0254-6124/2007/27(3)-250-03 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Fu Hongyong, Lin Baojun, Chen Fuen. Comprehensive reliability assessment of high reliable space electronic products based on general failure rate. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, **27**(3): 250∼252

一种基于通用失效率的航天设备可靠性评估算法 *

伏洪勇 [1,2] 林宝军 [3] 陈福恩 [3]

[1](中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

[2](中国科学院研究生院)

[3](中国科学院光电研究院)

摘 要 针对高可靠、长寿命的航天电子设备的可靠性评估问题, 从 Bayes 定理出发, 进行了理论推导, 提出了一种等效任务数折合算法. 在此基础上, 建立了一种基于电子元器件通用失效率的电子设备可靠性评估算法模型, 并对一具体航天电子设备进行了可靠性评估.

关键词 Bayes 方法; 可靠性综合评估; 等效任务

中图法分类号 V 488

Comprehensive Reliability Assessment of High Reliable Space Electronic Products Based on General Failure Rate

FU Hongyong[1,2] LIN Baojun[3] CHEN Fuen[3]

[1](*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080)

[2](*The Graduate School of Chinese Academy of Sciences*)

[3](*Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences*)

Abstract According to the Bayes theorem, the comprehensive reliability assessment of high reliable electronic products in astronautics is studied theoretically and a method for the number of equivalent tasks is given. A calculation method from the tested and applied parameters of components is put forward. Finally a practical example for a certain space electronic product is presented.

Key words Bayes method, Comprehensive reliability assessment, Equivalent task

1 引言

航天电子设备由基本的电子元器件组成, 航天电子设备要求数量少、可靠性高、寿命长等, 要准确地评估出其可靠性比较困难. 以往航天电子设备的可靠性评估主要采用 Bayes 方法, 但是该方法更依赖验后信息, 即设备的试验信息 [1],[2]. 本文借助 Bayes 思想给出一种新的评估方法, 此方法更多利用验前信息, 即电子元器件的定级试验信息. 航天电子设备的系统协调性好, 地面试验充分, 假设工装的潜在缺陷都基本剔除, 那么反映设备可靠性高低的主要因素就是电子元器件本身的可靠性. 本文在此假设的基础上利用电子元器件可靠性数据, 建

* 国家自然科学基金项目资助 (60574086)

2006-08-20 收到原稿, 2007-03-08 收到修定稿

立一套综合评估航天设备整体可靠性的数学模型，并以航天数传发射机中的差分编码器部件为例给出算例.

2 系统可靠性评估参数的推导

用 Bayes 方法进行可靠性评估是一个由单元到系统的信息融合过程. 在实际工程中，单元一般可以是电子产品、机械产品、机电产品等. 通常情况下所研究的对象是设计、组装、调试、试验好的设备，在其研制过程中已经积累了较多的试验数据. 因此利用这些试验数据，从组成设备的各电子元器件的失效率入手，并假设它的共轭验前分布函数为 $\Gamma(\alpha,\beta)$, $\alpha>0$, $\beta>0$, 其中 α 为形状参数， β 为尺度参数. 那么，用 Bayes 方法就可以较好地评估航天设备的可靠性.

由实际设备研制过程可知设备试验时间一般是总定时的，若在试验过程中出现故障，则需在进行故障定位后替换有故障的电子元器件. 该过程实际是一个典型的 Possion 过程. 设失效率为 λ, 试验总时间为 T, 在 T 内产品因失效更换次数为 Z, 则它的抽样密度函数即似然函数为

$$f(T,Z/\lambda)=(\lambda T)^Z e^{-\lambda T}/Z!. \tag{1}$$

用文献 [3] 法则即可求解无信息验前分布 $g(\lambda)$, 密度似然函数的对数为

$$\ln L(\lambda/Z)=Z\ln(\lambda T)-\lambda T-\ln(Z!). \tag{2}$$

从而

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \lambda}=Z/\lambda-T. \tag{3}$$

$$\frac{\partial^2 \ln L}{\partial \lambda^2}=-Z/\lambda^2. \tag{4}$$

根据文献 [3] 法则，且注意到 $Z=T\lambda$, 在单参数情况下，则有

$$J(\hat{\lambda})=\Big(-\frac{\partial^2 \ln L}{\partial \lambda^2}\Big)_{\lambda=\hat{\lambda}}=T/\hat{\lambda}. \tag{5}$$

