

基于 GJB899A 的可靠性统计试验方案分析

李国胜, 仇玲萍, 宋 刚

(武汉船舶通信研究所, 湖北 武汉 430205)

摘 要 可靠性试验作为可靠性工程的重要一环, 是衡量产品是否满足可靠性要求的重要手段之一。GJB899A《可靠性鉴定和验收试验》给出了一系列统计试验方案, 主要涉及定时截尾试验方案和序贯截尾试验方案。针对这 2 类试验方案的原理开展分析, 根据试验方案的所需参数明确方案的确定方法, 给出可靠性指标的验证方式。结合应用示例进行了分析说明, 用以指导工程人员根据被试产品的可靠性要求选择合适的可靠性试验方案, 可以有效帮助研制方和订购方开展可靠性试验。

关键词 可靠性; 统计试验方案; 定时截尾试验; 序贯截尾试验

中图分类号 TP202 **文献标识码** A **文章编号** 2096-5753(2021)01-0071-05

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2021.01.013

Analysis of Reliability Statistical Test Scheme Based on GJB899A

LI Guosheng, QIU Lingping, SONG Gang

(Wuhan Maritime Communications Research Institute, Wuhan 430205, China)

Abstract As an important part of reliability engineering, reliability test is one of the important means to measure whether products meet the reliability requirements. GJB899A "Reliability Appraisal and Acceptance Test" standard gives a series of statistical test schemes, which mainly involve the fix-time censored test scheme and the sequential censored test scheme. In this paper, the principles of these two types of test schemes are analyzed, the determination methods of the test schemes are defined according to the required parameters of the test schemes, and the verification method of reliability indexes is given. Combined with application examples, it is analyzed and explained for guiding engineers to choose the appropriate reliability test scheme according to the reliability requirements of the tested products, which can effectively help developers and orderers to carry out reliability tests.

Key words reliability; statistical test scheme; fix-time censored test; sequential censored test

0 引言

可靠性鉴定和验收试验作为可靠性工程的重要一环, 是确保产品满足可靠性要求的一个重要手段。可靠性鉴定和验收试验作为统计性试验^[1-4], 通过抽取一定的样本数据开展相应的试验, 根据事先规定的判定准则用以确定试验是否通过、产品是否达到规定的可靠性指标要求。可靠性鉴定试验一

般是为了验证产品的设计满足可靠性要求的程度, 由订购方选择有代表性的产品在规定的条件下、在第三方试验室所做的试验, 并以此作为批准定型的依据。可靠性验收试验是用以确定批生产产品经过批生产期间的工艺、工装、工作流程变化后的可靠性是否保持在规定的水平。目前国内外颁发的标准试验方案一般都属于指数分布的试验方案, GJB899A《可靠性鉴定和验收试验》规定的可靠性

统计试验方案均为指数分布对应的统计试验方案。统计试验方案一般分为定时截尾试验方案、定数截尾试验方案、全数试验方案、序贯截尾试验方案^[5-8]。全数试验是指对每台产品均开展试验，一般仅在极为特殊的情况（如安全或完成任务的需要）下才会采用。定时截尾试验是指事先明确规定试验的截尾时间，根据结果判定试验是否通过，并利用试验结果数据评估被试产品的可靠性特征量。定数截尾试验是指事先明确规定试验截尾时的故障个数，根据结果判定试验是否通过，并利用试验结果数据评估被试产品的可靠性特征量。定数截尾试验方案由于先前不易估计所需的试验时间，实际应用较少。序贯截尾试验一般是事先规定被试产品接收、拒收及截尾时间的判别区间，试验过程中对受试产品持续监测，将累积的试验时间和故障个数与规定的判别区间进行比较，以判定被试产品是接收、拒收或继续试验。GJB899A 给出了一系列统计试验方案，主要涉及定时截尾试验方案和序贯截尾试验方案。本文主要针对这 2 种试验方案开展分析，研究可靠性试验方案的原理，确定合适的可靠性试验方案，以有效帮助研制方和订购方开展可靠性试验。

1 定时截尾试验方案

1.1 定时截尾试验方案的确定方法

在定时截尾可靠性试验^[9-10]中，产品被判决接收的概率 $P(\theta)$ 与产品 MTBF 的真值 θ 的关系为

$$P(\theta) = \sum_{k=0}^a \frac{(T/\theta)^k}{k!} e^{-T/\theta} \quad (1)$$

式中： a 为产品被接收时所对应的判决故障个数； T 为产品被接收时所对应的总试验时间（台时）； $P(\theta)$ 表示采用定时截尾试验时，被试产品在总试验时间 T 内，发生的故障个数小于等于 a 的概率。

