

利用 AMSAA 模型预测产品可靠性增长

梅文华

(北京航空工程技术研究中心, 北京 100076)

摘要:阐述了在保持试验条件和改进过程不变的条件下,利用 AMSAA 模型来预测产品在将来某一时刻的外推可靠性量度的评估方法,指出了《AMSAA 模型用于可靠性增长预测时的改进》的不足之处,说明了 AMSAA 模型方法的合理性。

关键词:可靠性增长;AMSAA 模型;外推可靠性量度

中图分类号:TB114.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2003)02-0081-03

有计划地激发失效、分析失效原因和改进设计,并证明改进措施的有效性而进行的试验,称为可靠性增长试验。可靠性增长试验过程中,产品在各个时刻的失效数据,不是来源于同一母体,因此,需要应用变动统计学的原理来建立产品的可靠性增长模型。产品的可靠性增长模型反映了产品可靠性在变动中的增长规律。1972年,美军装备系统分析中心的 L. H. Crow 在 Duane 模型^[1]的基础上提出了 AMSAA 模型^[2-3],获得了广泛的应用,先后被美国军用手册 MIL-HDBK-189^[4]、MIL-HDBK-338^[5]、MIL-HDBK-781^[6],国际标准 IEC61164^[7],我国军用标准 GJB1407^[8]和 GJB/Z77^[9]采纳。AMSAA 模型不但适用于可靠性增长试验数据的跟踪,也适用于可靠性增长的预测。

文献[10]认为,使用基于已知试验数据得到的 AMSAA 模型形状参数和尺度参数来预测产品在将来某一时刻的可靠性增长存在问题,用牛顿迭代法对 AMSAA 模型预测方法进行了改进。而本文认为 AMSAA 模型预测产品可靠性增长的方法是合理的。

1 AMSAA 模型

AMSAA 模型假设产品在开发期 $(0, t]$ 内失效次数 $N(t)$ 是具有均值函数 $EN(t) = at^b$ 及瞬时强度 $\lambda(t) = abt^{b-1}$ 的非齐次 Poisson 过程,参数 $a > 0, b > 0$ 。 a 和 b 分别称为尺度参数和形状参数。当 $b = 1, \lambda(t) = a$, 非齐次 Poisson 过程退化为 Poisson 过程,失效时间间隔服从指数分布,产品可靠性没有趋势,既不增长也不下降。当 $b < 1, \lambda(t)$ 递减,表明可靠性增长。当 $b > 1, \lambda(t)$ 递增,表明可靠性下降。

对于时间截尾,给定 T ,在 $(0, T]$ 内发生 $n > 1$ 次失效,失效时间为 $0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n < T$ 。此时,观测的似然函数为 $L(t_1, t_2, \dots, t_n) = \prod_{j=1}^n abt_j^{b-1} \cdot e^{-aT^b} = a^n b^n e^{-aT^b} \prod_{j=1}^n t_j^{b-1}$ 。因此有 $\ln L(t_1, t_2, \dots, t_n) = n \ln a + n \ln b - aT^b + (b-1) \sum_{j=1}^n \ln t_j$ 。通过解方程组 $\frac{\partial \ln L(t_1, t_2, \dots, t_n)}{\partial a} = 0, \frac{\partial \ln L(t_1, t_2, \dots, t_n)}{\partial b} = 0$, 得 $\frac{n}{a} - T^b = 0, \frac{n}{b} - aT^b \ln T + \sum_{j=1}^n \ln t_j = 0$ 。因此, b 和 a 的极大似然估计为 $\hat{b} = n / \sum_{j=1}^n \ln \frac{T}{t_j}, \hat{a} = n / T^{\hat{b}}$ 。在时刻 T , 产品 MTBF 的极大似然估计为 $\hat{M}(T) = \frac{T}{n\hat{b}} = \frac{T}{n^2} \sum_{j=1}^n \ln \frac{T}{t_j}$ 。 b 和 a 的极大似然估计不是无偏的, b 和 a 的

