

基于多试验信息的可靠性综合评估方法

王晓红, 许小靓, 王立志

(北京航空航天大学, 北京 100191)

摘要: 针对在长寿命高可靠产品的样本及数据极少的情况下, 同一个样本由于经历了不同环境下的试验而无法进行寿命及可靠性评估的问题, 通过对产品进行可靠性建模, 并在此基础上进行失效率预计, 由预计结果计算获取了各种试验环境下的环境折合因子, 由此得到不同环境下的试验所对应规定环境下的试验信息, 可对产品的寿命及可靠性进行评估。

关键词: 多试验信息; 环境折合因子; 可靠性评估

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2013.04.009

中图分类号: V240.2 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2013)04-0034-04

Integrated Reliability Evaluation Method Based on Multiple Test Information

WANG Xiao-hong, XU Xiao-liang, WANG Li-zhi

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Aiming at the service life and reliability evaluation problems of long life and high reliability products, which are rare samples and data, and samples experiencing different environmental tests, an integrated reliability evaluation method was put forward. Through building the product reliability model, product failure rate was predicted. The result was used to calculate the environment converting factor for different environmental tests. Test information of regulated environment was obtained from different environmental test and service life and reliability evaluation of product can be made at last.

Key words: multiple test information; environment converting factor; reliability evaluation

对于某些产品,特别是长寿命高可靠的产品,由于研制周期及经费的限制,寿命或可靠性试验并不能获得充足的数据。有时亦因为条件的限制,无法开展相应的寿命及可靠性试验,从而导致无法评估得到其实际的可靠性或寿命。同时,受样本量和经费的制约,这些产品的某些样本在研制阶段的各个时期除了进行寿命或可靠性试验外,通常还经历了

性能试验、环境试验等多项试验,对产品的寿命造成了一定的损耗,且这些试验的结果中也包含着大量看似零散、但很有价值的可靠性信息。若能将不同试验的信息综合起来,开展寿命及可靠性评估工作,上述问题便迎刃而解,因此需要一种能够融合不同试验信息的方法。

目前所采用的多试验信息融合方法中,基本思

收稿日期: 2013-02-22

作者简介: 王晓红(1969—),女,内蒙古包头人,副教授,主要研究方向为可靠性试验理论及加速试验技术。

路都是在获取不同试验时间的基础上,首先得到产品在不同环境下的折合因子;其次利用折合因子对不同试验的有效试验时间进行折合,将其转化为所需条件下的试验时间,并将这些时间进行累加,得到总试验时间;利用折合得到的总试验时间,结合相应的寿命及可靠性评估方法对产品的寿命及可靠度进行评估。

对多试验信息融合方法的研究分为3种情况:1)变母体数据的可靠性综合评估,常见的有杜安Duane模型、AMSAA模型^[1]等;2)变环境数据的可靠性综合评估^[2],要利用产品在不同环境条件下的故障数据进行可靠性综合评估,关键问题是要将不同环境条件下的试验结果转换为同一种环境条件下的试验结果^[3];3)利用相似产品信息的可靠性综合评估^[4],通常可以采用贝叶斯方法,将相似产品信息作为先验信息引入到评估模型中^[5]。在产品的样本数极小(如等于1)或用于评估的数据极少的情况下,用现有方法较难开展数据融合评估工作。

针对缺乏样本及数据时,环境折合因子难以获取,寿命、可靠性评估工作难以进行的情况,提出了一种基于多试验信息的可靠性综合评估方法。与以往方法类似,都是在环境因子折合试验时间后进行评估,但环境因子的获取方式不同,文中方法适用于样本及数据极少的情况,并能综合不同试验信息对寿命及可靠性进行评估。

1 基于多试验信息融合方法

通过对产品进行可靠性建模,并在得到产品数学模型的基础上进行失效率预计。由预计结果计算获取各种试验环境下的环境折合因子,最后根据环境折合因子可得到各试验转化为正常使用条件下的时间,并进行寿命及可靠性评估。评估过程包括4个步骤,流程如图1所示。

