

一种高可靠电子产品贮存寿命评估方法

王九兴¹, 付力力¹, 邢志伟¹, 刘雄飞², 王瑞²

(1.北京控制与电子技术研究所, 北京 100038, 2.中国航天科工运载技术研究院 北京分院, 北京 102308)

摘要: 介绍了加速寿命试验的基本理论, 并给出一种基于多应力加速试验的高可靠电子产品贮存寿命评估方法。首先给出一种基于多应力加速试验的电子产品贮存寿命评估流程, 然后指出关键环节是根据产品特点选择合适的加速应力、加速模型, 最后给出数据处理方法。该评估方法经过了工程实践, 快速评估出一种高可靠产品的贮存寿命。

关键词: 多应力; 加速试验; 贮存寿命评估

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.03.006

中图分类号: TN601 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)03-0026-04

A Storage Life Assessment Method of Highly Reliable Electronic Product

WANG Jiu-xing¹, FU Li-li¹, XING Zhi-wei¹, LIU Xiong-fei², WANG Rui²

(1. Beijing Institute of Control and Electronics Technology, Beijing 100038, China; 2. Launch Vehicle Technology Academy of China Aerospace Science & Technology Industry Corporation, Beijing 102308, China)

ABSTRACT: This paper proposed a method of the storage life assessment for high reliability electronic product based on the accelerated test with multiple accelerating stresses. First, the technological process of the storage life assessment for electronic products based on the accelerated test with multiple accelerating stresses was introduced; then it was pointed that the key was to choose accelerating stresses and accelerated model according to characteristics of product. This assessment method is verified through practice. It could rapidly assess the storage life of highly reliable product.

KEY WORDS: multi-stress; accelerated test; storage life assessment

1 概述

随着电子元器件、材料、工艺技术的飞速发展, 如何有效评估高可靠电子产品贮存寿命成为产品工程师面临的一个难题。寿命评估是通过合理的试验及试验数据分析量化产品寿命的过程^[1]。电子产品寿命评估主要通过两种基本试验方法获得寿命数据, 一种是传统的模拟真实环境的寿命试验方法, 另一种是加速寿命试验方法。随着技术的飞速发展和市场竞争的日益激烈, 一方面电子产品能够在模拟环境试验下或

真实使用条件下长期(可能会达到上千小时)无故障工作; 另一方面企业要在短期内研制出满足用户需求的高可靠、低成本的电子设备。

传统的基于环境真实性模拟的可靠性寿命试验可能存在以下不足^[2]: 试验周期长, 成本高; 对产品设计、工艺上缺陷没有专门考核, 导致产品中可能存在残留缺陷。如果在使用过程中出现问题, 可能会带来经济、声誉上的损失。在这种情况下, 加速试验成为可靠性试验领域的重要研究方向。加速试验通常通过加大应力量值或提高应力频度或者两者的组合, 实

收稿日期: 2018-10-07; 修订日期: 2018-11-16

作者简介: 王九兴(1978—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 研究生, 高级工程师, 主要研究方向为质量可靠性技术, 以及电子产品的研制。

现缩短试验时间以及产品可靠性的评估、提升等。

加速试验在国内外工程中已有大量应用,加速试验的目的可概括如下:查找产品薄弱环节并进行改进,提升产品固有可靠性,缩短高质量产品的研发周期,降低产品成本,适应市场竞争环境;满足用户预期的需要(比如给出工作寿命/贮存寿命的评估)。

根据加速试验的目的不同,可以将其主要分为两类:

1) 加速应力试验。确定和纠正产品薄弱环节,缩短高质量产品研发周期。比如可靠性强化试验、高加速应力筛选试验等。

2) 加速寿命试验。预估产品工作寿命或贮存寿命,满足用户预期的需要。比如加速贮存(寿命)试验、加速(工作)寿命试验等。

按照应力施加方式的不同,加速应力试验一般分为恒定应力加速试验(恒加试验)、步进应力加速试验(步加试验)、序进应力加速试验(序加试验)三种基本类型^[3-4]。加速应力的确定需要结合产品研制和使用特点来决定,常用的加速应力主要包括:温度应力、湿度应力、振动应力、电应力、综合应力(上述应力的组合,比如温度、湿度的组合)。

