

# 触点寿命试验中初始接触电阻与寿命的关系研究

张菲菲<sup>1</sup>, 李志刚<sup>1</sup>, 李玲玲<sup>1</sup>, 王婧<sup>2</sup>

(1. 河北工业大学电气工程学院, 天津 300130; 2. 国网新能源张家口风光储示范电站有限公司, 河北 张家口 075000)

**摘要:** 若能发现继电器触点初始接触电阻与寿命的关系, 就可以根据初始接触电阻值预测出单个产品的寿命, 而不需要对试品进行完全寿命试验来获得试品的寿命, 还可避免用批产品寿命代表样本个体寿命的缺点。所以, 对寿命试验中的初始接触电阻与寿命的关系进行了研究。在按照寿命大小对继电器进行分类的基础上, 比较分析了各类继电器的接触电阻的规律。分析结果表明: 继电器的寿命与初始接触电阻值的大小有关。当初始接触电阻连续出现较大值时, 即使在运行一段时间后, 接触电阻回到正常值, 继电器仍会发生早期失效, 寿命较短; 当继电器的接触电阻在运行初期正常, 在中后期电阻出现由小到大剧烈变化的趋势时, 继电器即将失效, 且其极大值点的剩余寿命与接触电阻的变化率有关。

**关键词:** 接触电阻; 寿命; 电磁继电器; 触点; 失效

## Research on the relationship between initial contact resistance and lifetime in contact life tests

ZHANG Feifei<sup>1</sup>, LI Zhigang<sup>1</sup>, LI Lingling<sup>1</sup>, WANG Jing<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. Zhangjiakou Wind and Solar Power Energy Demonstration Station Co., Ltd., State Grid Xinyuan Company, Zhangjiakou 075000, China)

**Abstract:** If it could be found that the relationship between early contact resistance of relay and lifetime, the lifetime of a single product would be obtained by the prediction of early contact resistance, instead of using the complete life tests. Meanwhile, this method could avoid the disadvantage of using the life of a batch of products to represent the life of a sample. So, the relationship between contact resistance values and lifetime in life tests are studied. Based on relays' classification by the size of lifetime, the varying characteristic of the early contact resistance are compared and analyzed among groups of relays. The analysis shows that the lifetime of relays is related to the values of initial contact resistance. The relay is prone to early failure, and has short lifetime, when there are several large values of contact resistance in the early period in operation of relay, even if the value of contact resistant go back to the normal range after operating for a while. When the values of contact resistance are normal in the beginning period, and have a trend of soaring increase in the middle and later period, the relay is about to fail. The remaining useful life at the maximum of contact resistance is related to the change of the contact resistance values.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377044).

**Key words:** contact resistance; lifetime; electromagnetic relay; contact; failure

中图分类号: TM588      文献标识码: A      文章编号: 1674-3415(2015)05-0063-06

## 0 引言

电磁继电器是电气系统中的基础元件, 其寿命大小直接影响着整个电气系统的正常运行时间, 特别是在现代化大型电力系统、航空航天和军事等一些重要场合, 电磁继电器的寿命与安全性和

可靠性息息相关。因此, 研究电磁继电器的寿命对提高整个电气系统的安全性和可靠性有重要意义。

目前, 对产品寿命进行预测和评估的方法主要是在交叉熵理论<sup>[1]</sup>、云理论<sup>[2]</sup>、随机模糊理论<sup>[3]</sup>、数据挖掘和模糊聚类<sup>[4]</sup>等理论的基础上建立其相应的寿命预测模型。为了提高继电器的使用可靠性, 学者们在继电器的可靠性影响因素<sup>[5]</sup>、失效模式和失效机理<sup>[6-9]</sup>及寿命预测<sup>[10-11]</sup>等方面的研究已做了很多的工作。文献[12]在云理论的基础上, 建立了可靠性度量的云模型。文献[13]以超程时间为预测变

