

doi: 10.7690/bgzd.2025.10.002

成败型产品可靠性鉴定试验方案特性分析

张乐威, 李大伟, 王国栋, 杨 茁

(中国人民解放军 91550 部队 41 分队, 辽宁 大连 116023)

摘要: 为准确掌握定数截尾和序贯截尾 2 种试验方案的内涵, 从方法原理、特征角度进行深入分析。提出 2 种方案的特征量概率模型, 从机理上揭示了 2 种方案的适用范围。结果表明: 该分析在成败型产品可靠性鉴定试验中为试验方案的制定提供了便利, 对试验组织实施有指导意义。

关键词: 可靠性试验; 定数截尾试验方案; 序贯截尾试验方案; 特征量模型; 算例分析

中图分类号: TB114.3 **文献标志码:** A

Characteristic Analysis of Reliability Qualification Test Plan for Success-failure Product

Zhang Lewei, Li Dawei, Wang Guodong, Yang Zhuo

(No. 41 team of No. 91550 Unit of PLA, Dalian 116023, China)

Abstract: In order to accurately grasp the connotation of the two test schemes of fixed number censoring and sequential censoring, this paper makes an in-depth analysis from the perspective of method principle and characteristics. The characteristic quantity probability models of the two schemes are proposed, and the application scope of the two schemes is revealed from the mechanism. The results show that the analysis provides convenience for the establishment of test scheme in the reliability qualification test of success-failure type products, and has guiding significance for the test organization and implementation.

Keywords: reliability test; fixed fail number truncated test scheme; sequential truncated test scheme; characteristic quantity model; example analysis

0 引言

早在 20 世纪中期, 可靠性就被应用于工程质量检验^[1-3], 能直接反映产品完成规定功能或任务的能力, 是产品的一项重要指标。为对成败型产品可靠性指标进行考核, 经过不断发展利用经典统计理论^[4-5], 学者提出定数截尾和序贯截尾 2 类试验方案, 并在工程中得到广泛应用。

定数截尾试验方案因为具有试验方案唯一、工程安排便利的优点, 自 20 世纪 70 年代开始, 吸引了大量学者进行研究, 比如文献[6]对寿命型产品的定数截尾试验方案的随机性给出估计方法, 并得出数据分析结果; 文献[7]针对测试性试验下的 2 种试验方案进行对比, 分析在测试性试验中 2 种方法的不同。序贯截尾试验方案自 1943 年 Wald 提出了“统计数据的序贯分析理论”^[8]以来, 同样受到广泛关注。文献[9]提出了在有限的产品数量条件下可通过调整接收、拒收线的方法在双方风险不变的情况下降低最大所需产品数量; 文献[10]根据接收概率曲

线和期望截尾曲线提出了序贯截尾试验优化方案。通过梳理相关研究成果, 目前, 相关研究^[11-14]主要集中在最优检验方法的获取和应用上。从机理上说明 2 类试验方案的特征与异同, 分析两者工程特点和适用范围的研究相对较少, 造成工程实践过程中, 存在试验方难以根据需求正确使用 2 类试验方案的问题。例如文献[15]从定时截尾试验、定数截尾试验和序贯试验 3 种方法中选择定时截尾试验方法, 而未说明不选择另 2 种方法的原因。

基于以上问题, 笔者从方法原理、特征量等方面进行研究, 建立 2 种方案的特征量概率模式, 比较定数截尾方案和序贯截尾方案的特点、工程应用中的差别及优劣, 最后通过实例进行验证, 为方案的选择起到了一定的借鉴作用。

1 方案形式及原理

1.1 定数截尾试验方案

定数截尾试验是指参加测试的产品数目固定,

收稿日期: 2024-10-06; 修回日期: 2024-11-06

第一作者: 张乐威(1995—), 男, 安徽人。

测试完成后,按试件的成功次数来判定其可靠性满足指标。该方案确定原理是利用统计学中的假设检验方法,通过控制风险得到产品接收/拒收原则。定数截尾试验一般分为:1)控制双方风险的标准型;2)仅控制使用方风险的极限型。

标准型定数截尾试验方案通过控制使用方风险和生产方风险来反映产品达到指标要求的概率,以体现使用方和生产方的利益。此方案确定需要的输入参数为双方风险、检验上限和检验下限,得到的标准型定数截尾统计方案具有唯一性。

