

# 论加速可靠性增长试验 (I) 新方向的提出

周源泉<sup>1</sup>, 朱新伟<sup>2</sup>

(1. 北京强度与环境研究所, 北京 100076; 2. 中国海鹰机电研究院, 北京 100074)

**摘要:** 在分析总结加速寿命试验 (ALT) 及可靠性增长试验 (RGT) 的基础上, 首次提出了加速可靠性增长试验 (ARGT) 这个新方向, 并指出了在研究 ARGT 时将会遇到的主要问题以及解决这些问题的途径。

**关键词:** 产品可靠性; 可靠性增长; 可靠性试验; 故障分析; 加速寿命试验; 过载

**中图分类号:** V430      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-4055(2000)06-0006-04

## Research on accelerated reliability growth test (I) presentment of a new direction

ZHOU Yuan-quan<sup>1</sup>, ZHU Xin-wei<sup>2</sup>

(1. Beijing Inst. of Structure and Environment, Beijing 100076, China;

2. China Haiying Electromechanical Technology Academy, Beijing 100074, China)

**Abstract:** Accelerated Life Testing (ALT) and Reliability Growth Testing (RGT) were summarized. Based on these analysis, Accelerated Reliability Growth Testing (ARGT) — a new direction of reliability engineering was presented. And the main problems encountered in the study of ARGT were proposed. The approaches for these problems were given.

**Key words:** Product reliability; Reliability growth; Reliability test; Fault analysis; Acceleration life test; Overload

## 1 引言

许多可修系统如动力装置、控制仪器等, 在可靠性增长试验 (Reliability Growth Testing — RGT) 前, 已具有相当高的可靠性, 其故障间隔已相当长, 在正常应力 (即模拟产品在使用条件下的应力) 下, 进行 RGT 需要很长的试验周期, 耗费大量的资金和人力, 在许多情况下, 工程上都难以接受。

为了达到使产品的可靠性快速增长的目的, 我们能否参照加速寿命试验 (Accelerated Life Testing — ALT) 的方法, 对产品施加比正常应力更严酷的应力, 使产品的故障加快暴露, 再对故障加以分析、纠正后, 而实现可靠性快速增长呢? 实际上要设计一种试验方法, 它既是可靠性增长试验, 又是加速试验的方法, 可称为加速可靠性增长试验 (Accelerated Reliability Growth Testing — ARGT), 以快速实现可靠性增长, 既节省研制时间与经费, 又能用合理、科学的方法评定经此试验后产品的可靠

性, 并能代替鉴定试验。为此, 本文从分析、总结 ALT 及 RGT 已有的研究成果出发, 讨论 ARGT 研究中将会遇到的主要问题, 以及解决这些问题的简要思路。

## 2 关于加速寿命试验 (ALT)

不少元器件、原材料及设备在正常应力下, 其寿命达数十年, 甚至更长。在较短时间内, 难以完成有足够多的失效数据的寿命试验。为了快速查明失效原因及评定产品的可靠性, 采用加大试验应力, 促使产品加速失效, 以达到缩短试验周期, 节省试验经费等预期目的, 这就是 ALT。

20 世纪 60 年代以来, ALT 已逐渐发展成为一门较成熟的可靠性工程的一个分支。迄今为止已有不少著作<sup>[1~4]</sup>和标准 (GB2689.1~4) 介绍该分支所取得的主要成果。曾咏生等<sup>[5]</sup>将过载试验方法用于固体火箭发动机可靠性的评估。

Nelson W<sup>[1]</sup>总结性地指出, 对 ALT 的失效数据

\* 收稿日期: 2000-02-22; 修订日期: 2000-04-05。

作者简介: 周源泉 (1937—), 男, 研究员, 研究领域为可靠性评定与可靠性增长及加速试验。

作统计分析, 需要有如下的四条基本假定。

假定 1: 在正常应力水平  $S_0$  及加速应力  $S_i$  ( $i=1, 2, \dots, l$ ) 下, 产品的寿命服从某个同族的概率分布。即应力水平不改变寿命的分布类型, 而改变分布参数。

例如, 最常见的情况是假定产品在不同应力水平下的寿命服从对数位置尺度族, 其分布数 ( $C_{df}$ ) 为

$$F_i(t) = G[(\ln t - \mu_i) / \sigma_i] = G[\ln(t / \eta_i)^{m_i}] \quad i = 0, 1, 2, \dots, l \quad (1)$$