从而得到验前分布密度

$$g(\theta)\propto\sqrt{J(\theta)}\propto 1/\sqrt{\lambda},\quad \lambda>0. \tag{6}$$

从式 (6) 可以得到一个关于 λ 的密度核，但考虑到系统的可靠性综合需要，从可靠度 R 入手，得到关于 R 的密度核较为方便. 由代换定理可以得到关于 R ($R=\exp(-\lambda t_0)$, 其中 t_0 为设备规定的任务时间) 的近似无信息验前密度，有

$$g(R)=g_\lambda[r^{-1}(R)]\Big|\frac{\mathrm{d}[r^{-1}(R)]}{\mathrm{d}R}\Big|\propto\frac{1}{R\sqrt{-\ln R}}. \tag{7}$$

定义等效任务数 $\mu=T/t_0$, 由 Bayes 定理可知，在 (T,Z) 试验之后，式 (1) 可以改写为

$$f(\mu,Z/R)=(\mu^Z(-\ln R)^Z R^\mu/Z!)\propto(-\ln R)^Z R^\mu. \tag{8}$$

在试验 (μ,Z) 之后，由 Bayes 定理可知 R 的验后密度函数为

$$\begin{aligned} g(R/Z,\mu)&=\frac{(-\ln R)^{Z-1/2}R^{\mu-1}}{\int_0^1(-\ln R)^{Z-1/2}R^{\mu-1}\mathrm{d}R}\\ &=\Gamma(Z+1/2,\mu). \end{aligned} \tag{9}$$

从而得到 1 阶矩：

$$E(R/Z,\mu)=\Big(\frac{\mu}{\mu+1}\Big)^{Z+1/2}. \tag{10}$$

2 阶矩：

$$E(R^2/Z,\mu)=\Big(\frac{\mu}{\mu+2}\Big)^{Z+1/2}. \tag{11}$$

3 电子设备可靠性评估算法

由概率论可知，只要反映两个分布函数特征项的各阶矩保持不变，一个未知形式的分布函数可以用已知形式的分布函数拟合. 假设系统由 N 个独立的寿命服从指数分布的组件串联组成时，在近似无信息验前分布下, 用待定的 $\Gamma(Z+1/2,\mu)$ 密度函数对未知的系统可靠性密度做矩拟合，则有 1 阶矩：

$$E(R/Z,\mu)=\prod_{j=1}^m\Big(\frac{\mu_j}{\mu_j+1}\Big)^{Z_j+1/2}=A. \tag{12}$$

2 阶矩：

$$E(R^2/Z,\mu)=\prod_{j=1}^m\Big(\frac{\mu_j}{\mu_j+2}\Big)^{Z_j+1/2}=B. \tag{13}$$

由下式可以得到有关 μ 和 Z 的信息：

$$\begin{aligned} &\ln\Big(\frac{\mu+1}{\mu}\Big)\Big/\ln\Big(\frac{\mu+2}{\mu+1}\Big)=\\ &\qquad\ln\prod_{j=1}^m\Big(\frac{\mu_j+1}{\mu_j}\Big)\Big/\ln\prod_{j=1}^m\Big(\frac{\mu_j+2}{\mu_j+1}\Big)=C. \end{aligned} \tag{14}$$

$$Z=\ln A/\ln\Big(\frac{\mu}{\mu+1}\Big)-1/2. \tag{15}$$

从而得到定时截尾试验在置信度为 γ 时的可靠度置信下限为

$$R_{\mathrm{L}} = \exp\Big[-\frac{1}{2\mu}X^2_{\gamma,2Z+2}\Big]. \tag{16}$$

在式 (12)~(16) 中, μ_j 为第 j 个组件试验等效任务数, Z_j 为第 j 个组件试验失效次数, A 为系统可靠度 1 阶原点矩, B 为系统可靠度 2 阶原点矩, μ 为系统等效任务数, Z 为系统折合失效次数, R_{L} 为所求系统可靠度置信下限.