工程中一般存在试验成本的限制,特别是对于造价昂贵的航空武器等成败型产品,其通常不具备重复性,使用者会优先对使用方风险进行控制;因此,产生了极限型定数截尾试验方案。该方案将要求的使用方风险和可靠性检验下限作为输入参数,得出的统计方法不具有唯一性。

2 类定数截尾试验方案确定的判决标准大致如表 1 所示。

表 1 成败型产品可靠性定数截尾试验方案

试验方案	接收故障数	拒收故障数	试验总次数
标准型定数截尾	$\leq c$	$\geq c+1$	N
	$\leq c_1$	$\geq c_1+1$	N_1
极限型定数截尾	$\leq c_2$	$\geq c_2+1$	N_2
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

1.2 序贯截尾试验方案

随着产品可靠性水平增高、造价越来越昂贵,为快速判决产品可靠性水平是否满足指标要求,缩短试验周期,产生了序贯截尾试验方案。该方案在每次试验后,分别对产品可靠性检验上限和检验下限时出现试验结果的概率进行统计,通过计算结果的比例来判断是否接收、拒收和继续试验。

序贯截尾试验方案确定的数据需求和判决准则如表 2 所示。

表 2 成败型产品可靠性序贯截尾试验方案

故障数	试验总次数	
	接收	拒收
0	$N_{0,a}$	—
1	$N_{1,a}$	$N_{1,r}$
2	$N_{2,a}$	$N_{2,r}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
r_0	—	$N_{f,r}$

在实际工程中,为避免试验结果始终不满足接收、拒收标准带来的无限次试验问题,预先规定最大试验次数和 N_0 ,最大允许故障数 r_0 。

2 方案特征量建模分析

2.1 定数截尾试验方案建模分析

在采用定数截尾试验方案的情况下,其特征值通常包含双方的实际风险、OC 曲线、平均试验次数等。极限型定数截尾试验方案可以看作是一个标准型的特例,只要对该方法进行合理的简化,就可以获得该方法的特征量概率模型。

为建立以上特征量概率模型,笔者对定数截尾试验方案的接受/拒绝概率进行研究。

2.1.1 接收概率

在成败型的产品中,可靠性水平为 R ,试验结果呈现为成功和失败,总体上遵循二项分布,故在 N 次试验中,发生 k 故障次的概率:

$$P(k|N, R) = C_N^k R^{N-k} (1-R)^k. \quad (1)$$

式中 R 一般为成败型产品的可靠度水平真值。

根据定数截尾试验方案的接收原则,产品只有在完成试验次数 N 的条件下,故障数小于等于最大允许故障数 c 才会被接收,将该事件记为 $A(N, R)$,即在试验次数 N 时接收该产品。此时产品的接收概率通过式(1)可以得出:

$$P(A(N, R)) = \sum_{k=0}^c P(k|N, R) = \sum_{k=0}^c C_N^k R^{N-k} (1-R)^k. \quad (2)$$

显然,接收概率为 R 的一个增函数, R 越大,接收概率就越大。

2.1.2 拒收概率

根据该方案的拒收原则,产品在完成试验次数 N 的条件下,故障数大于最大允许故障数 c 便会被拒收,将该事件记为 $B(N, R)$,即在试验次数 N 时拒收该产品。同样,产品的拒收概率通过式(1)可以得出:

$$P(B(N, R)) = \sum_{k=c+1}^N P(k|N, R) = 1 - \sum_{k=0}^c P(k|N, R) = 1 - \sum_{k=0}^c C_N^k R^{N-k} (1-R)^k. \quad (3)$$

显然 $P(A(N, R)) + P(B(N, R)) = 1$ 产品的接收与拒收互为对立事件。接收概率是 R 的一个增函数,而拒收概率与之相反,即拒收概率随着 R 的增加而减小。

在确定了产品接收/拒收概率后,研究试验方案特征量的概率模型如下:

1) 双方实际风险。在双方风险定义的基础上,

根据产品的检验上限 R_0 和检验下限 R_1 ，可以得出该方案的双方实际风险，该值体现了双方风险实际水平，满足下式：

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 1 - \sum_{k=0}^c C_N^k R_0^{N-k} (1-R_0)^k \\ \beta &= \sum_{k=0}^c C_N^k R_1^{N-k} (1-R_1)^k \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

