

1 概述

GJB899-90中的定时截尾试验方案是航空、航天、兵器、电子等国防领域可靠性鉴定验收试验中经常采用的试验方案。依据定时截尾试验方案,订购方检验产品的平均无故障工作时间(MTBF)值是否达到规定的目标。如果订购方有要求,那么,可靠性验证试验的单位还应向订购方提交MTBF的最新验证区间估计 (θ_L, θ_U) 和点估计 $(\hat{\theta})$ 。定时截尾试验中,试验产品总试验时间按规定的试验方案达到规定时间就停止试验;或者总试验时间虽未达到方案规定的时间,但故障数已大于或等于方案规定的拒收判决数,则停止试验。如果试验是可替换的,即立即修复出现故障

的产品或更换新产品后继续试验,统计所有产品的累积试验时间可得总试验时间。如果试验是不可替换的,即出现故障的产品退出试验后,不进行修复或者不更换,产品的总试验时间(T)一般按如下方法进行计算:抽取 n 个产品进行试验,设 t_1, t_2, \dots, t_n 为产品发生故障的时间; $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ 是截尾时间。因此,所能观察到的是, $t_i \wedge \tau_i, t_2 \wedge \tau_2, \dots, t_n \wedge \tau_n$ 记 $x_i = t_i \wedge \tau_i, (i = 1, \dots, n), t_i \wedge \tau_i$ 表示 t_i

和 τ_i 中的最小值。则总试验时间为

$$T = \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

如何计算可靠性参数 θ 的区间估计? GJB899-90分别根据“接受判决”和“拒收判决”的试验结果给出了评估方法。但在使用过程中,我们发现该评估方

法中存在一些问题,下面就使用过程中遇到的在定时截尾试验下可靠性评估的这些问题与同行进行探讨。

2 置信度的选取和区间的估计形式

关于置信度的选取, GJB899-90中规定:订购方在规定MTBF置信区间的置信度为 C 。例如,若采用标准型定时试验方案17的试验数据是 $(2, T)$, 其中, $T=4.3$ 单位为 θ , 则应采取接收判决, MTBF点估计为

$$\hat{\theta} = \frac{4.3}{2} = 2.15 \quad (2)$$

取置信度 $C=1-2\beta=1-2 \times 20\%=60\%$, 查表可得MTBF区间估计 (θ_L, θ_U) 。

GJB899-90

定时截尾试验采取纠正措施下产品可靠性

评估探讨

郭奎 任占勇

(中国航空综合技术研究所, 北京 100028)

[摘要]就GJB899-90中定时截尾试验方案下的MTBF区间估计形式和置信度的选取进行了分析, 并对采取纠正措施下产品的可靠性评估方法进行了探讨。

[关键词]定时截尾试验; 纠正措施; 可靠性增长

[中图分类号] TB114.3; T-652 **[文献标识码]** C **[文章编号]** 1003-6660 (2006) 01-0042-03

$$\theta_L = 4.3 \times 2 / x_{0.2}^2 (2 \times 2 + 2) = 1.005$$

$$\theta_U = 4.3 \times 2 / x_{0.8}^2 (2 \times 2) = 5.215 \quad (3)$$

这说明MTBF真值落在这个区间的概率至少为60%, 置信度为80%时MTBF的单侧置信限分别为 $1.005\theta_1, 5.215\theta_1$, 即MTBF真值小于或者等于 $5.215\theta_1$

[收修订稿日期] 2005-10-27

试验, 节约了大量经费和人力, 并在实际应用中取得了成功, 为复杂地面设备维修性试验积累了实践经验, 对后续产品的维修性试验有一定的参考价值。

[参考文献]

- [1] 秦英孝. 可靠性维修性·保障性概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [2] 甘茂治. 维修性设计与验证[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.

(编辑: 雨晴)



的概率为 80%。

若采用标准型定时试验方案 17, 试验到 $T=4$, 单位为 θ_1 , 出现 3 个责任故障, 采取拒收判决, 停止试验。相应的 MTBF 点估计为 $\hat{\theta}=1.333$, 置信度 $C=60\%$ 下, MTBF 的区间估计为 (0.935, 2.605)。说明 MTBF 真值落在该区间的概率至少为 60%。MTBF 的真值大于或者等于 $0.935\theta_1$ 的概率为 80%, MTBF 真值小于或者等于 $2.605\theta_1$ 的概率为 80%。

