

继电器及装置可靠性试验(指数分布)及评定方法

许昌继电器研究所 韩天行

50年代兴起的可靠性研究已经在世界上许多工业发达的国家蓬蓬勃勃地开展起来了。它对提高产品质量,保证产品可靠工作起着极为重要的作用。可靠性技术是一门以概率论为理论基础,以数理统计为基本方法的新兴综合技术。

产品的可靠性特征参数是产品可靠性的主要特征量,它是产品质量的重要组成部分。开展产品的可靠性研究将成为提高产品质量、实现四个现代化的关键措施之一。近年来,国内许多行业也陆陆续续地开展可靠性研究,取得了可喜的成绩,促进了产品质量的提高。继电器及装置行业现正在开始这项研究,为提高产品质量做了一定的工作。

一 失效模式及失效判据

要开展产品的可靠性研究,首先要研究产品的失效模式,确定产品的失效判据。

从继电器和装置的工作方式来看,它的失效方式可以分为二类:即不正确的动作——误动和不正确的不动作——拒动。这些产品的工作状态都是通过继电器的触点系统的工作状态来反映。如果触点系统不能完成它们规定的工作状态,就认为这些产品出现失效或故障。

从继电器及装置的构成原理可分为二类:一类是电磁型继电器;另一类是静态型继电器。对于电磁型继电器,从可靠性角度可以看作由以下四部分所构成的串联系统。它的无故障工作模式由图1所示。

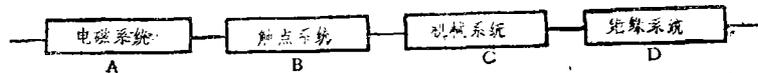


图1 继电器可靠性的方框图

从继电器的可靠工作的模式可以得出它们的可靠度,由(1)式所示。

$$R = R_A \cdot R_B \cdot R_C \cdot R_D \quad (1)$$

从图1可以看出,当其中一部分出现故障时,继电器就无法完成规定的功能,它们常见失效模式如图2所示,它的失效率由(2)式所示。

$$\lambda = \lambda_A + \lambda_B + \lambda_C + \lambda_D \quad (2)$$

对于静态型继电器一般是由各类变换器(如电流变换器、电压变换器、电抗变换器等)和各种电子元件(如电阻、电容、二极管、三极管、稳压管和集成电路等)组成的各种功能的触发器、延时电路以及出口回路等。出口回路一般是由小型电磁型继电器,它的失效模式也如图2所示。各类变换器的失效模式和电磁型继电器的电磁系统的

