

文章编号: 1000-6893(2002)04-0349-04

机电产品寿命与可靠性综合验证试验技术研究

龚庆祥, 王自力

(北京航空航天大学 工程系统工程系, 北京 100083)

STUDY ON ELECTROMECHANICAL PRODUCTS LIFE AND RELIABILITY INTEGRATED COMPLIANCE TEST

GONG Qing-xiang, WANG Zi-li

(Reliability Engineering Research Institute, Beijing University of
Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘要: 大量机电产品既有可靠性指标要求,又有寿命指标要求,且在研制阶段结束时,需通过试验给出两种指标的验证结果。在对寿命与可靠性综合验证试验的可行性研究的基础上,提出了对其可靠性与寿命指标同时进行综合验证的试验方案。主要介绍该试验方案中的关键内容:试验时间、失效(故障)判据、试验接收与拒收的判决准则的确定、试验结果的评估方法等。该试验方案的应用,为部分机电产品的寿命与可靠性试验验证提供了一个合理的、高效费比的技术途径。

关键词: 机电产品; 寿命; 可靠性; 综合验证

关键词: V215.7 文献标识码: A

Abstract: Most electromechanical products have both reliability and life requirements, and are required to give tested results of the two requirements. On the basis of feasibility study to the life and reliability integrated compliance test, the authors bring forward the test plans that can make the reliability and life synthetically tested at the same time. This paper introduces the key contents: the testing time, the determination of failure criteria, acceptance and rejection criteria, and the evaluation of the testing result. The application of these plans will offer a reasonable and high effectiveness-cost rate way for life and reliability compliance test of some electromechanical products.

Key words: electromechanical product; life; reliability; integrated compliance

1 寿命与可靠性综合验证试验的可行性

能否进行寿命与可靠性综合验证试验,关键取决于产品的寿命试验剖面与可靠性试验剖面是否一致。根据寿命试验(加速寿命试验除外)和可靠性鉴定试验的目的,受试产品均应在尽可能真实地模拟产品的实际使用环境(包括工作应力和环境应力)下进行,而产品的寿命剖面(包括任务剖面)正是产品使用环境的真实描述。因此,由同一寿命剖面制定的寿命试验剖面和可靠性鉴定试验剖面应该是一致的,这为寿命与可靠性综合验证试验方案的实施奠定了基础。

笔者查阅了大量的美国军用标准与机电产品技术规范,这些文献虽没有提出寿命与可靠性综合验证的试验方案,但可看出,这些产品的寿命(耐久)试验条件均与可靠性试验条件相同,并明确允许进行综合验证。综合验证的方式有以下两

种:

(1) 用已顺利通过可靠性试验的试品继续进行规定的寿命试验,可靠性试验过程中所累积的试验时间可以加到寿命试验时间中去。

(2) 如产品已顺利通过了可靠性试验,受试产品数量等于或大于规定的寿命试验件数,且每个受试产品的试验时间寿命大于等于试验规定的工作时间数,则可免做寿命试验,即成功的可靠性试验可以代替寿命试验。

由此可见,机电产品可以进行寿命与可靠性综合验证试验已不容置疑。

2 寿命与可靠性综合验证试验技术

(1) 确定试验总时间 T_L 寿命与可靠性综合验证试验一般采用定时截尾试验,试验时间取决于受试产品的寿命与可靠性指标值、产品的重要度以及可靠性统计试验方案参数等因素。

¹ 寿命指标验证所需的最少试验总时间 T_L

寿命指标验证通常应用工程经验法^[1]和分析

如采用工程经验法, 设 T_0 为受试产品规定的首翻期(工作时间)或使用期限(工作时间); K 为工程经验系数, 各型产品的具体数值由承制方与使用方视产品的重要度、受试品数量及相似产品的经验等因素共同确定, 一般取 1.2~2.0 之间, 受试品数为 n 个, 则试验总时间应为

$$T_L \geq nKT_0 \quad (1)$$

如采用分析法(定时截尾试验), 为保证评估的精度, 应使试品失效数 r 在试验截止时间 T_z 内达到大于等于 70% n 的要求, 则

$$T_L \geq nT_z \quad (2)$$

° 可靠性试验最少试验总时间 T_R 可靠性试验总时间 T_R 取决于产品的可靠性指标值(如设计定型最低可接受值)和统计试验方案参数。对于服从指数分布假设的产品, 可直接应用 GJB899 《可靠性鉴定与验收试验》中规定的统计试验方案, 由生产方风险值 A 使用方风险值 B , 鉴别比 d 及可靠性指标值, 求得最少试验总时间 T_R 。而 A , B , d 的选取则需根据产品的可靠性预计值、重要度、及所能允许的试验进度和试验经费, 经权衡后予以确定。

