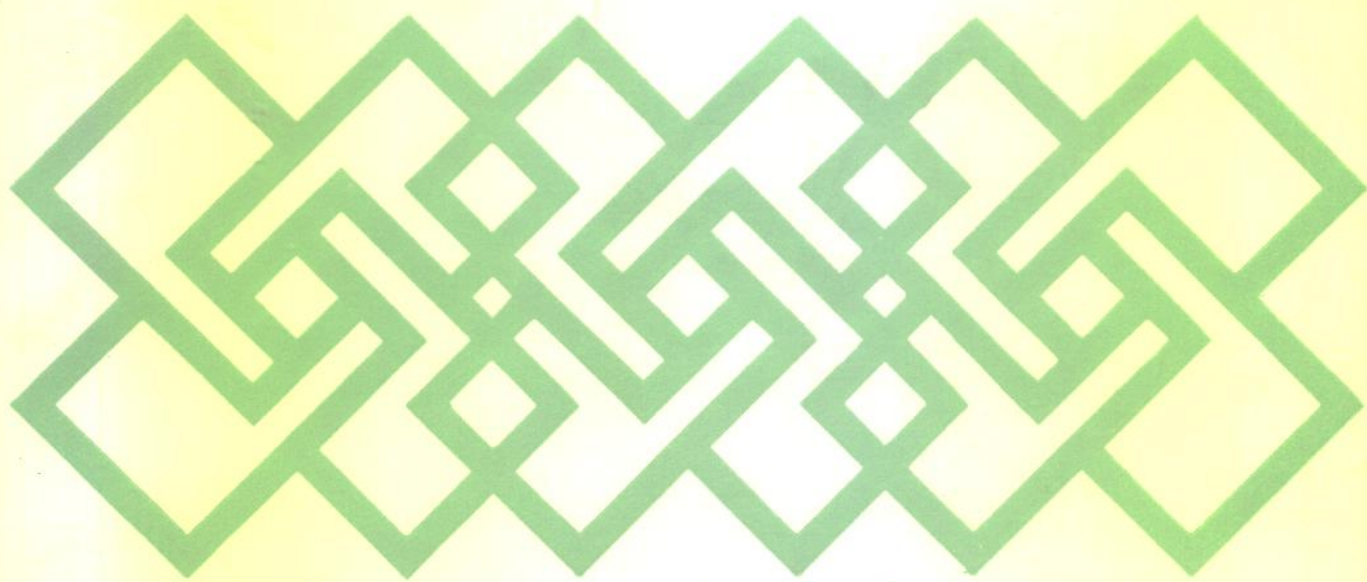


可靠性增长



可靠性增长

周源泉 翁朝曦 著

科学出版社

中

FB114-3

TB114.3
Z85-2

355120

可 靠 性 增 长

周源来 翁朝曦 著

科 学 出 版 社

1992

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

DW38/31

本书阐述可靠性增长的管理、试验与分析技术。主要内容分为三部分。第一部分(第二章)讨论可靠性增长试验技术,包括可靠性增长试验的设计方法、环境应力筛选试验、综合环境试验及所需设备。第二部分(第三章)讨论可靠性增长管理技术。第三部分(第四章至第七章)讨论可靠性增长分析技术,其中以目前国内外应用最广的 AMAA 模型及 AMSAA-BISE 模型为重点,介绍了 23 种可靠性增长模型及趋势检验方法。附录给出了阅读本书所需的概率、统计知识及可靠性增长的统计用表。

本书可供从事新产品研制的决策人员、设计师、可靠性和质量管理工程师、环境试验工程师等阅读,也可作为理工大学有关专业的教师、研究生、高年级大学生的教学参考书。

可 靠 性 增 长

周源泉、翁朝曦 著

责任编辑 唐正必

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1992 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

1992 年 1 月第一次印刷 印张:14 3/4

印数:1—1 800 字数:329 000

ISBN 7-03-002507-5/TN·107

定 价:14.10 元

序

新产品在研制、试产及试用过程中,须经历暴露缺陷—分析原因—改进设计、工艺或操作等循环过程,才能使它的可靠性和性能提高到预定的水平。对于已经定型的产品,如装机前的元器件或出厂前的整机,也需通过筛选或老炼来提高它们的可靠性。

在这些过程中,能否找到既节省时间和经费,又保证产品可靠性达到预定要求的科学方法?对于新研制的,特别是试验代价昂贵的高可靠产品或复杂系统,能否利用它们的可靠性增长试验或采用老炼试验来代替鉴定或验收试验?这是可靠性增长研究中所要解决的问题。

航空航天部一院七〇二所的周源泉、翁朝曦两位同志对航天与民用产品的可靠性增长问题进行了十多年的研究与实践;建立了多台系统同步可靠性增长的 AMSAA-BISE 模型、顺序约束的指数 MTBF 增长模型与顺序约束正态精度增长模型等。这些工作将可靠性增长技术提高到了一个新的水平。他们在总结这些研究成果的基础上写成的《可靠性增长》一书,从管理、试验和统计分析三个方面,系统地解答了上述问题。大量工程验证表明,书中所介绍的方法使用方便,可大幅度地缩短产品的研制周期,节省试验费用及试验样品,有明显的经济效益与社会效益。

相信此书的出版对促进可靠性增长技术在我国普及与提高会有积极的推动作用。

梁思礼

1990 年

审校者序

近 20 年来,可靠性增长技术得到迅速发展,成为可靠性工程中极为活跃的部分.它的发展引起了国内外工程界和从事可靠性研究的科技人员的广泛关注.