式中  $\mu_i$ 、 $\sigma_i$  分别是应力水平  $S_i$  下的对数位置参数与对数尺度参数, 而  $m_i = \sigma_i^{-1}$ ,  $\eta_i = e^{\mu_i}$  分别是  $S_i$  下的形状参数与尺度参数。

假定 2: 产品在正常及加速应力水平下, 失效机理不变的条件是某个分布参数和/或某些分布参数的函数不随应力改变。

例如, 对于产品寿命服从对数位置尺度族的情况, 失效机理不变的条件为<sup>[4]</sup>

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_l = \sigma_0 = \text{常数} \quad (2)$$

或  $m_0 = m_1 = m_2 = \dots = m_l = \text{常数} \quad (3)$

假定 3: 要给出表述产品寿命分布参数与应力水平之间的关系式, 即所谓加速方程或加速模型。

例如, 最常见的加速方程为

$$\mu_i = \ln \eta_i = a + b\phi(S_i), \quad i = 0, 1, 2, \dots, l \quad (4)$$

式中  $\phi(\cdot)$  是已知函数,  $a$ ,  $b$  是待求的未知常数。

假定 4: 要给出不同应力水平下的时间折合公式。

例如, Nelson 假设为

$$F_i(t_i) = F_j(t_{ij}) \quad (5)$$

即在概率意义下, 产品在  $S_i$  下工作  $t_i$  时间相当于在  $S_j$  下工作  $t_{ij}$  时间。

例如, 对于对数位置尺度族, 可导出其时间折合公式如下:

按式 (5) 有

$$G[(\ln t_i - \mu_i) / \sigma_i] = G[(\ln t_{ij} - \mu_j) / \sigma_j]$$

考虑到式 (2), 可得

$$t_{ij} / t_i = \exp(\mu_j - \mu_i) \quad (6)$$

按照文献 [1], 假定 2 是根据试验结果提出的, 只能根据失效数据概括并检验, 而假定 4 是 Nelson 根据失效物理提出的, 目前尚难验证。

周源泉的研究结果<sup>[4]</sup>表明, ALT 本质上只有两条基本假定——即假定 1 与假定 3, 就是寿命模型

与加速模型。文献 [4] 对加速系数及其性质进行了深入研究, 指出“加速系数应不随失效概率的变化而改变”, 这与失效机理不变间有着本质的联系, 据此即可导出假定 2 及假定 4。该文献还对哪些概率分布可作为 ALT 中合适的寿命分布进行了总结。

例如, 关于产品寿命服从对数位置尺度族的情况, 在应力水平  $S_i$  下, 对于指定的可靠性值  $R$ , 可靠寿命  $t_{R,i}$  由下式确定

$$1 - R = G[(\ln t_{R,i} - \mu_i) / \sigma_i]$$

故

$$t_{R,i} = \exp[\mu_i + \sigma_i G^{-1}(1 - R)]$$

式中  $G^{-1}(\cdot)$  是  $G(\cdot)$  的反函数; 则  $S_i$  对  $S_j$  的加速系数  $K_{ij}$  为

$$K_{ij} = t_{R,j} / t_{R,i} = \exp[(\mu_j - \mu_i) + (\sigma_j - \sigma_i) G^{-1}(1 - R)] \quad (7)$$

因要求  $K_{ij}$  与  $R$  无关, 故必须令

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_m = \sigma_0 = \text{常数}$$

此即假定 2。

由  $t_{R,i}$  及  $K_{ij}$  的定义, 可得

$$1 - R = F_i(t_{R,i}) = F_j(t_{R,j}) = F_j(t_{R,i} K_{ij})$$

由于上式对  $[0, 1]$  中的任一个  $R$  都成立, 故

$$F_i(t) = F_j(t k_{ij}) \quad (8)$$

这就是 Nelson 的时间折合的假定 4。不过这里的式 (8) 比式 (5) 更深刻而已。因为式 (8) 才真正地一步到位地给出了时间折合公式。即在概率意义下, 产品在  $S_i$  下工作时间  $t$ , 相当于在  $S_j$  下工作时间  $tK_{ij}$ ; 而 Nelson 的假定还需对具体分布进行计算, 才能导出最终的时间折合公式。

