

可靠性工程的若干方向

周源泉

(北京强度环境研究所, 北京 100076)

摘要: 本文对可靠性工程的一些重要方向的研究情况进行了扼要的介绍与评述。这些方向包括复杂系统的可靠性综合, 可靠性变动统计学, 低可靠元件组成高可靠系统, 含增长单元的复杂系统的可靠性综合, 加速寿命试验, 加速可靠性增长试验, 产品寿命预测及发动机可靠性评估。

关键词: 可靠性工程; 系统综合; 可靠性增长; 田口方法; 加速寿命试验; 加速可靠性增长试验; 产品寿命预测; 发动机可靠性

中图分类号: TB114.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-3919(2005)03-0033-06

Some directions of reliability engineering

Zhou Yuan-quan

(Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: Some important directions of reliability engineering are introduced and reviewed simply. They include reliability synthesis of complex system, variable statistics of reliability, high reliable system consisted of low reliable units, reliability synthesis of complex system contained reliability growth units, accelerated life test, accelerated reliability growth test, product life prediction and reliability assessment of engine

Key words: reliability engineering; system synthesis; reliability growth; Taguchi's method; accelerated life test; accelerated reliability growth test; product life prediction; reliability of engine

1 引言

可靠性工程是一个发展极其迅速、应用十分广泛、规模十分庞大的学科, 本文拟对其若干重要方向进行简要论述。

2 复杂系统的可靠性综合

钱学森先生早就指出, 复杂系统的可靠性综合是可靠性工程的三大研究方向之一。随着科技高速发展, 大型复杂系统, 如火箭、导弹、卫星、飞船、大型客机、通讯网、雷达网、公路网、铁路网、大型电站等大量涌现。这些系统, 特别是导弹、飞船、核武器等, 其实际使用试验要耗费巨资, 周期又长, 所以, 这种试验数量一般很少。为了在很少的实际使用试验后, 使复杂系统达到高可靠与高性能的要求, 发展了一种金字塔式的试验程序(见图1), 即对低装配级产品作大量试验, 以暴露问题, 改进

收稿日期: 2004-06-08; 修回日期: 2004-08-16

作者简介: 周源泉(1937-), 男, 研究员, 研究方向: 可靠性工程, 可靠性统计; (100076)北京 9200 信箱 72 分箱。

设计、工艺,为较高装配级产品的高可靠性奠定基础。级越高,试验量越少,当系统做完试验后,就为复杂系统的可靠性积累了大量的先验信息,故对复杂系统仅需做少量实际使用试验,就能对其高可靠性作出保证。

与之相应,发展了复杂系统的金字塔式的评估方法,即所谓复杂系统可靠性的综合,这些方法五彩缤纷,包括经典的、Bayesian、Fiducial 三个学派的种种手法, Monte Carlo 模拟手段,以给出复杂系统可靠性的点估计与区间估计。

为了深入研究这个方向,与之配套,发展了一系列可靠性课题,如产品寿命分布的拟合与鉴别,异常值检验,单元可靠性、维修性、可用性评估,机械结构可靠性评估,环境因子确定等。

从 20 世纪 60 年代起,航天部门在钱学森先生倡导下就开展了此项研究,取得了一系列成果,为航天产品研制发挥了重要作用。这个方向研究的详细情况可见[1],[2]。

3 质量可靠性变动统计学

众知,产品(包括硬件、软件及其综合体)在研制中通常会暴露出其设计、工艺等方面的缺陷,并采取针对性的措施予以改进,因此研制中产品的质量可靠性并不是一个常数,而是一个不断变动的量,这样仅用描述定型后成熟产品寿命的概率分布(如指数分布,对数正态分布, Weibull 分布等)已不能完善地描述产品寿命的变动过程。钱学森先生在 20 世纪 70 年代把研究产品在研制中质量可靠性性状的学问,叫做质量可靠性变动统计学,并指出,这也是可靠性工程的三大研究方向之一。

事实上,要刻划质量可靠性在研制中的变动规律,就要用到随机过程及随机变量序列等工具。前者主要用非齐次 Poisson 过程。研究硬件的质量可靠性变动统计学就是硬件可靠性增长的理论基础,研究软件的质量可靠性变动统计学就是软件工程学的理论基础。