1.1 环境折合因子获取方法

环境折合因子是一种环境媒介,通过它可以对不同环境下的试验数据进行折算与综合^[6]。环境因子的理论基础是基于以下3个假设条件:

1) 产品在不同环境应力水平下失效机理保持不变;



图1 基于多试验信息的可靠性综合评估方法流程

Fig.1 Flow chart of integrated reliability evaluation method based on multiple test information

2) 产品在不同环境因子下的寿命服从同一形式分布;

3) 产品的残存寿命仅依赖于已累积的失效和当前的环境应力,与累积方式无关^[7]。

环境折合因子的获取需要通过计算各试验环境下的失效率得到。

1.1.1 获取产品在不同试验环境下的失效率

首先对产品的结构功能进行分析,依据产品的原理、功能以及功能流程建立产品的可靠性模型。常用的模型形式有串联模型、并联模型等^[8]。

在得到产品可靠性模型的基础上,对产品的失效率进行预计,得到产品在不同试验环境下的预计失效率。若没有相应的预计资料,可参考相应的标准。如产品自身已经进行了详细的可靠性预计,也可以参考预计结果给出各部件的失效率。

由于针对长寿命高可靠的产品,受经费和时间的限制,样本及数据极少,无法得到实际失效率,因此采用相应标准中的数据进行失效率预计。其中非电子器件采用NPRD—91《非电子器件可靠性数据》中的失效率数据,电子器件采用元器件应力分析法预计其失效率,失效数据采用GJB/Z 299C—2006《电子设备可靠性预计手册》中提供的数据。

电子产品从生产出来,经贮存、运输到交付使用,每刻都在经受各种环境应力的作用,因此环境应力对电子产品的质量影响很大。据美国空军总部对某沿海基地使用的产品故障调查分析结果,损坏或故障的电子产品中,52%是由环境因素引起的^[9]。相比于电子产品,非电子产品受到环境的影响极小,因

此假设不同环境下失效率的差异主要作用在电子产品上,则可通过预计试验 j 环境下电子产品的失效率,结合固有的非电产品失效率来获取系统在试验 j 环境下的失效率 $\lambda_j(j=1,2,\dots,m,m$ 为试验的数量)。

预计的具体方法如下。

1) 根据产品试验的具体情况,对产品的单元 $i(i=1,2,\dots,n)$ 在试验 $j(j=1,2,\dots,m)$ 环境下的失效率 λ_{ij} 进行预计。由于非电产品单元受环境影响极小,因此可直接从NPRD—91中查得失效率预计值。对于电子产品单元,GJB/Z 299C—2006对环境应力中温度应力的影响有相应的规定,而对于其它环境应力的影响可以通过标准中的环境因子 π_E 来进行描述;若产品单元在某试验条件下的环境应力无法精确描述,则用环境因子给出描述这种试验条件的区间值,从而得到产品单元失效率预计值 λ_{ij} 或其区间。

2) 通过预计得到的单元失效率 λ_{ij} ,根据产品的可靠性模型,得到产品在第 j 个试验下的失效率 λ_j 。若产品的可靠性模型为串联模型,各单元的寿命分布均为指数分布时,产品的寿命也服从指数分布,产品在第 j 个试验下的 λ_j 为产品中各单元的失效率 λ_{ij} 之和,见式(1)。

$$\lambda_j = - \sum_{i=1}^n \frac{\ln[R_{ij}(t)]}{t} = \sum_{i=1}^n \lambda_{ij} \quad (1)$$

式中: t 为产品寿命时间; $R_{ij}(t)$ 为第 i 个单元在 j 试验条件下的可靠度。同时由正常使用环境下的各单元失效率计算得到产品在正常使用情况下的失效率 λ_0 。

