

电磁继电器触簧系统触头 弹跳的多因素分析

熊 军, 何俊佳, 臧春艳
(华中科技大学, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 基于正交实验,对影响电磁继电器触头弹跳的因素进行了方差分析。设计了可模拟直接驱动型簧片系统的试验装置,研究了触头的最大弹跳位移、最大弹跳时间、最大动态接触力及返回系数与簧片长度、厚度、形状尺寸及表面状况的关系。实验结论可作为改善继电器机械结构,提高工作寿命的依据。

关键词: 电磁继电器; 触头弹跳; 正交实验; 方差分析

中图分类号: TM 581 文献标识码: B 文章编号: 1001-5531(2009)01-0007-04



熊 军 (1979—),男,博士研究生,研究方向为低压电器的动态特性与电接触弹跳理论。

Multifactor Analysis on Contact Bounce in Reed Systems of Electromagnetic Relay

XIONG Jun, HE Junjia, ZANG Chunyan

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Based on orthogonal experiments, the variance of factors which influence the contact bounce of electromagnetic relays was analyzed. The test device that can simulate the direct-drive type reed system was designed. The relationship between the maximum bounce displacement, time, the maximum dynamic contact force, restitution coefficient of the contact and the length, thickness, shape, size and surface condition of reed was studied. The experiment results can be reference for improving mechanical structure and working endurance of relays.

Key words: electromagnetic relay; contact bounce; orthogonal experiments; analysis of variance

0 引 言

当电磁继电器等开关电器执行闭合操作时,通常会发生触头弹跳现象。在有负载的情况下会引起触头间的电气磨损和材料侵蚀,严重时甚至会发生“热熔焊”,这将大大降低继电器工作可靠性,影响其工作寿命。对于接触弹跳现象的影响因素,国内外学者进行了大量的研究。MCBRED主要对手动摇臂开关研究其动态性能^[1],认为增大静态接触力、降低初始速度或减少转动惯量均能减少弹跳,且后者的效果更明显,但其假定在接触支撑和接触臂上无弹性振动,未考虑簧片柔性的影响。MIEDZINSKI主要从外施的磁动势、负载及温度等外在条件研究簧片开关的弹跳^[2],

认为弹跳的变化与表面硬化和接触形貌有关。国内的学者主要从操作机构动态特性方面研究真空断路器的合闸弹跳的影响因素^[3],也有利用动态仿真分析软件对其动态过程进行优化设计,但成果大多集中在断路器、接触器等这一类刚性机械结构上^[4,5]。文献[6]则针对航天继电器触簧系统的接触特性进行了仿真分析,但未对影响其弹跳的各种因素做进一步分析。

针对电磁继电器机械系统的动作过程具有刚柔结合的特点,且多种影响因素相互作用,本文基于正交实验的分析方法,对影响继电器触头弹跳的各种因素进行评估,其结论对具有柔性结构的开关电器的动态过程有一定的参考价值。

何俊佳 (1968—),男,教授,博士生导师,博士,研究方向为电力系统、电机电器及控制、高电压与绝缘技术。

臧春艳 (1978—),女,讲师,博士,研究方向为电弧电接触、在线监测、数字图象处理。

1 实验方案

目前,航天等领域继电器电磁系统的衔铁多采用跷跷板式结构,故现今的簧片系统结构主要与该结构相匹配。老式的拍合式继电器的簧片系统结构现在已很少采用。按照簧片驱动方式,其簧片系统可分为推杆驱动式和直接驱动式两种基本类型,如图 1 所示。前者多用在小功率和中功率继电器中,具有结构简单、产品容易调整等优点,缺点是由于推动杆绝缘玻璃球对簧片的滑移而导致磨损,若设计不当会影响产品吸合参数的稳定性、产生失效并造成机械寿命下降。后者用衔铁直接驱动簧片,克服了前者的缺点,但结构较前者略复杂,调整较难,衔铁转动惯量增加,影响其动态特性。