**基金项目:** 国家自然科学基金(51377044); 高等学校博士学科点专项科研基金(20121317110008); 河北省科技支撑计划资助项目(13214303D, 13214604D)

量建立了回归模型实现对单个继电器产品的寿命预测。文献[14]以触点接触电阻为对象研究电接触性能，并建立了电接触失效预测模型。文献[15]在灰色理论的基础上，利用大于某阈值的表征系统行为特征值建立灾变预测模型。文献[16]研究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关，综合考虑弹跳时间和接触电阻峰值的变化规律对继电器触点进行失效预测。上述预测方法基本上都是在大量试验数据的基础上，通过建立模型来预测未来时刻的数据值，并结合继电器数据的失效阈值来得到继电器的寿命，均没有对触点接触电阻在运行初期的表现进行专门研究。

继电器触点的静态接触电阻是反映电接触性能的主要指标。文献[17]研究发现初始接触电阻值大的继电器容易发生失效。如果能够发现初始接触电阻与寿命的大小有关系，则试验可以不必完全做完，或者说可以大幅度地缩短试验时间。另外，用早期试验数据进行寿命预测可以在不损伤或基本不损伤使用寿命的情况下，对产品进行寿命预测。对于单个产品而言，可以不再使用批产品寿命来代表样本个体寿命的统计方法，而是根据装机前的检测数据就可以预测出单个产品的寿命，该方法意义重大。所以，本文依据此思想，对由寿命试验获得的五组触点的试验数据进行分析，研究初始接触电阻值与寿命的关系，为使用初始试验数据预测继电器寿命做准备。

### 1 接触电阻值的获得及结果分析

在一定的试验条件下，用继电器电寿命试验系统<sup>[18]</sup>对电磁继电器进行电寿命试验，可以得到各个操作时刻对应触点的静态接触电阻值。

该试验的设置条件为：若触点闭合时的触点接触压降大于电源电压的10%，或者触点断开时触点间压降小于电源电压的90%时，则认为触点发生了1次超限。等超限次数累计到5次时，则认为继电器发生失效，不再进行试验。因为试验的数据量很大，为减少数据的存储量，继电器动作时每隔1次记录相应的接触电阻值，即记录第2、4、6、8、10…次操作的接触电阻值，直至继电器发生失效才停止记录。

对20多组电磁继电器触点进行了试验，并获得了大量的接触电阻值。由于数据量很大，仅对某批次的5个试品进行分析来研究接触电阻与寿命的关系。5个试品的试验结果统计见表1。

由表1可知：首次电阻值都比均值要小，但5个继电器的使用寿命长短不一，均值、标准差、首次

阻值、最大阻值和最小阻值也稍有不同。可见，继电器个体之间存在差异。

表 1 试验结果  
Table 1 Test results

试品编号	试验总次数	首次阻值/mΩ	电阻均值/mΩ	电阻标准差/mΩ	最大阻值/mΩ	最小阻值/mΩ
#1	18514	4.95	6.11	0.92	9.36	4.59
#2	1540	4.19	5.91	1.03	8.72	4.15
#3	1965	4.01	5.51	1.06	8.87	3.94
#4	25405	4.51	5.91	0.88	9.97	4.46
#5	31150	4.89	6.09	1.00	9.51	4.18

为了观察接触电阻在整个寿命期内的分布，以#1继电器的试验数据为例进行说明。图1是#1继电器在上述试验方法的基础上得到的整个寿命期内的接触电阻值分布图。为了更清楚地展示数据点“.”的含义，局部放大第1000次到1050次的离散数据点。若将整个寿命期内的数据点全部压缩绘制到坐标中就得到图1的结果。

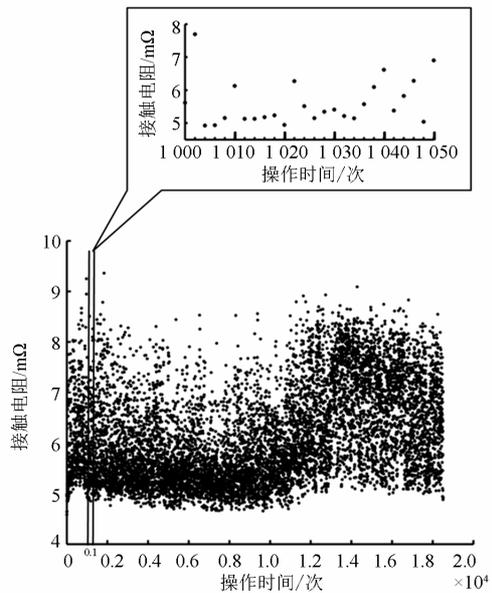


图 1 #1 继电器接触电阻分布图

Fig. 1 Contact resistance distribution of relay 1

由图1可知：继电器触点接触电阻值的分布具有一定的不确定性和分散性。这与触点接触电阻受电、热、力、磁和化学腐蚀效应等多种因素的影响有关<sup>[19]</sup>。