1975 年,钱学森教授曾向我国可靠性工程界指出:要搞变动统计学(即可靠性增长方法的理论基础)研究.之后又进一步指出,变动统计学是可靠性工程的三大研究方向之一.这些意见有力地推动了国内可靠性增长的研究和实践.本书的作者,就是在这种背景下,开始步入这个领域的.十多年来,他们在可靠性增长试验、管理和分析等技术上,潜心钻研,作出了一些成绩.本书内容就是他们部分工作的总结.

可靠性增长普遍存在于产品的研制、试生产和使用中.如果用科学的方法来计测和控制产品的可靠性增长(包括性能参数与精度增长),就能使产品研制加快速度、减少浪费、提高质量,从而增加效益.本书所介绍的主要方法,都是作者结合自己的实践体验,在总结、改进前人工作经验的基础上发展起来的.实践证明这些方法在航天和民用系统的工程实践中,特别是在产品研制和老炼试验中,具有明显的科学价值、经济效益和社会效益(如缩短研制周期、节省试验时间、减少试验样品,等等).

本书的特点是在工程上试图将试验、管理、分析三者结合起来,以便有助于解决可靠性增长全过程中可能遇到的各类问题.在统计方法方面,本书则兼用经典学派与 Bayesian 学派的方法,力求发挥它们各自的长处.(应指出的是,这两派的观点是不一样的,计算的结果也不尽相同.)

本书取材新颖,文字简洁,讲解清楚,例题众多,并给出了计算步骤,极易为读者所掌握.可以预计,它将会推动可靠性增长技术在工程上的普遍应用,也会引起统计界同行们作进一步研究的兴趣.

魏宗舒

1990 年 12 月

前 言

在新产品的研制或试生产等过程中,用可靠性增长技术对产品进行可靠性分析、控制和管理,对缩短产品的研制周期,节约试验时间、试验样品和研制费用有明显的效果。因此,对这项技术的研究有重大的实践意义与理论意义。1975年以来,钱学森教授多次提出,要进行变动统计学(即可靠性增长的理论基础)的研究,这是可靠性工程的最重要的研究方向之一。

我们从1977年开始从事航天与民用产品的可靠性增长的试验、分析与管理技术的研究,在总结实践经验与理论成果的基础上,吸取国内外已有成果,写成此书。

本书将工程试验、管理与统计分析紧密结合,运用经典学派与 Bayesian 学派的观点、方法处理可靠性增长中提出的各种统计分析问题。希望能引起工程界、统计界两方面的兴趣。

我们在十多年的可靠性增长研究中,多次得到魏宗舒教授的指导。特别承他对本书进行了精心的修改、审校,提出了一系列中肯宝贵的意见。航空航天部科技委副主任梁思礼总工程师为本书撰写了序言。在此谨向他们表示衷心的感谢!由于作者经验及水平所限,错误与不当之处在所难免,敬请专家与广大读者批评指正。

作者

1990年8月于北京

目 录

序

审校者序

前言

第一章 引论	1
1.1 可靠性增长技术的意义与作用	1
1.2 可靠性增长技术的统计特点	2
1.3 可靠性增长技术的现状	2
1.3.1 国外状况	2
1.3.2 国内状况	4
1.4 可靠性增长的工程原理	4
1.4.1 产品可靠性的变动	4
1.4.2 产品缺陷的分类与改正流程	5
1.4.3 可靠性增长因素	6
1.4.4 可靠性增长工作的内容与程序	8
1.5 本书内容的特点	9
第二章 可靠性增长试验	11
2.1 引言	11
2.2 制定试验方案应考虑的因素	11
2.3 系统的试验安排——金字塔式的试验程序	12
2.4 试验应力的确定准则	12
2.5 元器件的筛选与模块的预试验	13
2.6 单元级以上的试验	14
2.6.1 寿命周期、任务周期与环境条件的分析	14
2.6.2 剪裁 (Tailoring).....	15
2.6.3 根据缺陷类型选择应力	16
2.7 主要试验应力的优化	16
2.7.1 最佳筛选应力的选择	16
2.7.2 高低温循环应力的确定	16
2.7.3 振动的优化	18
2.7.4 筛选强度与应力的关系	20
2.8 环境应力筛选试验	21
2.8.1 引言	21
2.8.2 环境应力筛选方法	22
2.9 应力的联合作用与综合环境试验	23
2.10 综合环境试验设备简介	24
2.11 各种试验的关系与信息综合利用	26