2) OC 曲线。可以反映在采用定数截尾试验方案时，产品可靠性的真值与接收概率的相关性。从 OC 曲线的概念出发，利用接收概率，可以直接得到 OC 曲线的表达式如下：

$$P(R) = P(A(N, R)) = \sum_{k=0}^c C_N^k R^{N-k} (1-R)^k \quad (5)$$

3) 平均试验次数。反映了采取该方案时，产品进行判决所需的试验次数，是衡量方案是否经济合理的重要标准。由接收/拒收准则可知，产品的判决都在试验次数 N 结束后进行，故得到产品平均试验次数：

$$ETN = N \times P(A(N, R)) + N \times P(B(N, R)) = N \quad (6)$$

由式(6)可知，在定数截尾试验方案中，产品平均试验次数是定值，这是由接收/拒收准则决定的。

2.2 序贯截尾试验方案建模分析

根据序贯截尾试验方案确定原理可知，当该方案确定方法用于成败型产品时，对于每个故障次数，均需进行接收判定准则和失败判定准则的建立，对表 2 进行整理，可得到如表 3 所示的判决时刻。

表 3 序贯截尾试验方案判决时刻

判决时刻	拒收故障数 c_r	继续试验故障数 c_c	接收故障数 c_a	间隔次数
$N_1 = N_{1,r}$	1	0	—	$\Delta N_1 = N_1$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$N_i = N_{0,a}$	$c_{i,r}$	$1 \sim c_{i,r}$	0	$\Delta N_i = N_i - N_{i-1}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$N_n = N_{f,r}$	$c_{n,r}$	—	$c_{n,a}$	$\Delta N_n = N_n - N_{n-1}$

表 3 中 $c_{i,r}$ 、 $c_{i,a}$ 分别表示在第 i 个判决时刻所对应的拒收故障数、接收故障数，其中 $N_1 < N_2 < \dots < N_n$ 。

为便于描述，对表 3 做出以下说明：

记最大拒收故障数和最大接收故障数分别为 $c_{\max, r} = f$ 和 $c_{\max, a} = f - 1$ 。

拒收故障数 c_r 和接收故障数 c_a 均为一个数值，而继续试验故障数 c_c 则由具体统计方案确定，数值个数可能不唯一。为便于描述，任意判决时刻 N_j

继续试验故障数以集合形式 $\varphi_j = \{c_{j-1, c}, c_{j-1, c+1}, \dots, c_{j, c}\}$ 进行描述。

对判决时刻 $\{N_1, N_2, \dots, N_n\}$ 来说，拒收故障数 c_r 是一定存在的，但并不一定存在接收故障数 c_a 。同时，对于最后一个判决时刻 N_n ，因为对试验次数进行强制截尾，所以不存在继续试验故障数 c_c 。

在试验实施过程中，每到达判决时刻时，需对照故障数与试验次数之间的关系，采取 3 种不同措施：接收、拒收和继续，前 2 种措施会使试验结束。对 3 种措施构建模型进行研究。

2.2.1 继续试验概率

记事件 $C(N_j, R)$ 为产品在任意判决时刻 N_j 继续进行试验，由判决准则可知，该事件等价于前 j 个判决时刻的累积故障数均满足继续试验故障数，即：

$$C(N_j, R) = \{c_1 \in \varphi_1, c_2 \in \varphi_2, \dots, c_j \in \varphi_j\} \quad (7)$$

式中 c_j 为产品在判决时刻 N_j 的累积故障数。

由于每次试验结果互相独立，产品发生故障的概率仅与未来进行试验次数有关，而与已经进行的试验次数无关（即表现为“无后效性”）；因此，利用表 3 可将产品任意判决时刻 N_j 分解为互相独立的试验区间来描述其继续试验的概率。利用式(1)可得到式(7)为满足事件发生的概率：