1.1.2 确定环境折合因子

由指数分布性质可知,寿命时间同失效率的关系为:

$$t = \frac{\ln(R)}{-\lambda} \quad (2)$$

式中: R 为产品可靠度; λ 为产品失效率。

由式(2)可知,在给定的可靠度水平下,试验时间与失效率成反比关系。产品在试验 x 条件下向 y 条件下时间折合的环境折合因子见式(3)。

$$k_{x \rightarrow y} = \frac{t_y}{t_x} = \frac{\lambda_x}{\lambda_y} \quad (3)$$

同理,产品在试验 j 条件下向正常使用条件下时间折合的环境折合因子见式(4)。

$$k_{j \rightarrow 0} = \frac{t_0}{t_j} = \frac{\lambda_j}{\lambda_0} \quad (4)$$

式中: t_0 为产品在正常使用条件下的试验时间。

从而得到产品在 m 个试验条件下的时间向正常使用条件下的时间折合的环境折合因子 $k_{1 \rightarrow 0}, k_{2 \rightarrow 0}, \dots, k_{m \rightarrow 0}$ 。

1.2 试验数据的折合及评估

利用得到的环境折合因子,对原有试验时间 t_j 进行折合,将其转化为正常使用条件下的时间,见式(5)。

$$t'_j = k_{j \rightarrow 0} \cdot t \quad (5)$$

式中: t'_j 为试验 j 条件下试验时间所对应的正常使用时间。

因此,获得各试验转化为在正常使用条件下的时间,分别为 $t'_1, t'_2, \dots, t'_n$,对其进行累加,获得总试验时间,见式(6)。

$$t_{\text{总}} = \sum_{j=1}^m t'_j \quad (6)$$

利用得到的总试验时间,结合相应的寿命及可靠度评估方法,给出产品在某一特定条件下的可靠性特征量估计值。一般为给定置信度下的产品可靠性参数或寿命,如平均故障间隔时间 $MTBF$ 的点估计、区间估计,无故障运行时间 $MTTF$ 的下限估计值等。

2 实例

已知某机载机电产品由于时间条件等因素的限制,仅有1台样本经历了1000 h的寿命试验及200 h的环境试验,并未开展相应的可靠性试验。在没有其它试验数据的情况下,希望对其平均故障间隔时间进行评估,因此可靠性的评估具有一定的难度。

由于未对产品进行相应的可靠性试验,且样本仅为1台产品,因此很难用常规的方法进行评估,故采用文中所述的方法进行评估。

2.1 建立产品的可靠性模型

首先对产品的结构功能进行分析,依据产品的原理、功能以及功能流程建立产品的可靠性框图。

经过对产品的分析可知,产品由两部分组成,分别为机械部分和电子部分。机械部分包括蜗杆、轴组件等4个产品部件;电子部分包括电位计、继电器等9个产品部件。由分析可知,产品中任一机械部件或电子部件可能发生的故障发生后,都需要维修或更换,都会产生维修及保障要求,因此基本可靠性模型是一个全串联模型,其可靠性框图如图2所示。

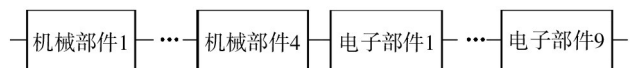


图2 实例产品的可靠性框图

Fig. 2 Reliability chart of sample product

产品的数学模型按串联可靠性模型计算为:

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^4 R_i \cdot \prod_{j=1}^9 R_j$$

$$= \exp\left[-\left(\sum_{i=1}^4 \lambda_i + \sum_{j=1}^9 \lambda_j\right) \cdot t\right] \quad (7)$$

