

文章编号: 1000-6893(2002) 02-0111-04

一种用于变环境数据的可靠性增长分析模型

赵 宇, 黄 敏, 王 智

(北京航空航天大学 可靠性工程研究所, 北京 100083)

MODEL OF RELIABILITY GROWTH EVALUATING TO VARIOUS ENVIRONMENTS

ZHAO Yu, HUANG Ming, WANG Zhi

(Institute of Reliability Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘 要: 提出了一种综合评估模型, 考虑不同试验环境对产品的影响而引入环境折合系数的概念, 从而将不同试验条件下的数据折合到相同试验条件下, 然后利用折合后的数据再进行可靠性增长分析。最后, 通过工程实例证明了该模型的工程实用性。

关键词: 研制阶段; 可靠性数据; 可靠性增长; 可靠性评估

中图分类号: V251.7 文献标识码: A

Abstract: Aeronautic equipment should take a series of tests in its development phase, and its reliability is continuously improved. Therefore, The use of all these test data to evaluate the system reliability growth could effectively improve the evaluating accuracy. But first of all it should solve the varied environment problem, that is, in the test, various environments produce various data. This paper brings forward a kind of integrated reliability growth evaluation model. By using environment conversion factors the model can convert the test data from various environments into those from the same environment and afterwards analyze the system reliability improvement to make a correct evaluation. In the end, an example presents the model's engineering practicability.

Key words: development phase; reliability data; reliability growth; reliability evaluating

产品在其研制周期内的不同时间, 不同环境应力条件下要进行一系列系统试验, 这些试验在不同的程度上是设计用来模拟系统的使用环境或在某种情况下加速环境应力对硬件的影响。在此过程中发生的故障能够被分析, “修正”后的结果可在随后的试验中检验。这种工程上的试验、分析、纠正再试验(Test, Analyses, Fix and Test 简称 TAAF)的方法是可靠性增长试验的主要特点^[1-3], 因此装备的可靠性在研制周期的各个阶段都会产生增长。如果能充分利用所有这些试验产生的数据, 那么将可以大大减少专门的可靠性增长试验时间, 在既节省了经费又满足了进度要求的同时使装备的可靠性水平得到充分增长^[4,5]。

但将研制阶段所有试验数据运用于可靠性增长分析, 将会面临的一个难点就是: 产品研制阶段各试验产生的数据是来自不同试验环境, 这不符合可靠性增长统计分析模型(如常用的 Duane 模型和 AMSAA 模型)的前提假设。一般来讲, 在评

估产品的可靠性水平时, 分析严酷试验环境条件下得到的试验数据将得出较为悲观的结果, 与其相反, 分析理想试验环境条件下得到的试验数据将得到较为乐观的结果, 这些都会影响对产品可靠性水平的正确评估。

美国军用手册 MIL-HDBK 189(可靠性增长管理手册)提出在产品研制过程中采用逐阶段地进行可靠性增长计划和控制方法, 其基本思路是先研究相似产品研制各阶段试验的历史数据, 然后推测新研制产品可靠性在各研制阶段的增长方式和增长速率, 综合这些数据就可以绘制出整个研制阶段的计划增长曲线, 在双对数坐标系下其形式是各阶段为斜率不同的直线, 而阶段间可靠性产生阶跃。对于可靠性增长跟踪则采用分段实施的方法。但该思路在工程实际中实施起来却很困难, 一是由于延缓修正而导致的研制阶段间可靠性阶跃的幅度难以估计, 给绘制计划曲线造成困难。另外某些研制阶段样本量过少, 可靠性增长跟踪精度不高^[6,7]。

另外, MIL-HDBK 189 还提出了可将整个研制规划作为一个整体来处理可靠性增长, 但没有

收稿日期: 2001-05-21; 修订日期: 2001-08-05

基金项目: 国防科技“九五”预研项目(91.2.2.4)资助项目

文章网址: <http://www.hkxb.net.cn/hkxb/2002/02/0111/>

提出相应的定量分析方法,也没有提出相应的增长统计模型来对整个研制过程实施可靠性增长跟踪。其主要原因是无法处理各试验阶段试验变环境数据的问题,虽然 MIL-HDBK 189 提出了 k 系数的概念,对试验数据进行环境修正,但终因无法得到适当的 k 系数取值而不被推荐使用。