第三章 可靠性增长管理	28
3.1 概述	28
3.1.1 规划管理	28
3.1.2 TAAF 过程管理	28
3.2 可靠性增长管理策略与基本概念	29
3.2.1 失效修正策略	30
3.2.2 改进有效性系数 (Improvement effectiveness factor)	31
3.2.3 增长潜力	31
3.2.4 固有可靠性、预计可靠性与增长潜力之间的关系	32
3.2.5 增长率与增长参数	33
3.2.6 可靠性增长的初始 MTBF	34
3.2.7 起始时间 t_1 的确定	35
3.2.8 规划的效益权衡	36
3.3 增长规划的管理与制定	37
3.3.1 按理想增长曲线的管理	38
3.3.2 理想增长曲线的绘制	39
3.3.3 计划增长曲线的绘制与分段管理	41
3.3.4 跟踪增长曲线与预测增长曲线的绘制	43
第四章 趋势检验方法	45
4.1 引言	45
4.2 趋势检验的图示法	45
4.3 趋势检验的 Laplace 方法	46
4.3.1 Laplace 检验的理论基础	46
4.3.2 Laplace 检验方法	49
4.4 数值例	51
第五章 可靠性增长的常用模型	55
5.1 引言	55
5.2 Duane 模型	55
5.2.1 概述	55
5.2.2 模型的数学描述	55
5.2.3 模型参数的最小二乘估计	57
5.2.4 模型的拟合优度检验	58
5.2.5 多台系统同步增长的情况	59
5.2.6 数值例	59
5.3 AMSAA 模型	64
5.3.1 概述	64
5.3.2 模型的数学描述	65
5.3.3 单台系统失效截尾	65
5.3.4 单台系统的时间截尾	70
5.3.5 AMSAA 模型的拟合优度检验	73
5.3.6 丢失数据的情况	75

5.3.7 分组数据时的 AMSAA 模型	77
5.4 AMSAA-BISE 模型	82
5.4.1 定义	82
5.4.2 多台系统的失效截尾	82
5.4.3 多台系统的时间截尾	85
5.4.4 拟合优度检验	87
5.4.5 数值例	88
5.4.6 AMSAA-BISE 模型对离散数据的应用	92
5.4.7 在拒绝 AMSAA-BISE 模型时的处理方法	94
5.4.8 多台系统丢失数据的分析	94
5.4.9 多台系统分组数据的分析	98
5.4.10 多台同步增长的预测区间	104
第六章 可靠性增长的 Bayesian 方法	109
6.1 引言	109
6.2 二项可靠性增长的 Bayesian 方法	109
6.2.1 问题的提出	109
6.2.2 精确限	110
6.2.3 试验阶段的划分	113
6.2.4 近似限	114
6.2.5 数值例	115
6.3 指数可靠性增长的 Bayesian 方法	120
6.3.1 问题的提出	120
6.3.2 精确限	120
6.3.3 阶段的划分	124
6.3.4 近似限	125
6.3.5 数值例	125
6.4 正态分布精度增长的 Bayesian 方法	127
6.4.1 问题的提出	127
6.4.2 精确限	128
6.4.3 阶段的划分	130
6.4.4 近似限及其计算方法	130
6.4.5 数值例	132
6.5 AMSAA-BISE 模型与顺序约束模型的综合	134
第七章 可靠性增长的其它模型	137
7.1 引言	137
7.2 Gompertz 模型	137
7.2.1 模型简述	137
7.2.2 应用 Gompertz 模型的步骤	137
7.2.3 数值例	139
7.3 Lloyd-Lipow 模型	142
7.4 EDRIC 模型	145
7.4.1 模型简述	145