式中: $R_s(t)$ 为系统可靠度。

2.2 预计产品在不同环境下的失效率

在得到产品可靠性模型的基础上,对产品的失效率进行预计。在没有相应预计资料及数据的前提下,采用参考相应标准给出各部件失效率的方法。

2.2.1 正常使用条件失效率

由NPRD—91《非电子器件可靠性数据》可查得产品各机械部件的失效率 λ_{i0} 。

由GJB/Z 299C—2006《电子设备可靠性预计手册》可知,在正常使用条件下,其条件为运输机无人舱,因此所选择的环境因子 π_E 的值为8.0。以精密线绕电位计为例,查表可得以下参数:基本失效率 λ_b ,工作环境温度为70℃,电应力比 S 为0.3,查表5.6.3-1,得 $\lambda_b=0.61$; π_E ,安装在运输机无人舱,查表5.6.3-2,得 $\pi_E=9.6$;质量系数 π_Q ,质量等级为B1,查表5.6.3-3,得 $\pi_Q=0.5$;阻值系数 π_R ,查表5.6.3-4,得 $\pi_R=1.0$;引出端系数 π_{TAPS} ,查表5.6.2-5,得 $\pi_{TAPS}=1.0$ 。

计算得电位计失效率为:

$$\lambda_{01} = \lambda_b \pi_E \pi_Q \pi_R \pi_{TAPS} = 2.928 \times 10^{-6}$$

同理可预计产品各电子部分的失效率 λ_{0j} ,根据产品可靠性模型可得出在正常使用条件下的失效率为:

$$\lambda_0 = \sum_{i=1}^4 \lambda_{i0} + \sum_{j=1}^9 \lambda_{0j} = 54.682 \times 10^{-6}$$

2.2.2 寿命试验条件失效率

由于该产品的寿命试验是在常温的实验室环境下进行的,相当于地面良好情况,所选择的环境因子 π_E 的值为1,查表可预计产品各电子部分的失效率 λ_{1j0} 。

根据产品可靠性模型可得出在寿命试验条件下的失效率为:

$$\lambda_1 = \sum_{i=1}^4 \lambda_{i0} + \sum_{j=1}^9 \lambda_{1j0} = 49.218 \times 10^{-6}$$

2.2.3 环境试验条件失效率

由于产品的环境试验项目繁多,环境应力情况各不相同,其环境介于地面良好和战斗机无人舱之间,因此其环境因子 π_E 的取值为[1, 11]。查表可预计产品各电子部分失效率 λ_{2j} 的区间值,将各部件失效率相加可得环境试验条件下产品电子部分的失效率区间为[0.408, 8.075]。

根据产品可靠性模型可得在环境试验条件下的失效率为:

$$\lambda_2 = \sum_{i=1}^4 \lambda_{i0} + \sum_{j=1}^9 \lambda_{2j}, \lambda_2 \in [49.218, 56.885] \times 10^{-6}$$

2.3 时间折合

根据得到的失效率,应用式(4)可计算出产品寿命试验时间向正常使用条件下工作时间折合的环境折合因子:

$$k_1 = \frac{t_0}{t_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_0} = \frac{49.218}{54.682} = 0.9$$

同理,产品环境试验时间向正常使用条件下工作时间折合的环境折合因子为:

$$k_2 = \frac{t_0}{t_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_0} = \frac{[49.218, 56.885]}{54.682} = [0.9, 1.04]$$

文中产品经历的寿命试验时间为1000 h。根据得到的寿命试验对应于正常使用条件的环境折合因子,对寿命试验时间由式(5)进行折合,将其转化为正常使用时的时间:

$$t'_1 = k_1 \cdot t_1 = 900 \text{ h}$$

文中产品经历的环境试验时间为200 h。对环境试验时间由式(5)进行折合,将其转化为正常使用

(下转第65页)

- 446—451.
- [11] 钟开云,彭成信. 中国电子产品质量与可靠性信息交换网工作回顾[J]. 电子产品可靠性与环境试验,1996(5):9—16.
- [12] 周雷,许新芳,孙军. 美国军用手册 217F 与 GJB/Z 299B 比较研究[J]. 国防技术基础,2008(8):20—22.
- [13] 张文俊,聂国健,郑丽香. 国外最新可靠性预计方法综述[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2009(2):24—28.
- [14] 周雷,许新芳,程俊. 美国军用手册 217F 以外的可靠性预计方法[J]. 电子质量,2008(8):68—70.
- [15] 张增照. 可靠性预计及其准确性[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2005,23(12):43—46.
- [16] NICHOLLS D. What is 217Plus/SupTM/and Where Did It