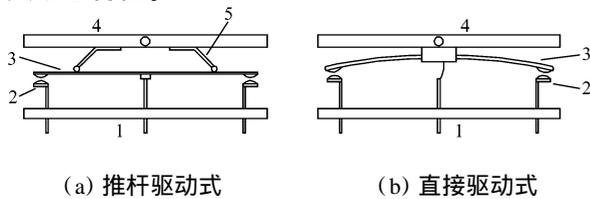


图 1 簧片驱动方式示意图

1—底板 2—静接点 3—动簧片 4—衔铁 5—推动杆

本文主要针对大功率继电器中广泛采用的直接驱动式簧片结构进行分析。对于直接驱动式簧片系统,其影响弹跳的因素有很多,包括簧片材料、动、静簧片形式(固定刚性接触、柔性接触)、触头材料及结构、驱动力形式及负载情况等。考虑实验条件,为揭示簧片的形状对其弹跳的影响,假定其驱动力为一定值。选取表 1 中的 A、B、C 三个因子对其进行正交实验设计,各因子取 3 水平,用抽签法确定各水平,采用正交表 $L_9(3^4)$,总共需进行 9 次实验。

表 1 正交实验设计 /mm

因子	水平		
	1	2	3
A:簧片长度	20	40	60
B:簧片宽度	8	6	4
C:簧片厚度	0.4	0.8	0.5

实际的直流继电器因其尺寸较小,且多为密封结构,其触簧系统的运动过程不易测量,故设计了如图 2 所示的实验装置,模拟直接驱动型簧片

系统。压缩弹簧(4)推动转动臂(3)使触头闭合,电磁线圈(1)吸合极靴(2)使触头分开,其中触头的初始间隙保证相同 $Z_0 = 2 \text{ mm}$,分别通过激光位移测量装置(9)和动态力测量装置(13、14)测量触头的位移和动态接触力。触头位移测量采用 Keyence 公司的 LK-G150 型激光位移传感器,利用激光三角原理和 CCD 光电传感器进行非接触式测量,其解析度可达 $0.5 \mu\text{m}$,测量范围可达 $150 \pm 40 \text{ mm}$,速度可达 50 kHz 。触头的动态接触力采用压电式石英力传感器进行测量,其灵敏度为 3.68 pC/N ,经电荷放大器转换后输出为 1 V/N ,下限频率为 0.1 Hz ,上限频率为 30 kHz 。利用示波器测量触头的电压和电流,6 和 12 两块绝缘垫片保证测试回路与动作部分隔离。为避免电弧的影响,测试回路的电源电压为 $\text{DC } 6 \text{ V}$,电流为 3 mA ,保证即使有电弧产生也不会对触头的运动过程带来大的影响。簧片材料为镀青铜,触头材料为银氧化铬。

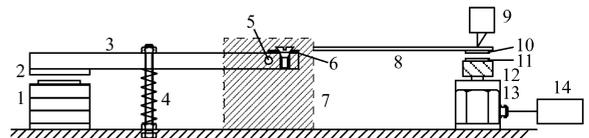


图 2 实验装置示意图

1—电磁线圈 2—极靴 3—转动臂 4—弹簧推力装置
5—支点 6—绝缘垫圈 7—支承座 8—簧片 9—激光位移测量仪 10—动触头 11—静触头 12—绝缘垫块
13—压电式力传感器 14—电荷放大器

对其进行正交实验,其各因子的重要性大小可通过各列离差平方和 S_j 的比较给出定性的判断,但其定量的统计推断必须通过 S_j 的方差分析给出。

$$S_j = \frac{r}{n} \sum_{i=1}^r M_{ij}^2 - \frac{1}{n} T^2 =$$

$$\frac{1}{3} (M_{1j}^2 + M_{2j}^2 + M_{3j}^2) - \frac{1}{9} T^2 \quad (1)$$

其中, r 为水平数; n 为实验数; M_{ij} 代表第 j 列中相应于表中水平号为 i 的各实验结果的总和; T 表示所有实验结果的总和; S_j 的自由度 $f_j = r - 1$; 各列均方差 $\bar{S}_j = S_j / f_j$; 若 $\bar{S}_j < \bar{S}_{\text{误}}$, 将其并入误差项,即此时对因子的 F 检验为:

$$F_{\text{因}} = \frac{S_{\text{因}} / f_{\text{因}}}{S_{\text{误D}} / f_{\text{误D}}} \cdot F(f_{\text{因}}, f_{\text{误D}}) \quad (2)$$