收稿日期:2002-11-22

作者简介:梅文华(1965-),男,湖南涟源人,高级工程师,空军工程大学硕士生导师,海军工程大学兼职教授,工学博士,主要从事可靠性理论、通信与信息系统研究。

无偏估计是 $\bar{b} = (n - 1) / \sum_{j=1}^n \ln \frac{T}{t_j}$, $\bar{a} = n / T^{\bar{b}}$ 。在时刻 T , 产品 MTBF 的无偏估计为 $\bar{M}(T) = \frac{T}{nb} = \frac{T}{n(n-1) \sum_{j=1}^n \ln \frac{T}{t_j}}$ 。在保持试验条件和改进强度不变的条件下, 在未来某一时刻 T^* , 产品 MTBF 的外推量度为 $M(T^*) = T^{*(1-\bar{b})} / (\bar{a}\bar{b})$ 。

2 AMSAA 模型预测可靠性增长的实例

根据文献[10]、[11]中提供的试验数据, 使用 AMSAA 模型分析歼击机雷达可靠性增长。已知在可靠性增长试验过程中出现了 6 次失效, 失效时间依次为 24、96、152、192、440、470 h, 试验于 752 h 时间截尾。试求: ①试验结束时雷达的 MTBF; ②如果要求 MTBF 达到 250 h, 预计需要多少试验时间; ③如果要求 MTBF 达到 300 h, 预计需要多少试验时间。

解: ① b 和 a 的极大似然估计为 $\hat{b} = 0.633\ 370$, $\hat{a} = 0.090\ 456$ 。 b 和 a 的无偏估计为 $\bar{b} = 0.527\ 808$, $\bar{a} = 0.181\ 994$ 。产品失效率估计为 $\lambda(t) = 0.181\ 994 \times 0.527\ 808 t^{0.527\ 808-1} = 0.096\ 058 t^{-0.472\ 192}$ 。试验结束时, $t = 752$ h, 产品 MTBF 的估计值为 237.5 h。

② 如果要求 MTBF 达到 250 h, 在保持改进强度不变的条件下, 需要的试验时间满足 $t^{0.472\ 192} / 0.096\ 058 = 250$, 由此解得 $t = 838.59$ h。因此, 总共需要 838.59 h 的试验时间, 才能使产品 MTBF 达到 250 h。

③ 如果要求 MTBF 达到 300 h, 在保持改进强度不变的条件下, 需要的试验时间满足 $t^{0.472\ 192} / 0.096\ 058 = 300$, 由此解得 $t = 1\ 233.78$ h。因此, 总共需要 1 233.78 h 的试验时间, 才能使产品 MTBF 达到 300 h。

3 与文献[10]作者商榷之处

文献[10]认为: 参数 a 和 b 都是变量, 是试验时间的函数; 当试验时间变化时, a 和 b 的值也相应地发生变化, 试验时间未知时, a 和 b 也不知道。因此, 不能将 a 和 b 作为已知结果代入有关公式来求解给定 MTBF 目标值条件下所需的试验时间。为了解决参数 a 和 b 随试验时间变化的问题, 在第三节中, 提出了采用牛顿迭代法来预测给定 MTBF 目标值条件下所需的试验时间。

实际上, AMSAA 模型中, a 和 b 均是常数, 只是这两个参数在未获得试验数据时无法确定, 而一旦获得试验数据, 就可以根据已有的试验数据来估计参数 a 和 b 的值。当然估计值不一定是真值, 试验数据越多, 估计值应当越准确。但是, 由于产品的失效遵循一个非齐次的 Poisson 过程, 即是一个特殊的随机过程, 在后续的试验时间里, 产品将发生多少次失效, 在何时发生失效, 都是未知数。因此, 根据已经获得的试验数据, 按照统计理论得到参数 a 和 b 的估计值, 应当是最合理的结果。如果按照前期的可靠性增长规划继续增长, 保持改进强度不变, 那么, 根据 a 和 b 的无偏估计, 来预测未来某一试验时间的 MTBF, 或者在给定 MTBF 目标值的条件下预测所需的试验时间, 在理论上是成立的。因此, 文献[11]中的预测方法是合理的。

文献[10]中的方法是否更合理一些, 预测结果更准确一些? 不难看出, 文献[10]的式(6)至式(13)推导过程中, 假设失效次数 n 是一个已知的常数。而实际上, 随着试验时间的增加, 失效次数 n 是变化的, 这就是文献[10]的问题所在。笔者按照文献[10]的牛顿迭代法和文献[11]介绍的 AMSAA 算法, 进行了计算, 结果见表 1。