$$\begin{aligned} P(C(N_j, R)) &= P\{c_1 \in \varphi_1, c_2 \in \varphi_2, \dots, c_j \in \varphi_j\} = \\ &= \sum_{c_1=0}^{c_{1,c}} P(c_1 | \Delta N_1, R) \sum_{c_2=c_{1,c}}^{c_{2,c}} P(c_2 - c_1 | \Delta N_2, R) \dots \\ &= \sum_{c_j=c_{j-1,c}}^{c_{j,c}} P(c_j - c_{j-1} | \Delta N_j, R) = \sum_{c_1=0}^{c_{1,c}} C_{\Delta N_1}^{c_1} R^{\Delta N_1 - c_1} (1 - \\ &R)^{c_1} \sum_{c_2=c_{1,c}}^{c_{2,c}} C_{\Delta N_2}^{c_2 - c_1} R^{\Delta N_2 - c_2 + c_1} (1 - R)^{c_2 - c_1} \dots \\ &= \sum_{c_j=c_{j-1,c}}^{c_{j,c}} C_{\Delta N_j}^{c_j - c_{j-1}} R^{\Delta N_j - c_j + c_{j-1}} (1 - R)^{c_j - c_{j-1}} \end{aligned} \quad (8)$$

2.2.2 接收概率

如果产品在任意判决时刻 $N_j = N_{i,a}$ 被接收，将事件记录为 $A'(N_j, R)$ 。可以理解为用户产品在试验次数 $N_j = N_{i,a}$ 内发生的故障次数 l 等于满足接收故障数，并且之前各个判决时刻的故障数均满足继续试验故障数，即：

$$\begin{aligned} A'(N_j, R) &= \{c_1 \in \varphi_1, c_2 \in \varphi_2, \dots, \\ &c_{j-1} \in [c_{j-2, c}, \min(c_{j-1, c}, l)], c_j \in \varphi_j\} \end{aligned} \quad (9)$$

在任意判决时刻 N_j 接收产品的概率都可以满足公式:

$$P(A'(N_j, R)) = P\{c_1 \in \varphi_1, c_2 \in \varphi_2, \dots, c_{j-1} \in [c_{j-2, c}, \min(c_{j-1, c}, l)], c_j \in l\} = \sum_{c_1=0}^{c_{1,c}} P(c_1 | \Delta N_1, R) \dots \sum_{c_{j-1}=c_{j-2, c}}^{\min(c_{j-1, c}, l)} P(c_{j-1} - c_{j-2} | \Delta N_{j-1}, R) P(l - c_{j-1} | \Delta N_j, R) = \sum_{c_1=0}^{c_{1,c}} C_{\Delta N_1}^{c_1} R^{\Delta N_1 - c_1} (1-R)^{c_1} \dots \sum_{c_{j-1}=c_{j-2, c}}^{\min(c_{j-1, c}, l)} C_{\Delta N_{j-1}}^{c_{j-1} - c_{j-2}} R^{\Delta N_{j-1} - c_{j-1} + c_{j-2}} (1-R)^{c_{j-1} - c_{j-2}} C_{\Delta N_j}^{l - c_{j-1}} R^{\Delta N_j - l + c_{j-1}} (1-R)^{l - c_{j-1}}. \quad (10)$$

针对具体的序贯截尾试验方案, 根据判决时刻 N_j 与接收时刻 $N_{i, a}$ 之间的关系, 利用式(10), 能够得到产品的接收概率满足:

$$P(A'(R)) = \sum_{i=0}^{r_0-1} P(A'(N_{i, a}, R)). \quad (11)$$

2.2.3 拒收概率

如果产品在任意判决时刻 $N_j = N_{i, r}$ 被拒收, 将事件记录为 $B'(N_j, R)$ 。可以理解为产品在试验次数 $N_j = N_{i, r}$ 内发生故障次数 l 大于等于拒收故障数, 并且之前各个判决时刻的故障数均满足继续试验故障数, 即 $B'(N_j, R) = \{c_1 \in \varphi_1, c_2 \in \varphi_2, \dots, c_{j-1} \in \varphi_{j-1}, c_j \geq l\}$ 。