7.4.2 应用 EDRIC 模型的步骤	146
7.4.3 数值例	147
7.5 可靠性增长预测模型	148
7.5.1 模型简述	148
7.5.2 模型失效率的点估计	149
7.5.3 改进有效性系数的估计	151
7.5.4 可靠性增长潜力的估计	151
7.6 其它重要的增长模型简介	153
7.6.1 离散型的可靠性增长模型	153
7.6.2 连续型的可靠性增长模型	154
附录 A 概率、统计的有关知识	158
A.1 多项式定理	158
A.2 用条件概率计算概率	158
A.3 Bayes 定理	160
A.4 有关的概率分布	161
A.5 顺序统计量	170
A.6 共轭型先验分布及无信息先验分布	172
A.7 第一、第二近似限及其推导	173
A.8 Cramér-Von Mises 检验	174
A.9 Poisson 过程	175
A.10 非齐次 Poisson 过程	177
附录 B	179
表 B.1 相关系数 $\rho = 0$ 时, 经验相关系数 $\hat{\rho}$ 的临界值 $\hat{\rho}_\alpha, P\{ \hat{\rho} \leq \hat{\rho}_\alpha\} = 1 - \alpha$ 表	179
表 B.2 趋势检验统计量 μ 的临界值 $\mu_{\alpha/2}$ 及 $\mu_{1-\alpha/2} = -\mu_{\alpha/2}$ 表	180
表 B.3 Cramér-Von Mises 统计量 C_M^2 的临界值 $C_{M,\alpha}^2$ 表	180
表 B.4 AMSAA-BISE 模型时间截尾区间估计系数表	181
表 B.5 AMSAA-BISE 模型失效截尾区间估计系数表	183
表 B.6 AMSAA-BISE 模型预测区间估计系数表	185
表 B.7 二项可靠性置信下限表	190
表 B.8 正态分布函数 $\Phi(u)$ 表	202
表 B.9 正态分布分位数 u_p 表	203
表 B.10 χ^2 分布分位数 $\chi_{\alpha,p}^2$ 表	204
表 B.11 F 分布分位数 $F_{\nu_1, \nu_2, \gamma}$ 表	210
参考文献	216
名词索引	220

第一章 引 论

1.1 可靠性增长技术的意义与作用

任何产品在研制初期,其可靠性与性能参数都不可能立即达到所规定的指标,必须经过反复试验—改进一再试验的过程,才能使其可靠性与其它性能不断提高,直到满足要求。在这个过程中,产品的设计、制造工艺、操作方法等不断地暴露出缺陷,而经过分析和改进之后又不断地趋于完善,从而使产品的可靠性和其它性能不断地提高,这就是可靠性增长过程。

由于新技术不断涌现,产品更新换代加速,以及要求新产品有更高和更复杂的功能,因此,可靠性问题往往成为产品研制过程中最棘手的问题。而人们总是希望能用最短的时间、最少的经费使新产品的可靠性提高到规定的指标。这种提高产品可靠性的“捷径”,仅凭工程上采用的“试验—暴露—改进一再试验”的方法是极难一次找到的,必须采用统计方法对所采取的工程改进措施进行检测和分析。用统计方法评价在某一时刻产品所达到的可靠性水平,评价及预测产品可靠性增长的速度,判断它们是否符合增长规划要求;并通过对人力、经费和时间进度的统一调配,将工程上的试验、分析、改进纳入科学管理之下,做到对产品可靠性增长进行定量控制。这就是可靠性增长管理。通过这种管理,可避免因对产品盲目改动而造成人力与资金的浪费;可防止直到研制结束时才发现产品可靠性未达到规定要求而必须大返工所造成的资金浪费、贻误时机。

事实上,只要产品尚未进入稳定使用阶段,围绕着产品所进行的工程活动,总不外是设法提高产品的性能和可靠性。只要产品暴露出缺陷,人们总要千方百计地采取措施加以纠正。因此,可靠性增长并不仅仅发生在产品研制的某个阶段,在产品寿命周期的每个阶段几乎都可能发生。具体地说,可靠性增长的分析、管理技术可用于下述各项活动中:

- (1) 对研制阶段的样机进行可靠性增长管理与分析;
- (2) 对因生产设施及其运行情况的改善所引起的产品可靠性增长进行分析;
- (3) 对因老炼或筛选所引起的产品可靠性增长进行分析与评定;
- (4) 对因生产人员的技术水平与工艺水平的提高而引起的产品可靠性增长进行分析与评定;
- (5) 对因使用人员的操作、维护技术的提高所引起的产品可靠性增长进行分析与评定。

目前,可靠性增长技术已成为可靠性工程的一个重要组成部分。在产品的开发、研制和生产等决定性的寿命阶段中,只有采用可靠性增长的各项技术来进行分析管理和实现各种工程改进,才能将各项可靠性工作联成一体,并贯穿于产品的整个寿命周期之中¹⁾。实践证明,在工程中,通过可靠性增长试验、分析与管理来提高产品的可靠性,是节省试验时

1) 关于各项可靠性工作的内容可见周源泉、翁朝曦 (1990b)。

间、减少试验次数和降低研制经费的有效办法。另外,对于需要进行可靠性鉴定或验收的产品,如果在研制或生产中就成功地应用了可靠性增长技术,由此得出完整的失效数据就可用来评定产品的可靠性,从而作为鉴定或验收的依据。也就是说,成功的可靠性增长试验可免去产品的鉴定试验,成功的筛选试验可免去产品的验收试验。由此可为工程节约鉴定或验收的试验费用,而且能加快工程进度。

