



加速寿命试验 技术与应用

Accelerated Life Testing
Technology and Application

陈循 张春华 汪亚顺 谭源源 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

加速寿命试验技术与应用

陈循 张春华 汪亚顺 谭源源 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书较为系统地论述了加速寿命试验的理论、方法和应用,针对加速试验效率、加速试验建模分析、加速试验结果一致性问题进行论述,主要内容包括步降应力加速试验及其建模分析,加速退化试验建模分析,整机级加速试验建模分析,仿真基加速试验优化设计,加速试验一致性分析及融合评估,加速试验的设计、分析与评估方法综合应用案例等。本书收录了作者科研团队近年来在国家自然科学基金、国家部委预研重点基金等项目的资助下在加速寿命试验技术领域的重要研究成果。

本书既可为从事可靠性技术研究与应用的人员提供借鉴,也可对相关专业博士、硕士研究生提供教学参考。

图书在版编目(CIP)数据

加速寿命试验技术与应用 / 陈循等著. —北京:国防工业出版社, 2013. 8

ISBN 978-7-118-08918-9

I. ①加… II. ①陈… III. ①加速寿命试验—研究
IV. ①TB302

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 190041 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 17 字数 320 千字

2013 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 66.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

前 言

寿命是对装备可靠服役状态持续能力的时间描述,是重要的可靠性参数,反映了装备在服役期内完成规定的任务,进而转化为战斗力的能力,对于确保装备维持较高的战备完好率,遂行军事任务,维护国家安全具有重大意义。如何通过高效的试验方法对装备寿命进行量化评估,为装备寿命设计定型、使用延寿提供可信的寿命信息,已成为当前亟待解决的工程问题。

加速寿命试验(Accelerated Life Testing)是近年来发展的高效试验技术,在不改变产品失效机理的前提下,通过对产品加载高于正常使用条件的应力等级,加快产品性能退化或失效过程,通过对加速应力下获得的数据进行统计分析,评估或预测产品正常使用条件寿命指标。通过加速寿命试验可以在产品的真实寿命消耗实现之前提前获得寿命过程数据,使得寿命指标的提前评判成为可能。

本专著针对加速寿命试验技术领域存在的理论与方法问题开展讨论,集成了近年来国防科技大学可靠性实验室在该领域的重要研究成果,内容包括加速寿命试验的理论、方法和工程应用的典型案例。

全书共9章:第1章介绍基本概念以及加速寿命试验的研究背景与需求,阐述加速寿命试验研究现状,介绍本专著针对的主要问题及内容安排;第2章分别介绍加速寿命试验中具有共性意义的各类模型,作为本专著后续各章的基础;第3章针对加速寿命试验效率问题,系统介绍一种新的步降应力加速寿命试验方法,在不降低现有方法预测精度的前提下,进一步提高加速寿命试验方法的效率;第4章针对加速寿命试验中引入退化失效的需求,系统介绍两类加速退化试验建模分析方法;第5章针对整机加速寿命试验建模需求,系统介绍竞争失效场合加速寿命试验建模分析方法;第6章针对加速寿命试验优化设计研究需求,系统介绍仿真基加速寿命试验优化设计方法;第7章针对加速寿命试验的一致性问题,分析加速寿命试验一致性的影响因素、一致性的量化指标,系统介绍两种提高加速寿命试验建模一致性的融合建模分析方法;第8章以某电子倍增器工作寿命加速寿命试验为例,介绍加速寿命试验在工程应用中取得成功应用的案例;第9章总结全书,并对加速寿命试验的研究与应用发展进行展望。

本书力图理论联系实际,既注重对于加速寿命试验这一新型技术领域的基本理论进行诠释,也注重对其试验方法及工程应用进行剖解,以开阔视野,启发思路。

希望能为读者揭示这一新型试验技术的研究与工程应用前景,推动加速寿命试验技术的进一步研究与工程应用的深入开展。

本书由陈循教授负责整体策划和审定,张春华副教授负责统稿,第1章至第4章由张春华副教授撰写,第6.1节~6.4节和第8章由汪亚顺博士撰写,第5章、6.5节、第7章和第9章由谭源源博士撰写。本书的出版是集体智慧的结晶,感谢邓爱民、罗巍、张详坡等博士,以及申晔、莫永强、刘泓江、殷凤龙、赵元等硕士在读期间所做出的成效卓越的研究工作。感谢装备重点预研基金及相关预研项目对研究的资助,感谢国防科技大学校庆60周年出版基金对本书出版提供资助,感谢卢秉恒院士、温熙森教授、康锐教授、李欣欣博士对本专著的建议和大力推荐。