常用的应力施加方式主要包括恒定应力方式、步进(降)应力方式、序进应力方式等。文中介绍了加速试验的基本理论,并给出一种基于多应力加速试验的高可靠电子产品贮存寿命评估方法。

2 加速寿命试验基本理论

1967年,美国罗姆航空研发中心(Rome Air Development Center: RADC)提出了加速寿命试验(Accelerated Life Testing: ALT)方法:基于合理的工程及统计假设,利用与失效物理规律相关的统计模型对在超出正常应力水平的加速环境应力下获得的寿命(或可靠性)信息进行转换,得到产品在额定应力水平下寿命(或可靠性)特征可以复现的数值估计的一种试验方法^[5]。

不同的加速应力对产品各种失效模式的加速机理和加速效果不同,通常用加速模型描述失效模式的可靠性特征量(如平均寿命、失效率等)与敏感加速应力的关系。常见的加速模型包括 Arrhenius 模型、Eyring 模型、cofin-manson 模型、多项式加速模型、Peck 模型等^[6]。Arrhenius 模型常用于描述温度与寿命之间的关系;Eyring 模型可以用于描述温度/湿度等多种应力与寿命时间的关系;Coffin-Manson 模型用于描述温度循环与寿命之间的关系;多项式加速模型属于典型的非参数模型,主要用于对寿命与应力之间的拟合;Peck 模型是描述温湿度环境应力对产品寿命曲线影响的加速模式,是 Eyring 模型的推广形式^[7]。

加速因子是加速寿命试验的一个重要参数。它是加速应力下产品某种可靠性特征量(如平均寿命、特征寿命、失效率等)与正常应力下该可靠性特征量的比值,也可称为加速系数,是一个无量纲数。加速因子反映加速寿命试验中加速应力水平相对正常应力的加速效果,即是加速应力的函数。

从 20 世纪 60 年代开始,有关学者对加速试验数据处理方法开展了研究,70 年代初传入我国^[5]。目前恒加试验的数据处理方法比较成熟,步加试验数据处理的难点在于从失效数据中分离出每个应力水平下的产品寿命信息。1980 年, Nelson 提出了著名的累积损伤模型^[8],在此基础上,我国茆诗松^[9]、葛广平^[10]等学者研究了不同分布类型下步加试验数据处理方法。

序加试验由于试验设备要求高(要设计一种装置产生符合要求的应力函数^[11]),数据处理难度较大,在工程上较少应用。我国林正宁和费鹤良^[12]给出了威布尔分布和对数正态分布场合下序加试验的统计分析方法,并在元器件层面上进行了应用。

综上所述,目前元器件、原材料的加速试验技术相对成熟,但是无法客观反映高可靠电子产品的寿命。主要原因有:无法模拟元器件、原材料在产品内部的联结形成的失效模式;难以模拟电子产品内部真实使用条件,比如元器件自身进行了降额设计,或者进行了防潮处理等。

整机层面的电子产品加速寿命试验很有意义,在短时间内给出产品寿命评估值的同时,能降低产品维护成本,提升市场竞争力。

3 一种基于多应力加速试验的电子产品贮存寿命评估方法

3.1 评估流程

通常对高可靠电子产品而言,面临多应力(温度、湿度、电应力、振动等)的贮存环境,如果简化成单应力条件开展加速贮存寿命试验时间可能会很长,将失去短时间内给出产品贮存寿命评估值的优势。另外如果没有得到充分的失效信息,加速试验可能会失败。一种基于多应力加速贮存寿命试验的产品寿命评估流程如图 1 所示。

3.2 加速模型选择

图 1 中加速应力的制定是关键环节,需要紧密结合产品设计特点和实际贮存环境进行合理选择。通常电子产品实际贮存环境存在温度、湿度应力,并且定期进行电测试。面对这种情况,可以在对产品进行综合应力(温度、湿度、电应力)摸底考核的基础上,用温度、湿度应力作为主要加速应力,开展加速贮存寿命试验。对应的加速模型为 PECK 模型,产品寿命分布可采用双参数威布尔分布。