产品被接收概率 $P(\theta)$ 同时满足：

$$P(\theta_0) = 1 - \alpha, P(\theta_1) = \beta \quad (2)$$

式中： α 为使用方风险； β 为生产方风险； θ_0 为检验上限； θ_1 为检验下限。

由于制定统计方案时， a 只能取整数，因此 $P(\theta_0)$ 和 $P(\theta_1)$ 只能分别尽量接近 $1 - \alpha$ 和 β 。

定时截尾试验可以预先确定试验持续时间，使得试验规划人员可以在试验持续时间、使用方风险 α 和生产方风险 β 、检验上限 θ_0 和检验下限 θ_1 之间进行权衡，即对于给定的 α 、 β 、 θ_0 、 θ_1 ，计算试验持续时间 T 和接收故障数 a 。

按时间截尾、故障件有替换的定时试验，试验截尾时间 T 和接收故障数 a 可以通过下式得到：

$$1 - \beta = \sum_{k=a+1}^{\infty} \frac{(T/\theta_1)^k e^{-T/\theta_1}}{k!} \quad (3)$$

$$1 - \alpha = \sum_{k=0}^a \frac{(T/\theta_0)^k e^{-T/\theta_0}}{k!} \quad (4)$$

接收故障数 a 与拒收故障数 r 的关系为 $a=r-1$ 。

由相关数理统计理论，可以证明：

$$T = \frac{\theta_1}{2} \chi_{\beta}^2(2r) \quad (5)$$

$$T = \frac{\theta_0}{2} \chi_{1-\alpha}^2(2r) \quad (6)$$

亦即

$$\frac{\theta_1}{\theta_0} = \frac{\chi_{1-\alpha}^2(2r)}{\chi_{\beta}^2(2r)} \quad (7)$$

式中： T 为试验截尾时间； $\chi_{\beta}^2(2r)$ 为上侧分位数（直接用 EXCEL 函数 CHIINV 计算即可）。

由于 r 只能是正整数，故实际上：

$$\frac{\theta_1}{\theta_0} \approx \frac{\chi_{1-\alpha}^2(2r)}{\chi_{\beta}^2(2r)} \quad (8)$$

寻找到满足 $\frac{\chi_{1-\alpha}^2(2r)}{\chi_{\beta}^2(2r)}$ 最接近 $\frac{\theta_1}{\theta_0}$ 的最小正整数 r 即为最小拒收故障数。

给定 α 、 β 、 θ_0 、 θ_1 ，只要使用上述方法即可确定 GJB899A 中各定时截尾试验方案。

试验截尾时间 $T = \frac{\theta_1}{2} \chi_{\beta}^2(2r)$ 或者 $T = \frac{\theta_0}{2} \chi_{1-\alpha}^2(2r)$ 。

1.2 定时截尾试验 MTBF 的验证值

采用定时截尾试验方案进行可靠性试验时，一般在规定 MTBF 指标的同时，还须规定置信度 C （默认为是对应的双侧置信区间的置信度），并在试

验后给出 MTBF 验证值的置信区间。

1) 定时截尾试验 MTBF 验证值的点估计值。

MTBF 观测值的点估计值 $\hat{\theta}$ 可用下式计算:

$$\hat{\theta} = \frac{T}{r} \quad (9)$$

式中: T 为产品的总试验时间; r 为发生的责任故障数。

2) 定时截尾试验 MTBF 验证值的双侧置信区间。

对于 MTBF 双侧置信区间的置信度 C , 一般建议取值为 $C = (1 - 2\beta) \times 100\%$ 。

在对被试产品作出接收判决时, 此时的截尾试验属于定时截尾, MTBF 观测值的双侧置信区间的置信下限 θ_L 和置信上限 θ_U 可用下式计算:

$$\theta_L = \frac{2T}{\chi_{1-C}^2(2r+2)} \quad (10)$$

$$\theta_U = \frac{2T}{\chi_{1+C}^2(2r)} \quad (11)$$

在对被试产品作出拒收判决时, 截尾试验属于定数截尾, MTBF 观测值的双侧置信区间的置信下限 θ_L 和置信上限 θ_U 可用下式计算:

$$\theta_L = \frac{2T}{\chi_{1-C}^2(2r)} \quad (12)$$

$$\theta_U = \frac{2T}{\chi_{1+C}^2(2r)} \quad (13)$$

3) 定时截尾试验 MTBF 验证值的单侧置信区间。

在对被试产品 MTBF 的验证值进行估计时, 有时也用单侧置信限估计。MTBF 单侧置信区间的置信度 $C' = (1+C)/2$, 用于表示置信下限 θ'_L 的可信程度。例如, 在接收时 (实际属于定时截尾), MTBF 观测值的单侧置信区间的置信下限 θ'_L 可用下式计算:

$$\theta'_L = \frac{2T}{\chi_{1-C'}^2(2r+2)} = \frac{2T}{\chi_{1-C}^2(2r+2)} = \theta_L \quad (14)$$

2 序贯截尾试验方案

2.1 序贯截尾试验方案的确定方法

序贯试验作为一种抽样试验方案, 事先规定被试产品接收、拒收及截尾时间的判别区间, 逐个 (或者成组) 地抽取样本个体, 但事先不固定它们的个数。试验过程中对受试产品持续监测, 根据事先规定的规则, 将累积的试验时间和故障个数与规定的判别区间进行比较, 直到可以做出接收或拒收批的决定为止。

设批产品的寿命为指数分布, 其 MTBF 的真值为 θ 。在批产品中随机抽取产品, 逐个进行试验, 出了故障, 容许修复后再投入试验, 观测第 r 个故障出现时刻的累积试验时间 $t(r) = t_r$ 。

根据 Wald 理论, 在 (t, r) 平面上, 有 2 条直线, 如图 1 所示。接收线 $L_0: r = a + bt$, L_0 之下叫接收区; 拒收线 $L_1: r = c + bt$, L_1 之上叫拒收区; L_0 、 L_1 之间叫继续试验区。

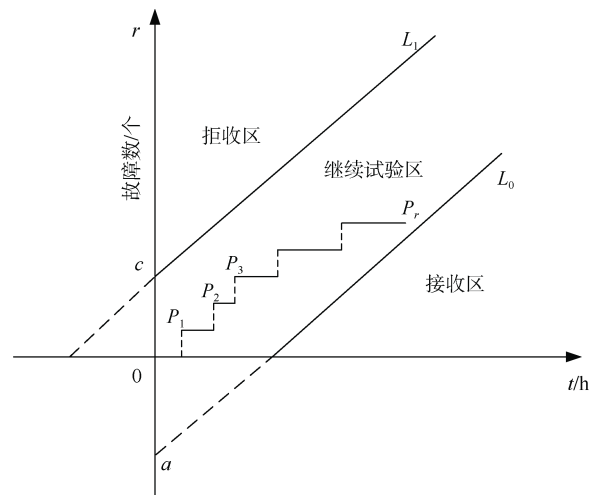


图 1 序贯试验的接收区、拒收区及继续试验区示意图
Fig. 1 Schematic diagram of receiving area, rejection area and continuous test area of sequential test

图 1 中, $P_1(t_1, 1), P_2(t_2, 2), \dots, P_r(t_r, r)$ 构成一条折线 C 。 $P_r(t_r, r)$ 表示第 r 个故障出现时刻的累积试验时间为 t_r 。

a 、 b 、 c 由下式确定:

$$A = \frac{d+1}{2d} \cdot \frac{1-\beta}{\alpha}, \quad B = \frac{\beta}{1-\alpha} \quad (15)$$

$$a = \frac{\ln B}{\ln d}, b = \left(\frac{1}{\theta_1} - \frac{1}{\theta_0}\right) / \ln d, c = \frac{\ln A}{\ln d} \quad (16)$$

式中： a 为使用方风险； β 为生产方风险； θ_0 为检验上限； θ_1 为检验下限； d 为鉴别比，即 θ_0 与 θ_1 的比值。

序贯试验的决策准则：如折线 C 穿出 L_0 进入接收区，即有 $P_r(t_r, r)$ 进入接收区，亦即 $r \leq a + bt$ 停止试验，并进行接收；如折线 C 穿出 L_1 进入拒收区，即有 $P_r(t_r, r)$ 进入拒收区，亦即 $r \geq c + bt$ 停止试验，并进行拒收；如折线 C 在接收线和拒收线之间，则继续试验。