表 1: 二种方法计算比较

MTBF 目标值 M^* /h		250	300	350	400	450	500
文献[10]	预计试验时间/h	776.16	869.85	959.95	1 047.15	1 131.91	1 214.60
	已知失效次数	6	6	6	6	6	6
AMSAA	预计试验时间/h	838.59	1 233.78	1 710.08	2 268.99	2 911.80	3 639.71
	预计失效次数	6~7	7~8	9~10	10~11	12~13	13~14

文献[10]的牛顿迭代法中, 已知失效次数 n 、失效时间、已试验时间和 MTBF 目标值, 求解为达到 MTBF 目标值所需要的试验时间, 即在失效次数 n 和失效时间保持不变的条件下, 根据不同的 MTBF 目标值得到相

应的试验时间。从表1不难看出,假定失效次数为常数是存在问题的。按照这一方法,根据已有的试验数据 $t_1 = 24$ h, $t_2 = 96$ h, $t_3 = 152$ h, $t_4 = 192$ h, $t_5 = 440$ h, $t_6 = 470$ h, $n = 6$, $T = 752$ h, 预测给定 MTBF 目标值为 $M^* = 300$ h 时所需的试验时间为 $T^* = 869.85$ h。如果在 752 h 到 869.85 h 之间没有出现失效,按照 AMSAA 模型评估, b 和 a 的极大似然估计分别为 0.579 898, 0.118 460, b 和 a 的无偏估计分别为 $\bar{b} = 0.483 248$, $\bar{a} = 0.227 860$, MTBF 估计为 $\hat{M} = 250$ h, $\bar{M} = 300$ h。评估结果表明通过 869.85 h 的可靠性增长试验产品 MTBF 达到了 300 h。但是,根据产品在 752 h 试验过程中的表现,并不能保证在 752 h 至 869.85 h 的试验过程中不出现失效,如果在此期间出现 1 次失效,则失效次数达到 7 次,产品 MTBF 的无偏估计将远小于 300 h。如果 MTBF 的目标值更大,例如 400 h,按照文献[10]中的牛顿迭代法,所需试验时间为 1 047.15 h,则更无法相信在 752 h 至 1047.15 h 的试验过程中不会出现任何失效,一旦在此期间的任意时刻出现任何失效,则评估结果将无法满足要求。

例如,按照 AMSAA 模型进行预测,需要 1 233.78 h 的研制试验时间,解决大约 $N(t) = at^b = 0.181 994 \times 1 233.78^{0.527 808} = 7.8$ 个 B 类失效,才能使 MTBF 达到 300 h。即需要再解决 1 至 2 个 B 类失效才能使 MTBF 达到 300 h。

参考文献:

- [1] DUANE J T. Learning curve approach to reliability monitoring [J]. IEEE Trans on Aerospace, 1964, 2(2): 563 - 566.
- [2] CROW L H. Estimation procedures for the Duane model [R]. ADA019372, 1972, 32 - 44.
- [3] CROW L H. Reliability analysis for complex, repairable systems [R]. ADA020296, 1975.
- [4] MIL - HDBK - 189, Reliability growth management [S].
- [5] MIL - HDBK - 338B, Electronic reliability design [S].
- [6] MIL - HDBK - 781, Reliability test methods, plans and environments for engineering development, qualification and production [S].
- [7] IEC61164, Reliability growth - Statistical test and estimation methods [S].
- [8] GJB1407 - 92, 可靠性增长试验 [S].
- [9] GJB/Z77 - 95, 可靠性增长管理手册 [S].
- [10] 董蕙茹, 黄燕锋, 刘 静. AMSAA 模型用于可靠性增长预测时的改进 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2002, 3(5): 79 - 82.
- [11] 陈学楚. 装备系统工程 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [12] 梅文华. 可靠性增长试验 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.

(编辑: 姚树峰)

Extrapolated Reliability Measure Based on AMSAA Reliability Growth Model

MEI Wen - hua

(Beijing Aeronautical Technology Research Center, Beijing 100076, China)

Abstract: This paper describes the evaluation method of predicting the extrapolated reliability measure of a product at a given future point by AMSAA model on condition that the previous test conditions and the modification procedures are kept unchanged, points out the deficiency in the modification of reliability growth prediction with AMSAA model and presents the reasonableness of the AMSAA model method.

Key words: reliability growth; AMSAA model; extrapolated reliability measure