1	3	4	2	4212.6	−5363.1	72.141	73.977
10	3	2	4	3	1	5188.9	−4156.9	74.1	70.515
11	3	3	1	2	4	4210.1	−7771.1	72.181	77.626
12	3	4	2	1	3	5168.1	−6901.2	74.084	76.386
13	4	1	4	2	3	3503.6	−6869.8	70.083	76.45
14	4	2	3	1	4	3566 4	−8038.9	70.326	77.922
15	4	3	2	4	1	3974.1	−3972	71.514	69.995
16	4	4	1	3	2	3956.8	−5352.6	71.474	73.865

3.4　外设计

对误差因素水平表设计试验方案，称为外设计，相应的正交表称为外表。外设计的目的就是考察调整参数在其误差范围内变化时，对静合、动合触点分断速度即目标函数的影响。根据误差因素（ 5 因

素）和水平（3 水平）个数，选用 L_{18}（3^7）作为外表进行外设计。对应于内表中的每一试验方案都有一张相应的误差因素水平表和外表，因此共有 16 张误差因素水平表和 16 张外表。

3.5 SNR 计算

为确定调整参数即可控因素在一定误差范围内波动对目标函数的影响程度，需进行 SNR 的计算。本设计的目标特性（静合、动合触点的分断速度）都为望大特性，即希望指标越大越好的特性。望大特性的 SNR 计算公式为

$$\eta = -10\lg\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{v_i^2}\right] \qquad (3)$$

n=18 为外表试验次数，v_i 为分断速度。对每张外表按公式（3）分别求出静合、动合触点分断速度的信噪比 η_{NC} 和 η_{NO}（见表 2）。

3.6 内表统计分析

内表统计分析要求对静合、动合触点的分断速度分别计算其总波动平方和 S_T，自由度 f_T，各可控因素波动平方和 S_j 及其自由度 f_j，误差引起的波动平方和 S_e 及其自由度 f_e。各计算公式如下

$$S_T = \sum_{i=1}^{n'}\eta_i^2 - C_T, C_T = \frac{T^2}{n'}, f_T = n' - 1, T = \sum_{i=1}^{n'}\eta_i ;$$

$$S_j = \frac{1}{3}(T_1^2 + T_2^2 + T_3^2) - C_T, f_j = r - 1$$

$$S_e = S_T - \sum_{j=1}^{m} S_j, f_e = n' - \sum_{j=1}^{m} f_j$$

式中，n'=16 为内表试验次数，r 为各可控因素水平数；T_1、T_2、T_3 为每一列可控因素各水平下信噪比的部分和；m 为可控因素个数。

表 3 和表 4 中 e' 表示误差因素；方差分析中，将带有记号“Δ”的加以合并，作为误差平方和 S_e 及误差自由度 f_e。因此 S_e=Σ 不显著因素波动平方和，f_e=Σ 不显著因素自由度。进行显著性检验时，倘若 G 值较大，则认为对应因素影响相对于试验误差的影响来说是显著的，否则认为不显著。显著性水平 α 通常取 0.05 或 0.01，并规定当 $G > G_{f_2}^{f_1}(0.01)$ 时，该因素高度显著，记为（**）；当 $G_{f_2}^{f_1}(0.01) \geqslant G > G_{f_2}^{f_1}(0.05)$ 时，该因素显著，记为（*）；当 $G \leqslant G_{f_2}^{f_1}(0.05)$ 时，该因素不显著。

表 3 v_{NC} 方差分析（$G_6^3(0.05)=4.76, G_6^3(0.01)=9.78$）

Tab.3 Variance analysis table of v_{NC}

方差来源	波动平方和 S	自由度 f	方差（$V=S/f$）	方差比（$G=V/V_e$）
A	47.854	3	15.9513	83.5147（**）
B	0.77466	3Δ	0.2582	1.3518
C	0.37126	3Δ	0.1238	0.6482
D	7.9616	3	2.6539	13.8948（**）
E	16.075	3	5.3583	28.0539（**）
e'	0.77466+0.37126	3+3	0.1910	1.0000
T	73.0368	15		