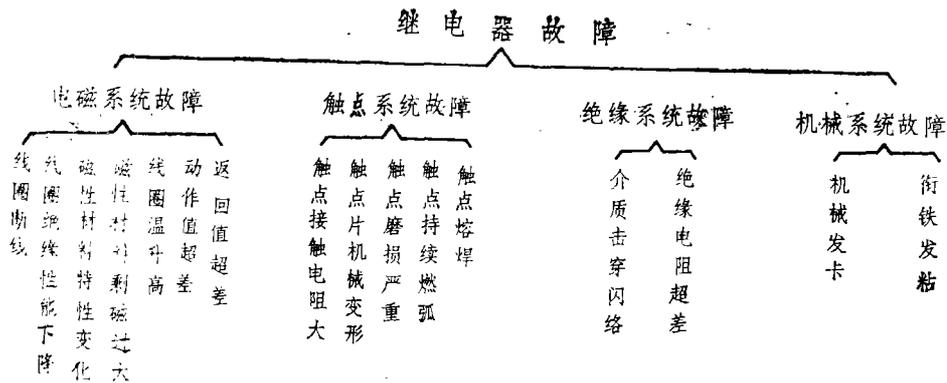


图2 电磁继电器失效模式

失效模式相类似，各种电子元器件的常见失效模式电子部有关部门作了大量工作。主要有元器件的特性恶化、特性参数变化、管子开路、短路、管脚断裂等等。

以上所示的各种常见的失效模式对产品性能的影响是不同的，根据其严重程度将失效分为致命失效和失效二类。它们的失效判据可归纳如下：

(一) 失效的判据

(1) 影响产品性能的外观和机械方面的失效

(2) 有或无继电器工作范围的缩小

(3) 定时限继电器、量度继电器及装置的基本性能参数的极限误差，一致性等特性参数超出产品标准的规定值。

(4) 绝缘性能失效判据

1. 介质强度：不能耐受介质强度试验电压规定值的75%（第一次试验应为规定值）。

2. 绝缘电阻：试验前和试验过程中的绝缘电阻检测应不低于规定值；试验后应不低于规定值的0.1倍

(5) 触点系统的失效判据

1. 动合触点在动作过程中不闭合，在返回过程中不断开。

2. 动断触点在动作过程中不断开，在返回过程中不闭合。

3. 触点间在动作过程中和返回过程中持续燃弧。

4. 触点片产生永久的机械变形。

(6) 电磁系统中线圈失效判据

1. 线圈温升超过规定值

2. 线圈电阻值超过规定值的15%（直流电压型）

(二) 致命失效

1. 触点系统出现熔接或其它形式的粘接

2. 衔铁系统出现发卡或其它形式的粘接

3. 线圈产生液化、碳化现象

4. 线圈断线

5. 绝缘系统出现击穿现象

二 失效分布的假设与产品的可靠性特征量

可靠性试验是与产品失效分布密切相关,目前大多数电工产品的失效分布还没有得出结果,对继电器及装置也是如此。目前在评定可靠性特征量时,先假定它们失效分布函数是服从指数函数,可以随着可靠性研究工作的深入得到真实的失效分布函数,再对试验方法进行修正。

根据继电器及装置产品的特点,我们将其产品分为可修复产品和不可修复产品二类,它们考核的可靠性特征量是不同的,现规定如下:

控制继电器考核失效率(λ);

保护用的有或无继电器和电磁型量度继电器为失效前的平均工作时间(M 、 T 、 T 、 F)

以上属于不可修复的产品

保护用的静态型量度继电器和装置考核平均无故障工作时间(M 、 T 、 B 、 F)

继电保护屏考核可靠性特征量有:平均无故障工作时间(M 、 T 、 B 、 F),平均维修时间(M 、 T 、 T 、 R),有效度(A),正确动作率和故障率($\lambda(\tau)$)

以上属于可修复的产品。

三 继电器及装置可靠性试验及评定方法

(一)可靠性试验条件

(1)环境条件(标准大气条件)

环境温度:15~35°C

相对湿度:45%~75%

大气压力:86~106kpa

(2)电源条件:

1.有或无继电器:

交流电源波形:正弦波,波形畸变不大于5%。

交流电源频率,50Hz±0.5Hz

直流电源中的交流分量(峰值—波纹系数)不大于6%。

2.量度继电器及装置:

交流电源波形:正弦波,波形畸变不大于2%或5%。

交流电源频率,50Hz±0.5%

交流电源中直流分量,峰值的2%

直流电源中交流分量:(峰值—纹波系数)不大于6%。

三相电源应为平衡电源

(二) 控制用有或无继电器的可靠性试验及评定方法。

控制用有或无继电器进行可靠性试验的主要内容是失效率等级试验，它分为失效率定级试验、失效率维持试验、失效率开级试验。

失效率等级试验应包括可靠性电寿命试验和可靠性机械寿命。

(1) 试验方案的选择：

1. 失效率等级名称，符号及最大失效率

根据我国继电器目前的质量现状，暂时先定亚五级、五级、六级和七级。其符号及最大失效率的规定见表1

表1 失效率等级名称、最大失效率

失效率等级名称	失效率等级符号	最大失效率 (1/10次)	失效率区间 (1/10次)
亚五级	YW	3×10^{-5}	$1 \times 10^{-4} > \lambda \geq 3 \times 10^{-5}$
五级	W	1×10^{-5}	$3 \times 10^{-5} > \lambda \geq 1 \times 10^{-5}$
六级	L	1×10^{-6}	$1 \times 10^{-5} > \lambda \geq 1 \times 10^{-6}$
七级	Q	1×10^{-7}	$1 \times 10^{-6} > \lambda \geq 1 \times 10^{-7}$