从上面的分析可以看出, GJB899-90 中给出的评估结果很难与相应的验证试验判决结果相对应, 例如, 置信度为 60% 时 MTBF 的区间估计为 (0.935, 2.605), 单位为 θ_1 , 针对验证指标 θ_1 , 区间估计的结果不能充分说明验证试验的拒收决策, 有时还会引起误解, 认为置信度决定着区间估计范围的大小, 不能通过验证试验的产品, 如果取较低的置信度, 依据评估方法给出的评估结果可以对该产品作出接收决策。这种理解主要是混淆了验证和评估的区别。GJB899-90 中可靠性验证试验包括可靠性鉴定试验和验收试验, 可靠性鉴定试验是为了确定产品可靠性特征量在规定条件下是否达到所要求的水平而做的试验, 可靠性验收试验是为确定生产产品可靠性特征量值是否符合规定的可靠性水平而在生产批次中抽取产品在规定条件下做的试验。可靠性验证试验主要是为了验证产品的可靠性是否达到规定的指标值, 而可靠性评估主要是利用试验数据对产品的可靠性进行评估。对产品可靠性的评估可以基于验证试验结果进行, 也可以利用产品的筛选试验、可靠性增长试验的信息进行。然而, 对于具体产品而言, 其可靠性是确定的, 利用该产品的可靠性试验信息得到的验证试验结果和评估结果应该是一致的, 即如果依据试验信息得出拒收的决策, 对应给出的评估结果也应该说明该产品的可靠性不满足规定要求。鉴于按 GJB899-90 进行的可靠性试验主要关注的是使用方提出的可靠性指标是否达到要求, 而给出置信度下 MTBF 的区间估计和验收目标不具有可比性, 因此, 作者建议计算给定置信度下的单侧估计 θ_L , 即计算给定置信度下 MTBF 的置信下限, 置信度选取 $C=1-\beta$, 利用置信度 $C=1-\beta$ 下 MTBF 的置信下限和验证指标进行比较作出决策, 这样, 与使用方风险为 β 相应的验证试验所做出的决策是一致的。上面给出的例子中, 按标准型定时试验方案 17, 试验到 $T=4$, 单位为 θ_1 , 出现 3 个责任故障, 采取拒收判决, 停止试验。依据试验数据信息计算置信度为 $C=1-20\%$ 时 MTBF 的置信下限为 $\theta_L=2 \times 4 / x_{0.2}^2$

$(2 \times 3) = 0.935$, 把该评估结果和验证指标比较, 发现没有达到验证指标要求。类似地, 若采用标准型定时试验方案 17 的试验数据是 $(2, T)$, 其中 $T=4.3$, 单位为 θ_1 , 则应采取接收判决。依据试验数据信息计算置信度为 $C=1-20\%$ 时 MTBF 的置信下限为 $\theta_L=2 \times 4.3 / x_{0.2}^2 (2 \times 2 + 2) = 1.005$, 把该评估结果和验证指标比较, 显然达到了验证指标的要求。

3 产品可靠性评估过程中应注意的问题

在可靠性鉴定试验中, 对故障的分类十分关键, 它关系到产品是否能够通过鉴定试验。由于只有关联责任故障才可作为产品合格与否的判据, 所以承制单位总想方设法将故障划为非关联故障, 以使产品便于通过鉴定试验。承制方通常应用的方法就是对故障采取纠正措施, 然后根据有关规定, 将故障划为非关联故障。而 GJB899-90 中 5.3.1.3 条规定, 对于已划定的责任故障, 不应因采取了纠正措施而列入非责任故障。但是, 在对产品采取纠正措施后的试验结论中, 采用可靠性鉴定试验中的统计方法进行评估存在以下问题:

第一, 在对交付鉴定试验样机的试验结论中, 由于采取了纠正措施, 使得在试验时间出现的故障次数大大减少。因此, 按照可靠性鉴定试验的统计方法进行评估, 给出的 MTBF 估计值大于纠正前真实的 MTBF 值, 小于采取纠正措施后真实的 MTBF 值。所以, 该评估结果既不能代表采取纠正措施前的可靠性水平, 也不能代表实施纠正措施后的可靠性水平, 而仅表示产品试验结束时累积的 MTBF 估计值。

第二, 实施纠正措施后, 受试产品的母体发生变化, 产品的可靠性得到提高, 从理论上讲, 如果按照可靠性鉴定试验统计方法进行评估, 则应重新进行可靠性鉴定试验。由于受到研制进度和试验经费的制约, 人们一般难以承受严格按照这种意义的可靠性鉴定试验方法进行的试验。如果将纠正措施之前的故障次数扣除, 按照鉴定试验统计方法进行评估, 给出的评估结果通常大于产品进行可靠性增长后的真实 MTBF 值。

第三, 对于可靠性鉴定试验的样本大小, GJB899-90 规定应按合同或由承制方和订购方商定。若无具体规定时, 至少应有两台设备接受试验。对于验收试验, 若订购方无其它规定, 每批产品中至少应有两台接受试验。因此, 如果多台产品在可靠性鉴定试验中同时进行, 一旦某台产品发生责任故障, 就会对所有产品

同时采取纠正措施,这将使试验时间内故障次数显著减少,使得鉴定试验评估结果有一定的偏差。

综上所述,对于可靠性鉴定试验,在试验过程中,试验之前确定的技术状态是不能改变的,也就是说,对试验过程中出现的关联责任故障只能修复或更换,而不能采取纠正措施。只有这样,鉴定试验的评估结果才是正确的。若在试验过程中采取了纠正措施,每采取一个纠正措施,产品的技术状态就变化一次,那么,采取纠正措施前的试验应该是无效的。如果在可靠性鉴定试验中边改进、边试验,最后按鉴定试验的统计方案进行评估,得到的评估结果不能充分反映其可靠性水平。