在任意判决时刻 N_j 拒收产品的概率都可以满足以下公式:

$$P(B'(N_j, R)) = P\{c_1 \in \varphi_1, c_2 \in \varphi_2, \dots, c_{j-1} \in \varphi_{j-1}, c_j \geq l\} = P(C(N_{j-1}, R)) \left[1 - \sum_{c_j=c_{j-1}}^{l-1} P(c_j - c_{j-1} | \Delta N_j, R) \right] = \sum_{c_1=0}^{c_{1,c}} C_{\Delta N_1}^{c_1} R^{\Delta N_1 - c_1} (1-R)^{c_1} \dots \sum_{c_{j-1}=c_{j-2, c}}^{c_{j,c}} C_{\Delta N_{j-1}}^{c_{j-1} - c_{j-2}} R^{\Delta N_{j-1} - c_{j-1} + c_{j-2}} (1-R)^{c_{j-1} - c_{j-2}} \left[1 - \sum_{c_j=c_{j-1}}^{l-1} C_{\Delta N_j}^{c_j - c_{j-1}} R^{\Delta N_j - c_j + c_{j-1}} (1-R)^{c_j - c_{j-1}} \right]. \quad (12)$$

对于具体的序贯截尾试验方案, 根据判决时刻 N_j 与拒收时刻 $N_{i, r}$ 之间的关系, 利用式(12)可以获得产品的拒收概率满足:

$$P(B'(R)) = \sum_{j=1}^n P(B'(N_j, R)) = \sum_{i=c_{\min, r}}^f P(B'(N_{i, r}, R)). \quad (13)$$

式中最小拒收故障次数 $c_{\min, r}$ 与具体的统计方案有关。

在掌握成败型产品序贯截尾试验方案接收/拒收概率后, 分析其特征量概率模型。

1) 双方实际风险。结合风险定义, 结合式(11), 给出生方实际风险 α 和使用方实际风险 β 的解析表达式, 即:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 1 - P(A'(R_0)) \\ \beta &= P(A'(R_1)) \end{aligned} \right\}. \quad (14)$$

如式(14)所示, 因序贯截尾试验方案的检验方式为“边试验边判决”, 故将不同判决时刻的接收概率进行累加得到双方风险。

2) OC 曲线。由式(11)可以得到相应的 OC 曲线在给定的序贯截尾试验方案中满足:

$$P(\theta) = P(A'(R)). \quad (15)$$

3) 平均试验次数。由判决准则可知, 只有在判决时刻才能对产品做出接收判决。通过式(10), 在接收产品时可以获得相应的平均试验次数 ETN_a 满足:

$$ETN_a = \sum_{i=0}^{f-1} N_{i, a} P(A'(N_{i, a}, R)). \quad (16)$$

由于产品发生故障的随机性, 其能够在任意时刻发生故障, 当故障次数满足对应拒收故障次数时, 试验会因为拒收而结束; 因此, 利用式(12), 能够得到产品拒收时对应的平均试验次数 ETN_r 满足:

$$ETN_r = \sum_{i=0}^f N_{i, r} P(B'(N_{i, r}, R)). \quad (17)$$

综上所述, 成败型产品序贯截尾试验方案的平均试验次数满足:

$$ETN = ETN_a + ETN_r. \quad (18)$$

3 方案特性及工程应用分析

3.1 方案特性分析

由于确定原理不同, 造成 2 种方案的表现形式不同, 直接导致特征量发生明显变化。例如, 在采用定数截尾试验方案时, 虽然标准型和极限型控制风险的方法不同, 但试验次数在确定方案时已固定。而序贯截尾试验方案的试验次数则与产品自身水平相关, 实际的试验次数只有等到试验结束才能够得到。

接收概率前者模型较为简单, 计算简洁; 后者因判决原则变化, 计算复杂, 直接造成实际风险和 OC 曲线发生变化。同时, 尽管二者有着不同, 但是二者也有着相似之处, 均符合经典统计理论框架, 且风险定义(即二者错误概率)是一致的。

3.2 工程应用分析

在工程实施方面, 定数截尾试验方案因试验次

数固定，资源往往预先可知，给试验带来便利性，但是不利于快速作出判决；判断序贯截尾试验做出所需的平均试验次数较少，但试验结束时的试验次数无法提前预知，不利于试验周期掌握、人员安排等组织实施内容的布局。

在方案计算选取方面，定数截尾试验方案计算过程简单，步骤较简洁，查询表格完整；序贯截尾试验方案计算复杂，且标准仅提供了典型数值的查询表格，对于未提供的指标要求，工程中只能采取近似、商讨的方式进行，带来不便。

从平均意义上说，特别是质量极好或极差的产品，采用序贯截尾试验方案可以减少试验次数，降低试验成本，但对于质量一般的产品，则对试验次数的要求较高。为降低试验成本，在工程中可对标准型定数截尾试验方案规定的判决准则进行适当改进，这一思想类似于序贯截尾试验的统计思想，结合了二者试验次数固定和快速判决的特点。