4 等效任务数折合

设备各组成器件的等效任务数可以根据以下方法确定. 这里假设设备为指数寿命型产品, 并且组成设备的器件也为指数寿命型产品, 彼此独立, 且串联组成系统. 设器件的任务时间为 t_0, 试验总时间 (包括设备现场使用时间和试验时间 T_i, 器件二次筛选试验时间 T_i', 以及器件定级试验时间 T_i'') 为 T, 则等效任务数为 [1],[3]

$$\eta_i = (T_i + T_i' + T_i'')/t_0. \tag{17}$$

组成设备的组件均为电子元器件, 其相关手册查到的通用失效率 λ_i 根据电子元器件定级试验数据统计获得, 假设其失效数为 r_i, 定级试验时间为 T_i'', 则通用失效率为

$$1/\lambda_i = T_i''/r_i. \tag{18}$$

通过以上假设可知 $T_i + T_i' \ll T_i''$, 因此有

$$\eta_i = r_i/(t_0 \cdot \lambda_i). \tag{19}$$

其中, r_i 和 λ_i 可以由相关手册或通过元器件厂商得到.

5 算例

通过上述理论分析可以看出, 从组成系统的电子元器件的可靠性试验数据出发, 可进行电子设备的可靠性综合评定. 下面以一具体航天电子设备为例进行可靠性综合评估. 由于, 元器件的试验数据大, 而且统计也较困难, 故采用试验数据并结合手册中的通用失效率数据来获得元器件的等效任务数.

算例的航天电子设备电源部件由表 1 中的电子元器件构成. 这些元器件的工作时间等参数如表 1 所示. 计算在置信度为 0.8 时设备工作到 2000 h 的可靠度.

表 1 一具体航天电子部件的电子元器件可靠性数据

Table 1 The reliability data of space device for electronic components

元器件名称	数量	失效数	等效任务数
电阻	15	2	69 444
电容	29	1	5813
晶振	1	2	4761
线接收器	1	1	140 845
触发器	4	3	125 000
数据选择器	1	1	141 769
线发送器	1	2	281 690
二极管	14	3	90 361

将每个元器件的有关数据代入 (15)~(19) 式, 可以得到如下结果: $A = 0.999\,083\,4$, $B = 0.998\,732\,5$, $C = 1.000\,152\,38$, $\mu = 7502$, $Z = 6.38$. 从而可以得到综合评估出的这一电子设备的可靠度下限为

$$R_{\mathrm{L}} = 0.9993.$$

6 结束语

本文更多的利用器件验前信息, 提出了一种基于电子元器件通用失效率可靠性评估方法, 主要针对的是航天工程中普遍存在的高可靠、长寿命产品可靠性评估问题, 给出了工程可行的解决方案. 根据本文的假设, 如果复杂电子系统在系统集成过程中的地面试验充分, 集成带入的早期失效能够比较好的剔除, 则该方法也可推广到航天复杂电子系统的可靠性综合评估.

参考文献

[1] Hu Changshou. Reliability Engineering-Design, Test, Analysis and Management. Beijing: China Astronautics Publishing House, 1988. in Chinese (胡昌寿. 可靠性工程设计、试验、分析、管理. 北京: 宇航出版社, 1988)

[2] Zhou Yuanquan, Weng Chaoxi. Reliability Assessing. Beijing: Science Press, 1990. in Chinese (周源泉, 翁朝曦. 可靠性评定. 北京: 科学出版社, 1990)

[3] Jeffrey H. Theory of Reliability. Oxford: Clarendon Press. 1961

[4] Richard K L. Application of Bayesian Reliability Concept of Cruise Missile Electronic Components. AD-A2116208, 1989