统计#1~#5 继电器在整个寿命期内接触电阻值的概率密度分布如图2所示。由图2可知，5个继电器的接触电阻值的概率分布曲线基本相似，且在曲线的峰值右侧 A 区都有较多的大电阻值出现，接

触电阻分布明显不对称, 表明此次试验接触电阻值不服从正态分布。所以, 下文使用 z-score 规范化<sup>[20]</sup>后的数据不满足标准正态分布的规律。

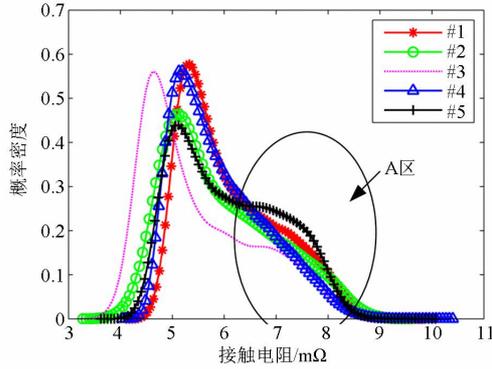


图2 接触电阻的概率密度分布图

Fig. 2 Probability distribution of the contact resistance

## 2 数据处理

由试验结果分析可知, 接触电阻具有不确定性和分散性, 并且继电器之间存在个体差异, 所以用分段平均和 z-score 规范化的方法来处理试验数据。

### 2.1 分段平均法

为了研究接触电阻的趋势性, 采用分段平均的方法来削弱接触电阻的不确定性和分散性。

假设测得的试验数据共有  $N$  个, 继电器的操作次数依次排列为  $t_1, t_2, \dots, t_N$ , 对应的接触电阻值为  $r_1, r_2, \dots, r_N$ , 将相邻的  $p$  个数据分为一段, 共分为  $m$  段, 每段均值为  $R_i (i=1, 2, \dots, m)$ , 相应操作时间为  $T_i$ , 具体计算公式如下:

$$m = [N/p] \quad (1)$$

$$R_i = \left( \sum_{k=(i-1)p+1}^{ip} r_k \right) / p \quad (2)$$

$$T_i = \left[ \left( \sum_{k=(i-1)p+1}^{ip} t_k \right) / p \right] \quad (3)$$

取  $p=10$ , 将试验获得的接触电阻按式(1)~式(3)进行处理, 其中#1 继电器的处理结果如图3所示。由图1和图3相比可见: 分段均值处理后接触电阻的趋势性变强, 分散性变弱。

### 2.2 数据规范化

为了消除样本间的个体差异给数据分析带来的影响, 对分段均值后的数据  $R_i (i=1, 2, \dots, m)$  进行 z-score 规范化处理得到接触电阻的规范化值为  $Z_R$ , 规范化公式为

$$Z_R = (R_i - \bar{R}) / s \quad (4)$$

式中:  $\bar{R}$  为样本的均值;  $s$  为样本的标准差。

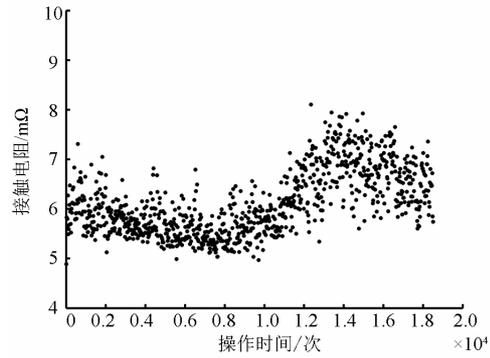


图3 #1 继电器接触电阻分段均值

Fig. 3 Contact resistance segment averages of relay

对试验数据进行上述处理后得到#1~#5 继电器的  $Z_R$  与操作时间的关系见图4。图4中的分图(b)、(c)横轴表示的最大操作时间不到2 000次, 而分图(a)、(d)、(e)横轴表示的最大操作时间大概是它们的10倍左右, 相差较大。所以, 线的疏密看起来不一样。