本文在 Duane 模型的基础上,提出一种可用于变环境数据的可靠性增长分析模型,通过引入环境折合系数的概念,对产品不同研制阶段试验产生的故障数进行修正,将不同试验环境条件下的数据折合到了一个统一的试验环境下,目的是根据产品研制阶段所有试验数据对产品当前的可靠性水平进行综合的增长分析。本文同时提出了求解环境折合系数的数值分析方法。

1 综合的增长分析模型

1.1 基本思路

为了将产品整个研制阶段的可靠性数据加以综合应用,以扩大可靠性增长分析的信息量,可以利用 Duane 模型的特点,对产品实施可靠性增长跟踪时去掉阶段试验中的数据点,只在阶段试验结束时标记定时截尾跟踪点,由于此时已引入延缓修正,那么就可将增长过程采用 Duane 模型进行分析。

但样本量的扩大也带来了新的问题,造成在综合利用所有试验阶段数据时,无法应用传统的 Duane 模型进行分析及预测。如图 1 为某航空产品研制阶段在双对数坐标下的可靠性增长跟踪曲线。

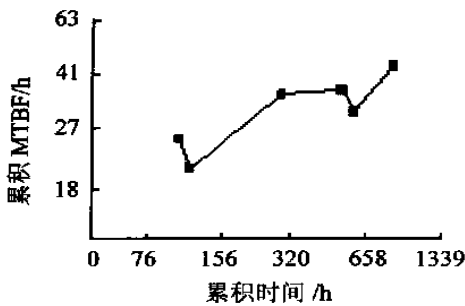


图 1 某航空产品研制阶段的累计 MTBF 增长过程跟踪曲线(环境修正前)

Fig. 1 MTBF's growth curve of a product developing course (before environment conversion)

如图 1 所示,根据该产品在研制阶段所做试验中得到的数据所绘制的跟踪曲线无法看出连续的增长过程,甚至存在可靠性负增长,数据不能通

过 Duane 模型的拟合优度检验。出现这种情况是因为工程实际中的试验数据不符合 Duane 模型的前提假设,即试验数据应来自于同样的环境应力条件。综合的可靠性增长数据来自于整个研制阶段的各个试验,环境应力条件各不相同,因此无法进行可靠性增长分析。

为解决此问题,必须引入环境折合的概念,将不同试验环境条件下产生的试验数据通过环境系数折合,修正为在单一试验条件下(本文采用实际使用条件)的折合数据,以进行综合的增长分析。

考虑到同类产品由于故障机理相同或相似,对于同类较规范的试验,具有相同的环境影响效应,因此认为它们具有相似或相同的环境折合系数,从而可以不必从单个产品角度考虑其在每类试验环境条件下承受的具体条件和试验过程细节。这样,要确定特定类型产品在特定类型的试验环境下的折合系数,可以分析同类产品在研制阶段的历史故障数据,通过统计分析总结出该类型产品对不同环境的敏感程度,进一步算出环境折合系数。不考虑每个产品各类试验的具体环境条件的定量影响效果,而是在宏观上反映环境折合系数对产品可靠性的影响。

每一种环境对应一个环境折合系数 k_i 。某一研制阶段试验在其试验环境条件下获得的故障数据通过下面公式折合到实际使用环境下(产品实际使用环境的环境折合系数为 1):

$$r_{\text{修}} = k_j \times r_{\text{实}}$$

式中: k_j 为第 j 个试验阶段对应的环境折合系数; $r_{\text{实}}$ 为实际故障数; $r_{\text{修}}$ 为修正后的故障数。

通过环境折合系数 k_i 的折合,产品在整个研制阶段各试验产生的试验数据都折合到单一试验环境(使用环境)下。再利用可靠性增长 Duane 模型对产品进行综合的可靠性增长分析。

1.2 模型基本假设

(1) 产品所经历的研制过程是一个变环境的可靠性增长过程;

(2) 产品所经历各试验阶段具有不同的环境,这种变动用环境折合系数 k_j 表示, j 代表产品所经历的试验阶段。而各个环境折合系数 k_j 可按试验阶段的目的和类型进行归类;

(3) 产品在各试验阶段实际发生的故障数 r_i 可以用环境折合系数 k_i 进行折合,折合值 $r_i k_j$ 可以认为相当于产品在实际使用环境下的故障数。

(4) 经过环境折合系数折合后,产品在整个

研制阶段的可靠性增长过程(每一试验阶段为一数据点)符合杜安模型;

(5) 由于杜安模型的数据点采用的是点估计,而且用对数坐标,因此,无论可靠性指标是累积故障率还是累积 MTBF,都要排除间断点。所以,在采用累积 MTBF 作可靠性指标时,当一个阶段试验故障数为零时,需做以下处理:

