

# 接触器式继电器的可靠性验证试验抽样方案的研究

刘帼巾, 陆俭国, 赵靖英

(河北工业大学电器研究所, 天津市 红桥区 300130)

## Study on Sample Plan of Reliability Compliance Test of Contactor Relay

LIU Guo-jin, LU Jian-guo, ZHAO Jing-ying

(Institute of electrical apparatus, Hebei University of technology, Hongqiao District, Tianjin 300130, China)

**ABSTRACT:** In order to analyze reliability level of contactor relay, the fault ratio is considered as the reliability characteristic which is the same as the international and national standards of electrical apparatus. The fault ratio ranks are established as index based on the product level. The operational features and the fault modes of contactor relay are analyzed from the result of experiments. The contactor relay is frequently-operated control electrical apparatus and has two kinds of failures, poor contact and poor break that may happen occasionally or permanently. That may have different effect on its reliability. The sample plan of reliability compliance test is gained from the relation of operation time and the acceptable fault time on base of reliability theory. The sample according to reliability compliance test plan introduced can ensure and measure the reliability level.

**KEY WORDS:** contactor relay; reliability; sample plan; reliability index; control electrical apparatus

**摘要:** 为定量分析接触器式继电器的可靠性水平, 借鉴目前国内外标准和可靠性研究成果, 确定了失效率作为它的可靠性特征量; 根据国内接触器式继电器的实际生产水平, 划分了失效率等级作为可靠性指标来确定产品可靠性水平; 为分析接触器式继电器的工作特点和失效模式, 进行多组试验结果表明接触器式继电器接触不良和断开不良的失效模式有偶然失效和永久失效两种表现型式; 不同表现对可靠性的影响不同, 根据可靠性抽样理论, 由操作时间与允许失效数之间的关系推导出可靠性验证试验抽样方案。按照该文的可靠性验证试验抽样方案抽取样品进行检测, 可确定接触器式继电器的可靠性水平。

**关键词:** 接触器式继电器; 可靠性; 抽样方案; 可靠性指标; 控制电器

## 0 引言

低压电器的可靠性直接影响到所控制系统的可靠性, 因而低压电器的可靠性研究越来越受到学

术界的关注, 已成为国内外研究的热点问题。接触器式继电器是低压电器的主要产品, 是目前自动控制系统中必不可少的控制元件, 应用面广, 使用量大, 但由于国产的可靠性不高, 使得使用场合和销量都受到限制。因而改变目前国产接触器式继电器可靠性水平低的问题迫在眉睫<sup>[1]</sup>。

可靠性验证试验是可靠性研究的一个重要内容。它是指验证产品可靠性特征量的数值是否符合规定的可靠性要求的试验, 其目的在于加强产品在设计、研制和生产中的可靠性保证活动。可靠性验证试验必须针对产品的工作特点进行, 这样才能真实反映可靠性水平。而目前我国没有针对接触器式继电器的可靠性试验的标准方法。本文借鉴继电器、接触器等同类产品的国家标准及行业标准, 根据已有可靠性研究成果<sup>[2-8]</sup>, 对接触器式继电器的可靠性试验方法进行了研究。

## 1 接触器式继电器的可靠性指标

目前, 国内外对小型断路器、低压断路器、量度继电器、高压断路器、继电器等电器的可靠性进行了大量的研究<sup>[9-14]</sup>, 但对接触器式继电器可靠性检测的研究甚少。其它电器的可靠性检测的方法对接触器式继电器可靠性研究有借鉴, 但由于不同电器的应用场合、工作条件、技术特征都不同, 因而可靠性检测方法不能直接套用到接触器式继电器。

对于接触器式继电器, 一般可假定其失效分布类型为指数分布, 亦即其失效率为常数(不随时间的增加而变化), 所以国内外继电器标准中一般均以失效率的高低作为继电器的可靠性指标<sup>[15-17]</sup>。为与国内外有关标准协调一致, 用失效率的高低作为接触器式继电器的可靠性指标来定量反映接触器式继电器的可靠性水平。失效率是指产品工作到 $t$ 时刻后