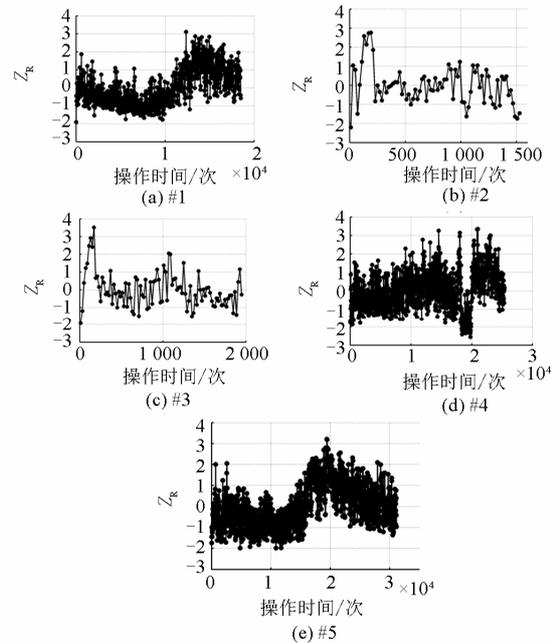


图4  $Z_R$  与操作时间的关系

Fig. 4 Relationship between  $Z_R$  and the operating time

## 3 接触电阻值与寿命的关系

由图4可知, #1~#5 继电器的寿命(即最大操作时间)相差悬殊。如果能够按寿命大小将继电器进行分类, 然后将各类继电器的初始接触电阻进行比较分析, 则可以得到初始接触电阻与寿命的定性关系。因此, 先根据“浴盆曲线”失效期的划分对继电器进行分类, 然后分类比较了初始接触电阻的规律, 并对寿命较长的继电器中后期接触电阻的变化率与寿命的关系进行了研究。

### 3.1 寿命大小分类

由于继电器的寿命大小等于失效时间，所以用失效期的分界点作为继电器按寿命大小进行分类的界限。

假设产品个数为  $n$ ，产品从  $t=0$  开始工作，到  $t$  时刻和  $t+\Delta t$  时刻的失效数分别为  $m(t)$  和  $m(t+\Delta t)$ ，则失效率  $\lambda(t)$  为

$$\lambda(t) = \frac{m(t + \Delta t) - m(t)}{[n - m(t)]\Delta t} \quad (5)$$

从数学上讲，当  $\Delta t$  无限趋近于 0 时，式(5)成立。对于离散数据来讲，失效率仅在可数的离散时间点上定义。这里暂且用  $\Delta t=1\ 000$  次进行失效率的粗略分析。

本试验有 5 个继电器，每隔 1 000 次操作计算失效率，用式(5)并结合表 1 的试验总次数计算得到失效率  $\lambda(t)$  的情况见表 2。

表 2 失效率数值表

Table 2 The values of failure rate

$t/10^4$ 次	0	0.1	...	1.8	...	2.5	...	3.1
$\lambda(t)/10^{-3}$	0	0.4	0	0.33	0	0.5	0	1

