

基于 AMSAA 模型的成型产品可靠性 综合评估方法研究

吴和成, 胡琳

(南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 211106)

摘要: **目的** 改进基于 AMSAA 模型成型产品的可靠性综合评估方法。**方法** 采用工程界普遍使用的 AMSAA 模型, 利用同类或相似产品研制阶段试验的故障数据, 基于综合利用均值和方差信息这一思路, 提出一种通过对拟合优度检验统计量的离散系数进行寻优而确定时间环境折合系数的方法。**结果** 通过这一改进方法计算得到置信度为 0.9 时, 产品成形时的 MTBF (Mean Time Between Failure) 单侧置信下限提高了 17%, 优于文献结果, 且求得置信度分别为 0.95 和 0.99 时, 产品成形时的 MTBF 单侧置信下限依然优于文献结果。**结论** 在不同的置信度下, 该方法合理可行, 符合工程实际。

关键词: 研制试验; AMSAA 模型; 时间环境折合系数; 离散系数

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.05.021

中图分类号: TB114 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)05-0106-05

Comprehensive Evaluation Method of Molding Product Reliability Based on AMSAA Model

WU He-cheng, HU Lin

(School of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

ABSTRACT: Objective To improve the reliability evaluation method of molding products based on AMSAA model. **Methods** A method of determining the time environment conversion coefficient by optimizing the discrete coefficient of goodness of fit test statistics by using the AMSAA model commonly that used by the engineering community was proposed with same or similar product development stage test data based on the comprehensive utilization of mean and variance information. **Results** The result of this improved method showed that the lower confidence limit of MTBF (mean time between failures) was increased by 17% when the confidence degree was 0.9, which was superior to the result of literature. Moreover, when the confidence level was 0.95 and 0.99, the MTBF confidence level of the product was still better than that of the literature. **Conclusion** Therefore, at different confidence degree, the method is reasonable and feasible and it is also in line with the engineering practice.

KEY WORDS: development test; AMSAA model; time environment conversion coefficient; discrete coefficient

通常在产品设计定型或鉴定时, 需要定量评估产品的可靠性水平, 以确认其是否符合研制要求^[1]。某些体积较大或质量较大的产品, 受试验条件和经费的限制, 一般无法进行可靠性鉴定试验, 因此需要找到

工程上更实用的评估方法。

实际上, 产品在研制阶段进行了很多次可靠性试验, 其在试验过程中出现的故障也采用与正规的可靠性增长试验相同的程序来纠正^[2]。在此过程中, 产品

的可靠性不断提高, 此为变母体的过程。又由于产品在研制过程中经历的试验项目均在不同环境下完成, 因此其又是变环境的试验过程。事实上, 产品的研制试验数据包含了产品的可靠性信息, 因此充分利用此类信息进行可靠性评估是可行的^[3]。此外, 在可靠性增长评估中, 为提高评估结果的可信度, 文献中多采用扩大样本量的方法^[4-7]。文中通过利用被评估产品的同类或相似产品的研制数据, 以提高可靠性综合评估精度。

由于产品及其同类或相似产品在研制阶段获取的试验数据所具有的变母体、变环境的特性不符合可靠性增长统计分析模型的前提假设, 因此为了利用研制试验数据来评估产品的可靠性, 首要应解决各种试验的数据在可靠性增长模型前提下的折合问题。Duane 模型和 AMSAA 模型为常用的可靠性增长模型, 在进行可靠性评估时 Duane 模型只能给出 MTBF 的点估计^[8-13], 而 AMSAA 模型克服了这一缺点。因此, 文中主要研究在 AMSAA 模型前提下, 产品研制阶段试验数据的折合问题。时间环境折合系数的求解可以表示为具有多约束极小形式的最优化过程, 而在此过程中, 最重要的是优化准则的选取。文献中常用的优化准则为: 拟合优度检验统计量的均值最小^[14-16]。此准则只考虑了均值这单一因素, 具有片面性。文中选取拟合优度检验统计量的离散系数最小作为优化准则, 其含义是当各产品的拟合优度检验统计量变异性最小时, 运算出的环境折合系数即为所求的解^[17]。文中提出的方法综合利用了均值和标准差信息, 经过试验数据验算, 符合工程实际, 是一个可取的优化准则, 进而可进一步求解产品设计定型时 MTBF 的点估计、置信区间和单侧置信下限。

1 时间环境折合系数的求解

为了利用产品研制阶段的试验数据求解其定型时 MTBF 的点估计、置信区间和单侧置信下限, 需先求解时间环境折合系数。

1.1 前提假设

利用产品研制试验数据进行可靠性综合评估有以下假设:

- 1) 产品经历的可靠性增长过程是变母体和变环境的。
- 2) 产品及其同类或相似产品经历的改进均属于即时改进类型。
- 3) 用时间环境折合系数 k_{ij} 表示产品经历的所有试验所具有的环境应力变动 (i 表示产品的编号, j 代表产品 i 所经历的试验项目), 时间环境折合系数可以将各种研制试验环境应力下的试验时间转化为标准使用环境下的试验时间。即第 i 个产品的第 q 次故障的试验时间 t_{iq} 通过 k_{ij} 进行折合后为 $t_{iq} \cdot k_{ij}$, 表示

该产品在实际使用环境下的故障时试验时间。

- 4) 当产品在研制期间经历的试验项目较多时, 可将所有试验项目归结为几类环境应力, 被归结为同一类环境应力的试验项目具有相同的时间环境折合系数。

1.2 数学描述

已知有 p 个 ($p \geq 2$) 同类或相似产品在研制阶段共经历了 m_i 个 ($m_i \geq 2$) 试验项目, 产品 i 在研制期间发生的总故障数为 n_i 。 $T_{i(j-1)}$ 、 T_{ij} 分别表示产品 i 的第 j 个试验项目的起止节点, 产品 i 落在某个试验项目内的第 q 次故障的累计试验时间为 t_{iq} ($i=1, 2, \dots, p$; $j=1, 2, \dots, m_i$; $q=1, 2, \dots, n_i$)。

求产品所经历的每个试验项目对应的时间环境折合系数 $k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{im_i}$ 。

- 1) 计算折合后的故障时累计试验时间。对于一组假定的时间环境折合系数 $k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{im_i}$, 根据式 (1) 计算折合后的产品 i 在整个研制过程发生第 q 次故障时的累计试验时间, 用 tt_{iq} 表示:

$$\begin{cases} TT_{i0} = T_{i0} \\ TT_{ij} = TT_{i(j-1)} + k_{ij} (T_{ij} - T_{i(j-1)}) \\ tt_{iq} = TT_{i(j-1)} + k_{ij} (t_{iq} - T_{i(j-1)}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $T_{i(j-1)} \leq t_{iq} \leq T_{ij}$; TT_{i0} 为折合后产品 i 在整个研制过程的起始节点; $TT_{i(j-1)}$ 、 TT_{ij} 分别为产品 i 的第 j 个试验折合到整个研制过程的起止节点。

- 2) 计算各产品参数 \bar{b} 的点估计:

$$\bar{b}_i = \begin{cases} (n_i - 1) / \sum_{q=1}^{n_i} \ln \frac{TT_{im_i}}{tt_{iq}} & n_i > 1 \\ n_i / \sum_{q=1}^{n_i} \ln \frac{TT_{im_i}}{tt_{iq}} & n_i = 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: TT_{im_i} 为折合后产品 i 在整个研制过程中试验的截止时间。

- 3) 确定环境折合系数。如果存在一组时间环境折合系数能够将所有同类或相似产品的每一研制试验项目所对应的试验时间转换为产品在基准使用环境下的试验时间, 并认为经折合后的同类或相似产品在研制过程中的可靠性增长规律均服从 AMSAA 模型, 且其增长规律可以用 AMSAA 模型来拟合。出于此判定规则, 可以得到所求的适用于同类或相似产品的一组时间环境折合系数应满足的约束条件。由于每个产品在进行 AMSAA 模型拟合时, 拟合优度检验统计量 C_{i,n_i}^2 含有待定的环境折合系数 k_{ij} , 文中综合利用 C_{i,n_i}^2 的方差和均值信息, 确定更符合工程实际的关于 C_{i,n_i}^2 的函数 E , 可由式 (3) 求得各时间环境折合系数:

$$E = \min \left\{ \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^p (\bar{C} - C_{i,n_i}^2)}{p}} \bigg/ \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p C_{i,n_i}^2} \right\} \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} U_i \leq -U_{i,(1-\alpha_i/2)} \\ C_{i,n_i}^2 \leq C_{i,n_i,\alpha_i}^2 \end{cases}$$

式中： U_i 为产品*i*的增长趋势检验统计量的值； C_{i,n_i}^2 为产品*i*的AMSAA模型拟合优度检验统计量的值，其可分别由式(4)求得； $U_{i,(1-\alpha_i/2)}$ 和 C_{i,n_i,α_i}^2 分别为产品*i*在显著性水平为 α_i 下的增长趋势检验统计量的临界值及拟合优度检验统计量的临界值。

$$U_i = \left(\sum_{q=1}^{n_i} tt_{iq} - \frac{n_i TT_{im_i}}{2} \right) \bigg/ \left(TT_{im_i} \sqrt{\frac{n_i}{12}} \right)$$

$$C_{i,n_i}^2 = \frac{1}{12n_i} + \sum_{q=1}^{n_i} \left[\left(\frac{tt_{iq}}{TT_{im_i}} \right)^{\bar{b}_i} - \frac{2q-1}{2n_i} \right]^2 \quad (4)$$

