

动态接触电阻测量及触点失效预测研究

陈 鹏, 陆俭国, 姚 芳, 李 新

(河北工业大学, 天津 300130)

摘要: 用动态接触电阻测量系统进行了电磁继电器失效检测试验, 监测了其触点闭合过程的接触压降。试验发现闭合过程的触点接触压降为随时间复杂变化的衰减波形, 经历了由动态的弹跳、微振动再到静态的过程。数据分析表明, 继电器接触失效与闭合过程的弹跳时间及接触电阻峰值有一定关系, 可综合考虑弹跳时间-操作次数曲线及接触电阻峰值-操作次数曲线的变化规律对继电器触点进行失效预测。

关键词: 电磁继电器; 触点; 失效预测

中图分类号: TM 501+.3

文献标识码: A

文章编号: 1003-3076(2005)03-0027-04

1 引言

触点是有触点电器的关键部件, 触点性能的好坏直接关系到有触点电器的工作性能和动作可靠性。现代化大型电力系统、自动控制系统、遥控遥测系统、通信系统等电气系统中触点电接触无处不在, 触点数目常常数以万计, 若其中一个或几个触点工作失效, 会导致整个系统工作瘫痪。对于航天、钻井、电力系统等一些关键场合中的开关电器, 对触点的要求更高, 不仅要求它们的总体可靠性高(较低的失效率), 而且要求关键时刻触点不能接触失效。因此触点失效预测的研究对提高有触点电器的可靠性乃至工业生产具有重要意义。预测在许多领域都有广泛的应用和研究, 有的领域已经达到实用的研究水平(如: 天气预报等), 有些领域还有待进一步的研究(如: 地震预测等)。因此对触点失效预测已成为可能。要实现有效预测, 首先必须掌握触点失效前其特征量的变化规律。

本文用动态接触电阻测量系统^[1]对继电器触点进行了可靠性试验, 试验监测了触点闭合过程的接触压降。大量试验数据及其分析结果表明: 继电器触点失效与其闭合过程的相关参数有一定关系, 为进一步实现接触失效预测奠定了基础。

2 继电器失效检测试验

为实现继电器触点失效的预测进而找出继电器触点的失效机理, 本文用动态接触电阻测量系统进行了 HH52P 型电磁继电器可靠性试验, 监测了继电器触点闭合过程的接触压降。图 1 为测量系统的硬件结构。该测量系统以工控机为核心, 配以模块化电路, 能对试品线圈、数字记忆示波器进行实时控制。由于触点闭合时触点压降相当小, 测量电路采用 5A 短时脉冲电流测量触点间接触压降, 以减少干扰误差的影响。试验过程中, 可随时测试接触压降, 记录当前试验操作次数及试品触点的所有试验记录。试验采用截尾寿命试验, DC24V, 电阻负载, 4 对常开触点置于调温调湿箱中, 监测了闭合过程的接触压降, 一般间隔 10 万次记录一次。

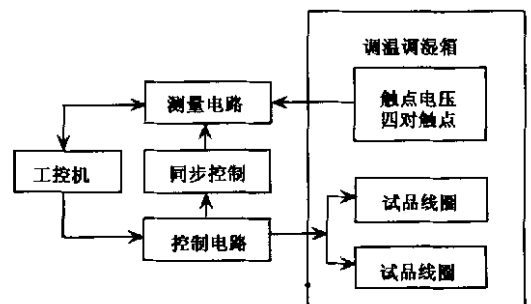


图 1 动态接触电阻测量系统的硬件结构

Fig. 1 Dynamic contact resistance measurement system diagram

收稿日期: 2005-01-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59977012)

作者简介: 陈 鹏(1975-), 男, 河北籍, 博士生, 主要从事智能电器与机电一体化研究;

陆俭国(1936-), 男, 江苏籍, 教授, 博导, 长期从事电器可靠性检测及智能电器与机电一体化研究。

3 继电器触点闭合过程接触压降变化规律

3.1 闭合过程的动态接触压降

试验观察到: 试品不同对触点的实测接触压降波形及相同对触点的不同次测量的实测接触压降波形呈现或多或少的差异(弹跳时间、接触压降峰值等)。但均为随时间起伏波动, 复杂变化的动态波形, 且呈现出一定的规律性: 由较剧烈波动逐渐衰减稳定, 该过程一般延时几毫秒。图2为继电器触点闭合过程接触压降随时间变化波形的典型示意图。