的单位时间内发生失效的概率。接触器式继电器属于控制类电器，对它提出的要求是投入使用后，应保证可靠工作，不发生故障。选用失效率作为接触器式继电器的可靠性特征量，可以方便地定量评价产品的可靠性。GB/T15510-1995 按最大失效率的数值分为亚五级、五级、六级、七级(即YW、W、L、Q)。而目前国内生产的接触器式继电器大多无法达到标准中规定的最低等级即亚五级。为能够准确反映产品的可靠性等级，增加划分可靠性等级，亚四级、四级、亚五级、五级、六级、七级，见表 1。这样做并不是降低了可靠性要求，而是进一步细分了可靠性等级。

表 1 接触器式继电器失效率等级和最大失效率  
Tab. 1 The failure ratio rank and its maximum

失效率等级	最大失效率 $\lambda_{\max}$ (1/10 次)
亚四级	$3 \times 10^{-4}$
四级	$1 \times 10^{-4}$
亚五级	$3 \times 10^{-5}$
五级	$1 \times 10^{-5}$
六级	$1 \times 10^{-6}$
七级	$1 \times 10^{-7}$

## 2 接触器式继电器失效模式的分析

制定可行的可靠性抽样方案，应考虑接触器式继电器的工作特点和失效模式。为分析接触器式继电器的失效模式，对不同型号规格的接触器式继电器进行试验，分析产品的失效模式。接触器式继电器是以电磁铁线圈作为输入元件，触点作为输出元件的低压电器元件。线圈通电后，触点接通或分断控制电路。接触器式继电器的失效集中在触点系统，主要可能产生 2 种类型的失效，一种是触点接触不良，另一种是触点断开不良。不同大小的负载，对试品触点的工作有不同影响<sup>[18-19]</sup>。

因而，在试验中循环操作试品，试品的触点通以不同负载电流，检测触点的工作状态。不同型号试品，不同负载的多组试验中，试品都表现出偶然失效和永久失效 2 种型式。例如，在对 8 台某型号的接触器式继电器的一组试验中，线圈通以额定 220V 交流电压，触点通以直流 24V、0.1A 的负载电流，负载因数为 40%，操作频率为 1200 次/小时。试验中记录失效时间和失效的试品触点号，以及发生的失效类型。试验中设置 4 次连续检测失效后，不再检测该触点状态。试品循环操作 200000 次，试品失效型式可由 2 个触点说明：1 号试品的 7 号触点和 9 号试品的 7 号触点的失效数据列在表 2 中。

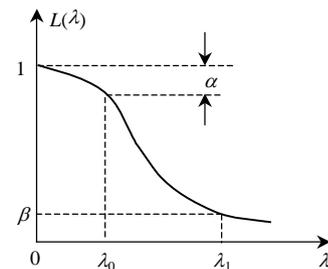
表 2 接触器式继电器部分触点试验数据  
Tab. 2 A part of test data of contactor relay

试品号	触点号	失效时间/次	失效类型
1	7	4134	接触不良
9	7	30422	接触不良
9	7	30423	接触不良
9	7	30424	接触不良
9	7	30425	接触不良

9 号试品的 7 号触点从 30422 次后连续检测中都出现了失效。试验后检查，9 号试品的 7 号触点接触电阻高达  $3\Omega$ ，已不能可靠闭合。这类触点的失效是由于部件磨损或损坏引起的永久失效，即动作过程中发生不再消失的失效。1 号试品的 7 号触点只出现一次失效，随后的操作中，失效不再出现，试验后检查不出试品的部件的损坏。这类试品触点出现的是偶然失效，即出现失效后，在随后的操作中，恢复正常工作，具有一定偶然性的失效。这种在动作过程中曾发生，但在重新动作中可自行消失的偶然失效是很难分析和避免的，环境条件中的一些偶然因素如：灰尘、晃动以及冲击振荡都可能引起接触器式继电器的偶然失效。

## 3 接触器式继电器可靠性抽样方案：

接触器式继电器是生产量和使用量都很大的低压电器，而且可靠性检测试验简单，只检测触点状态，因而接触器式继电器的抽样检查方案采用一次抽样检查方案。由可靠性抽样理论<sup>[20]</sup>可知，失效率抽样特性曲线可由图 1 表示。