表 4 v_{NO} 方差分析（$G_{12}^3(0.05)=3.49, G_{12}^3(0.01)=5.95$）

Tab.4 Variance analysis table of v_{NO}

方差来源	波动平方和 S	自由度 f	方差 $V=S/f$	方差比 $G=V/V_e$
A	0.018 009	3Δ	0.0060	0.0385
B	0.406 72	3Δ	0.1356	0.8709
C	1.4098	3Δ	0.4699	3.0180
D	0.034 161	3Δ	0.0114	0.0732
E	134.87	3	44.9567	288.7392（**）
e'	0.0180+0.0341+0.4067+1.4098	3+3+3+3	0.1557	1.0000
T	136.7375	15		

由表 3 可以看出衔铁行程、触点间隙和动合超程对静合触点分断速度影响高度显著，由方差比的数值大小可得其影响静合触点分断速度程度由大到小依次为 A、E、D。由表 4 可知动合超程对动合触点分断速度影响高度显著。因此，衔铁行程、触点间隙和动合超程为决定静合触点分断速度的关键调整参数，动合超程为动合触点的关键调整参数。在调试工艺过程中，为保证静合触点分断速度 v_{NC} 的一致性，应尽量缩小衔铁行程、触点间隙和动合超程的误差范围，尤其要严格控制衔铁行程大小。同时，为保证动合触点分断速度 v_{NO} 的一致性，应缩小动合超程的误差范围。对分断速度影响较小的非关键因素（返簧预压力矩、静合压力）的误差范围则可适当放宽，这样既可降低继电器的调试难度，同时又对分断速度无大的影响。

4 最佳调整参数的确定

由于衔铁行程、触点间隙和动合超程为影响静

合和动合触点分断速度的关键参数，其参数值的大小对分断速度具有很大影响，其他调整参数（返簧预压力矩和静合压力）为影响分断速度的次要因素，因此在确定最佳调整参数时，仅需对关键调整参数进行设计。本文通过对关键参数再次进行正交设计并比较各水平下目标函数即分断速度的方法以确定最佳调整参数。选用 L_{25}（5^6）作为内表，对 3 个关键因素进行 5 水平正交试验设计。关键因素的水平表和试验内表分别见表 5 和表 6，次要因素中的返簧预压力矩取 0.10×10^{-3}N·m，静合压力取 0.12N。

表 7 给出了各关键影响因素在各水平下的目标函数平均值（由表 6 数据计算）。按选取目标函数最大的平均值对应的关键因素水平值作为该因素最佳参数值的原则，目标函数为静合触点分断速度时，因素 A 应取 1 水平，因素 D 取 1 水平，因素 E 取 1 水平，目标函数为动合触点分断速度时，因素 E 应取 5 水平。由上文分析知，因素 E 为影响静合触点分断速度的第二关键因素，而为影响动合触点分断速度的唯一关键因素。综合考虑静合、动合触点分断速度两个目标函数（即在尽量增大静合和动合触点分断速度，但同时保证两触点分断速度值相差不大），因素 E 应取 3 水平。综上，最佳调整参数为：衔铁行程 A=6.0°，触点间隙 $D=0.16\times10^{-3}$m，动合超程 $E=0.09\times10^{-3}$m。在该调整参数值下的静合触点分断速度为 7040.7°/s，动合触点分断速度为 –6913.5°/s，动态吸、反力力矩配合曲线如图 4 所示，图 5 和图 6 分别为吸合和释放过程的分断速度曲线。

表 5　关键调整参数水平

Tab.5　Controllable factor level of key adjusted parameters

水平	A/（°）	D/mm	E /mm
1	6.0	0.16	0.05
2	5.5	0.18	0.07
3	5.0	0.20	0.09
4	4.5	0.22	0.11
5	4.0	0.24	0.13