4 算例验证

本节进一步说明上述研究内容的准确性，并与现有标准进行比较，验证结果、分析结论。

假设，已知一成败型产品的可靠性规定值为 0.8，双方风险为 0.2，最低可接受值为 0.4，分别分析其 2 种试验方案。

4.1 方案设计

1) 标准型定数截尾试验方案，如表 4 所示。

表 4 某产品的标准型定数截尾试验方案

接收故障数	拒收故障数	试验次数	使用方风险/%	生产方风险/%
1	2	4	17.92	19.08

2) 序贯截尾试验方案。产品的序贯试验方案相关判决原则可通过查询 GB/T5080.5—1985《设备可靠性试验成功率的验证试验方案》获得，相关内容如表 5 所示。

表 5 某成败型产品的序贯截尾试验方案

故障数	试验次数	
	拒收 <	接收 ≥
0	—	2
1	—	5
2	5	—

由表 4 和 5 整理后得到该产品的判决时刻如表 6 所示。

4.2 特征量计算

根据试验方案计算 2 种方案对应特征值，分析

两者差异。

表 6 某成败型产品序贯截尾试验方案判决时刻

判决时刻	拒收故障数 c_r	继续试验故障数 c_c	接收故障数 c_a	间隔次数
0	—	—	—	—
$N_1=2$	2	1	0	$\Delta N_1=2$
$N_2=5$	2	—	1	$\Delta N_2=3$

4.2.1 双方风险

1) 标准型定数截尾试验方案。在表 4 基础上，结合式(4)，对该统计方案的特征量分别进行计算，可得：

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 1 - P(A(4, 0.8)) = 0.190\ 8 \\ \beta &= P(A(4, 0.4)) = 0.179\ 2 \end{aligned} \right\}。$$

(19)

2) 序贯截尾试验方案。由表 3 可知，接收时刻共有 2 个，利用式(10)，得到当可靠性真值为 0.4 时，2 个时刻的接收概率为：

$$\left. \begin{aligned} P(A'(2, 0.4)) &= P(0|2, 0.4) = 0.16 \\ P(A'(5, 0.4)) &= P(1|2, 0.4)P(0|3, 0.4) = 0.030\ 7 \end{aligned} \right\}。$$

(20)

接收概率之和为 $P(A'(0.4)) = 0.190\ 7$ 。

拒收时刻共有 2 个，利用式(12)，得到 2 个时刻的拒收概率为：

$$\left. \begin{aligned} P(B'(2, 0.4)) &= P(2|2, 0.4) = 0.36 \\ P(B'(5, 0.4)) &= P(1|2, 0.4)[1 - \\ &\quad P(0|3, 0.4)] = 0.449\ 3 \end{aligned} \right\}。$$

(21)

拒收概率之和为：

$$P(B'(0.4)) = 0.809\ 3；$$

(22)

$$P(A'(0.4)) + P(B'(0.4)) = 1。$$

(23)

同理，利用式(14)，能够得到当可靠性真值为 0.8 时，2 个时刻的接收概率和拒收概率分别为 0.803 8、0.196 2。

$P(A'(0.4))$ 、 $P(B'(0.8))$ 为该方案对应的双方风险实际值，即：

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 0.196\ 2 \\ \beta &= 0.190\ 7 \end{aligned} \right\}。$$

(24)

4.2.2 OC 曲线

根据式(5)和(15)，可得到 2 方案 OC 曲线如图 1 所示。由图 1 可知：定数截尾试验方案与序贯截尾试验方案的 OC 曲线整体趋势相同，但相同任务可靠度真值对应的接收概率略有不同。当任务可靠度真值在(0, 0.5)内，前者的接收概率高于后者，当任务可靠度真值在(0.5, 1)内，前者的接收概率低于