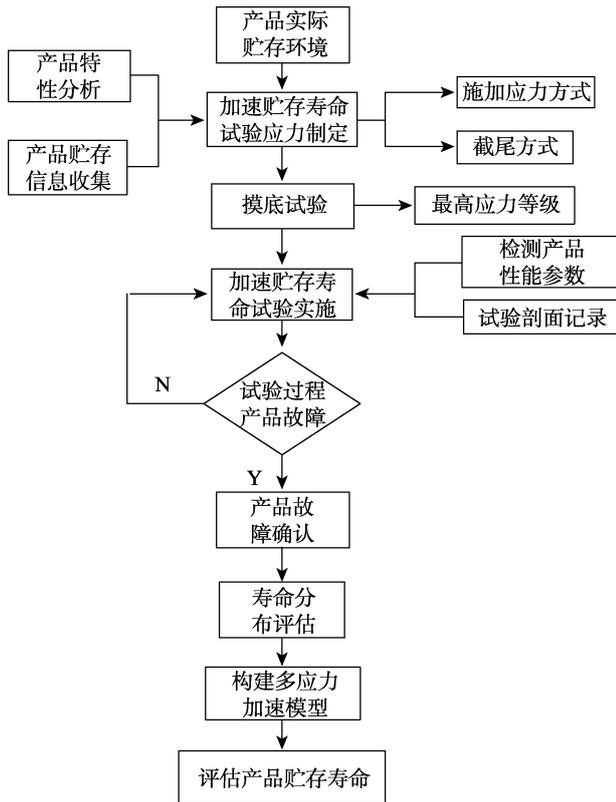


图1 一种基于多应力加速寿命试验的产品贮存寿命评估流程

Peck 温湿度模型的加速因子如下。

$$AF = \left(\frac{RH_u}{RH_s} \right)^{-n} e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_s} \right)} \quad (1)$$

式中： RH_u 为正常贮存环境条件下的相对湿度，%； RH_s 为试验应力条件下的相对湿度，%； T_u 为正常贮存环境条件下的温度，K； T_s 为试验应力条件下的温度，K； k 为玻尔兹曼常数， $k=8.617 \times 10^{-5}$ eV/K； E_a 为激活能，通常的取值范围为0.3~1.5 eV； n 为常数，取值范围为1~12。

E_a 和 n 是模型的两个系数，由试验确定，并且取决于产品失效机制和所包含的元器件/原材料。

3.3 确定应力水平

开展摸底试验，摸底试验有两个重要的目的：一是确认产品在所施加的应力下存在贮存退化趋势；二是确定最大的应力量级（即可能是产品自身能承担的真实应力量级，也可能是应力施加设备能力范围所能提供的最大量级），试验时最大应力量级应该在确定的最大应力量级基础上留有一定的余量。

根据摸底试验的结果，假定试验时最大的温度/湿度应力为 T_{max}/RH_{max} ，除最大应力水平组合下的加速试验数据外，至少还需要两组应力水平组合才能用最小二乘法求出参数 E_a 和 n 。拟定的温度、湿度加速应力水平组见表1。

表1 应力组合

应力组数	应力种类		
	温度应力	湿度应力	最少样本量/台
试验应力组 A	T_{max}	RH_{max}	3
试验应力组 B	T_{max-5}	RH_{max}	3
试验应力组 C	T_{max}	RH_{max-5}	3

3.4 最小试验时间

最小试验时间 t_{min} 是满足 Y 年后有 $F\%$ 产品失效的样本，在置信度为 CL 的条件下出现第一个故障的时间，是对试验时间的一个预估值。试验开始后，若出现了3个故障，则停止试验；若故障数一直未达到3个，则当试验持续到2倍的 t_{min} 时停止试验。前者为定数截尾，后者为定时截尾。

计算不同应力水平下的最小试验持续时间 t_{min} 的公式为：

$$t_{min} = \frac{Y}{AF} \left[\frac{\ln(1-UC L_1)}{\ln(1-CF)} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (2)$$

式中： $UC L_1$ 为在置信度 CL 下产品出现第一个故障的概率； Y 表示年数； AF 表示某应力水平下的加速因子； F 表示产品在 Y 年之内出现故障的概率； C 表示某独立故障模式在 Y 年内所引起产品的故障占产品总故障的百分比； β 为威布尔分布形状参数，取值一般在0.5~5之间。

借鉴 JESD94A（使用以知识为基础的测试方法体系来进行特定应用的质量鉴定），结合产品设计和使用经验，以及多应力摸底试验情况，在置信度 CL 给定的情况下，假定一组 E_a 、 n 、 F 、 C 、 β 的值，可知最大应力下的加速因子 AF ，以及预估 Y 年对应的最大应力水平下的最小试验时间。

