

# 采用超程时间建模的航空航天继电器 寿命预测方法的研究

翟国富 赵新民 刘茂恺 张德双  
(哈尔滨工业大学 401 信箱, 哈尔滨, 150001)

RESEARCH ON RELIABILITY LIFE FORECASTING BASED  
ON MODEL-BUILDING OF SUPER-PATH TIME FOR AEROSPACE RELAYS

Zhai Guofu, Zhao Xinmin, Liu Maokai, Zhang Deshuang  
(Box401, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001)

**摘 要** 提出以电磁继电器超程时间为变量,运用时间序列回归分析和数理统计分析方法,建立航天密封继电器超程时间减小曲线寿命预测数学模型。预测和实测结果的比较,表明了该方法的有效性。

**关键词** 继电器 可靠性 寿命预测 时间序列 超程时间

**中图分类号** V242

**Abstract** This paper proposes a method which takes aerospace relay super-path time as a variable and applies time series regression analysis and mathematical statistics analysis to build an aerospace relay super-path time reliability life forecasting mathematical model. The effectiveness of the method is proved by comparison between the forecasting and experimenting results.

**Key words** relay, reliability, life forecasting, time series, super-path time

继电器在航空航天领域是一种应用面很广的机电元件。继电器触点是影响继电器可靠工作的主要因素之一。航天继电器的可靠性基本要求及相应的试验标准已在军用规范中给出<sup>[1]</sup>。可靠性寿命试验是可靠性试验的一个重要内容,它主要是考核继电器在工作时触点的电气耐磨性。触点在断开和闭合过程中,由于电弧等的侵蚀作用造成触点的电磨损<sup>[2]</sup>,随着触点电磨损的增加,触点的厚度逐渐减少。为了保证触点具有较小的接触电阻和足够的电气寿命,在制造过程中应保证触点具有一定的接触压力和超额行程(简称超程),它是保证继电器固有可靠性的重要因素。当超程和接触压力减小到一定值时,不能保证触点可靠接触,继电器也就达到了寿命极限。

针对现行电器可靠性寿命试验存在的问题<sup>[3]</sup>: 1 抽样试验概率统计方法估计电寿命的可靠度较低; 2 试验周期长,耗费人力、物力及电能; 3 试验是破坏性的。文献[4]提出采用检测一定次数的触点收缩电阻的方法,对继电器寿命进行推算,即采用触点收缩电阻作为继电器寿命预测变量;文献[5,6]提出采用磨损量作为继电器寿命预测变量,这些方法的试验结果表明了它们的有效性,但因收缩电阻很难获得较高的测量准确度,而触点磨损量测量繁琐,耗费人力物力较大,尤其不适用于航天密封继电器,所以它们的实用性均较差。继电器超程时间可以定量地描述超程的变化,对于航天密封继电器来说,超程是无法测量的,而超程时间较容易测出。本文提出采用超程时间作为预测变量,对航天密封继电器进行可靠性寿命

预测。

## 1 继电器超程时间及测试数据的获得

电磁继电器的超程,一般是指继电器从动触点与静触点接触瞬间起到衔铁闭合为止,触点的移动(或可能移动)距离,亦称触点跟踪。超程时间就是指触点在超程阶段移动所需的时间,它可以通过继电器线圈电流和触点电压动态测试波形直观地表示出来<sup>[7]</sup>,图 1 所示  $t_c (= t_2 - t_1)$  即为超程时间。

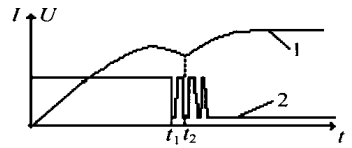


图 1 继电器动态测试波形

1—继电器线圈电流动态波形;

2—触点电压动态波形;

$t_1$ —常开触点开始接通时间;

$t_2$ —衔铁运动到完全闭合所需的时间

本研究以 4JRXM-3 为被试验继电器,通过 HP 数字储存示波器对该继电器线圈电流和触点电压进行高速数据采集,利用笔者所研制的简易 IEEE488 并行接口卡,将所采集的数据传入计算机,然后由计算机对所采集的数据进行分析、处理,得到超程时间  $t_c$ ,图 2 为该继电器动作 1000 次所获得的超程时间数据。

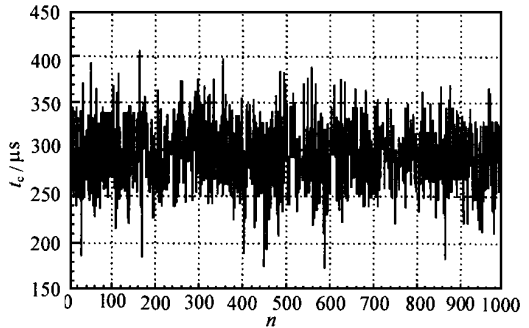


图 2 继电器动作 1000 次所获得的超程时间数据

分析图 2 的数据表明:<sup>1</sup> 随着动作次数  $n$  的增加,超程时间  $t_c$  呈逐渐减小的趋势;<sup>2</sup> 具有较大的分散性。针对以上特点,本文提出采用时间序列回归分析和概率统计分析相结合的方法,建立航天密封继电器寿命预测的数学模型。