后者, 当任务可靠度真值为 0.5, 两者的接收概率相同。

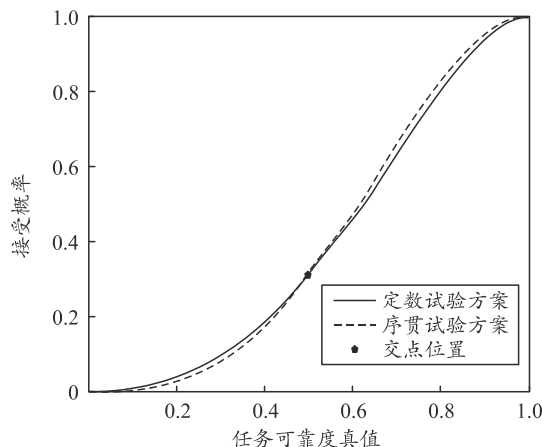


图 1 标准型定数截尾和序贯截尾试验方案的 OC 曲线

4.2.3 平均试验次数

根据标准型定数截尾试验方案的原理, 该方案所需要的平均试验次数为:

$$ETN=4. \quad (25)$$

利用式(16)~(18), 可获得序贯截尾试验方案的平均试验次数, 如表 7 所示为不同可靠性真值对应的平均试验次数。

表 7 不同可靠性真值对应的平均试验次数

可靠性真值	平均试验次数
0	2.000 00
0.4	2.748 80
0.5	2.875 00
0.6	2.871 68
0.8	2.780 80
1.0	2.000 00

4.3 方案对比分析

从上述模型与案例应用可以看出, 这 2 种方案有以下相同点:

1) 都以经典统计理论为基础, 所以在模型建立和特征值计算过程有很多相似之处;

2) 对于成败型产品, 都需要双方风险、产品可靠性规定值、最低可接受值支撑, 在此条件下, 可给出合格的试验方案。

2 种方法确定原理不同造成方案表现形式有所不同, 特征值存在差异。本案例中, 特征值差异主要体现在: 当可靠性真值不同时, 特别是较低和较高时, 定数截尾试验方案和序贯截尾试验方案给出结论的难易度不同, 可靠性真值较低时, 后者更容易拒收, 可靠性真值较高时, 后者更容易接收; 在双方风险受到控制的条件下, 序贯截尾试验方案的平均试验次数更少, 这点体现了其快速判决, 缩短

试验周期的特点。

4.4 定数截尾方案扩展分析

对于本产品, 定数截尾试验方案和序贯截尾试验方案的平均试验次数分别为 4 和 2.748 8。在前文基础上, 参照后者的判决准则, 对前者的判决准则进行扩展。

已知其定数截尾试验统计方案为(4, 1), 其接收准则等价于 4 次试验 3 次成功。如果该产品经费高昂、且属于消耗类的产品, 为了减少试验总数, 降低成本, 有时候会将 4 次试验 3 次成功的准则按照最大允许故障数进行“分解”。

认为接收准则为: 3 次试验 3 次成功(即不发生故障); 4 次试验 3 次成功。

认为拒收准则为: 2 次试验 2 次失败(即发生故障); 3 次试验 2 次失败; 4 次试验 2 次失败。

显然, 分解后的准则违背了定数截尾试验统计方案的准则(即试验次数为定值)。尽管分解后的准则形式上类似序贯截尾试验统计方案的准则, 但是其确定流程并不符合序贯截尾试验统计方案的流程。

根据分解后的接收/拒收准则, 分析其概率模型, 可获得在不同试验次数下所对应的接收概率为:

$$\left. \begin{aligned} P_{a,3} &= 0.4^3 = 0.064 \\ P_{a,4} &= C_3^1 0.4^2 (1-0.4)^1 0.4 = 0.115 2 \end{aligned} \right\}. \quad (26)$$

式中 $P_{a,i}$ 为试验次数为 i 次时的接收概率。

故接收概率 P_a 为 2 种情况的累加和:

$$P_a = P_{a,3} + P_{a,4} = 0.179 2. \quad (27)$$

由上文可知, 该接收概率与定数截尾试验统计方案的接收概率相同, 即:

$$P(A(4, 0.4)) = \sum_{k=0}^1 C_4^k 0.4^{4-k} (1-0.4)^k = 0.179 2. \quad (28)$$

同样, 在不同试验次数下所对应的拒收概率为:

$$\left. \begin{aligned} P_{r,2} &= (1-0.4)^2 = 0.360 \\ P_{r,3} &= C_2^1 0.4^1 (1-0.4)^1 (1-0.4)^1 = 0.288 0 \\ P_{r,4} &= C_3^1 0.4^2 (1-0.4)^1 (1-0.4)^1 = 0.172 8 \end{aligned} \right\}. \quad (29)$$