2. 失效率等级试验样品抽样表

失效率等级试验中选择定级试验和升级试验的置信度为90%，抽样表如表2所示，失效率维持试验选择置信度为60%，抽样表如表3所示。

3. 试验方案选择：

- a、根据失效率等级试验的种类，确定置信度和抽样使用的抽样表。
- b、选择合格判定数C

表2 失效率定级试验及升级试验抽样表 (置信度90%)

失效率等级符号	最大失效率 (1/10次)	累计的元件动作次数 (10^6 次)					
		C=0	C=1	C=2	C=3	C=4	C=5
YW	3×10^{-5}	0.768	1.30	1.77	2.33	2.66	3.09
W	1×10^{-5}	2.3	3.89	5.32	6.68	7.99	9.27
L	1×10^{-6}	23	38.9	53.2	66.8	79.9	92.7
Q	1×10^{-7}	230	389	532	668	799	927

合格判定数C选择越大，总的试验次数T就越大，要求试验样品的数量n越大，试验工作量就大。根据工作量的大小和试验样品的多少来合理选择合格判定数。从工作量来讲，C=0时工作量是最小，但C=0是不可取的方案。因为C=0时的接收概率太低，

表3 失效率维持试验抽样表 (置信度60%)

失效率等级 符 号	维持周期 (月)	累计元件动作次数 (10 ⁶ 次)				
		C=1	C=2	C=3	C=4	C=5
YW	6	0.67	1.04	1.39	1.74	2.10
W	6	2.02	3.11	4.18	5.24	6.29
L	12	20.2	31.1	41.8	52.4	62.9
Q	24	202	311	418	524	629

因此须要综合考虑。

根据以上几方面,控制继电器的可靠性评定中定级试验和升级试验选择 C = 2 或 C = 3; 维持试验选择 C = 3 或 C = 4, 维持试验不允许选择 C = 0。

c、确定总试验次数 T

根据合格判定数 c 由表 2 和表 3 可确定总的试验次数 T,

d、确定试验样品数 n 和每个样品的截止试验次数 t。

先选择截止试验次数 t, 然后根据 $T = nt$ 来计算 $n = \frac{T}{t}$ 。

截止试验次数 t 的确定应尽量接近产品技术标准规定的寿命次数, 但也应考虑样品数 n 的大小, 一般 n 的大小应不小于 5 ~ 10。

例: 某小型中间继电器的失效率定级试验, 为五级, 选择合格判定数 c = 3 时, 截止试验次数 t = 10⁶ 次时的样品数 n。

由表 2 可查出, 五级定级鉴定试验 c = 3 时的总试验次数 T = 6.68 × 10⁶ 次。

由 T = nt, 可确定 t = 10⁶ 次时的 n

$$n = \frac{T}{t} = \frac{6.68 \times 10^6}{10^6} = 6.68$$

取 n = 7

所以失效率 W 级定级试验, 当 c = 3 时, 截止试验次数为 10⁶ 次时, 应抽取 7 只继电器进行试验。

若 t = 10⁵ 次时, 则 $n = \frac{T}{t} = \frac{6.68 \times 10^6}{10^5} = 66.8$

取 n = 67

截止试验次数为 10⁵ 次时, 应抽取 67 只继电器进行试验。

(2) 试验程序:

1. 由试验方案确定抽样样品数, 在经检查合格的一批产品中抽取。
2. 试验样品首先按技术条件规定的出厂检查项目 (如动作值、返回值、动作时间、返回时间、介质强度、绝缘电阻、线圈电阻等等) 进行检查测试。