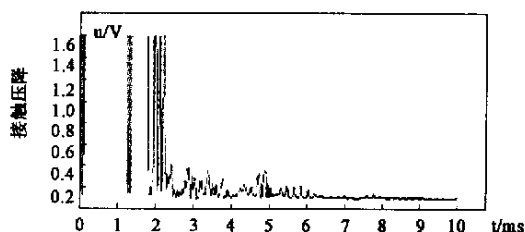


图2 继电器闭合过程触点接触压降典型波形

Fig.2 Waveform of contacts voltage when contacts close

3.2 机理分析

影响触头运动的因素(包括触头结构、质量、材料、表面状况及闭合速度等)非常复杂, 以至接触电阻动态过程具有一定的随机性和不确定性, 因而每次观测到的接触压降波形也就会不同。

图2所示的接触压降波形表明继电器触点闭合过程的接触电阻为动态接触电阻^[2], 该电阻经历了弹跳过程和振动过程^[3]最后达到静态接触电阻, 数值均在毫欧数量级。这是因为: 1) 在动、静触点每一次碰撞的过程中, 两触点间开始时只有少数实际接触点, 在接触压力的作用下实际接触点增多, 接触面也逐渐变形(从弹性变形到塑性变形), 塑性变形、摩擦等要消耗动触头的部分能量, 同时弹性变形恢复力使动触头反跳。接触前后动触头的能量关系可由下式表示:

$$0.5m_1v_1^2 = 0.5m_1v_2^2 + w_A$$

式中 m_1 为动触头的质量; v_1 为接触前动触头的速度, $0.5m_1v_1^2$ 为相应的动能; v_2 为动触头弹跳的初速度, $0.5m_1v_2^2$ 为相应的动能; w_A 为塑性变形、摩擦等消耗的能量。可见触头质量、动触头闭合速度及触头材料都是影响触头弹跳的重要因素。由于动触头每次碰撞和弹跳都要消耗能量, 弹跳的距离呈减小趋势, 直至触头不再分离、弹跳停止; 2) 动能是不能突然消失的, 只能在不断转化中逐渐减弱。故弹

跳过程停止后, 触头虽不分离仍有微振动, 振动幅度小于最大变形距离且逐渐减小, 最后动能因塑性变形、摩擦等原因全部消耗, 微振动才停止。正是因为触点弹跳和微振动造成了触点间接触压降按剧烈波动—逐渐衰减—稳定这一共性的规律变化。

4 继电器触点失效与闭合过程动态参数的关系

4.1 选择失效特征参数

上面的试验及分析表明直观上是触点弹跳和微振动造成触点间接触电阻的衰减变化。若衰减过程很短, 则一般还不足以对线路负载启动造成较大影响, 但若衰减过程很长, 动态接触电阻对应的接触压降和脉宽都很大时, 则可能造成负载启动失败, 控制失效, 从而严重危害系统的工作可靠性。所以, 认为弹跳时间、微振动时间及接触压降峰值是影响继电器触点接触可靠性的主要因素。本节以弹跳时间和接触电阻峰值为特征参数, 对继电器触点失效与其触点闭合过程特征参数的关系进行分析。

4.2 失效与特征参数的关系

(1) 失效特征参数—操作次数的关系

图3~图6给出常温(20℃)下4对试品触点的接触电阻峰值、弹跳时间与操作次数的关系曲线, 其中#1触点和#2触点在242万次操作后分别因接触不良和粘连而失效, #3和#4触点到截尾操作次数492万次仍正常工作。

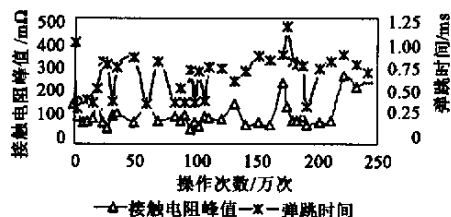


图3 触点#1的接触电阻峰值和弹跳时间随操作次数的变化曲线

Fig.3 Contact resistance peak value and bouncing time of contact #1 with operation periods

(2) 失效特征参数的统计学特征

表1列出20℃继电器触点闭合过程动态参数的均值和方差。

(3) 失效与特征参数的关系

表1的数据及图3的曲线表明: 1) 失效触点的弹跳时间均值、接触电阻峰值均值比未失效触点大很多; 2) 失效触点在很长的一段时间内及未失效触

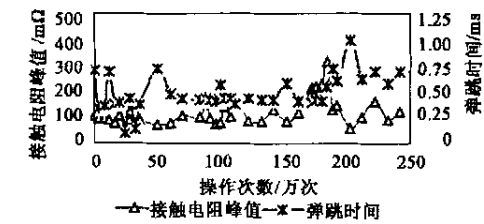


图 4 触点 # 2 的接触电阻峰值和弹跳时间随操作次数的变化曲线

Fig.4 Contact resistance peak value and bouncing time of contact # 2 with operation periods