- Come from[C]// Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Conference Symposium. New York: IEEE, 2007:22—27.
- [17] 谭松林,施琼,马良. 质量与可靠性信息管理探析[J]. 军民两用技术与产品,2002(11):28—29.
- [18] 航天产品质量与可靠性信息管理系统(QRMS2.1)内容介绍[J]. 质量与可靠性,2005(3).(余不详)
- [19] 陈业朋,黄洪钟,王贵宝,等. 3F 体系数据库开发与应用关键技术研究[J]. 质量与可靠性,2010(1):56—59.
- [20] 韩庆田,刘梦军,贺孝涛,等. 可靠性预计及其发展趋势[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2001(5):14—18.
- [21] 张学渊. MIL-HDBK-338B 美军可靠性设计手册介绍[J]. 质量与可靠性,2006(3):54—57.

(上接第37页)

时的时间:

$$t'_2 = k_2 \cdot t_2, t'_2 \in [180, 208]$$

累加后获得总环境折合后的试验时间为:

$$t_{\text{总}} = t'_1 + t'_2, t_{\text{总}} \in [1080, 1108]$$

2.4 评估寿命及可靠度

利用得到的总试验时间,可对产品的 *MTBF* 进行评估。产品在经过相当于 $t_{\text{总}}$ 小时的试验后,仍未出现失效,因此在接下来的评估过程中将 $t_{\text{总}}$ 作为 0 失效定时截尾数据处理。

因为无故障, $r=0$, 只进行单侧置信下限估计。若将使用方风险 β 定为 20%, 则所得到的产品 *MTBF* 单侧置信下限为:

$$\theta_L = \frac{t_{\text{总}}}{-\ln \beta}, \theta_L \in \left[\frac{1080, 1108}{-\ln 0.2} \right] = [670.85, 688.24]$$

由此可以推断,在使用方风险为 20% 的情况下,产品的 *MTBF* 下限区间为 [670.85, 688.24]。若取区间的下限值 670.85, 可知产品 *MTBF* 的评估至少为 670.85 h。

3 结语

提出了一种基于多试验信息的可靠性综合评估方法,在长寿命、高可靠产品的样本及数据极少的情

况下,通过获取各种环境下的环境折合因子,综合不同试验信息进行寿命及可靠性评估,简化了确定环境折合因子的过程,应用起来更加简便。

由于在确定折合因子的过程中采用了标准或历史数据,且在满足一定假设的情况下开展,因此仅适用于数据及样本量极其稀缺的情况,利用多试验信息对产品的寿命及可靠性进行评估。文中方法的评估精度具有一定的局限性,还有待进一步改进。

参考文献:

- [1] MIL-HDBK-189, Reliability Growth Management[S].
- [2] 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.
- [3] 程志君,王小林,郭波. 变环境条件下发射场测控设备使用阶段可靠性评估模型[J]. 导弹与航天运载技术,2010(6):41—44.
- [4] 李凤,师义民,荆源. 两参数 Weibull 分布环境因子的 Bayes 估计[J]. 系统工程与电子技术,2008,30(1):186—189.
- [5] 赵宇,黄敏. 变母体变环境数据的可靠性综合评估模型[J]. 北京航空航天大学学报,2002,28(5):597—600.
- [6] 甄昕. 环境因子在电子产品可靠性评定中的应用研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2009,27(1):20—22.
- [7] 赵婉,温玉全. 可靠性评估领域中环境因子的研究进展[J]. 综述与展望,2005(2):69—72.
- [8] 曾声奎,赵廷弟,张建国,等. 系统可靠性设计分析教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2001:31—35.
- [9] 章新瑞,任占勇. 可靠性试验中环境应力与产品故障机理间关系研究[J]. 环境技术,2000(5):7—11.