$\lambda_0$ —可接收的失效率； $\alpha$ —生产者风险率；  
 $\lambda_1$ —不可接收失效率； $\beta$ —使用者风险率

图 1 失效率抽检特性曲线

Fig. 1 Sample curve of failure ratio

失效率抽样特性曲线应尽量接近理想的阶跃形抽样特性曲线，当接触器式继电器失效率小于合格失效率水平 $\lambda_0$ ，应认为这批产品是合格的，当 $\lambda=\lambda_0$ 时被误判为不合格而拒收的概率 $\alpha$ ， $\alpha$ 称为生产者风险率。当接触器式继电器的失效率大于批失效率容限 $\lambda_1$ 时，应认为这批产品是不合格的， $\lambda=\lambda_1$ 时接触器式继电器以 $\beta$ 的概率被误判为合格的， $\beta$ 称为使用者风险率。

$$1 - L(\lambda_0) = \alpha \quad (1)$$

$$L(\lambda_1) = \beta \quad (2)$$

$L(\lambda)$ 可用二项概率公式计算,接触器式继电器寿命服从单参数指数分布,失效率抽样方案的接收概率  $L(\lambda)$ 由式(3)计算

$$L(\lambda) = \sum_{r=0}^{A_c} C_n^r (1 - e^{-\lambda t_g})^r (e^{-\lambda t_g})^{n-r} \quad (3)$$

失效率抽样方案就是根据给定的  $\lambda_0$ 、 $\lambda_1$ 、 $\alpha$  和  $\beta$  值来确定抽样数  $n$  和允许失效数  $A_c$ 。失效率抽样检查中常常采用  $\lambda_1$  方案或  $LTFR$  方案,即只根据给定的  $\lambda_1$ 、 $\beta$  值来确定失效率试验抽样方案。由一个方程来确定 2 个未知数会有许多组解,所以取  $A_c=0,1,2,\dots$ , 求出相应的  $n$  值,得到失效率试验抽样方案。

接触器式继电器是频繁操作的电器,它的机械寿命可达数百万次,电寿命可达数十万次。对接触器式继电器的可靠性考核,主要是考核在工作过程中,发生失效不能正常工作的概率。采用抽样数  $n$  和允许失效数  $A_c$  的试验抽样方案显然是不实用的。

而且偶然失效和永久失效对接触器式继电器的工作的影响是不同的,因而可靠性考核应考虑以上不同情况。同一台试品可以允许发生一次以上的偶然失效。在可靠性验证试验方案中,希望得到试品操作时间  $T$  与允许失效数  $A_c$  之间的关系来确定接触器式继电器的可靠性水平。

设所抽  $n$  个样品试验到规定时间(或操作次数)  $t_g$  时失效  $r$  个,一般接触器式继电器的失效率较低,  $\lambda t_g$  不太大,满足  $n\lambda t_g < 5$  及  $\lambda t_g < 0.1$ , 此时,二项概率可用泊松概率近似,接触器式继电器的接受概率  $L(\lambda)$ 可用式(4)计算

$$L(\lambda) \approx \sum_{r=0}^{A_c} \frac{e^{-n\lambda t_g} (n\lambda t_g)^r}{r!} \quad (4)$$

如令:  $T = nt_g$  (5)

$T$  为  $n$  个试验试品的总试验时间

$$L(\lambda) \approx \sum_{r=0}^{A_c} e^{-\lambda T} \frac{(\lambda T)^r}{r!} \quad (6)$$

将式(6)代入式(2)可得:

$$L(\lambda_1) = \sum_{r=0}^{A_c} e^{-\lambda_1 T} \frac{(\lambda_1 T)^r}{r!} = \beta \quad (7)$$

若作进一步变换可以得到

$$\sum_{r=0}^{A_c} e^{-\lambda_1 T} \frac{(\lambda_1 T)^r}{r!} = \int_{2\lambda_1 T}^{\infty} f(x, 2A_c + 2) dx \quad (8)$$

其中,  $f(x, 2A_c + 2)$  为自由度等于  $2A_c + 2$  的  $\chi^2$  分布

的密度函数。

而  $\beta = \int_{2\lambda_1 T}^{\infty} f(x, 2A_c + 2) dx$  (9)

$2\lambda_1 T$  与  $\beta$  间的关系可用图 2 表示。

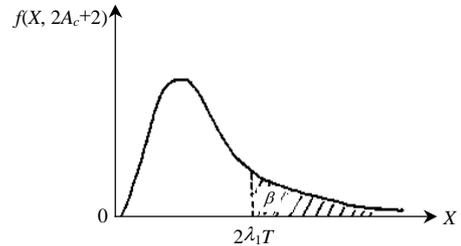


图 2  $2\lambda_1 T$  与  $\beta$  间的关系

Fig. 2 The relation between  $2\lambda_1 T$  and  $\beta$

显然,  $2\lambda_1 T$  就等于自由度为  $2A_c + 2$  的  $\chi^2$  分布的  $1 - \beta$  下侧分位点  $\chi_{1-\beta}^2(2A_c + 2)$ , 即

$$2\lambda_1 T = \chi_{1-\beta}^2(2A_c + 2) \quad (10)$$

或  $T = \frac{\chi_{1-\beta}^2(2A_c + 2)}{2\lambda_1}$  (11)