表 6　关键调整参数试验方案

Tab.6　Experimental scheme of key adjusted parameters

试验号	A	D	E	v_{NC}/（°/s）	v_{NO} /（°/s）
1	1	1	1	8023.2	–4161.8
2	1	2	2	7092.9	–5568.4
3	1	3	3	6215.7	–6858.0
4	1	4	4	5370	–8134.6
5	1	5	5	4549.8	–9275.7
6	2	1	2	6993.8	–5521.9
7	2	2	3	6049.5	–6843.7
8	2	3	4	5164.2	–8151.1
9	2	4	5	4297.3	–9322.2
10	2	5	1	5801.6	–4089.5
11	3	1	3	5834.4	–6904.3
12	3	2	4	4882	–8135.9
13	3	3	5	3938.6	–9338.5
14	3	4	1	5570	–4032.2
15	3	5	2	4618.6	–5493.5
16	4	1	4	4529	–8089.2
17	4	2	5	3492.7	–9323.5
18	4	3	1	5266	–4046.1
19	4	4	2	4241.4	–5441.7
20	4	5	3	3194.2	–6774.9
21	5	1	5	2920.7	–9275
22	5	2	1	4875.5	–4033.3
23	5	3	2	3766.5	–5456.8
24	5	4	3	2576.3	–6821.4
25	5	5	4	953.72	–7959.8

表 7　试验结果分析

Tab.7　Analysis of experimental results

因素	水平	v_{NC}/（°/s）	v_{NO} /（°/s）
A	1	6250.3	—
	2	5661.3	
	3	4968.7	
	4	4144.7	
	5	3018.5	
D	1	5660.2	—
	2	5278.5	
	3	4870.2	
	4	4411.0	
	5	3823.6	
E	1	5907.3	–4072.6
	2	5342.6	–5496.5
	3	4774.0	–6840.5
	4	4179.8	–8094.1
	5	3839.8	–9307.0

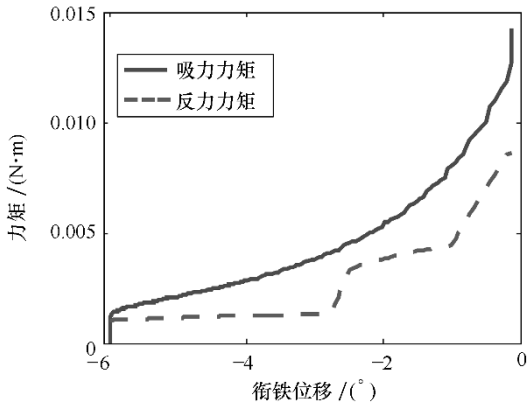


图 4　动态吸、反力力矩配合曲线

Fig.4　Dynamic curves of attractive and reaction torques

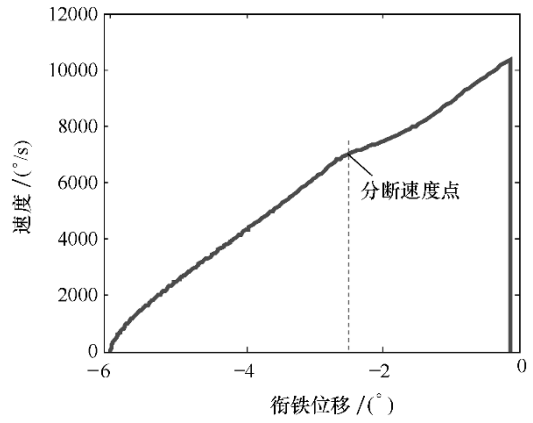


图 5 吸合过程分断速度曲线

Fig.5 Velocity curve of armature's pick-up process

当然，由于正交设计的水平个数有限，调整参数只能取相应水平下的参数值而不可能涵盖其所有可能取值，因此本文得到的最佳调整参数值为已取水平下的最佳参数值。但在已求得的最佳参数值的较小邻域内反复使用上文提到的优化方法，可以逐渐逼近最佳调整参数值。