» 寿命与可靠性综合验证试验总时间 T_{LR} 寿命与可靠性综合验证试验总时间 T_{LR} 应取 T_L 与 T_R 两者中的较大值。

如果 $T_L > T_R$, 且大得较多, 则可根据 T_L 值, 重新调整可靠性统计试验参数值, 选取更小的 A , B 或 d , 适当增加 T_R , 从而, 在不增加试验成本的前提下, 进一步降低试验的风险, 并提高 MTBF 估计值的置信度。

如果 $T_R > T_L$, 且大得较多, 则可将寿命指标验证试验设计成两个阶段。

第 1 阶段, 仍按原先规定的首翻期(工作时间)或使用期限(工作时间) T_0 值的要求进行试验, 定时截尾试验时间为 KT_0 (或 T_z)。该阶段试验结束后应给出产品能否达到规定的寿命值 T_0 的结论。如所有受试品在 KT_0 (或 T_z) 内均未出现关联故障(失效), 则可进行第 2 阶段试验。

第 2 阶段, 将试验截止时间延至 (T_R/n) 小时, 则总试验时间最多为 T_R 小时。该阶段试验结束后, 连同第 1 阶段的试验数据, 可以对受试产品的寿命值(首翻期或使用期限)进行评估, 从而为该产品的延寿提供依据。

(2) 确定失效(故障)判据 对产品寿命指标的考核与对可靠性指标的考核, 其失效(故障)判据是不相同的。

¹ 考核寿命指标的失效判据 对不可修复产品, 其寿命指标为使用期限, 凡引起产品更换的所有偶然失效和耗损失效均判为失效。

对可修复产品, 其寿命指标为首翻期或翻修间隔时间, 其失效只计及将引起产品翻修的耗损性失效, 如磨损、老化、疲劳断裂等。

° 考核可靠性指标的故障判据 若考核的是基本可靠性指标, 如 MTBF, 且单台试验时间在 T_0 内, 则试验中出现的将导致增加维修人力和后勤保障资源的所有事件均判为故障, 包括所有偶然故障和耗损故障。

若考核的是任务可靠性指标, 如致命性故障间的任务时间(MTBCF), 且试验时间在 T_0 内, 则试验中凡出现将影响完成规定的任务的事件才判为故障, 其中包括偶然故障和耗损故障。

但单台试验时间大于 T_0 后所发生的耗损故障, 及其引起的从属故障均不应计为可靠性关联故障。

(3) 接收与拒收的判决

¹ 对寿命指标的判决

a. 应用工程经验法 在截尾试验时间(KT_0)内, 所有受试品均未发生(2)节¹中所述的失效, 则判定该批产品已达到规定的寿命值 T_0 的要求, 予以接收。否则, 予以拒收。

b. 应用分析法 在给定的置信度 $(1-A)$ 下, 其首翻期或使用期限的置信下限 T_{Lo} 大于等于规定的指标值 T_0 的要求, 予以接收。否则, 予以拒收。

° 对可靠性指标的判决 将试验中发生的可靠性关联故障数与定时截尾统计试验方案中的接收或拒收标准(即规定的判决故障数)相比较, 如果在由统计试验方案规定的试验总时间内, 发生的故障数小于等于接收判决故障数, 且每个受试品的累计试验时间均大于等于全部受试品的平均试验时间的一半, 则对该产品的可靠性指标值做出接收判决。反之, 若发生的关联故障数大于等于拒收判决故障数, 或者其中至少有 1 台受试品的累计试验时间小于全部受试品的平均试验时间的一半, 则对该产品的可靠性做出拒收判决。