若式(11)中的  $\lambda_1$  用表 1 中所定的失效率等级的最大失效率  $\lambda_{max}$  替代,置信度  $1 - \beta$  用 0.9 代入,则由式(11)求得的  $T$  值即为表 3 所示的失效率验证试验方案中的截尾时间  $T_c$ 。对于不同的  $A_c$  值,可求得相应的  $T_c$  值,从而可得出表 3。

表 3 失效率验证试验方案  
Tab. 3 Compliant test plan of failure ratio

失效率等级	截尾时间 $T_c(10^6$ 次)									
	$A_c=0$	$A_c=1$	$A_c=2$	$A_c=3$	$A_c=4$	$A_c=5$	$A_c=6$	$A_c=7$	$A_c=8$	$A_c=9$
亚四级	0.0768	0.130	0.177	0.223	0.266	0.309	0.351	0.392	0.433	0.474
四级	0.23	0.389	0.532	0.668	0.799	0.927	1.053	1.177	1.30	1.421
亚五级	0.768	1.30	1.77	2.23	2.66	3.09	3.51	3.92	4.33	4.74
五级	2.3	3.89	5.32	6.68	7.99	9.27	10.53	11.77	13.0	14.21
六级	23	38.9	53.2	66.8	79.9	92.7	105.3	117.7	130	142.1
七级	230	389	532	668	799	927	1053	1177	1300	1421

由表 3 的失效率验证试验方案可按照以下步骤进行可靠性验证试验。

(1) 选定确定失效率等级。

(2) 选择允许失效数  $A_c$ 。

允许失效数  $A_c$  应尽量避免过小,但若选择过大,试验总次数就很大,试验工作量大。

(3) 由表 2 查出试品的截尾时间  $T_c$ , 即试品总操作次数。

(4) 根据试品的电寿命适当选定试品的截止时间  $t_c$ 。

(5) 从批量产品中,随机抽取  $n$  个试品。

$n$  的数值可由式(12)计算

$$n = T_c / t_c + A_c \quad (12)$$

(6) 在试品的试验条件下,操作试品。

(7) 统计试验中的失效数  $r$ 。

(8) 统计试验总次数  $T$ 。

(9) 试验结果判定。

判定产品是否达到选定的失效率等级：试品的操作次数达到选定试品的截尾时间，试品发生的失效数不大于允许失效数，则可判定该批试品达到选定的失效率等级；试品的操作次数未达到选定试品的截尾时间，试品发生的失效数  $r$  大于允许失效数  $A_c$ ，则可判定该批试品不能达到选定的失效率等级。