据表 2 中的数据绘制失效率与操作次数的点图并对其进行多项式拟合，拟合曲线见图 5。

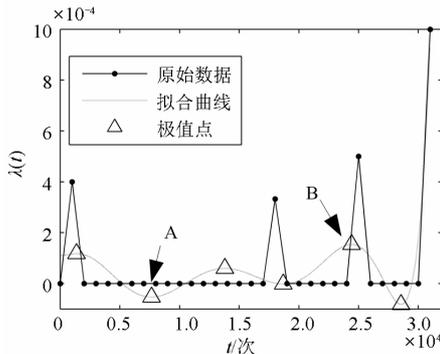


图 5 失效率拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of failure rate

对拟合曲线求极值，以得到的第一个极小值和之后的极值中的最大值作为分界点，图 5 中的分界点见表 3。

表 3 失效率曲线的分界点

Table 3 Cutoff points of failure rate curve

分界点	操作时间 $t$ /次
A	7 648
B	24 410

由表 3 可知：对于本试验而言，寿命小于 7 648 次的继电器可以认为是短寿命继电器；寿命大于 24 410 次的继电器可以认为是长寿命继电器；总寿

命在 7 648 次和 24 410 次之间的继电器可以认为是中寿命继电器。

### 3.2 分类讨论

下面主要是对图 4 的各分图进行对比分析。由于中寿命的#1 继电器与长寿命的#4、#5 继电器接触电阻的变化趋势基本相同，暂将中长寿命的继电器放在一起讨论。

#### 3.2.1 短寿命试品的初始接触电阻规律

短寿命的#2 和#3 继电器  $Z_R$  与操作时间的关系见图 4(b)、(c)。由图 4(b)、(c)可得：初始接触电阻均较小，在操作时间为 100 次到 200 次之间连续出现  $Z_R > 2$ ，将首次出现的时间记作  $t_1$ ，连续出现次数记作  $n^*$ ，总寿命记作  $T$ 。之后接触电阻值又变小，且没有再出现  $Z_R > 2$ 。其统计情况见表 4。

观察图 4(a)、(d)、(e)发现：#1、#4 和#5 继电器在运行早期没有出现或零散地出现  $Z_R > 2$  的情况。由此对比可以得出：继电器在运行早期连续出现接触电阻值较大的情况后，即使随后的接触电阻值回归到正常值，继电器的寿命也不长，易发生早期失效。如果此项结论适用于大多数继电器的情况，则对于继电器的寿命预测意义重大。

表 4  $Z_R > 2$  的统计结果

Table 4 Statistic results of  $Z_R > 2$

试品编号	首次出现的时间 $t_1$	连续出现次数	总寿命 $T$	剩余寿命 $T-t_1$
#2	131	4	1 540	1 409
#3	111	4	1 965	1 854

#### 3.2.2 中长寿命试品的接触电阻规律

由图 4(a)、(d)、(e)可知：#1、#4 和#5 继电器在运行早期没有出现接触电阻值较大的情况，在中后期均连续出现了  $Z_R > 2$  的情况，并且均出现了一段接触电阻值由小到大的剧烈变化，之后再变小并持续一段时间后寿命终止。下面针对接触电阻发生由小到大剧烈变化的区间进行研究。

1) 确定研究区间。对接触电阻  $Z_R$  进行多项式拟合，求出拟合曲线的所有极值点，并认为拟合曲线的相邻极值离差最大的区间就是接触电阻发生由小到大剧烈变化的区间。拟合曲线及极值点如图 6 所示。

在图 6 中，符号“☆”标注了各拟合曲线上相邻极值离差最大的极值点。

2) 计算变化率和剩余寿命。图 6 中的极大值和极小值分别记为  $Z_{Rd}$  和  $Z_{Rx}$ ，相应的操作时间记为  $t_d$  和  $t_x$ ，这两个极值间的变化率记为  $v_R$ ，则

$$v_R = \frac{Z_{Rd} - Z_{Rx}}{t_d - t_x} \quad (6)$$

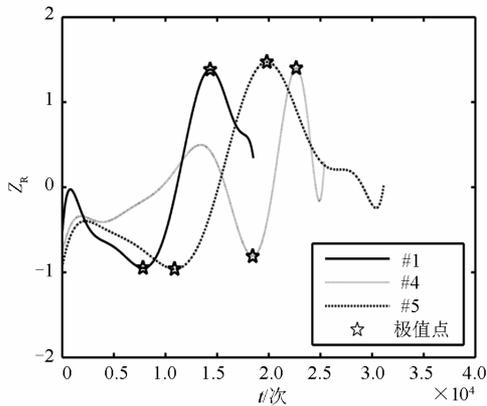


图 6 #1、#4 和#5 继电器拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of relay 1, 4 and 5

假设继电器的总寿命为  $T$ , 继电器的接触电阻值达到极大值  $Z_{Rd}$  之后继电器还能正常工作的时间即过极大值后的剩余寿命, 记为  $T_s$ , 则

$$T_s = T - t_d \quad (7)$$

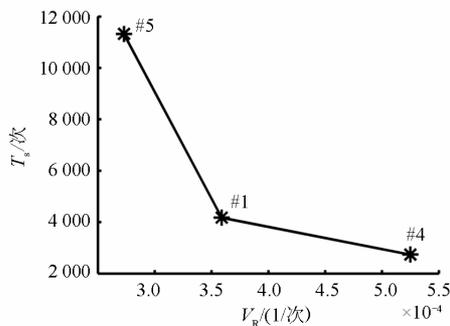
#1、#4 和#5 继电器接触电阻的变化率、剩余寿命的计算结果见表 5。

表 5 接触电阻变化率和剩余寿命的计算结果

Table 5 Calculation results of the contact resistance variation and remaining useful life