例如, 关于对数位置尺度族, 由式 (7) 可得

$$K_{ij} = \exp(\mu_j - \mu_i)$$

这与 Nelson 假设导出的结果即式 (6) 完全相同。

文献 [4] 还指出, ALT 中合适的概率分布有: 对数位置尺度族分布, 其中 Weibull 分布、对数正态分布最常用; 还有对数 Logistic 分布、Pareto 分布 (即对数双参数指数分布)、对数 Laplace 分布与对数 Cauchy 分布等; 尺度族分布, 其中最常用的指数分布、Gamma 分布以及 Birnbaum-Saunders 分布。有趣的是这些分布有两个共同的特点, 其一是失效机理不变的条件都是其形状参数不随应力而异; 其二是加速系数都是不同应力下尺度函数之比。

### 3 关于可靠性增长试验 (RGT)

为了在研制阶段提高产品的可靠性, RGT 便应

运而生,它要求产品在模拟的使用应力下进行试验。现在已出现了多种应力综合的综合环境可靠性试验(Combined Environment Reliability Testing—CERT)设备。如四综合(振动、温度、湿度、真空)环境试验设备和三综合(振动、温度、噪声)环境试验设备等。另外,从20世纪60年代起,就开始了可靠性增长模型的研究。比较著名的就有十多种。迄今,可靠性增长已发展成为可靠性工程的一个较成熟的分支。其标志是一批标准及研究著作<sup>[6]</sup>的出版。标准有:IEC 1014(1989),IEC 1164(1995),GB/15174(1994),GJB1407(1992),GJB/Z77(1996),MIL-HDBK-189(1981),MIL-HDBK-781(1987),MIL-HDBK-338(1984)等。

对于连续可靠性增长模型,产品在时间区间 $(0, t]$ 内的故障次数 $N(t)$ 仅用一种概律分布已难以刻划,而必须用随机点过程描述。

幂律模型包括Duane模型及AMSAA(Army Materiel System Analysis Activity)模型的故障次数用幂律过程(Power Law Process)或称Weibull过程刻划。对此模型,可靠性增长之故障数据的统计分析有下述四项内容<sup>[7]</sup>:

- (1) 增长检验(亦称趋势检验);
- (2) RGT的故障数据与幂律模型间的拟合优度检验;
- (3) 模型参数及系统当前MTBF的点估计;
- (4) 增长参数(亦称形状参数)及系统当前的MTBF的区间估计。

这里前两项内容就是对RGT的两个基本假定,以及对它们作统计假设检验。

#### 4 ARG T研究的主要内容与途径

ARGT建立在ALT及RGT的基础之上,其基本想法是加大应力,使进行ARGT的产品加速暴露故障,经分析与采取纠正措施,达到使产品的可靠性快速增长的目的,并科学地评估产品经ARGT后所达到的可靠性指标。

首先,与ALT相仿,ARGT的前提条件是产品在正常及加速应力水平下,其故障机理不变。为了奠定ARGT的基础,必须先给出ARGT的加速系数 $A_F$ (Accelerated Factor)定义。ALT的 $A_F$ 是针对两个寿命的概率分布提出的,而ARGT的 $A_F$ 则必须针对两个随机过程给出。这两者之间有重大的差别,必须理论结合实践,认真分析随机过程的特征,缜

密地给出合理的定义。在此基础上,要研究ARGT的 $A_F$ 性质,并研究这些性质与故障机理不变条件间的本质联系,研究ARGT的合适的随机过程(或RGT模型)。

其次,参照ALT的四条基本假定及RGT的两条基本假定,对ARGT数据作统计分析时有以下五个基本假定(因为ALT及RGT中均有一个统计模型,而ARGT也只需一个统计模型):(1)在正常及加速应力水平下,产品均有显著的可靠性正增长;(2)在正常及加速应力水平下,产品的故障次数服从同族的随机过程,即应力水平改变,过程类型不改变,而仅改变过程的参数;(3)在正常及加速应力水平下,产品故障机理不变的条件是某个过程参数和/或某些过程参数的函数不随应力水平而异;(4)关于加速模型的假定;(5)关于不同应力水平间的时间折合公式的假定。