为了防止 $P_r(t_r, r)$ 总是停滞在继续试验区，考虑到现实要求，实际序贯截尾试验需采用到一定时间 T_c 强制停止试验的规定。由满足下面公式的最小正整数 r 确定终止试验的故障数 r_c ：

$$\frac{\theta_1}{\theta_0} \leq \frac{\chi_{1-\alpha}^2(2r)}{\chi_{\beta}^2(2r)} \quad (17)$$

最大试验时间由 $T_c = \frac{\theta_1}{2} \chi_{\beta}^2(2r_c)$ 或者 $T_c = \frac{\theta_0}{2}$

$\chi_{1-\alpha}^2(2r_c)$ 确定。

当序贯试验达到最大故障数 r_c 或者最大试验时间 T_c 时，皆终止试验。

2.2 序贯截尾试验 MTBF 的验证值

根据序贯截尾试验的判决规则，被试产品只有在总试验时间满足接收判决时间时才能停止试验并作出接收判决。由于被试产品在试验过程中随时可能故障，所以在试验的任何时刻都可能作出拒收判决。因此，接收置信限和拒收置信限的计算公式存有不同。接收判决相当于定时截尾，拒收判决相当于定数截尾。MTBF 验证值的估计可参考前述定时截尾试验方案 MTBF 验证值的估计方法。通常情况下，采用序贯截尾试验的被试产品，不对其 MTBF 的验证值作出评价。

3 应用示例

某产品开展可靠性验证试验，其中要求 $\alpha = \beta = 20\%$ ，产品最低可接受值 $\theta_1 = 500$ h，规定值 $\theta_0 = 1500$ h。

1) 若选用定时截尾试验方案，结合公式 (8)：

$$\frac{\theta_1}{\theta_0} = \frac{500}{1500} = 0.333$$

$$\text{当 } r=1 \text{ 时, } \frac{\chi_{1-\alpha}^2(2r)}{\chi_{\beta}^2(2r)} = \frac{\chi_{80\%}^2(2)}{\chi_{20\%}^2(2)} = 0.195;$$

$$\text{当 } r=2 \text{ 时, } \frac{\chi_{1-\alpha}^2(2r)}{\chi_{\beta}^2(2r)} = \frac{\chi_{80\%}^2(4)}{\chi_{20\%}^2(4)} = 0.275;$$

$$\text{当 } r=3 \text{ 时, } \frac{\chi_{1-\alpha}^2(2r)}{\chi_{\beta}^2(2r)} = \frac{\chi_{80\%}^2(6)}{\chi_{20\%}^2(6)} = 0.359;$$

$$\text{当 } r=4 \text{ 时, } \frac{\chi_{1-\alpha}^2(2r)}{\chi_{\beta}^2(2r)} = \frac{\chi_{80\%}^2(8)}{\chi_{20\%}^2(8)} = 0.416;$$

所以，最小拒收故障数应为 3，此时总试验时间：

$$T = \frac{\theta_1}{2} \chi_{\beta}^2(2r) = \frac{\theta_1}{2} \chi_{20\%}^2(6) = 4.3\theta_1 = 2150 \text{ h}$$

此即 17 号标准型定时试验方案。

2) 若选用序贯截尾试验，结合式 (15) 和式 (16)：

$$d = \frac{\theta_0}{\theta_1} = \frac{1500}{500} = 3$$

$$A = \frac{d+1}{2d} \cdot \frac{1-\beta}{\alpha} = \frac{3+1}{2 \cdot 3} \cdot \frac{1-0.2}{0.2} = 2.667$$

$$B = \frac{\beta}{1-\alpha} = \frac{0.2}{1-0.2} = 0.25$$

$$a = \frac{\ln B}{\ln d} = \frac{\ln(0.25)}{\ln 3} = -1.262$$

$$b = \left(\frac{1}{\theta_1} - \frac{1}{\theta_0}\right) / \ln d = \left(\frac{1}{500} - \frac{1}{1500}\right) / \ln 3 = 0.001$$

$$c = \frac{\ln A}{\ln d} = \frac{\ln(2.667)}{\ln 3} = 0.893$$

所以，接收线 $L_0: r = -1.262 + 0.001t$ ，拒收线 $L_1: r = 0.893 + 0.001t$ 。

使用公式 (17) 计算最大试验截尾时间和最大试验故障数，显然 $r_c = 3$ 。

此时最大试验截尾时间：

$$T_c = \frac{\theta_1}{2} \chi_{\beta}^2(2r_c) = \frac{500}{2} \chi_{20\%}^2(6) = 2150 \text{ h}$$