1.2 可靠性增长技术的统计特点

在可靠性增长过程中,由于反映产品质量水平的母体不断变化,因此不能采用母体不变的常用的统计方法对产品进行分析。尤其是贵重产品和试验代价很高的复杂系统,它们在每次试验中投入的样品很少,试验次数和(或)试验时间非常有限,因此,小样本的可靠性增长分析问题在实践上就显得更为重要,在方法上也更为复杂。这正是本书所要讨论的重点问题。

在可靠性增长的管理与分析中,要用到多种统计分析方法。除了检验产品可靠性是否存在增长趋势之外,还必须按照可靠性增长规划的特点,建立起与可靠性增长规划相应的数学模型,以描述增长过程中产品可靠性变化的情况,这种与可靠性增长规划相应的、用于描述产品可靠性变化的数学模型称为可靠性增长模型。可靠性增长模型有多种,例如,对应于研制过程中的一边试验一边改进而使可靠性连续增长的规划方式,就有一系列的时间函数模型,对应于在不同试验阶段之间进行改进而使可靠性呈阶跃式增长的规划方式,有各种顺序约束模型,等等。这些模型在不同的场合发挥作用。因此,必须针对具体工程规划的特点,选择使用合适的可靠性增长模型,才能对产品的可靠性进行正确的跟踪与预测,并为工程管理提供正确信息。

1.3 可靠性增长技术的现状

1.3.1 国外状况

50年代末期,国外就已比较严肃地提出了可靠性增长的思想。Duane (1962)首先提出了一种有广泛应用价值的可靠性增长模型,同时,Lloyd & Lipow (1962)也提出了他们的可靠性增长模型。此后,可靠性增长问题引起了国外可靠性工程界的广泛注意,并发表了数百篇论文、报告。美国对此更为重视,曾在1972年、1974年、1978年和1988年四次召开可靠性增长的学术会议(见表1.1),并发表了会议录。

国外还制订和出版了不少关于可靠性增长试验、管理及分析方法的标准与手册,以指导可靠性增长实践。这方面的主要状况见表1.2。

此外,国外还出版了许多论述可靠性的著作,其中辟有专章(或节)阐述可靠性增长的有Lloyd & Lipow (1962); Myere, Wong & Gordy (1964); Amstadter (1970); Arsenault & Roberts (1980); Dhillon (1983)等的著作。但迄今尚未见有专门讨论可靠性增长的专著。

从这些文献、标准、手册和著作中可以看出,可靠性增长技术在工程上,尤其在美军的装备研制方面,已有相当广泛的应用。

在可靠性增长模型方面,除了硬件模型之外,随着软件应用的迅速发展,国外已有了

表 1.1 美国可靠性增长学术会议概况

时间	主办单位/主持人	会议录名称/文件号
1972 年	AMSAA ¹⁾ /Crow, L.H.	Reliability Growth Symposium/ADA 019372
1974 年	AMSAA/Crow	Reliability Growth Symposium (2nd.)/ADA027035
1978 年	IES ²⁾ Environmental Reliability project Group	Reliability Growth Management, Test and Modelling
1988 年	IES	Institute of Environmental Sciences Reliability Growth Process and Management Conference and Workshop

1) AMSAA 是 Amry Materiel System Analysis Activity 的缩写.

2) IES 是 Institute of Environmental Sciences 的缩写.

表 1.2 国外有关的可靠性增长标准和手册

年月	出处	代号与名称	主要意义/使用模型
1969.3	美军	MIL-STD-785A 设备和系统研制与生产阶段的可靠性大纲	首次将可靠性增长作为可靠性工作中必须进行的一项重要内容而纳入标准
1977.3	美军	MIL-STD-2068 可靠性研制试验	第一个可靠性增长标准 用“移动平均值”的方法处理数据
1978.2	美军	MIL-STD-1635 (EC) 可靠性增长试验	采纳 Duane 模型
1981.2	美军	MIL-HDBK-189 可靠性增长管理	采纳 AMSAA 模型
1984.10	美军	MIL-HDBK-338 电子设备可靠性设计手册	介绍 AMSAA 模型、Duane 模型等
1986.10	美军	MIL-STD-781D 工程研制、鉴定和生产中的可靠性试验方法	
1987.7	美军	MIL-HDBK-781 工程研制、鉴定和生产中的可靠性试验方法,计划与环境	采用 AMSAA 模型、Duane 模型
1989.8	IEC	TC-56 (CO) 150 Reliability growth models and estimation methods	采用 AMSAA 模型、Duane 模型
1989.10	IEC	IEC Pub.-1014 programmes for reliability growth	

数十种软件的可靠性增长模型,但其中有不少是未经工程验证,或者是适用面很小的模型,而且,至今尚未推出被公认的通用模型。为此,本书将着重介绍以硬件为主的设备和系统的可靠性增长模型。