试 品 编 号	总寿命 $T/次$	极小值		极大值		变化率 $v_R/(10^{-4}/次)$	过极大值 后剩余寿 命 $T_s/次$
		$t_s/次$	$Z_{Rr}$	$t_d/次$	$Z_{Rd}$		
1	18 514	7 838	-0.95	14 340	1.38	3.59	4 174
4	25 405	18 452	-0.81	22 668	1.40	5.25	2 737
5	31 150	10 894	-0.96	19 826	1.47	2.73	11 324

由表 5 得到的变化率  $v_R$  和过极大值后剩余寿命  $T_s$  的大小关系具体如图 7 所示。

图 7  $v_R$  与  $T_s$  的关系Fig. 7 Relationship between  $v_R$  and  $T_s$ 

由图 7 可知: 接触电阻经过由小到大的剧烈变化的区间, 该区间内的接触电阻变化率越大, 继电器过极大值后的剩余寿命越短。

由上述分析可知: 在运行早期, #1、#4 和#5 继电器接触电阻规范化值没有出现或零星出现几个  $Z_R > 2$  的情况。在运行中后期, 继电器的接触电阻值出现由小到大的变化趋势, 这种增大趋势可能是由于触点发生较严重的电磨损、机械磨损、氧化腐蚀等情况。而对于接触电阻由小到大的变化率越大, 经过极大值点后的剩余寿命越小的结论, 可能是因为电阻的变化率与触点表面状态的恶化快慢程度有关。

由于样本量太少, 仅提出一种剩余寿命的推导方法。如果能够得到大量样本的变化率  $v_R$  与剩余寿命的数值, 则可以根据数据拟合的方法建立剩余寿命与变化率的数学模型:  $T_s = f(v_R)$ 。

## 4 结论

对由试验获得的 5 组接触电阻值进行分析得到如下结论:

1) 由于受多种因素的相互影响, 接触电阻值具有一定的随机性和分散性, 其分布不服从正态分布。对于看起来随机分散的接触电阻, 若存在趋势, 则用分段平均法可使接触电阻的趋势性更明显。

2) 继电器在运行初期连续出现接触电阻的规范化值  $Z_R > 2$  的情况时, 即使之后的接触电阻值恢复正常, 继电器也容易发生早期失效, 寿命较短。

3) 如果继电器的接触电阻值在运行初期正常, 在中后期电阻出现由小到大剧烈变化的趋势时, 继电器即将失效, 且其极大值点的剩余寿命与接触电阻的变化率有关。变化率越大, 其剩余寿命越短。

## 参考文献

- [1] 栗然, 刘会兰, 卢云, 等. 基于交叉熵理论的配电变压器寿命组合预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 97-103.  
LI Ran, LIU Huilan, LU Yun, et al. A combination method for distribution transformer life prediction based on cross entropy theory[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 97-103.
- [2] 范莉, 夏非, 苏浩益, 等. 基于云理论的高压绝缘子污秽状态风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 57-62.  
FAN Li, XIA Fei, SU Haoyi, et al. Risk assessment of high voltage insulator contamination condition by cloud theory[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 57-62.
- [3] 栗然, 韩彪, 卢云, 等. 基于随机模糊理论的变压器经济寿命评估[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 9-16.  
LI Ran, HAN Biao, LU Yun, et al. Transformer's economic life assessment based on random and fuzzy