时间环境折合系数的寻优过程采用穷举搜索法，此过程可运用MATLAB软件实现。即*K*在工程上合理的范围（一般可根据工程经验的方法给出）和步长被给定后，通过软件运算得出的一组*K*值，即为产品及其同类或相似产品共同的时间环境折合系数。

2 研制试验数据可靠性综合评估

运用上述方法确定时间环境折合系数后，便可求解产品设计定型时MTBF的点估计、置信区间和单侧置信下限。

已知被评估的产品在设计定型前共经历了*m*个试验项目；在研制期间的总故障数为*n*；第*j*个试验项目的起止节点为 T_{j-1} 、 T_j ；落在某个试验项目内的第*q*次故障发生时的累计试验时间为 t_q （ $m_i \geq 2$ ； $j=1, 2, \dots, m$ ； $q=1, 2, \dots, n$ ）。求产品设计定型时的MTBF的点估计、置信区间和单侧置信下限。

2.1 总故障数不为0

依据上述方法确定该产品及其同类或相似产品共同的时间环境折合系数 k_1, k_2, \dots, k_m 后，按照式(5)计算出折合到整个研制过程中第*q*次故障发生时的累计试验时间 tt_q ：

$$\begin{cases} TT_{i0} = T_{i0} \\ TT_j = TT_{j-1} + k_j (T_j - T_{j-1}) \\ tt_q = TT_{j-1} + k_j (t_q - T_j) \end{cases} \quad (5)$$

1) 利用式(6)、(7)分别计算AMSAA模型的参数 \bar{b} 、 \bar{a} 的点估计：

$$\bar{b} = \begin{cases} (n-1) / \sum_{q=1}^n \ln \frac{TT_m}{tt_q} & n > 1 \\ n / \sum_{q=1}^n \ln \frac{TT_m}{tt_q} & n = 1 \end{cases} \quad (6)$$

$$\bar{a} = n / TT_m^{\bar{b}} \quad (7)$$

式中： TT_m 为该产品整个研制过程最后一个试验折合后的截止时间。

2) 计算MTBF的点估计、双侧置信区间和单侧置信下限。研制试验结束时MTBF的点估计由式(8)得到：

$$\bar{\theta} = \left[abTT_m^{\bar{b}-1} \right] \quad (8)$$

置信度为 γ 的MTBF双侧置信区间为：

$$\left. \begin{aligned} \theta_{L,\gamma} &= \pi_1 \bar{\theta} \\ \theta_{U,\gamma} &= \pi_2 \bar{\theta} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中： $\theta_{L,\gamma}$ 、 $\theta_{U,\gamma}$ 分别为置信度等于 γ 的MTBF置信下限和置信上限； π_1 、 π_2 表示置信度为 γ 的时间截尾区间估计系数。

置信度为 γ 的MTBF单侧置信下限为：

$$\theta_{DL,\gamma} = \theta_{L,(2\gamma-1)} \quad (10)$$

2.2 总故障数为0

当被评估产品在研制阶段的总故障数为0时，可利用已经得到的其同类或相似产品的时间环境折合系数进行可靠性评估。由式(5)得到折合后整个研制试验的截止时间 TT_m ，则置信度为 $(1-\alpha)$ 的MTBF的单侧置信下限为：

$$\theta_L = \frac{2TT_m}{\chi_{2,\alpha}^2} \quad (11)$$

3 实例分析

某航天产品有3个同类产品，其研制阶段的试验数据见表1，求解拟进行设计定型的1号产品的MTBF单侧置信下限。

运用MATLAB软件按上述方法计算，可求得置信度为0.9、0.95、0.99情况下，分别用优化准则为拟合优度统计量的均值最小^[15]和离散系数最小的方法求得时间环境折合系数，并由此计算产品设计定型时MTBF的单侧置信下限，见表2。

由表2可知，在文中给出的方法下，置信度为0.9、0.95、0.99的情况下求得的产品MTBF单侧置信下限均高于文献[15]求得的结果，即在相同的置信度下，产品MTBF置信区间更短，也即在文中方法下，产品MTBF估计的精度更高。同时，由于综合

表 1 某航天产品 3 个同类产品的研制试验故障数据

产品	序号	试验名称	试验时间/h	故障次数	故障时试验时间/h
1	1	性能试验	360	6	12,28,54,96,142,242
	2	综合测试	200	4	8,30,69,136,
	3	综合环境试验	260	6	2,21,52,96,148,212
	4	高温老练	300	3	10,80,200
	5	联合试验	120	1	20
2	1	性能试验	350	5	18,26,98,110,198
	2	综合测试	190	3	7,15,75
	3	综合环境试验	250	6	1,9,16,42,110,190
	4	高温老练	290	2	31,44
	5	联合试验	110	2	55,93
3	1	性能试验	380	7	10,19,63,92,150,190,253
	2	综合测试	220	5	9,38,74,150,189
	3	综合环境试验	280	8	1,36,58,77,106,139,174,232
	4	高温老练	320	4	22,63,98,156
	5	联合试验	140	3	43,89,117