在诸模型中,时间函数模型比顺序约束模型成熟。其中最成熟的是 Duane 模型。从 1962 年开始,该模型不但被用于硬件,还被用于软件。二十多年的工程考验表明,它有广泛的适用性。1978 年被美军标准 MIL-STD-1635 (EC) 所采纳。在 70 年代, Crow 基于 Duane 模型发展了 AMSAA 模型。此模型于 1981 年被美军手册 MIL-HDBK-189 所采纳,接着又被国际电工委员会和美军的其它标准、手册和文件所引用(见表 1.2),成为

迄今国际上最重要的可靠性增长模型。

顺序约束模型首先由 Barlow, Proschan & Scheuer (1966) 提出。之后, Smith (1977) 用 Bayesian 方法讨论了二项可靠性增长模型; Weinrich & Gross (1978) 用 Bayesian 方法讨论了三项可靠性模型。但这些模型的经典精确方法至今尚未取得长足的进展。

1.3.2 国内状况

钱学森教授于 1975 年、1977 年和 1981 年先后三次提出我国要搞“变动统计学”和“小样本变动统计学”研究(这就是可靠性增长方法的理论基础)。钱学森教授指出,可靠性增长是可靠性理论研究的三大方向之一。根据这些意见,本书作者自 1977 年起,结合多种航天产品及其它工业产品的研制,开始了对可靠性增长的研究工作。

在 Bayesian 方法方面,国内有关资料曾介绍了国外关于二项与三项可靠性增长的顺序约束模型。我们所作的工作主要是完善了国外已提出的二项可靠性增长的顺序约束模型;发展了指数型可靠性增长的顺序约束模型及正态分布精度增长的顺序约束模型;并对这三种模型进行了工程验证。

在经典方法方面,80 年代初已有人介绍了 Duane 模型、Gompertz 模型和 AMSAA 模型,并作了若干工程验证。我们根据工程实践的需要,在 AMSAA 模型基础上,提出了更有普遍意义的 AMSAA-BISE 模型,解决了 Crow 十几年来想解决而没有解决的多台同步可靠性增长问题,包括趋势检验、模型拟合优度检验、模型参数及系统 MTBF 的点估计与区间估计、分组数据及丢失数据的统计推断、第 v 次未来失效的预测区间等问题,并进行了工程验证,为本书的撰写奠定了基础。

1.4 可靠性增长的工程原理

1.4.1 产品可靠性的变动

在产品的寿命周期中,产品的可靠性参数要经过多次变动。对于一个复杂的产品,其可靠性水平变动情况一般如图 1.1 所示。

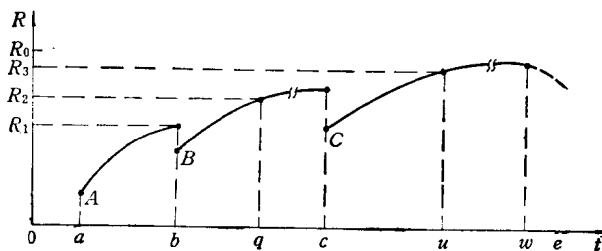


图 1.1 产品的可靠性在寿命期中的变动

在图 1.1 中, $0a$ 为产品的方案设计阶段,此时样机尚未制成,但在可靠性设计方案中已确定了产品在各阶段的可靠性指标 R_1 , R_2 和 R_3 。经过设计和初步研制,并进行可靠性预计得到产品的可靠性预计值为 R_0 。在产品寿命期的各项可靠性增长活动中,通常将 R_1

作为产品可靠性合格的基准,而认为 R_0 是产品可靠性增长所能达到的极限值。因此,若 R_0 比 R_1 大得多,则在可靠性增长过程中,产品可靠性达到所规定目标的风险就小得多。

图 1.1 中 $\overline{ab}$ 为研制阶段, A 点为样机的诞生时间。产品在研制初期,由于存在着设计方案、制造工艺、操作方法、管理技术等方面的问题,因此,样机的可靠性比设计值低得多。经过试验,暴露出所存在的缺陷,并经过分析改进,使可靠性逐步提高。在此过程中,产品通常要经过三到四次重新设计制作,因此,这个阶段又可细分为若干个小阶段。正确的改进措施,使产品的可靠性在每个小阶段中逐渐增长,直到满足所规定的要求。

$\overline{bq}$ 为试生产阶段, B 点表示产品初次投产。产品从研制转入生产,在制造工艺、材料的选用、生产设施、人员的操作技术与管理水平等方面,都会存在许多问题。试生产初期的产品,其可靠性将低于规定值。在生产过程中,产品不断地暴露出缺陷,设计人员则不断地采取针对性的改进措施,从而使产品可靠性不断地提高,直到能稳定地生产出可靠性满足规定值的产品。