当采用置信度为 0.5 时单边置信下限作为点估计值,有

$$MTBF = \frac{t}{-\ln 0.5} = \frac{t}{0.7}$$

把这个原则推广到任何试验阶段,得出以下假设:当产品的某个阶段试验故障数为零时,首先将其折合为 0.7 个故障。

1.3 已知条件

(1) n 种同类产品各有自己的经历和试验阶段,设第 i 个同类产品经历了 p_i 个试验阶段,则共有 $\sum_{i=1}^n p_i$ 个 k_{ij} 系数, $i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, p_i$ 。

(2) 不同的试验阶段可分属于特定的试验类型,它们的环境折合系数相同。这些特定的试验类型是依其所施加应力的情况而划分的。如本文进行如下分类:

k_1 ——单应力,如除三防试验外的环境试验和例行试验等;

k_2 ——综合环境应力,如可靠性增长、摸底、鉴定试验等;

k_3 ——实际使用环境,如试飞、服役使用;

k_4 ——单项应力逐次施加,如定型试验;

(3) 每个产品在每个试验阶段中的试验时间 t_{ij} 和故障数 r_{ij} 为已知。

1.4 模型的数学描述

由基本假设,根据 Duane 模型,一个产品历次试验过程结束时的累积试验时间和累积 MTBF 按一定顺序排列时,在双对数坐标系中呈线性关系,即下式成立

$$\lg MTBF_j = \alpha + m_i \lg t_j \quad (1)$$

其中:累积故障数要经过环境折合

$$MTBF_j = \frac{t_j}{\sum_{j=1}^j (k_{ij} \cdot r_{ij})} \quad (2)$$

式中: α 为第 i 种产品的拟合曲线在对数纵坐标 MTBF 上的截距; m_i 为第 i 种产品的拟合曲线的增长率; $MTBF_{ij}$ 为第 i 种产品在第 j 个试验阶段结束时的 MTBF 观察值; t_{ij} 为第 i 个产品在第 j 个试验阶段的试验时间; t_j 为第 i 种产品在第 j 个试验阶段结束时的累积试验时间; r_{ij} 为第 i 种产品在第 j 个试验阶段中的故障数; k_{ij} 为第 i 种产品在第 j 个试验阶段的环境折合系数。

2 环境折合系数的确定方法

2.1 基本思路

同类产品对于同类较规范的试验,具有相同的环境折合系数。因此,可以通过统计分析同类产品研制阶段的历史失效数据总结出该类型产品对不同环境的敏感程度,进一步算出环境折合系数。

假设已知 n 个同类产品在研制阶段的试验数据,选择一组环境折合系数 k_i ,将各产品的试验数据用同一组环境折合系数进行修正,而对修正后的试验数据进行最小二乘拟合时,则通过一个判定拟合效果最好的原则来确定相对应的环境折合系数。

2.2 优化准则

在对每个产品进行拟合时,无论拟合直线的斜率 m_i 还是相关系数 ρ_i ,都含有待定的环境折合系数 k_{ij} 。确定每个环境折合系数,需要利用具有类似的环境应力敏感性的一组同类产品,比如:不同型号的相同产品或同一大类的电子产品、机电产品和机械产品等,借助这些产品相关系数的函数 E ,来求得各环境折合系数。

本文采用如下的优化准则

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{\rho} - \rho_i)^2}{n} \quad (3)$$

$$E = \min\{S\}$$

其中: $\bar{\rho}$ 为各产品拟合相关系数的均值。

此优化准则要求各套数据数值拟合后相关系数的方差最小。该准则不强调各个相关系数尽可能大,而是尽可能接近,经检验是较符合工程实际的一个准则。

3 实例分析

某航空产品研制阶段共进行了 6 种不同类型

试验, 试验数据如表 1。

表 1 某航空产品研制阶段试验数据

Table 1 Test data of product developing course

试验名称	环境类型	试验时间 /h	故障数 /次
1 试飞	实际使用环境	15.8	2
2 验收试验	单项应力逐次施加	128	5
3 定型试验	单应力	252.2	7
4 可靠性摸底试验	综合环境应力	352.8	5
5 试飞	单应力	4.7	3
6 可靠性鉴定试验	综合环境应力	594.4	5