## 2 数学模型的建立

(1) 时间序列趋势项回归数学模型的建立 首先,利用前 950 次动作的超程时间数据,采用常用的 5 种函数在计算机上进行回归分析,建立相应的回归模型分别为

$$^1 \text{ 线性回归模型} \quad \hat{t}_n = 296.86 - 0.0096834n \quad (1)$$

<sup>2</sup> 多项式回归模型

$$\hat{t}_n = -4.8631e - 7n^2 - 3.0209e - 4n + 296.56 \quad (2)$$

$$\gg \text{ 指数回归模型} \quad \hat{t}_n = 294.16 \times 0.999997^n \quad (3)$$

$$\frac{1}{4} \text{ 幂回归模型} \quad \hat{t}_n = 295.42n^{-0.0010901} \quad (4)$$

$\frac{1}{2}$  双曲线回归模型

$$\hat{t}_n = 1 / (3.8034e - 12n^2 - 3.1254e - 9n + 0.0034355) \quad (5)$$

5 种时间序列回归曲线示于图 3。

其次,通过概率统计方法,利用超程时间数据的前 950 点的回归标准离差  $s_1$  公式和后 50 点(950 次~1000 次)的预测标准离差  $s_2$  公式,即

$$s_1 = \sqrt{\frac{1}{950} \sum_{i=1}^{950} (t_i - \hat{t}_i)^2}; \quad s_2 = \sqrt{\frac{1}{50} \sum_{i=950}^{1000} (t_i - \hat{t}_i)^2} \quad (6)$$

计算上述 5 种回归数学模型的回归标准离差和预测标准离差如表 1 所示。

然后,比较各数学模型的回归标准离差和预测标准离差,取其最小者所对应的数学模型作为该继电器寿命预测数学模型。所以本研究采用线性回归模型为预测数学模型。以下仅

对线性回归模型进行修整, 即利用采集的全部 1000 个数据点进行回归分析, 所得趋势项线性回归数学模型为

$$\hat{d}_n = 296.76 - 0.00096931n \quad (7)$$

表 1 5 种回归数学模型的回归和预测标准离差

模型类别	回归标准离差/Ls	预测标准离差/Ls
线性回归	36.8311	32.8323
多项式回归	36.8331	33.2948
指数回归	36.9251	33.0354
幂回归	36.9241	33.1108
双曲线回归	37.1755	33.3426

(2) 残差序列统计量估计 图 2 表明, 超程时间对于不同的动作次数具有较大的分散性, 这是因为电弧等电磨损的作用, 造成触点材料的转移和触点表面结构发生变化, 触点表面的凹凸程度不同。研究其残差子序列  $u_i = \hat{d}_i - t_i (i = 1, 2, \dots, m = 1000)$  的概率密度函数曲线 (图 4), 可以认为具有近似的正态分布特性。

假设残差序列在继电器整个寿命期间均服从正态分布  $N(L, R^2)$ , 且具有遍历性, 那么由于子样序列  $u_i = \hat{d}_i - t_i (i = 1, 2, \dots, m = 1000)$ , 可以估计置信水平为  $1 - A$  时  $L$  和  $R^2$  的置信区间<sup>[7]</sup> 分别为

$$L - t_{\alpha}(m - 1) \frac{s}{m - 1} \leq L \leq L + t_{\alpha}(m - 1) \frac{s}{m - 1} \quad (8)$$

$$\frac{ms^2}{V_{\alpha}^2(m - 1)} \leq R^2 \leq \frac{ms^2}{V_{1-\alpha}^2(m - 1)} \quad (9)$$

式中:  $t_{\alpha}(m - 1)$  为给定置信水平  $1 - A, 0 < A < 1$ , 在  $t$ -分布 (统计量  $\frac{\overline{(L - L)}}{s} \sim t(m - 1)$ ) 表中查出自由度  $m - 1$  对应的临界值;  $V_{\alpha}^2(m - 1), V_{1-\alpha}^2(m - 1)$  为给定置信水平  $1 - A, 0 < A < 1$ , 在  $V^2$ -分布 (统计量  $\frac{ns^2}{R^2} \sim V^2(m - 1)$ ) 表中查出自由度  $m - 1$  对应的临界值;  $L$  为残差子序列  $u_i (i = 1, 2, \dots, m = 1000)$  的数学期望  $L = (\sum_{i=1}^m u_i) / m$ ;  $s^2$  为残差子序列  $u_i (i = 1, 2, \dots, m = 1000)$  的方差  $s^2 = [\sum_{i=1}^m (u_i - L)^2] / m$ 。

设残差序列的上确界为  $U_L$ , 即

$$\hat{d}_i - t_i \leq U_L \quad (10)$$

根据正态分布的“3R 规则”<sup>[8]</sup> (即对于正态随机变量来说, 其值落在区间  $[L - 3R, L + 3R]$  内的概率为 99.74%), 由式 (8) 和式 (9) 分析可得  $U_L$  的估计值为