$\overline{qc}$ 为正规或批量生产阶段。在这个阶段中,产品的设计方案、加工工艺、管理技术、操作规程,以及所用的器材和生产设施都已确定下来;管理人员和操作人员的技術已趋熟练,因此所生产的产品的可靠性相对地稳定一致。然而,在此期间内为了消除产品在制造中所引入的残余缺陷(详见 1.4.2 节内容),通常规定将可靠性筛选试验作为固定的生产环节纳入工序之中。这种筛选试验过程就是典型的可靠性增长过程。

$\overline{cu}$ 为试用阶段, C 点表示初次试用。由于产品经过运输、安装等过程引入了新的失效源,或者因使用人员对操作维护技术生疏,使得产品的可靠性再次跌落。由于试用中暴露并排除了缺陷,使用人员也因此而提高了操作技能和维护水平,从而可靠性又逐步回升,直至转入正规使用阶段。

$\overline{uw}$ 为正规使用阶段。在此期间,有关人员的技術已趋熟练,产品所受的环境应力、工作应力相对稳定,因此,产品可靠性相对保持恒定。

$\overline{we}$ 为磨损老化阶段。产品经过长期使用,其可靠性逐渐呈退化状态(亦称为可靠性负增长),直到不宜使用而退役为止。

由上可见,在产品的寿命周期中,可靠性总是处在不断的变化之中,只在某个阶段上可以保持相对稳定。对于这些可靠性变动剧烈的阶段,应当用科学的方法加以分析与控制。

1.4.2 产品缺陷的分类与改正流程

1. 产品缺陷的分类

产品在研制、生产和使用初期,其可靠性未能达到规定值的原因通常可归咎于以下两类缺陷:

(1) 系统性缺陷。这种缺陷是指在产品研制与生产初期,由于设计、工艺,以及有关文件规范所存在的问题而造成的缺陷,例如选材不当,对环境应力或工作应力的考虑与现实不符,生产工艺或操作规程不合理等引起的隐患。这类缺陷的影响面大,常在产品中以同一失效模式暴露出来。然而,一旦查出它的原因,并针对其原因进行设计、工艺或文件上的修正,就可保证在此后的生产或使用中,消除或削弱产品的这类缺陷,使产品总体的可靠性得到根本性的改善。

(2) 残余缺陷。在硬件产品的研制、生产,以及装卸、运输、贮存、安装等过程中,经常存在着一些造成产品隐患的偶然因素。例如人为失误或环境变化而造成的各种应力冲击,以致造成结构、零部件、线路及元器件的暗伤,电路或机构中的多余物、腐蚀或污染因素等。这些由偶然因素造成的缺陷称为残余缺陷。残余缺陷通常以不同的失效模式随机出现。当它们被查出之后,可以将它们逐个地消除或削弱,使这一件产品的可靠性提高。但是,这种措施不可能保证另一件产品不再发生类似问题。

无论是系统性缺陷还是残余缺陷,都需对产品施加工作应力或环境应力,才能使之激发暴露,才能进行分析与纠正,以此来提高产品的可靠性。然而,这两种缺陷的暴露、试验与纠正措施存在着如下的差异:

对系统性缺陷进行试验时,通常只取具有代表性的 k 件产品($k \geq 1$)便可暴露出产品所存在的缺陷。通过对缺陷的分析,找出原因之后便可采取纠正措施。这种纠正措施是对产品的设计、工艺、管理程序等方面的改进。只要措施正确有效,就可在以后的全体产品中消除或削弱这些缺陷的影响。在修正中应尽量避免引入新的系统性缺陷。这种试验就是可靠性增长试验。

对于残余缺陷,其暴露试验与相应的纠正措施必须分别在每一批的每一件产品上进行,这种试验称为筛选或老炼。当产品进入稳定生产阶段,筛选或老炼试验中所施加的各种应力、条件和试验程序,通常都被明确规定下来,成为生产中必不可少的固定环节。

2. 产品缺陷的改正流程

必须指出,在产品研制过程中所进行的各种试验,尤其是正式的增长试验,除了暴露系统性缺陷之外,也必然会暴露出所存在的残余缺陷。因此,在试验中对于所出现的问题必须加以诊断、分析,查清是系统性缺陷还是残余缺陷。除了对系统性缺陷进行纠正之外,还应对残余缺陷的暴露过程与表现形式进行详细记录,以供进一步分析,寻找失效源,并为筛选条件的制定积累信息,提供依据。图 1.2 描述了研制试验中,缺陷的暴露、分析和纠正的流程。