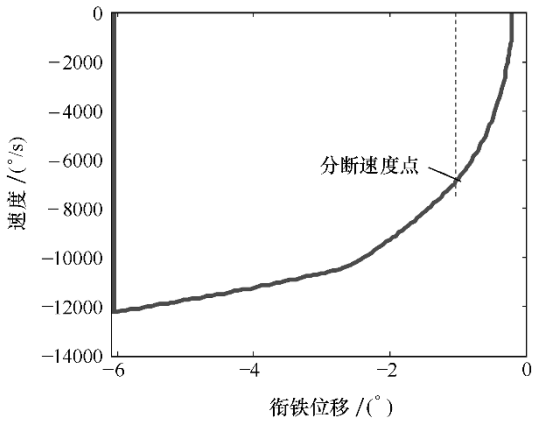


图 6 释放过程分断速度曲线

Fig.6 Velocity curve of armature's drop-out process

5 结论

（1）通过正交试验设计找出了影响电磁继电器触点分断速度的关键调整参数，其中，衔铁行程、触点间隙和动合超程为影响静合触点分断速度的关键参数，动合超程为影响动合触点分断速度的关键参数。

（2）在确定出关键调整参数的基础上，提出调整参数的优化方法，并给出最佳调整参数。

（3）关键调整参数的确定及提出的优化方法为生产工艺控制提供理论依据，对保证产品质量具有重要意义。

参考文献

[1] Jemma N B. Break arc duration and contact erosion in automotive application[J]. IEEE Trans. on C.P.M.T. 1996, 19(1): 82-86.

[2] 王其平. 电器电弧理论 [M]. 北京：机械工业出版社 , 1991.

[3] 翟国富, 梁慧敏, 等. 基于正交试验设计的极化磁系统参数优化设计方法的研究 [J]. 中国电机工程学报 , 2003, 23(10): 158-163.
Zhai Guofu, Liang Huimin, et al. Research on the parameters optimum design of polarized magnetic system based on orthogonal design[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 158-163.

[4] 毕成. 正交试验自动设计的实现及其在继电器优化设计上的应用 [J]. 机电元件, 2002, 22 (1): 6-9.
Bi Cheng. Orthogonal test automatic design and its application to optimum design of relay[J]. Electromechanical Components, 2002, 22 (1): 6-9.

[5] Wu Yingxin, Lin Xiangning, Miao Shihong, et al. Application of family eugenics based evolution algorithms to electric power system fault section estimation[C]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific Dalian, China, 2005: 1-5.

[6] Scibilia B, Kobi A, Chassagnon R, et al. Designed fatigue experiment to improve the reliability of liquid crystal displays[C]. Proceedings Annual Reliability And Mainaniability Symposium, 2000: 234-238.

[7] 王其亚. 航天电磁继电器三维实体模型开发及其动态特性研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学 , 2006.

[8] 韩之俊, 章渭基. 质量工程学 ——线外、线内质量管理[M]. 北京: 科学出版社 , 1991.

[9] 杨茜, 荣命哲, 吴翊, 等. 低压断路器中空气电弧重击穿现象的仿真与实验研究 [J]. 中国电机工程学报 , 2007, 27(6): 84-88.
Yang Qian, Rong Mingzhe, Wu Yi, et al. Simulation and experimental research on air arc restriking in low-voltage circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(6): 84-88

[10] 杨茜, 荣命哲, 吴翊.低压断路器中空气电弧运动的仿真及实验研究 [J]. 中国电机工程学报 , 2006, 26 (15), 89-94.
Yang Qian, Rong Mingzhe, Wu Yi. Simulation and

experimental research on air arc motion in low-voltage circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(15): 89-94.

作者简介:王其亚　男, 1982 年生, 博士研究生, 主要研究方向为航天电磁继电器综合优化设计技术。 翟国富　男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为航天电磁继电器可靠性与测试技术。