对于显著性的因子,进行各水平效应比较,此时第 j 列因子第 i 水平的效应为

$$a_{ij} = \frac{1}{n} (M_{ij} - T) \quad (3)$$

2 实验结果与分析

图 3 为模拟装置的典型实验波形,其中 CH1 为位移信号(灵敏度为 2 V/mm),CH2 为电压信号,CH3 为电流信号(取样电阻为 237 Ω),CH4 为力信号(灵敏度为 3.68 pC/N,经电荷放大器转换后输出 1 V/N)。

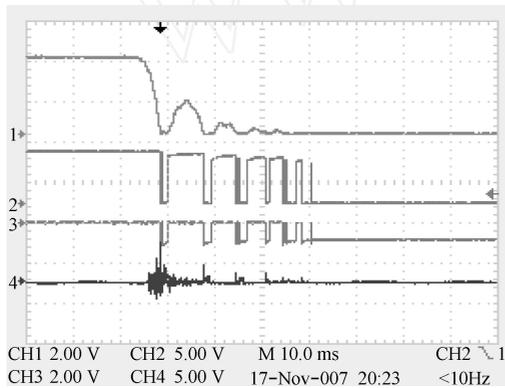


图 3 实验波形图

实验数据如下表 2 所示。

表 2 正交实验结果

A	B	C	空	Z_{max}	t_{max}	F_{max}	e_z	e_t
1	2	3	4	/mm	/ms	/N		
1	1	1	1	0.358	1.2	5.8	0.52	0.74
1	2	2	2	0.234	3	7.6	0.46	0.47
1	3	3	3	0.264	0	5.5	0.13	0.44
2	1	2	3	0.275	1	13.4	0.21	0.34
2	2	3	1	0.386	3	6.9	0.72	0.72
2	3	1	2	0.816	5	5.9	0.42	0.79
3	1	3	2	0.782	8	5.9	0.32	0.74
3	2	1	3	0.932	7	3.1	0.27	0.68
3	3	2	1	0.861	6	10.8	0.26	0.70

对影响最大弹跳高度 Z_{max} 的各因子进行方差分析如表 3 所示,其中第 4 个因子为误差项。

此时, $F_{0.90}(2, 2) = 9.00$, $F_{0.95}(2, 2) = 19.00$,

表 3 Z_{max} 的方差分析

方差来源	平方和	S 自由度	f	均方 \bar{s}	F 值	显著性
A	0.506 2	2	0.253 1	22.60	*	
B	0.049 6	2	0.024 8	2.21		
C	0.111 2	2	0.055 6	4.96		
误	0.022 3	2	0.011 2			

$F_{0.99}(2, 2) = 91.01$, 故 A 因子作用显著, B、C 因子无显著作用。各因子对 Z_{max} 的影响程度为 $A > C > B$ 。

对于 A 因子,其效应 $\mu_1 = -0.260$, $\mu_2 = -0.053$, $\mu_3 = 0.313$, 则 $\mu_3 > \mu_2 > \mu_1$, 故簧片长度对 Z_{max} 影响显著,且簧片越长, Z_{max} 越大。这是因为在其他条件不变的情况下,簧片越长,其等效刚度系数越大,故其所储存的弹性势能越多,则碰撞后由其释放的动能就越多,故 Z_{max} 越大。

对影响最大弹跳时间 t_{max} 的各因子进行方差分析如表 4 所示。

表 4 t_{max} 的方差分析

方差来源	平方和	S 自由度	f	均方 \bar{s}	F 值	显著性
A	38.485	2	19.242	11.20	*	
B	2.691 3	2	1.345 6			
C	11.979	2	5.989 4	3.49		
误	4.179 8	2	2.089 9			
误	6.871 1	4	1.717 8			

此时, $F_{0.90}(2, 4) = 4.32$, $F_{0.95}(2, 4) = 6.94$, $F_{0.99}(2, 4) = 18.0$, 故 A 因子作用显著, C 因子无显著作用。各因子对 t_{max} 的影响程度为 $A > C > B$ 。