(4) 试验结果的评估方法

¹ 对寿命指标的评估

应用工程经验法

a. 如每台受试品试验到 $T_z = (KT_0)$ 小时均未发生与寿命关联的失效, 可按式(3)估计产品的首翻期(工作时间)或使用期限(工作时间) T_0

$$T_0 = T_z / K \quad (3)$$

b. 如受试品中至少有一个试品在 $T_z = K T_0$ 小时内发生了与寿命关联的失效, 即已判定产品的寿命指标达不到原规定的寿命指标 T_0 的要求。在这种情况下, 可以先给出一个比 T_0 短的临时寿命值 $T_{\text{临}}$ 。 $T_{\text{临}}$ 应取以下 2 个值中的较小者: 一个是受试品中最先发生与寿命关联的失效的试验时间 t_i ; 另一个是按式(4)算出的估计值 T'

$$T' = \frac{\sum_{i=1}^r t_i + (n - r) T_z}{n K_0} \quad (4)$$

式中: t_i 为第 i 个试品发生与寿命关联的失效时间 ($t_i \leq T_0$); K_0 为工程经验系数, 大于 K , 具体数值由承制方与使用方共同商定; r 为失效产品数 ($r \leq n$)。

c. 如果寿命与可靠性综合验证试验总时间 $T_{\text{总}} = T_R > R_L$, 且大得较多, 每台受试品试验到 ($K T_0$) 小时均未发生与寿命关联的失效(故障), 再继续进行延寿试验, 到试验截止时间 $t_0 = T_R / n$ 为止, 有 r 个产品发生了与寿命关联的失效 ($r < n$), 产品的首翻期(工作时间)或使用期限(工作时间) T'' 按式(5)估计

$$T'' = \frac{\sum_{i=1}^r t_i + (n - r) t_0}{n K_0} \quad (5)$$

d. 如果寿命与可靠性综合验证试验总时间 $T_{\text{LR}} = T_R > R_L$ 且大得较多, 每台受试品试验到 ($K T_0$) 小时均未发生与寿命关联的失效(故障), 后再继续进行延寿试验, 到试验截止时间 $t_0 = T_R / n$ 为止, 全部产品均发生了关联失效, 则按式(6)估算产品首翻期(工作时间)或使用期限(工作时间) T^E

$$T^E = \sum_{i=1}^n t_i \sqrt{(n K_1)} \quad (6)$$

式中: K_1 为工程经验数, 一般大于 K 与 K_0 , 具体数值由承制方与使用方共同商定。

应用分析法(定时截尾试验)对寿命指标的评估公式参见参考文献[2]。

° 对可靠性指标的评估 对产品的故障分布服从指数分布的情况, 可按参考文献[3]对可靠性指标进行评估。

接收时 MTBF(MTBCF)的估计:

a. 计算 MTBF (MTBCF) 的观测值(点估计值)

$$H = T_R / r \quad (7)$$

式中: T_R 为可靠性试验总时间; r' 为与可靠性指标关联的责任故障数。

b. 计算 MTBF(MTBCF) 的置信下限 H 和置信上限 H

$$H = H(c, r') \hat{H} \quad (8)$$

$$H = H(c, r') \hat{H} \quad (9)$$

式中: $H(c, r')$ 和 $H(c, r')$ 值根据责任故障数 r' 和置信度 c , 查参考文献[3]中的表 A7 或图 A24 求得。

拒收时 MTBF(MTBCF)的估计:

a. 计算 MTBF (MTBCF) 的观测值(点估计值)

$$H = T / r' \quad (10)$$

式中: T 为当责任故障数达到拒收故障数时, 可靠性试验进行的总时间。

b. 计算 MTBF(MTBCF) 的置信下限 H 和置信上限 H

$$H = H(c, r') H \quad (11)$$

$$H = H(c, r') H \quad (12)$$

式中: $H(c, r')$, $H(c, r')$ 值根据责任故障数 r' 和置信度 c , 查参考文献[3]中的表 A8 或图 A25 求得。

3 应用实例

某导弹控制舱原工作寿命为 25h, 使用方要求通过试验将其延至 50h, 并同时要求对该舱段的可靠性指标 MTBF 最低可接受值能否达到 50h 进行验证。为此, 确定寿命与可靠性综合验证试验方案如下。