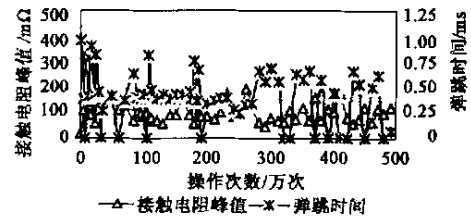


图 5 触点 # 3 的接触电阻峰值和弹跳时间随操作次数的变化曲线

Fig.5 Contact resistance peak value and bouncing time of contact # 3 with operation periods

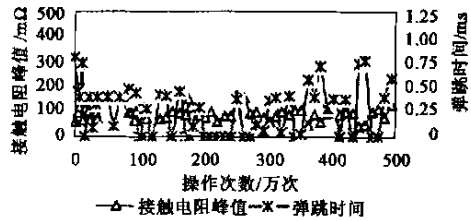


图 6 触点 # 4 的接触电阻峰值和弹跳时间随操作次数的变化曲线

Fig.6 Contact resistance and bouncing time of contact # 4 with operation periods

点到截尾次数止 ,不同触点接触电阻峰值曲线和弹跳时间曲线无明显差别 ,接触电阻峰值一般在 100 mΩ 上下(40 mΩ ~ 200 mΩ 间)波动 ,弹跳时间一般在 0.5ms 上下(0 ~ 1ms 间)波动 ; 3) 未失效触点时有不弹跳现象发生 ,失效触点临近失效前的接触压降峰值及弹跳时间有相继或同时大于均值现象。

表 1 20℃继电器触点特征参数的样本均值和样本标准差
Tab.1 Sample mean and sample standard error of mean of characteristic parameter of relay contacts at 20℃

实测值 统计值	接触电阻峰值(mΩ)				弹跳时间(ms)			
	# 1	# 2	# 3	# 4	# 1	# 2	# 3	# 4
均值	116.05	124.05	102.84	95.35	0.67	0.49	0.36	0.26
方差	53.88	53.57	29.80	30.83	0.20	0.17	0.25	0.24

4.3 机理分析

继电器触点闭合过程的特征参数在杂乱的无序变化中呈现的这些规律性的特征绝非偶然。可靠性试验虽是在相同的环境及应力条件下 ,对来自同批生产的同规格的继电器进行的。但试品个体存在差异 ,还有随机和偶然因素的影响 ,使得触点闭合过程的弹跳时间和接触电阻峰值随操作次数的变化规律不同。从而导致随失效因素的发展 ,触点表面变坏的态势也就不同。

人们已经从大量的试验数据和使用中所得到的数据的统计分析中发现大多数产品的失效率与时间 t 的关系曲线为“ 浴盆曲线 ”,见图 7。

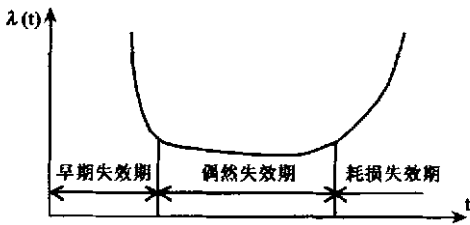


图 7 产品失效率的浴盆曲线

Fig.7 Tub curve of product failure

该曲线大致划分为三个阶段 :早期失效期、偶然失效期和耗损失效期。在早期失效期 ,设计和制造工艺缺陷是产品的主要失效因素 ,在耗损失效期 ,老化、磨损、疲劳等是其主要失效因素 ,在偶然失效期 ,早期失效因素淡化 ,耗损失效因素还未发展 ,产品失效率极低且稳定。

对具体某个产品 ,触点的失效因素是随操作次数逐渐发展的 ,经历一个从明显到不明显再到明显的过程。继电器触点在工作的早期 ,可能因早期失效因素而失效 ,即使没有失效安全进入偶然失效期 ,其特征参数也可能因此表现为相对不稳定 ;随早期失效因素的淡化 ,继电器触点工作进入偶然失效期 ,失效主要源于随机因素 ,其特征参数为相对稳定 ;与此同时 ,耗损失效因素逐渐发展 ,当该失效因素变得严重时 ,继电器触点特征参数表现不平稳的性质。