该序贯试验方案示意图如图 2 所示。

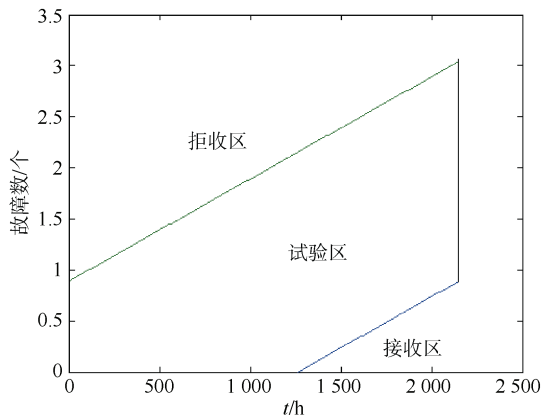


图 2 序贯试验方案示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sequential test scheme

4 结束语

GJB 899A 给定的研制方风险和使用方风险一般为 10%, 20%, 30%, 鉴别比一般为 1.5, 2.0, 3.0, 基于这 2 类参数的不同组合即可确定相应的可靠性统计试验方案。从分析结果综合比较来看:

1) 定时截尾试验方案的优点是事先已规定了最大的累积试验时间, 便于计划管理并能对产品 MTBF 的真值作出估计, 所以得到广泛应用。序贯截尾试验方案的主要优点是相对于定时截尾时间, 在相同试验方案参数(风险和鉴别比)下做出判断所要求的平均故障数和平均累积试验时间最少, 常用于可靠性验收试验。但其缺点是产品质量一致性存在波动时, 被试产品的总试验时间往往差别很大。对于某些产品, 接收或拒收的判断当不能较易做出而需要不断继续试验时, 序贯截尾试验的累积试验时间和累积故障数可能会超过相同试验方案参数对应的定时截尾试验方案。

2) 在相同的试验方案参数条件下, 序贯截尾试验、定时截尾试验最大试验时间和最大允许故障数是一致的(式(8)和式(17)略有不同是基于 GJB899A 各方案略有修正的分析结果。依据 MIL-HDBK-108, 这 2 个公式完全一样), 因此序贯截尾试验更容易提前做出判定, 相对来说实际试验时间可能会更短。但如上所述, 对于某些产品, 随着产品质量不同, 由于不易做出接收或拒收的判

断, 最大累积试验时间和故障数可能会超过相同试验方案参数对应的定时截尾试验方案。

3) 如果仅需要以预定的风险对预定的可靠性指标作出接收与否的判定, 不需要对产品可靠性的真值作出评定, 可选用序贯截尾试验方案。批生产装备的可靠性验收试验通常选用序贯截尾试验方案。

4) 如果事先需要知道确定的试验时间, 并且要以规定的精度(α , β , θ_0 , θ_1)对 MTBF 的真值作出估计时, 应选用定时截尾试验方案(由于序贯试验存在 3 个不同的判别区, 对产品多次重复试验即使都能通过, 也可能会在不同时间点的接收区结束试验, 使得 MTBF 评估结果可能存在多种)。装备鉴定和定型的可靠性鉴定试验通常采用定时截尾试验方案。

参考文献

- [1] 中国人民解放军总装备部. GJB899A—2009 可靠性鉴定和验收试验[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2009.
- [2] 中国人民解放军总装备部. GJB1621.8A—2006 技术侦察装备通用技术要求第 8 部分: 可靠性指标和验证试验方法[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2006.
- [3] 甘茂治, 康建设, 高琦. 军用装备维修工程学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [4] 康锐. 可靠性维修性保障性工程基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [5] 朴甲哲, 张永祥. 舰船机械维修工程[M]. 北京: 海潮出版社, 2001.
- [6] 刘飞, 王中伟, 张为华. 指数寿命产品可靠性增长试验的 Bayes 分析[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(4): 128-132.
- [7] 胡湘洪, 高军, 李劲. 可靠性试验[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [8] 菲诗松, 汤银才, 王玲玲. 可靠性统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [9] 李根成, 姜同敏. 定时截尾可靠性鉴定试验的参数选择与分析[J]. 航空学报, 2006, 27(2): 272-274.
- [10] 万勤. 可靠性验证试验中心 α 、 β 的计算方法探讨[J]. 海军航空工程学报, 2004, 19(2): 268-270.

(责任编辑: 曹晓霖)