式中 $P_{r,i}$ 为试验次数为 i 次时的拒收概率。

故该产品的拒收概率 P_r 满足下式:

$$P_r = P_{r,2} + P_{r,3} + P_{r,4} = 0.820 8; \quad (30)$$

$$P_a + P_r = 1. \quad (31)$$

根据接收/拒收概率, 能够得到双方风险满足:

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = 0.4112 \\ \beta = 0.1792 \end{array} \right\}^{\circ} \quad (32)$$

从风险数值的层面看，只有使用方风险得到了有效的控制。该现象从拒收准则角度可以进行解释，分解后的拒收准则使试验总数有所下降，导致生产方风险有所增加。

当定数截尾试验统计方案确定的判决准则进行分解后，仅能控制使用方风险，对于生产方风险未能很好地控制。虽然对生产方利益有所影响，但是从工程实施角度，分解后的判决准则能够减少试验总数，对于消耗类且成本极高的产品可靠性指标考核有着一定的积极影响，可以根据实际情况进行使用。此时，分解后的接收/拒收准则可视为序贯截尾试验统计方案的一种特殊情况。

5 结论

笔者以成败型产品可靠性鉴定试验方案建立为例，从方法机制、表现形式、特征量等方面，对定数截尾试验方案、序贯截尾试验方案的差异和优缺点进行了比较与解释，并通过实例验证，对试验鉴定中常用的扩展定数截尾方案进行了特征量分析，指出了存在的问题。所得结论：1) 分析了定数截尾试验方案和序贯截尾试验方案的特征量模型，有助于从原理上理解和确定试验方案的确定过程；2) 通过算例分析，验证了特征量模型的准确性，并对定数截尾试验统计方案的判决准则进行扩展，说明了该方法在工程中的优势。

参考文献：

- [1] 孙龙, 胡湘洪, 高春雨. 可靠性发展历史与经验启示[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2021, 39(z2): 1-4.
- [2] 康锐, 王自力. 可靠性系统工程理论研究回顾与展望综述[J]. 航空学报, 2022(10): 527505.
- [3] 陈文华, 贺青川, 潘骏, 等. 机械产品可靠性试验技术研究现状与展望[J]. 中国机械工程, 2020, 31(1): 72-82.
- [4] SU C, HU Z Y, LIU Y. Multi-component opportunistic maintenance optimization for wind turbines with consideration of seasonal factor[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(2): 490-499.
- [5] JIN J, YANG N, LU D. Evaluation Method of Exponential Series System Reliability Based on Fixed Time Truncated Test and the Combination of System and Its Units Test Data[J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(8): 1756-1760.
- [6] 黄江平. 定时与定数截尾试验参模的建立与参数估计[J]. 纯粹数学与应用数学, 2004, 20(1): 44-52.
- [7] 张艺琼, 蒋觉义, 曾照洋, 等. 测试性试验中定数截尾试验方案与序贯试验方案的对比[J]. 测控技术, 2016, 35(8): 129-131.
- [8] 赵晨皓. 指数分布下定数截尾寿命抽样检验[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.
- [9] 余闯, 王晓红, 李秋茜. 计数型序贯截尾试验方案的计算与选择[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(4): 575-578.
- [10] 高连生, 任增. 计量型序贯截尾试验方案的计算与选择[J]. 山东工业技术, 2016(9): 293-294.
- [11] 胡思贵. 截尾序贯最优检验方法研究及其在机械产品质量检验中的应用[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
- [12] 雷鸣, 张艳. 基于多阶段试验信息融合的防空导弹飞行可靠性综合评估方法[J]. 兵工自动化, 2021, 40(9): 31-34.
- [13] 张春华, 周泽蕴, 周婷, 等. 基于 MC 仿真的系统可靠性建模分析[J]. 兵工自动化, 2022, 41(6): 78-84.
- [14] HASAN R, ESMAEIL A. Developing an adaptable sequential probability ratio test applicable for lifetime analysis of different continuous distributions[J]. Quality Technology & Quantitative Management, 2022, 19(4): 511-530.
- [15] 涂志健, 卫能, 侯卫国, 等. 基于定时截尾的搬运机器人可靠性试验方法[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2020, 38(3): 7-12.