继电器触点的弹跳会使其表面晶粒疲劳、松动甚至脱落 ,从而产生机械磨损 ,当弹跳时间和接触压降峰值连续过高时 ,机械磨损加速 ,耗损失效因素迅速发展。因此 ,若继电器触点闭合过程的弹跳时间和接触压降峰值同时过高 ,其接触可靠性会降低 ,甚至发生接触失效。

5 结论

由试验数据及其分析 ,本文得出如下结论 :

(1) 继电器触点闭合过程的接触压降呈现动态性质,是随时间起伏波动,复杂变化的动态波形,但同时呈现出一定的规律性,即随时间经历了动态的弹跳、微振动再到静态的衰减过程。

(2) 失效触点的弹跳时间均值、接触电阻峰值均值比未失效触点大很多,在直至失效前的很长的一段时间内,接触电阻峰值—操作次数曲线和弹跳时间—操作次数曲线均无明显差异;失效触点临近失效前的接触电阻峰值及弹跳时间有相继或同时大于均值现象。

(3) 未失效触点到截尾次数止,不同触点的接触电阻峰值—操作次数曲线和弹跳时间—操作次数曲线均无明显“异性”特征;未失效触点时有不弹跳现象发生。

(4) 上述的现象可用失效因素的“浴盆曲线”进行解释。

本文所得结论是在现有数据的基础上得到的,有待于进一步试验验证。

参考文献 (References):

- [1] Li Wenhua. Study and reliability analysis on testing instrument for dynamic contact resistance on contact [A]. 46th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts [C]. Chicago, USA, 2000. 109-114.
- [2] Li Zhigang. Reliability analysis and failure prediction study of dynamic contact resistance on contact [A]. 48th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts [C]. Chicago, USA, 2002. 61-65.
- [3] 程礼椿 (Cheng Lichun). 电接触理论及应用 (Electrical contact theory and application) [M]. 北京:机械工业出版社出版 (Beijing: China Machine Press), 1988.
- [4] 易丹辉 (Yi Danhui). 统计预测 — 方法与应用

(Statistical forecast — method and application) [M]. 北京:中国人民大学出版社 (Beijing: China Renmin Univ. Press), 1990.

- [5] R S Mroczkowski. Electrical contact reliability: How to it determined [A]. Proc. 34th Annual Meeting Holm Conference on Electrical Contacts [C]. San Francisco, CA, USA, 1988. 65.
- [6] L Boyer. Electrical and physical modeling of contact defects due to fretting [J]. IEEE Trans. on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, 1994, 17(1): 134-141.
- [7] R W Caven. Prediction the contact resistance distribution of electrical contacts by modeling the contact interface [A]. Proc. 37th Annual Meeting Holm Conference on Electrical Contacts [C]. Chicago, IL, USA, 1991. 83-89.
- [8] L Boyer. Constriction resistance of a multispot contact: An improved analytical expression [J]. IEEE Trans. on Component, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1991, 14(1): 134-136.
- [9] B W Bennett. The effect of current on stationary contact behavior [A]. Proc. 34th Annual Meeting Holm Conference on Electrical Contacts [C]. San Francisco, CA, USA, 1988. 267-276.
- [10] Glenr Vrane. Contact resistance on surface with nonuniform contaminant Films [J]. IEEE Trans. on Component, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1981, 4(1): 5-9.
- [11] 王敬, 姚建军, 王建华 (Wang Jing, Yao Jianjun, Wang Jianhua). 一种基于 $\mu C/OS-II$ 的电力系统数字继电器通用软件平台 (A digital relay software platform based on $\mu C/OS-II$) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2004, 23(1): 72-76.
- [12] Terutaka Tamai. Effect of silicone vapor and humidity on contact reliability of micro relay contacts [J]. IEEE Trans. on Components and Packaging Technology, 1996, 19(3): 329-337.
- [13] Hermann P Koidl. Influence of contact material parameters on contact compatibility of organic vapors [J]. IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2000, 23(2): 222-226.

Research on dynamic contact resistance measurement and failure prediction of relay contacts

CHEN Peng, LU Jian-guo, YAO Fang, LI Xin

(Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: The contacts voltage of counterpart contacts in the close course of electromagnetic relay is observed and recorded in its failure tests using dynamic contact resistance measurement system. It is found that the voltage varies with time and its wave takes on complicated variation and attenuation. Also, the contact experiences dynamic bouncing, tiny vibration and static state with time. The analysis on test data shows that the contact failure of relay, to a certain extent, is related to the bouncing time and the maximum value of contact resistance in the close course. Therefore, the curve of variation of bouncing time to operating times and maximum value of contact resistance can be considered synthetically for forecasting contact invalidation of relay.

Key words: electromagnetic relay; contacts; failure prediction