硬件可靠性增长模型与可靠性增长方式相应,分为三大类:

第一类,与仅采用即时纠正的可靠性增长方式相应,是连续型的可靠性增长模型,它们大都以非齐次 Poisson 过程为工具。其中最著名、应用最广的是幂律模型,包括 Duane 模型与 Crow 的 AMSAA 模型,后者的主要工具是幂律过程(有的文献称之为 Weibull 过程)。关于这个模型已出版了国际标准 IEC1164^[3]。

第二类,与仅采用延缓纠正的可靠性增长方式相应,有顺序约束的阶段可靠性增长模型,其中包括二项分布阶段可靠性增长模型,三项分布阶段可靠性增长模型,指数分布阶段可靠性增长模型,失效分型的指数分布阶段可靠性增长模型等。

第三类,与包含即时纠正与延缓纠正两者的可靠性增长方式相应的可靠性增长模型尚不多见,目前,有人正在用 Bayes 信息融合(Fusion)方法进行研究。

硬件产品的可靠性增长主要包括试验、管理与分析,其详细内容见文[2],[4]。关于软件可靠性增长的试验,管理与分析详见文[5]。

4 低可靠元件组成高可靠系统

通常,对复杂系统有很高的可靠性要求。例如,要求发射飞船的可靠性不低于 0.97,如果飞船及

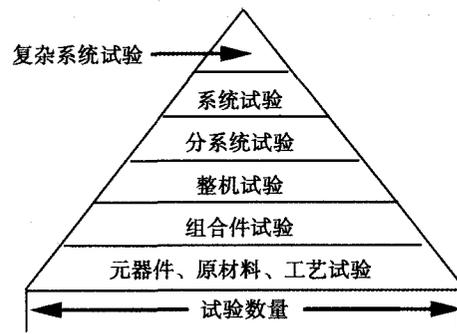


图 1 金字塔式的试验程序

火箭等由 100 万个元件组成,那就要求每个元件的可靠性达到 0.99999997。对于我们这样的发展中国家,要求电子的、电气的、机械的、液压的…等各种元件一下子都达到这么高的可靠性水平是不现实的。所以,钱学森先生指出,研究低可靠元件组成高可靠系统,也是可靠性工程的三大研究方向之一。

日本的田口玄一(Genichi Taguchi)于 20 世纪 70 年代就开始研究用低性能元件组成高性能系统的方法,被称为田口方法^[6]。这是本方向的一个重要组成部分。本方向的实质就是研究可靠性优化设计。它不仅包括田口的稳健设计(Robustness design),还包括冗余设计、容错设计、简化设计、降额设计、热设计、耐环境设计、电磁兼容设计、防潜在通路设计等^[7]。这是一个非常重要而实用的研究方向。是可靠性工程的核心,值得专门组织人力财力系统地、有计划地进行持续的研究。

5 含增长单元的复杂系统的可靠性综合

研制一个新的复杂系统,其单元通常可分为两种类型,一种是继承型单元,另一种是开发型单元。一般继承型单元比较成熟,它的寿命可以用一个概率分布来描述。开发型单元的研制总会要经过一个明显的可靠性增长过程,其寿命信息必须用一个表征故障数的随机过程或一组表征寿命的随机变量序列(通常满足顺序约束要求)来描述,此时的复杂系统可靠性综合,就已不能沿用“经典的”处理多个不同单元的寿命分布的综合方法,而是要讨论一组寿命分布,一组随机过程,一组随机变量序列的综合问题。我们将之称为含增长单元的复杂系统可靠性综合^[8]。显然,这种提法更符合工程实践。按照 Springer 的提法,它将一组寿命分布的可靠性综合称为随机变量代数学,那么,与本方向相应,将会出现随机过程代数学,随机变量序列代数学以及它们的组合。

这个方向的近似处理方法之一是,将开发型的增长单元的随机过程或随机变量的序列信息等效折合为一个随机变量的信息,然后再按“经典的”复杂系统可靠性综合方法分析^[8]。可以预期这个方向的成果将会受到工程实践的欢迎,同时,这个方向将会推动综合理论以至概率统计及随机过程理论的发展。