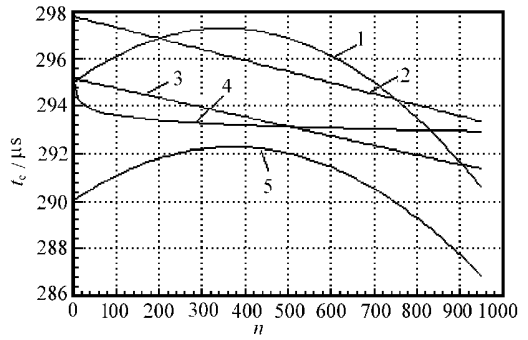


图 3 5 种时间序列回归曲线  
1—多项式回归; 2—线性回归; 3—指数回归;  
4—幂回归; 5—双曲线回归

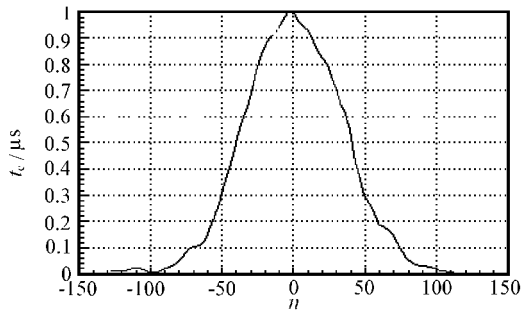


图 4 残差子序列分布图

$$U_L = L + t_A(m-1) \frac{s}{m-1} + 3 \frac{\sqrt{ms^2}}{\sqrt{(1-A^2)(m-1)}} \quad (11)$$

### 3 寿命预测与试验结果分析

设继电器可靠性寿命为  $N_s$ , 为了保证继电器可靠工作(使继电器触点可靠接触), 必有超程时间  $t_i \geq 50L_s$ , 且寿命预测残差  $\hat{\theta}_{N_s} - t_i \geq U_L$ , 由式(7)和式(11)得

$$296.76 - 0.00096931n = L + t_A(m-1) \frac{s}{m-1} + 3 \frac{\sqrt{ms^2}}{\sqrt{(1-A^2)(m-1)}} \quad (12)$$

由残差子序列  $u_i (i=1, 2, \dots, m=1000)$  可得  $L = -0.36215$ ,  $s^2 = 1340.1$ ; 查  $t$ -分布表<sup>[7]</sup> 和  $\chi^2$ -分布表<sup>[9]</sup>, 置信度为  $100(1-A)\% = 99.74\%$  时  $t_A(m-1) = 2.80$ ,  $\chi^2_{(1-A^2)(m-1)} = 1143.9$ . 则由式(12)得  $N_s \approx 145670$  次。

本研究对该继电器(4JR XM-3)进行了可靠性寿命试验(负载 28V, 3A, 连续动作频率为 2 次/s), 在试验过程中, 同时监测触点电压和超程时间。当动作次数达到 156100 次时, 超程时间的最小监测值已小于  $50L_s$ , 常开触点闭合时的触点电压已超过规定值 300mV(接触电阻 100m $\Omega$ ), 判定该继电器失效, 即该继电器的试验寿命为 156100 次。

比较预测和试验结果可知, 预测相对误差为 6.68%。影响预测准确度的原因:

(1) 受试验条件限制, 对 1000 次分析数据的采集过程并非按现行标准继电器寿命试验(动作 2 次/s)进行的, 试验周期较长(约 3min), 导致其与现行标准寿命试验的统计特性比较有差异;

(2) 分析假设的残差序列统计分布的遍历性具有一定的误差;

(3) 系单变量预测, 没有考虑燃弧时间、燃弧能量、吸合时间、释放时间、触点温升等因素对继电器寿命的影响。

### 参 考 文 献

- 1 美国军用规范. 带有可靠性指标的电磁继电器设计规范. MIL-R-83536, 1990. 29~39.
- 2 宋政相, 方鸿发. 负载参数对继电器分断直流电弧影响的研究. 低压电器, 1996, (2): 6~11.
- 3 翟国富, 赵新民, 刘茂恺. 电器可靠性寿命试验新方法的探讨. 低压电器, 1996, (6): 36~40.
- 4 杨冬莲. 对电寿命试验方法的探讨. 低压电器, 1995, (3): 22~24.
- 5 帅志良. 小容量交流接触器电寿命快速试验的探讨. 低压电器, 1983, (1): 23~27.
- 6 姜同敏. 用延拓试验方法预测产品磨损寿命的研究. 中国国防科技报告 GF81039, 1990. 1~29.
- 7 浙江大学数学系高等数学教研组. 概率论与数理统计. 北京: 人民教育出版社, 1979. 341~343.
- 8 Shoji Mtsuishi, Kunihisa Fujii. Life expectancy of electromagnetic relay contacts in near-zero-phase switching of alternating current. 34th Relay Conference Proceedings, 1986. 21~29.
- 9 第四机械工业部标准化研究所. 可靠性试验用表. 北京: 国防工业出版社, 1979. 258~262.