第三,研究ARGT的参数估计方法。(1)先研究恒定应力条件下的ARGT;再研究步进应力及序进应力条件下的ARGT;(2)对恒定应力的ARGT,先研究幂律模型,再研究其它模型;对幂律模型,可分别研究分组数据及单独故障数据的情况;(3)估计方法可以是图估计或数值统计方法。

第四,研究ARGT设计中的若干问题,如应力水平数的选择,确定应力水平的原则,确定试验样本量的原则,确定ARGT终止时间的原则等。

#### 5 ARG T当前研究内容的建议

当前,ARGT可以从以下几个方面着手研究,来指导ARGT的实践与理论工作。

(1)给出ARGT的 $A_F$ 的定义,研究 $A_F$ 的性质,及其与故障机理不变条件的本质联系,对各种常见的可靠性增长模型给出故障机理不变的条件及 $A_F$ 的表达式;

(2)可靠性增长检验方法;

(3)在正常及加速应力水平下,故障数据对增长模型的拟合优度检验方法;故障机理不变条件的检验方法;

(4)选择加速模型,并研究其验证方法;

(5)对恒定应力ARGT,研究幂律模型在分组数据情况下的图分析方法和大样本统计分析方法;

(6)对恒定应力ARGT,研究幂律模型在单独时间故障数据情况下的统计分析方法;

(7)研究恒定应力ARGT的试验设计方法。

## 参 考 文 献

- [1] Nelson W. Accelerated testing: statistical model, test plans, and data analysis [M]. New York: John Wiley & Sons, 1990.
- [2] 茆诗松, 王玲玲. 加速寿命试验 [M]. 北京: 北京科学出版社, 1997.
- [3] 费鹤良. 加速试验及其统计分析的研究进展和评述 [C]. 全国第五届可靠性学术会议论文集, 1995.
- [4] 周源泉. 加速寿命试验的理论基础 [R]. 北京强度与环境研究所, 2000.
- [5] 曾咏生, 戴祖明, 谢蔚民. 固体火箭发动机结构可靠性评估的过载试验法 [J]. 推进技术, 1998, 19 (2).
- [6] 周源泉, 翁朝曦. 可靠性增长 [M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [7] 周源泉, 郭建英. 可靠性增长幂律模型的 Bayes 推断及在发动机上的应用 [J]. 推进技术, 2000, 21 (1).

(责任编辑: 龚士杰)

## 简 讯

### 2001 年弹用吸气式发动机技术交流会征文

中国航天机电集团公司科技委拟于 2001 年 5 月左右召开“2001 年弹用吸气式发动机技术交流会”。

#### 1 征文内容

整体式冲压发动机研究、设计和试验技术; 超声速燃烧冲压发动机技术; 各种组合冲压发动机技术; 弹用涡喷(扇)发动机研究、设计和试验技术; 进气道设计和进气道/发动机匹配技术; 新型燃料与推进剂技术; 弹用吸气式发动机控制与调节技术; 制造技术; 可靠性技术、故障诊断监测技术等。

#### 2 征文要求及注意事项

(1) 论文论点明确, 文字简练, 数据真实准确。凡已在全国性学术会议或刊物上交流发表过的论文不再征集。

(2) 报送的稿件文责自负, 应不涉密。请注明作者姓名、职称、单位、详细通信地址、联系电话、传真和电子信箱。

(3) 文稿采用 A4 纸, 计算机排版打印, 通栏排。首页内容顺序为文题、作者姓名、工作单位和通讯地址、摘要、关键词及正文。具体格式及字体、字号同《推进技术》刊发论文要求。全文字数不超过 6000 (含图、表在内), 要求字迹、字符、图形清晰, 并同时提供文稿软盘。

(4) 征文截止日期为 2001 年 3 月 15 日。经专家组评审后录用的论文将于 2001 年 4 月 10 日前通知作者。录用论文将收入会议论文集, 其中达到《推进技术》发表质量要求的论文, 将通知作者修改后收入《推进技术》专辑。

(5) 会议召开的时间和地点另行通知。

(6) 论文请寄北京市 7208 信箱 26 分箱《推进技术》编辑部, 邮编为 100074, 信封上请注明“征文”。联系人: 史亚红, 朱立影, 电话 010-68376141, 传真 010-68374052, E-mail: tijos@sina.com

《推进技术》编辑部