(1) 受试品数量为 8 台。

(2) 综合试验总时间 延寿试验采用工程经验法, K 取 1.5, 故延寿试验时间为

$$T_L = 1.5 \times 8 \times 50 = 600h$$

可靠性验证试验, 经分析该产品故障分布近似满足指数分布假设, 故可采用 GJB899 中标准型定时试验方案 13, 即 $A=0.1, B=0.2, d=2$, 判决故障数(接收) $r \leq 13$, 由此可知可靠性验证试验所需最少时间 $T_R = 12.4 \times 50 = 620h$

取 T_L 和 T_R 两者的较大值为综合试验总时间, 即 $T_{LR} = T_R = 620(h)$ 。单台试品的试验时间为 $620/8 = 77.5h$ 。

(3) 失效(故障)判据 考核寿命指标的关联失效只计及将引起产品翻修的耗损性失效。考核 MTBF 的关联故障, 则包括所有偶然故障和耗损

故障。

(4) 试验情况与分析 8个受试品中,第3个受试品在试验到25h时,发现因发射电插头断线引起导引头电锁失效,经分析属耗损性失效,但为排除该失效,只需更换电插头,而无需对产品进行翻修,故该失效对寿命指标考核为非关联失效,而对可靠性指标考核属关联责任故障。第4个受试品在试验到30h时,发生因零位电位器失效导致舱面偏向一边,试验至72.5h时又发现因低压变压器失效造成电源参数超差,因某电阻失效,导致低温转子转速过低。以上3个故障的原因均属元器件失效,应属偶然失效,故对寿命指标考核为非关联失效,但对可靠性指标考核为关联责任故障。其它6个受试品在试验过程中始终未发生故障或失效。

(5) 试验结果评估

¹ 寿命指标的评估,因没有发生与寿命指标考核关联的失效,应用式(3)得 $T_0 = T_z/K = 77.5/1.5 = 51.7h$, 则该导弹控制舱段的工作寿命可延至51.7h,达到了预期目标。

^o 可靠性指标的评估 发生的关联责任故障数 r' 为4,少于统计试验方案规定的允许故障数13,试验判为接收。应用式(7),计算MTBF的观测值为 $H = T_R = r' = 620/4 = 155h$

设置信度 $C = (1 - 2B)100\% = (1 - 2 \times 0.2) \times 100\% = 60\%$, 则 $C' = (1 + C)/2 = 80\%$ 。应用式(8)、式(9)并查GJB899中的表A7,得MTBF的置信下限 H 和置信上限 H 为

$$H = H(c', r') \hat{H} =$$

$$H(0.8, 4) \times 155 = 0.595 \times 155 = 92.2$$

$$H = H(c', r') \hat{H} =$$

$$H(0.8, 4) \times 155 = 1.742 \times 155 = 270.0$$

评估结果表明,该导弹控制舱的MTBF的真

值有80%的概率大于92.2h。

由于采用了寿命与可靠性综合验证试验方案,与传统的试验方法相比,节省了近一半左右的试验时间和试验经费,取得了显著的社会经济效益。

参 考 文 献

- [1] 杨为民,屠庆慈,等.对“工程经验法”的理论分析[J].航空学报,1988,9(8):366-373.
(Yang W M, Tu Q C, Lu T X. Theoretical analysis of engineering experience method[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1988, 9(8): 366- 373.)
- [2] 何国伟.可信性工程[M].北京:中国标准出版社,1997. 451- 456.
(He G W. Dependability Engineering[M]. Beijing: Chinese Standard Publishing House, 1997. 451- 456.)
- [3] GJB899- 90 可靠性鉴定与验收试验[S]. 21- 23.
(GJB899 - 90. Reliability Testing for Qualification and Production Acceptance[S]. 21- 23.)

作者简介:



龚庆祥(1944-) 男,浙江永康人,北京航空航天大学工程系统工程系研究员,1966年毕业于西安交通大学数理力学系应用力学专业,1967~1997年在江西南昌飞机制造公司飞机设计研究所工作,任某型飞机副总设计师、副所长,1997年至今在北航从事可靠性与环境工程技术研究,联系电话:(010)82316434。



王自力(1964-) 男,四川南充人,北京航空航天大学工程系统工程系高工,硕士,1988年毕业于北京航空航天大学工程系统工程系飞机设计专业,毕业后留校工作至今,现任系主任,主要从事可靠性系统工程管理及可靠性设计与分析技术研究。联系电话:(010)82316433。

(责任编辑:李铁柏)