3.5 数据处理方法

对于产品每一个独立故障模式，在不同的应力下所得到的加速因子不同。在明确产品实际贮存条件下的温度和相对湿度后，设 TTF_s 是某故障模式在一个应力组合下的失效前时间，则根据已经求得的该应力组合下的加速因子，将 TTF_s 外推至正常贮存条件，即

$$TTF_u = TTF_s \times AF \quad (3)$$

TTF_u 即贮存条件下，该故障模式出现同一故障的失效前时间，相应的累积不可靠度 $F(TTF_u)$ 可以根据相应的统计表查得。将所有外推失效前时间与相应的累积不可靠度 $F(TTF_u)$ 组成新的样本点，即 $(TTF_u, F(TTF_u))$ 。在威布尔分布图上描出这些点并进行线性拟合，可得贮存条件下该故障模式的威布尔分布参数 β, η 。

从以上过程可以求得正常贮存条件下的每一个主要独立故障模式的威布尔分布，得到分布函数为（ i 表示第 i 个故障模式）：

$$F_i(t) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta_i}\right)^{\beta_i}\right\} \quad (4)$$

推导出所有故障模式的累积分布后, 根据系统累积分布的定义, 得:

$$F(t) = 1 - (1 - F_1(t))(1 - F_2(t)) \cdots (1 - F_n(t)) \quad (5)$$

式中: n 为故障模式个数。

在求 t_{\min} 时, 采用了预估的 E_a 和 n 的值。通过表 1 中试验应力 B 和试验应力 C 的两组应力组合的试验, 可用最小二乘法求得 E_a 和 n 的实际值。当试验产生 3 个相同故障时则试验定数结尾。如果截止到 $2t_{\min}$ 时, 虽然出现故障但仍然没有达到 3 个故障, 则试验可以定时结尾; 如果没有出现故障, 则表明试验具体实施过程存在不足, 需要详细核查试验情况并重新开展试验。

该评估方法经过了工程实践, 在不到 300 h 的试验时间内, 参试的多台高可靠电子产品全部暴露出故障, 通过数据处理快速评估出产品的贮存寿命。

4 结语

文中介绍了一种高可靠电子产品加速贮存寿命评估方法。一个成功的加速试验离不开试验团队的大力协作, 离不开技术和管理水平的良好发挥, 离不开一个个案例、经验的积累, 期待通过大家的共同努力, 让加速试验技术在快速预估高可靠电子产品贮存寿命、保证产品安全使用、挖掘产品潜力等方面发挥越来越大的作用。

参考文献:

- [1] 蒋培, 陈循, 张春华, 等. 可靠性强化试验技术综述[J]. 强度与环境, 2003(3): 58-64.
- [2] 陈循, 张春华, 汪亚顺, 等. 加速寿命试验技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [3] 赵宇. 可靠性数据分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [4] 王宇, 王欣汝, 黄进永, 等. 通用电子产品全寿命周期可靠性分析方法[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2017, 35(1): 40-44.
- [5] 张春华, 温熙森, 陈循. 加速寿命试验技术与应用[J]. 兵工学报, 2004(4): 485-490.
- [6] 陈兵, 李星. 加速寿命试验技术在国内外工程应用研究[J]. 强度与环境, 2010, 37(6): 31-38.
- [7] 李晓阳, 姜同敏. 加速寿命试验中多应力加速模型综述[J]. 系统工程与电子技术, 2007(5): 28-31.
- [8] NELSON W B. Accelerated Life Testing-step-stress Models and Data Analysis[J]. IEEE Trans on Reliability, 1980, 29(2): 103-108.
- [9] 茆诗松. 指数分布场合下步进应力加速寿命试验的统计分析[J]. 应用数学学报, 1985(3): 311-316.
- [10] 葛广平, 马海训. Weibull 分布场合下步进应力加速寿命试验的统计分析[J]. 数理统计与应用概率, 1992(2): 7-11.
- [11] 葛广平. 我国加速寿命试验研究的现状与展望[J]. 数理统计与管理, 2000(1): 25-28.
- [12] 费鹤良, 汤银才, 冷时铭, 等. 固体钽电容器序进应力加速寿命试验及数据处理[J]. 应用概率统计, 1997(3): 330-332.