6 加速寿命试验

加速寿命试验(Accelerated Life Test-ALT)是一种用加大试验应力缩短试验周期的寿命试验方法,它加速了产品故障源的暴露,为提高可靠性开辟了道路,并使高可靠长寿命产品的可靠性评估成为可能^[9]。

ALT 包括恒定应力的 ALT,步进应力的 ALT,序进应力的 ALT。简记为 CSALT, SSALT, PSALT。CSALT 是选取若干组样品分别在不同的加速应力下寿试, SSALT 是一组样品依序在逐次升高的加速应力下寿试, PSALT 是在随时间连续上升的应力下寿试。后者的优点是所需样品少、周期短,但需有专门的控制与记录设备。

ALT 常用的寿命分布有指数分布, Weibull 分布, 对数正态分布等。分析试验数据时,总要作以下假定:产品的寿命分布族不随应力改变而改变,改变的仅仅是分布参数,还假定在试验应力范围内失效机理不变,且失效机理不变的条件是分布的某个或某些参数或其函数不变。例如,对 Weibull 分布来说,失效机理不变条件是形状参数不变。对对数正态分布,其失效机理不变的条件是对数标准差不变。还要用到寿命特征与应力间的关系式,即加速方程,或称寿命应力模型,还要假定不同应力下的时间折合公式。

虽然, ALT 解决了大量实际问题,但为什么选这些假定, ALT 的分析者会回答, 试验信息本身就

是这样的。但为什么会这样,尚无答案。所以 ALT 仍带有浓厚的经验色彩,它的许多基本理论问题仍需解决。

我们指出,加速因子 AF 是 ALT 的关键参数,抓住它就抓住了 ALT 的牛鼻子。它定义为给定可靠度 R 下,应力水平 S_i, S_j 下可靠寿命之比。AF 本来与 S_i, S_j, R 有关。我们提出了有效的 ALT 概念,要求 AF 仅与 S_i, S_j 有关,而与 R 无关,从而解决了 ALT 中的一系列基本问题^[10],包括:

- (1) ALT 的主要性质。
- (2) 有效 ALT 的要求与失效机理不变条件间的本质联系。
- (3) 由此可导出失效机理不变的条件及 AF 的表达式。
- (4) 给出了适用于 ALT 的寿命分布族。
- (5) 指出 ALT 的基本假设只有两个,即寿命模型与加速模型。
- (6) 由此导出了不同应力水平下的时间折算公式的假定,并指出, Nelson 给出的时间折算公式假定^[10]与此是一致的。

7 加速可靠性增长试验

从 20 世纪 60 年代起,对 ALT 进行了大量试验研究,积累了大量经验,近期在理论上又有所突破。可靠性增长试验是提高产品可靠性的重要手段,且可靠性增长的幂律模型的分析方法已十分成熟,但可靠性增长试验耗资巨大,周期太长,工程上难以广泛开展。克服此缺点的方法之一是在 ALT 与可靠性增长试验的基础上,发展一种新的试验技术,这就是我们提出的加速可靠性增长试验 (Accelerated Reliability Growth Test-ARGT)。

从统计学的角度来看,ALT 研究与比较一组随机变量,而 ARGT 则研究与比较一组随机过程,迄今主要研究的是非齐次 Poisson 过程 (NHPP)。

ALT 的关键参数是 AF,它定义为两个同族寿命分布的分位数之比。对 ARGT,其研究对象是随机过程。如何定义其 AF 是研究 ARGT 遇到的第一个拦路虎,为此,我们引进了与故障数均值 N 相应的累积试验时间的概念,称之为 N -累积试验时间,而 ARGT 的 AF 就定义为两个不同应力水平下的 N -累积试验时间之比。并从工程实践需要出发,引进了有效的 ARGT 的概念。即其 AF 仅与所研究的两个不同应力水平有关,而与给定的故障数均值 N 无关。据此,可以建立 ARGT 的理论基础,包括:

- (1) ARGT 的 AF 的性质;
- (2) 有效的 ARGT 的要求与故障机理不变条件间的本质联系;
- (3) 推导各种常见的可靠性增长模型的故障机理不变的条件与 AF 的表达式;
- (4) 合理地给出不同应力水平下的时间折算公式假定;
- (5) 指出了 ARGT 统计分析中,需要哪些假定,其中哪些假定是基本假定;
- (6) 指出了哪些可靠性增长模型是适于进行 ARGT 的。

有趣的是,可以证明,ALT 的 AF 是 ARGT 的 AF 的特例。这从一个侧面说明了 ARGT 的 AF 的定义的合理性。而且,对于采用幂律模型的 ARGT,导出的故障机理不变条件正好和工程实践数据给出的结果完全一致。

对 ARGT 来说,可采用恒定应力的 ARGT,即 CSARGT,与步进应力的 ARGT,即 SSARGT。CSARGT 所需样品量及试验量仍较大,不易为工程实践采纳。SSARGT 最少仅需一台被试产品,试验量也较小,但其试验信息的分析相当困难,需要专门设计的软件方能处理。当前主要的工作是积累

实践经验,以检验与完善已有的理论与方法^[11]。

8 发动机可靠性评估

导弹、火箭用发动机种类繁多,比如液体火箭发动机、固体火箭发动机、涡喷发动机、涡扇发动机、冲压发动机等。它们的可靠性评估要用到不同的可靠性模型,下面分别予以介绍。

(1) 液体火箭发动机

通常认为,该发动机的寿命服从 Weibull 分布。可用 Weibull 分布的可靠性评定方法评估其可靠性。在失效数大于 2 时,有现成方法^[2],若无失效要用到无失效数据的可靠性分析方法^[12]。其它情况要专门设计软件进行分析。

(2) 固体火箭发动机^[13]

它可用成败型试验的可靠性评估方法,即用二项分布或事先设计好的负二项分布分析方法。对阶段间作延缓纠正的可靠性增长方式,可采用二项分布或负二项分布、三项分布的阶段可靠性增长模型评定。当试验次数较多,产品可靠性较高,且对产品采取即时纠正的可靠性增长方式,可采用幂律模型作离散化处理评定之。

(3) 涡喷、涡扇发动机^[14,15]

首先,将试车信息及任务时间等效折合到标称转速下,然后,可用幂律模型很好地跟踪试车故障数据。

(4) 冲压发动机

对此种发动机的可靠性评估,可采用复杂系统可靠性综合方法,更进一步地说,可以采用含增长单元的复杂系统可靠性综合方法,以充分利用各单元的各种地面试验信息。

9 寿命预测

通常的统计估计问题,是给出某个概率分布或随机过程的未知参数及其函数的点及区间估计,但在可靠性工程中,特别是在寿命试验及可靠增长试验中出现了另一类统计估计问题,要估计(更严格地说是预测——Prediction)样本的未来观测值与其某个统计量,这就是预测问题,这里主要讨论寿命预测。寿命预测问题分两类:

(1) 双样预测(two-sample prediction)

从寿命总体 Y 中抽出大小为 n 的样本,其前 r ($r < n$) 个相继的失效时间依序为: $Y_{(1)} \leq Y_{(2)} \leq \dots \leq Y_{(r)}$ 。这是当前样本(current sample)。它可从无替换或有替换寿试中得到。要求预测与 Y 有相同分布的寿命总体 X 的大小为 m 的未来样本(future sample) x_1, x_2, \dots, x_m 的某个统计量 $U = u(x_1, \dots, x_m)$, 例如, $x_j, j = \overline{1, m}, \bar{x} = n^{-1} \sum_1^n x_i, x_s = \sum_1^n x_i$ 及 x_j 的顺序统计量 $x_{(j)}, j = \overline{1, m}$ 。一般用 $Y_{(1)}, \dots, Y_{(r)}$ 的函数 $U^* = u^*(Y_{(1)}, \dots, Y_{(r)})$ 作为 U 的估计量,称为预测子(predictor)。对参数 Θ 的任何值 θ , 若 $\underline{U} = u(Y_{(1)}, \dots, Y_{(r)}), \bar{U} = \bar{u}(Y_{(1)}, \dots, Y_{(r)})$ 能满足 $P_\theta(\underline{U} \leq U \leq \bar{U}) \geq \gamma$ 。称 $[\underline{U}, \bar{U}]$ 是 U 的置信水平为 γ 的预测区间。