由于同类产品受试验环境的影响具有相似性, 将以上数据与其相似产品的历史数据比较后, 可以得出对应于各试验阶段的环境折合系数, 应用这套环境折合系数修正同类型产品的试验数据后, 较为符合 Duane 模型(通过线性回归方法)。说明确实可以通过环境折合的方法将变环境条件的可靠性增长问题简化为单一环境条件下的可靠性增长问题。

选用的环境折合系数和综合增长率如表 2。

表 2 某航空产品研制阶段试验环境折合系数及综合增长率

Table 2 Environment conversion factors of a product and its integrated growth rate

试验环境类型	单应力	综合环境应力	实际使用环境	单项应力逐次施加
环境折合系数	3	1.1	1.2	1.8
综合增长率		0.47		
当前的 MTBF		71.9		

计算结果表明, 通过环境折合系数的修正后, 产品的试验数据都能很好地吻合 Duane 模型, 增长率的大小也基本符合工程实际。该产品的试验数据在经过环境折合系数的修正后, 与未经环境折合的可靠性增长跟踪曲线(图 1)对比, 从重新绘制的跟踪曲线图中看出了持续增长的趋势, 如图 2。

4 结 论

相关的研究和统计表明, 通常的可靠性增长评估方法, 由于没有考虑环境对产品可靠性的影响, 利用可靠性增长试验数据对产品的可靠性增长所作的评估与利用实际使用数据的评估值相差较大, 有的甚至相差数倍。而应用本文提出的这种带环境折合的可靠性增长统计模型, 通过运用环境折合系数, 可以极大的简化变环境的可靠性增长的评估问题, 特别是在小子样的情况下, 能有效的扩大样本量。对工程实例的分析表明, 模型可以在产品研制阶段刚结束时, 就能利用研制阶段不

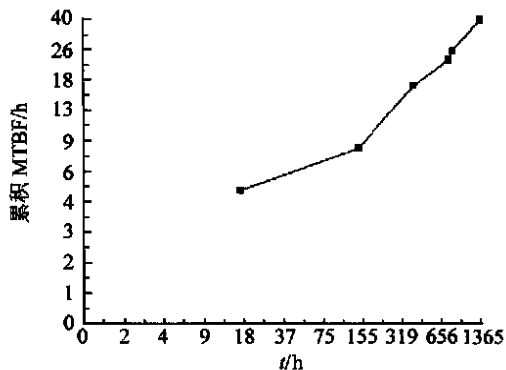


图 2 某航空产品研制阶段的累计 MTBF 增长过程跟踪曲线 (环境修正后)

Fig. 2 MTBF's growth curve of a product developing course (after environment conversion)

同环境下的试验数据, 对产品的可靠性水平作出较为精确的评估。因此, 本模型具有较高的工程应用价值。

参 考 文 献

- [1] MIL-HDBK-189. Reliability growth management[S]. 1981.
- [2] Benton A W, Crow L H. Integrated reliability growth testing[A]. 1989 Proceedings Annual R & M Symposium[C], 1989, 160- 166.
- [3] Brach J P, Phaller L J. Integrated test-A must for reliability achievement[A]. 1980 Proceedings Annual R. & M. Symposium[C], 1980, 242- 247.
- [4] Chin J H, Arne L, von Hasseln H J. Reliability growth through an integrated test approach- a case history[A]. 1982 Proceedings Annual R & M Symposium[C], 1982, 432- 438.
- [5] Marko D M, Wardner E A. TAAF testing of modified or redesigned equipment[A]. 1983 Proceedings Annual R & M Symposium[C], 1983, 287- 286.
- [6] Wronka J C. Tracking of reliability growth in early development[A], 1988 Proceedings Annual R & M Symposium [C], 1988, 68- 173.
- [7] Bell R. Army reliability growth management policy[A]. 1986 Proceedings Annual R & M Symposium[C], 1986, 210- 213.

作者简介:



赵 宇(1965-) 男,北京航空航天大学工程系统工程系副教授。从事可靠性统计、可靠性评估、可靠性信息管理 with 数据处理等方面的理论研究、教学与工程实践, 发表论文十余篇, 出版专著一部, 主持制定国家军用标准一部, 并已承担和正在承担国防预研、国防技术基础等十余项研究课题。现为中国宇航学会质量与可靠性专业委员会委员, 国防科工委可靠性工程技术研究中心副主任。

黄 敏(1968-) 女,北京航空航天大学工程系统工程系讲师。从事可靠性信息管理 with 数据处理等方面的理论与工程实践。
王 智(1974-) 男,北京航空航天大学硕士研究生。

(责任编辑: 李铁柏)