4 合理的评估方法

在可靠性鉴定试验中,如果没有出现责任性故障,或者出现了责任性故障但没有采取纠正措施,可以按鉴定试验中的统计方法进行可靠性评估。然而,在可靠性鉴定试验中,如果出现了责任性故障,而不进行纠正就无法继续进行试验,那么,对责任故障采取即时纠正,在故障次数较多的情况下,应按下面的可靠性增长模型给出评估结果。

AMSAA 模型 (1) 可修设备在时间 $(0, t]$ 内的失效次数 $N(t)$ 是具有均值函数 $E[N(t)] = at^b$ 及瞬时强度 $\lambda(t) = abt^{b-1}$ 的非齐次 Poisson 过程。(2) 可修设备在时刻 T 定型之后,其失效时间服从指数分布,即 $a(t) = abT^{b-1}$, $t \geq T$ 定型时的 MTBF 称为产品能达到的 MTBF, 即 $\theta(t) = T^{1-b} / ab$ 。

可修设备的可靠性增长试验在时刻 T 截尾,其相继的失效时刻为 $(n \geq 1)$

$$t_1 < t_2 < \dots < t_n < T \quad (4)$$

其中, $t_1=0$, 则 b 的无偏估计及相应参数 a 的估计为

$$\hat{a} = n/T^{\hat{b}}, \hat{b} = (n-1) / \sum_{i=1}^n \ln \frac{T}{t_{i\lambda}} \quad (5)$$

所以时刻 T 的 MTBF 点估计为 $\hat{\theta} = T/n\hat{b}$ 。给定置信度 γ , 对于定时截尾情形, $\theta(T)$ 的置信度为 γ 的置信下限为

$$\theta_L = \pi_1 \hat{\theta} \quad (6)$$

其中 $\pi_1 = n(n-1)/\gamma_2$, 而 γ_2 是方程

$$\sum_{j=1}^n \frac{\gamma_2^{j-0.5}}{j!(j-1)!U_1(2\sqrt{\gamma_2})} = 1 - \gamma \quad (7)$$

的根, 其中

$$U_1(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(x/i)^{2k+1}}{k!(k+1)!} \quad (8)$$

上面的方法仅针对单台产品定时截尾情形的评估。

如果在可靠性鉴定试验中,假设产品的可靠性试验共有 2 个阶段,对责任故障采取纠正措施,重新开始进行鉴定试验,采取纠正措施前的试验称为第一阶段,采取纠正措施后的试验称为第二阶段。记第 i 阶段的产品故障时间服从指数分布,其分布函数为 $F(t, \theta_i) = 1 - \exp(-t/\theta_i)$, $t \geq 0$, 其中, θ_1, θ_2 是未知的正数,约束条件是 $\theta_1 \leq \theta_2$, 在该约束条件下计算 θ_2 的点估计和置信下限。

在每一个阶段进行定时截尾试验,设第 i 阶段的总试验时间是 t_i , 对应的失效数是 r_i , $i=1, 2$, 则 θ_2 的最大似然估计是

$$\hat{\theta}_2 = \max\left\{\frac{t_2}{r_2}, \frac{t_1}{r_1}\right\} \quad (9)$$

上面式子等号右边记为 $\varphi(r_1, r_2)$ 。 (r_1, r_2) 是随机向量,它可能的取值构成样本空间 E , 根据 $\varphi(r_1, r_2)$ 的大小对 E 中的元素排序。设 (x_1, x_2) 和 (k_1, k_2) 都是 E 中的点, $(x_1, x_2) \geq (k_1, k_2)$ 下列条件之一成立:

$$\begin{aligned} k_2 > 0, \varphi(x_1, x_2) &\geq \varphi(k_1, k_2) \\ x_1 = x_2 = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

给定置信度 γ , 如果 $k_1 = k_2 = 0$, 可以直接计算出 θ_2 的置信下限 $\theta_L = -(t_1 + t_2) / \ln \gamma$ 。当 k_1, k_2 不全为 0 时,解下面方程可得 θ_2 的置信下限,

$$\sum_{(x_1, x_2) < (k_1, k_2)} \prod_{i=1}^2 \frac{1}{x_i!} \left(\frac{t_i}{\theta}\right)^{x_i} \exp\left(-\frac{t_i}{\theta}\right) = \gamma \quad (11)$$

5 结论

在可靠性鉴定试验和验收试验中,利用定时截尾试验得到的试验数据对产品的可靠性进行评估, GJB899-90 给出了评估的方法。然而,在具体的可靠性验证试验过程中,针对出现的责任故障,工程中经常采用边试验边纠正的方法。因此,基于可靠性增长的工程背景,对试验数据进行分析,给出可靠性的评估结果是可行的。此外,产品在进行可靠性验证试验之前,为保证可靠性验证试验的顺利进行和结果的准确性,试验前受试设备应进行应力筛选,剔除故障。结合筛选试验数据信息,利用可靠性验证试验信息对产品的可靠性进行评估,给出的评估结果无疑是对产品可靠性的充分反映。

(编辑: 雨晴)