对随机过程 Y , 其前 n 次故障的累积试验时间为 $Y_1 \leq Y_2 \leq \dots \leq Y_n$ 。要求预测与 Y 服从同族过程 X 的前 m 次故障的累积试验时间 $X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_m$ 及其统计量。

(2) 单样预测

对寿命分布, 其当前样本为 $Y_{(1)} \leq Y_{(2)} \leq \dots \leq Y_{(r)}$, 要求预测 $Y_{(j)}, j = r+1, \dots, n$ 。对故障过程, 其当前样本为 $Y_1 \leq \dots \leq Y_n$ 。要求预测未来第 v 次故障的累积试验时间 Y_{n+v} 。寿命预测有很大的工程应用

价值。例如:

(a) 单样预测结果对制订寿试及可靠性增长试验规划是一个有指导意义的手段。

(b) 双样预测技术是质量保证工程的重要手段, 因为 $X_{(1),L}$ 是服从某个寿命分布的一组 m 个同型产品的最小寿命的下限。它被称为安全保证寿命(Safe Warranty Life)或保险期(Warranty Period)。

(c) 双样预测技术为可靠性工程提供了重要的支持。因为 $X_{(1),L}$ 是由 m 个相同的服从某寿命分布的单元组成的串联系统的寿命下限, 而 $X_{(m),L}$ 是 m 个相同的服从某寿命分布的单元组成的并联系统的寿命下限。 $X_{(m-k-1),L}$ 是 m 个相同的服从某寿命分布的单元组成的 $k/m(G)$ 系统的寿命下限。

迄今, 对指数分布、双参数指数分布、正态分布、对数正态分布、Weibull 分布及幂律过程进行了寿命预测的研究。

参考文献

- [1] 周源泉等. 可靠性评定[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [2] 周源泉. 质量可靠性增长与评定方法[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1997.
- [3] IEC 1164. Reliability growth—statistical test and estimation methods[S]. 1995.
- [4] 周源泉等. 可靠性增长[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [5] 何国伟等. 软件可靠性[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [6] 韩之俊. 三次设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [7] 陆廷孝等. 可靠性设计与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [8] 周源泉等. 含增长单元的复杂系统的可靠性综合[J]. 系统工程学报, 1999, 14(3): 251–257.
- [9] 茹诗松, 王玲玲. 加速寿命试验[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [10] 周源泉等. 加速寿命试验的理论基础(I–II)[J]. 推进技术, 2001, (4)与(5).
- [11] 周源泉等. 加速可靠性增长试验(I~VIII)[J]. 推进技术, 2000, (6); 2001, (1)至(4); 2003, (4)至(6).
- [12] 韩明. 无失效数据的可靠性分析[M]. 北京: 中国统计出版社, 1999.
- [13] 周源泉等. 某型固体火箭发动机的可靠性增长分析[J]. 推进技术, 1997, (4): 14–17.
- [14] 周源泉等. 某型涡喷发动机的可靠性增长分析[J]. 推进技术, 1997, (5): 17–21.
- [15] 周源泉等. 某型涡扇发动机的可靠性增长分析[J]. 质量与可靠性, 2004, (3):

(上接第 13 页)

对工程设计有一定参考价值的结论。

参考文献

- [1] Foster C L. Solar array induced disturbance of the hubble space telescope pointing system[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1995, 32(4): 634–644.
- [2] 闵桂荣, 郭舜. 航天器热控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [3] 安翔. 大型空间结构热扰动机理研究[D]. 西安: 西北工业大学博士论文, 2001.
- [4] 安翔, 冯刚, 张铎. 大型空间桁架结构热分析的有限元方法[J]. 强度与环境, 2000, 27(2): 18–23.
- [5] Zienkiewicz O C. The Finite Element Method[M]. McGraw-Hill Book Company, 1977.