- theory[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 9-16.
- [4] 杨茂, 熊昊, 严干贵, 等. 基于数据挖掘和模糊聚类的风电功率实时预测研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 1-6.  
YANG Mao, XIONG Hao, YAN Gangui, et al. Real-time prediction of wind power based on data mining and fuzzy clustering[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 1-6.
- [5] 马存宝, 成功, 胡云兰, 等. 继电器可靠性影响因素分析[J]. 继电器, 2006, 34(4): 66-68.  
MA Cunbao, CHENG Gong, HU Yunlan, et al. Influencing factor analysis of relay reliability[J]. Relay, 2006, 34(4): 66-68.
- [6] 王淑娟, 余琼, 翟国富. 电磁继电器接触失效机理判别方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 38-44.  
WANG Shujuan, YU Qiong, ZHAI Guofu. Discrimination method of contact failure mechanisms for electromagnetic apparatus[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 38-44.
- [7] 刘帼巾, 陆俭国, 王海涛, 等. 接触器式继电器的失效分析[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 81-85.  
LIU Guojin, LU Jianguo, WANG Haitao, et al. Failure analysis of contactor relay[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 81-85.
- [8] YE Xuerong, MA Yue, MENG Hang, et al. Degradation failure model of electromagnetic relay[C] // Proceedings of ICEC-ICREPEC 2012, Beijing, 2012.
- [9] 任万滨, 余琼, 翟国富. 转换型电磁继电器电接触失效分析[J]. 电工材料, 2011(1): 14-19, 23.  
REN Wanbin, YU Qiong, ZHAI Guofu. Failure analysis of electrical contacts for electromagnetic relay with switched type contacts[J]. Electrical Engineering Materials, 2011(1): 14-19, 23.
- [10] 姚芳, 李志刚, 李玲玲, 等. 继电器触点接触电阻的时间序列短期预测[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 61-65.  
YAO Fang, LI Zhigang, LI Lingling, et al. The time series short-term prediction on the contact resistance of contacts of relay[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2): 61-65.
- [11] 翟国富, 王淑娟, 许峰, 等. 基于超程时间和吸合时间建模的继电器双变量寿命预测方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 76-80.  
ZHAI Guofu, WANG Shujuan, XU Feng, et al. Research on double-variable life forecasting based on model-building of super-path time and pick-up time for relays[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 76-80.
- [12] 李玲玲, 朱芬芬, 姚致清, 等. 基于可信度的可靠性度量云模型[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 90-94.  
LI Lingling, ZHU Fenfen, YAO Zhiqing, et al. Reliability measure cloud model based on credibility[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 90-94.
- [13] 李华, 孙东旺, 贺鹏举, 等. 基于超程时间回归模型的继电器寿命预测方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(增刊2): 414-417.  
LI Hua, SUN Dongwang, HE Pengju, et al. The method of relay life prediction based on the regression model of super-path time[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(S2): 414-417.
- [14] LI Wenhua, SUN Lijun. The test data verifying & prediction model of electrical contact[C] // Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Seattle, 2004.
- [15] 李玲玲, 韩俊杰, 王成山. 基于灰色理论的继电器电接触可靠性预测[J]. 机械工程学报, 2012, 48(2): 68-72.  
LI Lingling, HAN Junjie, WANG Chengshan. Based on grey theory of prediction on electrical contact reliability of relay[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(2): 68-72.
- [16] 姚芳, 李志刚, 李玲玲, 等. 继电器触点失效预测的研究[J]. 继电器, 2004, 32(16): 28-31.  
YAO Fang, LI Zhigang, LI Lingling, et al. Research on failure prediction of relay contacts[J]. Relay, 2004, 32(16): 28-31.
- [17] LI Zhigang. Reliability analysis and failure prediction study of dynamic contact resistance on contact[C] // Proceedings of the Forty-Eighth IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Chicago, 2002.
- [18] 黄凯, 李志刚, 杨屹. 电磁式继电器电寿命试验系统的研究[J]. 河北工业大学学报, 2008, 37(2): 1-6.  
HUANG Kai, LI Zhigang, YANG Yi. Study on the system of electromagnetic relay electric endurance test[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2008, 37(2): 1-6.
- [19] 许军, 李坤. 电接触的接触电阻研究[J]. 电工材料, 2011(1): 10-13.  
XU Jun, LI Kun. The research on resistance of electrical contact[J]. Electrical Engineering Materials, 2011(1): 10-13.
- [20] 韩家炜. 数据挖掘: 概念与技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

收稿日期: 2014-05-23

作者简介:

张菲菲(1985-), 女, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为电器可靠性及检测技术; E-mail: ddhudiefefei@163.com

李志刚(1958-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电器可靠性与测试技术、电器现代设计理论及其应用等;

李玲玲(1968-), 女, 博士, 教授, 研究方向为电器可靠性、电器产品的智能设计等。

(编辑 魏小丽)