投入可靠性试验的样品必须是检查测试合格的产品, 如样品中有不合格的产品时,

可以调整或替换，并经检查合格后，方可投入可靠性试验，对于失效的样品可不记入累积失效数中。

3. 试验线路应有自动监测装置，在目前无自动监测装置的厂家，可按链式电路进行试验。链式线路可按图3进行接线

4. 试验结束后，应再次按产品标准规定进行出厂检查试验。

(3) 试验结果评定：

1. 试验次数(时间) T：应符合试验方案所规定的累积试验次数(时间)。

2. 累积失效数 r 的统计，试验结束后，应对试验过程中发生的所有失效根据获得的完整数据和失效判据进行分析，最后确定是相关失效还是非相关失效。

对于非相关失效可不统计于累积失效数；对于相关失效还应根据其失效的严重程度，区分失效和致命失效，分别进行统计。

3. 试验结果评定：

a、出现一次致命失效，可作出拒收判定，

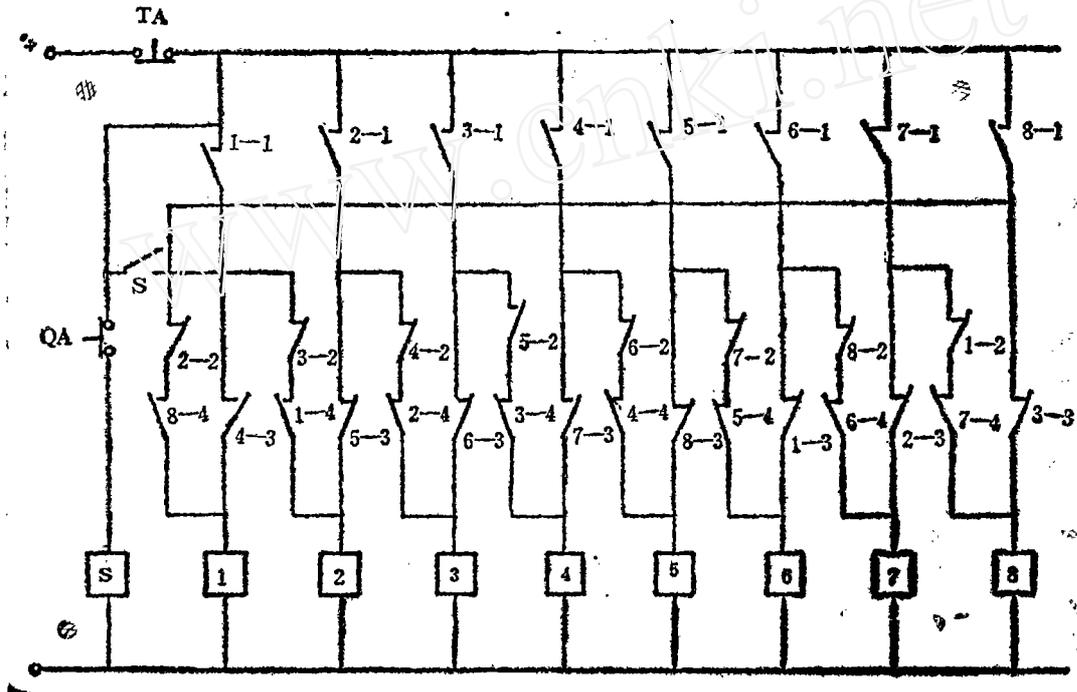


图3 8台继电器可靠性链式试验线路

b、对于失效的累积数应根据合格判定数 c 来判断接收或拒收。

当累积失效数 $r >$ 合格判定数 c：拒收； 当累积失效数 $r \leq$ 合格判定数 c：接收。

(三) 继电保护用的继电器及装置的可靠性试验及评定方法。

(1) 试验方案的选择

由 α 、 β 、 D_n (鉴别比) 来确定定时截尾的试验方案。

1. 由生产方，使用方共同协商 α 、 β 和 D_n 值。

2. 产品规定可靠性特征量M TBF (或M TTF) 值, 应为置信区间的下限值 θ_L 。
即M TBF (或M TTF) = $\theta_L = \theta_L$ 。

3. 根据鉴别比 D_n , 决定置信区间的上限值 θ_0 。
 $\theta_0 = \theta_L = D_n \theta_L = D_n \theta_L$