对于 A 因子,其效应 $\mu_1 = -2.44$, $\mu_2 = -0.17$, $\mu_3 = 2.61$, 则 $\mu_3 > \mu_2 > \mu_1$ 。故簧片长度对 t_{max} 影响显著,且簧片越长, t_{max} 越大。原因同上分析。

对影响最大动态接触力 F_{max} 的各因子进行方差分析如表 5 所示。

同前分析,此时 C 因子有一定影响, A、B 因子无显著作用。各因子对 F_{max} 的影响程度为 $C > A > B$ 。

对于 C 因子,其效应 $\mu_1 = -2.28$, $\mu_2 = 3.39$,

表 5 F_{max} 的方差分析

方差来源	平方和 S	自由度 f	均方 \bar{S}	F 值	显著性
A	10.562	2	5.281 1	3.68	
B	9.535 6	2	4.767 8	3.32	
C	53.722	2	26.861	18.72	(*)
误差	2.868 9	2	1.434 4		

$s_3 = -1.11$, 则 $s_2 > s_3 > s_1$ 。故簧片的厚度对 F_{max} 有一定影响, 且随着厚度的增加, F_{max} 有增大的趋势。这主要是因为在其他条件不变的情况下, 簧片越厚, 其转动惯量越大, 则等效刚度越大, 故碰撞时对触头的冲击越大, 其 F_{max} 也越大。

对于返回系数分别从弹跳高度的比值 e_z 和弹跳时间的比值 e_t 来定义, 由实验结果可得其各因子的离差平方和如表 6 所示。

表 6 返回系数的各因子离差平方和

返回系数	S_A	S_B	S_C	$S_{误差}$
e_z	0.041 7	0.069 7	0.015 3	0.136 7
e_t	0.037 1	0.002 0	0.082 0	0.089 7

因 S_A 、 S_B 和 S_C 均小于 $S_{误差}$, 故 A、B、C 因子都不重要。故返回系数与簧片的形状尺寸关系不大, 主要是受触头表面状况的影响。

3 结 语

(1) 电磁继电器的触头弹跳受多种因素的影响, 本文使用激光位移传感器和石英力传感器测量其触头的弹跳特征参数, 其精度和速度能满足

实际需要;

(2) 实验结果表明: 最大的弹跳位移和最大的弹跳时间主要受簧片长度的影响; 最大的动态接触力与簧片的厚度有一定的关系; 返回系数与簧片的形状尺寸关系不大, 主要是受触头表面状况的影响;

(3) 本文通过正交实验分析得出的结论对具有柔性结构的开关电器的动态闭合过程有一定的参考价值, 可作为从改善其机械结构等方面提高其工作寿命的实验依据。

【参考文献】

- [1] MCBR DE J W, SHARKH S M. Electrical Contact Phenomena During Impact [J]. IEEE Trans CHMT, 1992, 15 (2): 184-192
- [2] MIEDZNSKIB, KARISTANSEN M. Analytical and Experimental Investigations of Reed Contact Bouncing [J]. IEEE Trans CHMT, 1988, 11 (2): 200-210
- [3] 王蒲全. 真空断路器合闸时触头弹跳时间影响因素的分析 [J]. 高压电器, 1990 (1): 42-44
- [4] 张迎春, 张际先, 刘文华, 等. 基于 ADAMS 的低压断路器弹跳仿真研究 [J]. 农机化研究, 2004 (9): 110-112
- [5] 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
- [6] 樊薇薇, 任万滨, 翟国富. 电磁继电器触簧系统动态接触特性的研究 [J]. 机电元件, 2003, 23 (4): 3-9

收稿日期: 2008-04-29

(上接第 6 页)

统集成总体解决方案指南。

6 结 语

正确制订低压电器系统集成总体解决方案, 既是低压电力系统安全可靠运行的需要, 又是提高电器制造商市场竞争能力的需要。我国低压电器行业对这一问题关注刚刚开始, 希望通过本文探讨, 引起同行重视, 并迅速提高低压电器系统集

成的能力。

【参考文献】

- [1] 何瑞华, 尹天文. 我国低压电器行业现状与发展趋向 [J]. 低压电器, 2004 (1): 3-7
- [2] 何瑞华. 我国低压电器新产品主要特征、发展思路及关键技术 [J]. 电力设备, 2008 (2): 3-7

收稿日期: 2008-09-26