1.4.3 可靠性增长因素

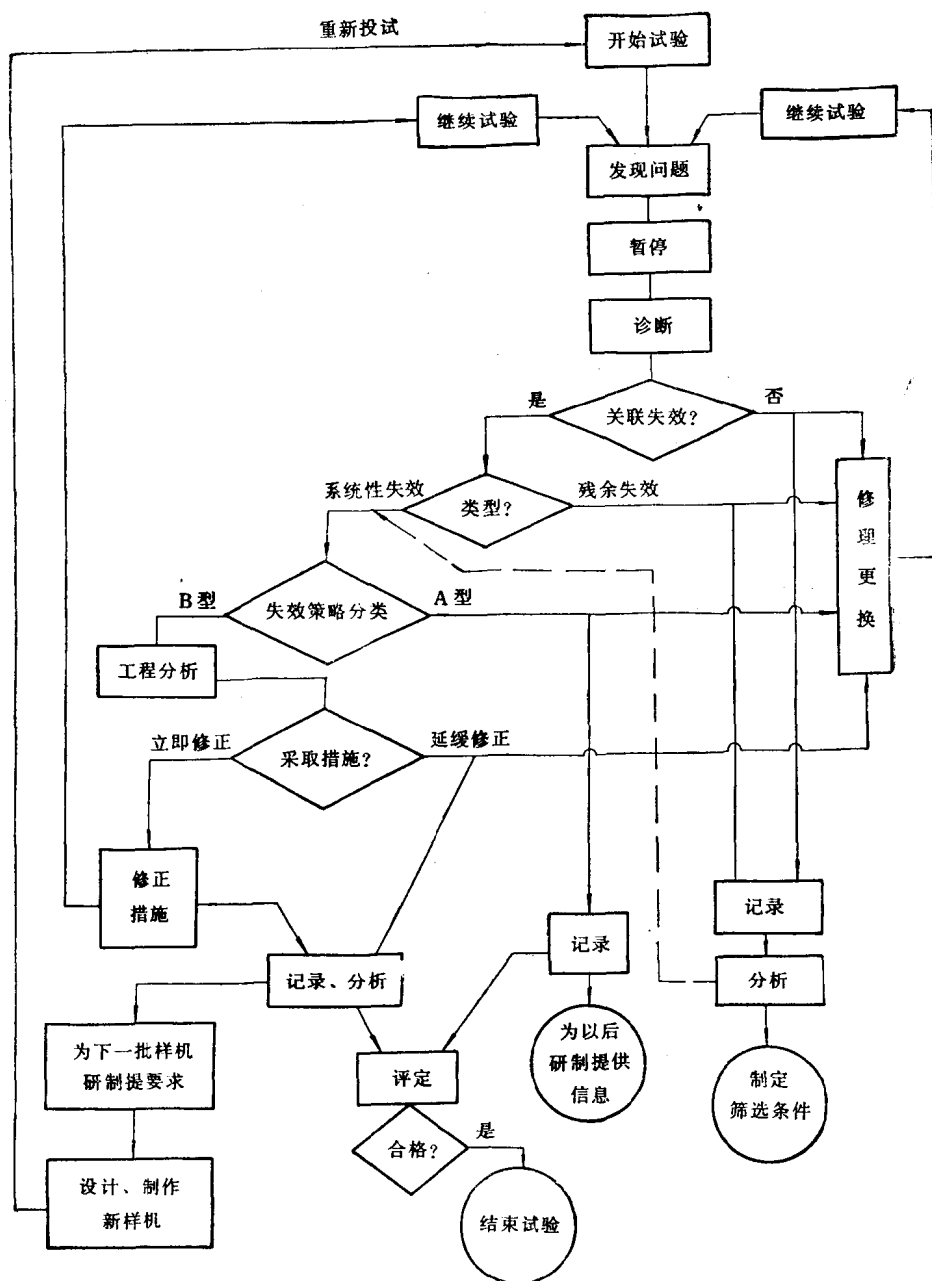
可靠性增长过程就是产品中隐藏的各种缺陷的暴露、分析和消除或削弱的过程。因此,产品可靠性增长取决于以下因素:

1. 对缺陷的纠正

(1) 缺陷的暴露与检测。为激发产品缺陷的暴露,需对产品施加不同的工作应力与环境应力,这就是产品在可靠性增长试验、筛选试验或现场试用中所经受的工作条件与环境条件。缺陷的激发时间与暴露程度取决于这些应力条件的严酷程度。当产品的缺陷通过激发而变成故障暴露出来时,就须采用检测与监控手段,准确地确定受试产品发生故障及有关情况的时间。

(2) 故障诊断。故障分析包括工程分析、失效物理分析、失效统计分析三部分。

工程分析是根据试验时暴露缺陷过程中的各种应力、产品状态变化等情况,寻找产品故障部位并查明故障的起因。此时可使用故障树分析(FTA)或失效模式、影响及危害



度分析 (FMECA) 等技术。

失效物理分析是利用显微镜、X 射线摄影仪、电子探针显微分析仪等物理或化学分析手段,对失效的元器件、零件或材料进行观测和解剖分析的,以确证其失效机理及引起失效的原因。

失效统计是指统计失效发生的部位、模式和相应的应力条件。根据故障发生的重复性与规律性来判断它是属于系统性失效还是残余失效(见第三章),并配合工程分析寻找