4. 根据 α 、 β 、 D_n 值从表4 定时截尾试验表查出总试验时间的截尾时间 $T = K \theta_0$ 和允许失效数 c 。

K是以 θ_0 的倍数列入定时截尾试验表中。

表4 定时截尾试验方案

方案编号	方案的特征			截尾时间 (θ_0 的 倍数)	允许失 效数 C	实际的风险 (%)	
	标称值%		D_n			$\theta = \theta_0$	$\theta = \theta_L$
	α	β				α'	β'
1	10	10	1.5	30.0	37	12.0	9.9
2	10	10	2	9.4	44	9.6	10.6
3	10	10	3	3.1	6	9.9	9.9
4	10	10	5	1.10	3	10.0	8.8
5	20	20	1.5	14.1	18	18.0	21.7
6	20	20	2	3.9	6	20.0	21.0
7	20	20	3	1.46	3	18.1	18.9
8	30	30	1.5	5.3	7	23.8	32.0
9	30	30	2	1.84	3	28.0	28.9
10	35	40	1.25	6.7	8	35.7	40.3

5. 根据 $T = nt$ 来选择 n 和 t 值

例: 制定某类继电器的平均寿命试验方案。若使用方、生产方共同商定 $\alpha = \beta = 0.1$
 $D_n = 3$, 产品标准要求平均寿命为5000小时;

1) 根据 $\theta_L = 5000$ 小时, 和 $D_n = 3$

可决定 $\theta_0 = 3 \theta_L = 3 \times 5000 = 15000$ (小时)

2) 由 $\alpha = \beta = 0.1$, $D_n = 3$, 可知寿命试验方案的编号为3。从表4可查出: 试验的截尾时间为 $3.1\theta_0$ 和允许失效数 $c = 6$

即 $T = 3.1 \times \theta_0 = 3.1 \times 15000 = 46500$ (小时)

如选择试验样品数 $n = 30$ 台做截尾寿命试验, 则试验截止时间 t 为:

$$t = \frac{T}{n} = \frac{46500}{30} = 1550 \text{小时。}$$

试验样品 n 的选择原则: 可根据生产批量的大小和总的累积试验时间的长短来决定。一般总的累积试验时间短时, 可少选几台。

如根据生产批量大小选择样品数时,可按表5推荐数选定。

表5 推荐抽样数

产品批量	1~3	4~16	17~52	53~96	97~200	200以上
最佳抽样数	全部	3	5	8	13	20

在进行继电器及装置可靠性试验时,要定期进行检测,测试周期确定的原则,当产品寿命分布为指数分布时可按 $\lg \Delta \tau = \lg \tau_{i+1} - \lg \tau_i = \frac{1}{3}$ 来确定。测试时间见表6。

表6 测试时间表

i	1	2	3	4	5	6	7	8	...
$\lg \Delta \tau$	0	0.33	0.67	1	1.33	1.67	2	2.33	...
τ (时)	1	2	5	10	20	50	100	200	...

(2) 试验程序

1. 由试验方案确定抽样样品数,并在经过检查合格的一批产品中抽样。

2. 抽样样品在试验前要进行出厂试验项目的检测。主要有动作值、返回值、动作时间、返回时间等特性参数,并决定这些特性参数的极限误差(或平均误差),一致性,还有绝缘电阻,介质强度,线圈电阻等。测试合格的样品可投入可靠性试验。

在测试过程中,如发现性能不符合产品技术操作要求时,可以维修或替换为合格品后再投入试验。

3. 试验线路

机电型有或无继电器,加一电位于线圈一端。

量度继电器:单输入激励量的量度继电器加入激励量使继电器处于不动作状态,激励量的大小应在相应的技术文件中给予规定。双输入激励量的量度继电器(如功率继电器、阻抗继电器)电流回路施加的激励量为零,电压回路施加的激励量为额定电压或技术文件规定的其它值,继电器处于不动作状态。

装置:应按技术文件规定施加激励量,也处于准备工作状态(即不动作状态)。

静态型量度继电器及装置除施加上述相应的激励量外,还应施加直流辅助激励量。

继电器的触点回路和装置的出口继电器的输出回路应对其工作状态进行监测。

4. 定期检测:

a、按测试周期定期检查产品出厂试验的基本性能。

b、其它检测内容,

静态型产品应进行拉合直流电源的试验。

当试验时间进行到总试验时间的二分之一时,应进行绝缘试验(包括介质强度,冲击电压和绝缘电阻测试等试验)。静态型产品还应增加抗干扰试验。

5. 最后检测。

试验结束后，应按定期检测的内容对样品再进行检测。

6. 性能检测的失效判据按本文第一部分的规定。

(3) 试验结果的评定：

1. 累积试验时间 T 的统计：

按 $T = \sum_{m=1}^n \sum_j t_{mj}$ ；统计累积试验时间

其中：n—被试样品总数

$\sum_j t_{mj}$ —第 m 个样品的试验时间总和。

t_{mj} —第 m 个样品第 j 次试验时间

累积试验时间应达到试验方案规定的试验时间的要求。

2. 累积失效数 r 的统计：

试验结束后，应对试验过程中发生的所有失效根据所获得的完整数据和失效判据进行分析，划分相关失效和非相关失效。对于非相关失效可不进行统计。对于相关失效还应按失效的严重程度，划分失效或致命失效，分别进行统计。

3. 试验结果评定：

出现一次致命失效，可作出拒收判定。

对于失效的累积数 r 应根据允许失效数 c 来判断接收或拒收。

当 $r < c$ 时，试验接收；

当 $r \geq c$ 时，试验拒收。

四 继电保护屏可靠性现场统计和评估

继电保护采用现场试验来统计，评估可靠性特征量，其方法介绍如下：

(1) 工作时间的累积和维修时间的累积。

如一台保护屏运行过程如图 4 所示。

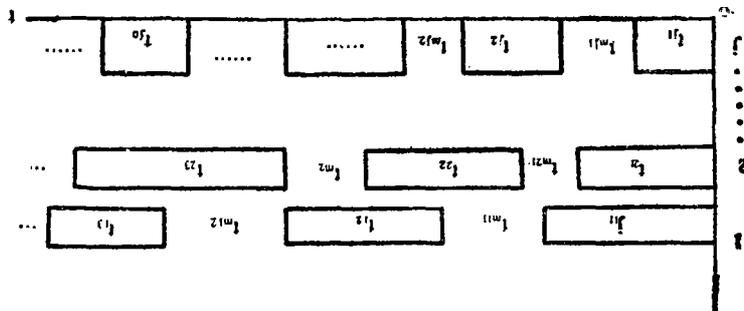


图 4 保护屏工作示意图

图中： t_w —工作时间

t_m —维修时间

待命时间未列入

保护屏工作时间累积为 $T = \sum_{i=1}^n \sum_j t_{i,j}$

保护屏维修时间累积为 $T_m = \sum_{i=1}^n \sum_j t_{m,i,j}$

(2) 产品可靠性特征量的评估:

1. MTBF,

a. 计算MTBF的点估计值 m :

$$m = \frac{T}{r} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_j t_{i,j}}{r}$$

式中: r —故障次数

b. 计算MTBF的置信区间的置信限: m_L 、 m_H :

$$m_L = \frac{2T}{\chi^2(1-\frac{\alpha}{2}, 2r+2)} \quad m_H = \frac{2T}{\chi^2(\frac{\alpha}{2}, 2r)}$$

c. 计算MTBF的单侧置信下限 m_L

$$m_L = \frac{2T}{\chi^2(1-\alpha, 2r+2)}$$

χ^2 值应根据累积故障数 r 和规定的置信区的置信水平由 χ^2 分布位数表查出。

当故障数为零时的单侧下限估计值可按 $m_L = \frac{2T}{\chi^2(1-\alpha, 2)}$ 来计算。

当置信水平为90%时, $m_L = \frac{T}{2.3}$

2. MTTR

$$MTTR = \frac{T_m}{r} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_j t_{m,i,j}}{r}$$

3. 故障率: $\lambda = \frac{r}{T}$

4. 有效度 $A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$

5. 正确动作率 = $\frac{\text{正确动作次数}}{T}$

6. 不正确动作率 = $\frac{\text{不正确动作次数}}{T}$

拒动率 = $\frac{\text{拒动次数}}{T}$

误动率 = $\frac{\text{误动次数}}{T}$

参考文献

1. 继电器及装置可靠性基础知识讲座 韩天行 1987.6
2. 局批企标JB/DQ6296—88《继电器及装置可靠性试验(指数分布)导则及评估方法》
3. 低压电器可靠性技术 陆俭国
4. 继电器及继电保护装置现场统计和可靠性试验探讨 韩天行 胡伟鸿 1986