通过以上步骤，进行接触器式继电器可靠性抽样试验，可对其可靠性水平进行评定。

## 4 结论

本文对接触器式继电器进行了可靠性研究，根据产品是频繁操作控制电器的工作特点和产生的失效型式分析，由可靠性理论得出以下结果：

(1) 以失效率作为接触器式继电器可靠性特征量来定量考核其可靠性水平。

(2) 按最大失效率划分了失效率等级作为可靠性指标；把失效率等级分为亚四级、四级、亚五级、五级、六级、七级共 6 个等级。

(3) 根据可靠性抽样理论，得到了接触器式继电器的试品操作时间与允许失效数的失效率可靠性验证试验抽样方案。

## 参考文献

- [1] 刘炳彰. 低压电器可靠性的现场调查和分析研究[J]. 低压电器 2002, (2): 11-13.  
Liu Bingzhang. Field survey and analysis on reliability of low voltage electrical apparatus[J]. Low voltage electrical apparatus, 2002, (2): 11-13(in Chinese).
- [2] Teverovsky A, Sharma A K. Reliability evaluation of thermally actuated micromachined relays for space applications[C]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, USA, 2003.
- [3] Sharma A, Teverovsky A. Evaluation of failure modes and mechanisms in thermally actuated micromachined relays for harsh environments space applications[C]. SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference Proceedings, Brazil, 2003.
- [4] Rieder W F, Strof T W. Reliability of commercial relays during life tests at low electrical contact load[J]. Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, IEEE Transactions on, 1992, 15(2): 166-171.
- [5] 翟国富, 王淑娟. 电器可靠性失效分析中极大似然设计方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(3): 90-92.  
Zhai Guofu, Wang Shujuan. The research on method of maximum likelihood estimation for apparatus reliability failure analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(3): 90-92(in Chinese).
- [6] 宋云亭, 郭永基. 改进的概率稳定评估方法及其应用[J]. 电网技术, 2003, 27(3): 23-27.  
Song Yunting, Guo Yongji. Improved algorithm of probabilistic stability evaluation and its application[J]. Power System Technology, 2003, 27(3): 23-27(in Chinese).
- [7] 韩小涛, 尹项根, 张哲. 故障树分析法在变电站通信系统可靠性分析中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 56-59.  
Han Xiaotao, Yin Xianggen, Zhang Zhe. Application of fault tree analysis method in reliability analysis of substation communication system[J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 56-59(in Chinese).
- [8] 任震, 张静伟, 张晋昕. 基于偏最小二乘法的设备故障率计算[J]. 电网技术 2005, 29(5): 12-15, 42.  
Ren Zhen, Zhang Jingwei, Zhang Jinxin. Calculation of failure rate of power equipments based on partial least square method[J]. Power System Technology, 2005, 29(5): 12-15, 42(in Chinese).
- [9] 陆俭国, 王景芹. 低压断路器可靠习惯评估方法与验证方案的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 193-197.  
Lu Jianguo, Wang Jingqin. Study on the reliability evaluation method and compliance test sample plan of low voltage circuit breaker [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (12): 193 -197(in Chinese).
- [10] Liu Guojin, Lu Jianguo. Reliability compliance test of residual current device[C]. Proceeding of the 1st international conference on reliability of electrical products and electrical contacts, China, 2004.
- [11] Roettjer P. Testing techniques to improve relay reliability [J]. Evaluation Engineering, 2005, 44(4): 44-48.
- [12] Spengen W M V, Puers R, Mertens R, et al. A low frequency electrical test set-up for the reliability assessment of capacitive RF MEMS switches[J]. Journal of micromechanics and microengineering, 2003.
- [13] Clark K. Distribution automation to improve circuit reliability [C]. 57th Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2004 USA, 2004: 91-96.
- [14] 曾克娥. 电力系统继电保护装置运行可靠性指标探讨[J]. 电网技术, 2004, 28(14): 83-85.  
Zeng Ke-e. Research on operation situation and reliability indices of protective relaying power system[J]. Power System Technology, 2004, 28(14): 83-85(in Chinese).
- [15] MIL-R-39016. 有可靠性指标的电磁继电器总规范[S], 1962.  
MIL-R-39016. General specification for electromagnetic relay with reliability index[S], 1962.
- [16] GB/T15510-1995 控制用继电器可靠性试验通则[S], 1995.  
GB/T15510-1995 General rules for reliability test of electromagnetic relay for control circuits[S], 1995.
- [17] JB/T10522-2005 小容量交流接触器可靠性试验方法[S], 2005.  
JB/T10522-2005 Reliability test method for lower capacity alternating current contactor[S], 2005.
- [18] 荣命哲, 王其平. 小电流下电触头材料转移的研究[J]. 中国电机工程学报, 1990, 10(3): 42-46.  
Rong Minzhe, Wang Qiping. The study of material transfer of electric contacts in low current[J]. Proceedings of the CSEE, 1990, 10(3): 42-46(in Chinese).
- [19] Naoki M. Effect of erosion and contact resistance of electrical contacts in n-hexane on contact reliability[C]. Electrical Contacts, Proceedings of the Annual Holm Conference on Electrical Contacts, USA, 1999.
- [20] 陆俭国. 电器可靠性理论及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.

收稿日期: 2007-01-05。

作者简介:

刘帼巾(1972—), 女, 副教授, 从事低压电器可靠性的研究, liuguojin72@163.com;

陆俭国(1936—), 男, 博士生导师, 从事低压电器可靠性的研究; 赵靖英(1975—), 女, 博士, 从事低压电器可靠性的研究。

(责任编辑 韩 蕾)