表 1 方法比较——1 号航天产品 MTBF 单侧置信下限

置信度	均值最小						离散系数最小					
	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	MTBF/h	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	MTBF/h
0.9	0.4	1.2	2.1	0.8	1.6	84.87	0.2	1	2.4	0.8	1.6	99.63
0.95	0.4	1.2	2.1	0.8	1.6	76.30	0.2	1	2.4	0.8	1.6	89.58
0.99	0.2	1	2.1	0.8	1.6	68.80	0.2	1	2.4	0.8	1.6	74.09

环境试验比实际使用环境严酷得多，其环境折合系数应更大。因此，文中提出的运用优化准则为拟合优度检验统计量的离散系数最小的方法求解，其评估产品设计定型时 MTBF 的置信下限的精度更高，更符合工程实际。

4 结论

文中提出的基于 AMSAA 模型，利用被评估产品及其同类或相似产品研制阶段的试验数据，通过对拟合优度检验统计量的离散系数进行寻优而确定时间环境折合系数的新方法，综合考虑了统计变量的均值和方差两个方面的信息，克服了以往仅利用统计变量的均值信息求解的片面性，因此依据该方法得到的时间环境折合系数更具合理性。以此为基础评估产品设计定型时刻的可靠性，不仅解决了产品样本量不足的问题，同时又提高了评估精度。

参考文献：

[1] BROEMM W J, ELLNER P M, WOODWORTH W J. AMSAA Reliability Growth Guide[J]. AMSAA Reliability Growth Guide, 2000.

[2] 翁雷, 廖军, 孙国强. 电子产品可靠性增长试验综述[J]. 环境技术, 2018(1): 20-23.

[3] DAI R, GUO C. Researches and Investigation on Manufacturers' Reliability Test Data of Electronic Parts[J]. Energy Procedia, 2017,127: 242-246.

[4] ZHU X, FANG Z. "DGM-AMSAA" Model of Reliability Growth Based on the Small Sample[C]// IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services. IEEE, 2014.

[5] TALAFUSE T P, POHL E A. Small Sample Reliability Growth Modeling Using a Grey Systems Model[J]. Quality Engineering, 2017, 29(3): 455-467.

[6] WAYNE M, MODARRES M. A Bayesian Model for Complex System Reliability Growth Under Arbitrary Corrective Actions[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2015,64(1): 206-220.

[7] 徐磊, 张流圳. 可靠性测试的样本量估计[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2018, 36(S1): 41-43.

[8] 黄敏, 赵宇. 一种产品可靠性综合评估模型的数值分析方法[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(11): 131-134.

[9] 赵宇, 王宇宏. 复杂电子设备研制阶段数据的可靠性综合评估[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(11): 99-102.

[10] 洪东跑, 赵宇, 马小兵. 利用变环境试验数据的可靠性综合评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(9):

- 1152-1155.
- [11] ZHANG W, LAN N, SUN P. An Integrated Reliability Evaluation Model of Aircraft Flight Test[C]// International Conference on Reliability, Maintain-ability and Safety. IEEE, 2011.
- [12] 蔡忠义, 陈云翔, 庄骏, 等. 基于研制试验数据的可靠性综合评估方法[J]. 火力与指挥控制, 2014(12): 70-72.
- [13] CAI Z, CHEN Y, ZHANG Z, et al. Method on Integrated Reliability Assessment of Test Data Based on Duane Model[C]// International Conference on Reliability, Maintainability and Safety. IEEE, 2015.
- [14] QIANG L, YUAN X, YANG J. Application of Ant Colony Algorithm in the Optimization of the Time Environ-mental Conversion Factor of the Reliability Models[C]// 2008 International Workshop on Geoscience and Remote Sensing. IEEE, 2008.
- [15] 杜振华, 赵宇, 黄敏. 基于 AMSAA 模型的研制试验数据可靠性综合评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(8): 745-748.
- [16] 杜振华, 赵宇, 陈金盾, 等. 产品设计定型时 MTBF 置信区间的确定[J]. 数学的实践与认识, 2003, 33(2): 38-43.
- [17] ORTIGUEIRA M D, RIVERO M, TRUJILLO J J. Steadystate Response of Constant Coefficient Discrete-time Differential Systems[J]. Journal of King Saud University Science, 2016, 28(1): 29-32.