限于水平,书中难免有不妥之处,恳请读者指正。

作者

2013年5月

于国防科技大学机电工程与自动化学院

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 基本概念及内涵	1
1.1.1 寿命与寿命评估	1
1.1.2 寿命试验与加速寿命试验	2
1.1.3 加速试验分类	4
1.2 装备贮存寿命评估	5
1.3 加速试验研究现状	7
1.3.1 加速试验统计建模分析	7
1.3.2 加速试验优化设计	8
1.3.3 加速试验应用概况	10
1.4 本书的内容安排	10
1.4.1 针对的主要问题	10
1.4.2 内容安排	11
参考文献	12
第 2 章 加速试验模型	17
2.1 加速试验常用模型	17
2.2 竞争失效模型	19
2.3 恒加速试验的寿命模型	19
2.3.1 恒加速试验的寿命分布类模型	19
2.3.2 恒加速试验的退化类模型	20
2.4 步加速试验的寿命模型	22
2.4.1 步加速试验的寿命分布类模型	22
2.4.2 步加速试验的退化类模型	24
2.5 加速模型	25
2.6 加速因子	27
2.6.1 加速因子定义	27
2.6.2 常见寿命分布的加速因子	27

2.6.3	关于加速因子的进一步讨论	30
	参考文献	30
第3章	步降应力加速寿命试验及其建模分析	32
3.1	步降应力加速试验方法	32
3.1.1	步降应力加速试验	32
3.1.2	步降应力加速试验的失效物理模型	34
3.1.3	步降应力试验的概率统计模型	37
3.2	步降应力加速试验数值仿真	40
3.2.1	仿真问题描述	40
3.2.2	Weibull分布随机抽样定数截尾样本的 Monte - Carlo 仿真	41
3.2.3	步降应力试验过程仿真	41
3.2.4	步进应力试验过程仿真	41
3.2.5	步降应力加速试验 MC 仿真结论	42
3.3	Weibull分布场合步降应力加速寿命试验建模分析	44
3.3.1	步降应力加速寿命试验建模分析问题描述	45
3.3.2	三步分析方法	47
3.3.3	基于加速因子的步降应力加速寿命试验数据折算	47
3.3.4	数据折算算例	50
3.4	Weibull分布场合恒定应力加速寿命试验建模分析	52
3.4.1	恒定应力加速寿命试验建模分析问题描述	52
3.4.2	二步分析方法	53
3.4.3	构造数据分析方法	55
3.4.4	Weibull分布恒定应力加速寿命试验建模分析算例	57
3.5	实验验证	59
3.5.1	步降应力加速寿命试验设计	59
3.5.2	加速效率验证	60
3.5.3	建模分析方法验证	61
	参考文献	63
第4章	加速退化试验建模分析	65
4.1	性能退化数据建模分析方法	65
4.1.1	性能退化数据结构	65
4.1.2	基于伪失效寿命的退化数据建模分析方法	66
4.1.3	基于退化量分布的退化数据建模分析方法	71

4.2	加速退化试验数据建模分析方法	77
4.2.1	加速退化试验的数据结构	77
4.2.2	基于伪失效寿命的加速退化数据建模分析方法	79
4.2.3	基于退化量分布的加速退化数据建模分析方法	84
	参考文献	90
第5章	整机级加速试验建模分析	91
5.1	概述	91
5.1.1	装备层级分析	91
5.1.2	装备各层级加速试验定位分析	92
5.2	整机恒定应力加速试验分析	92
5.2.1	问题描述和建模分析基本思路	92
5.2.2	整机恒加试验突发型失效模式统计分析	96
5.2.3	恒加试验退化型失效模式统计分析	104
5.2.4	应用实例	107
5.3	整机步进应力加速试验分析	111
5.3.1	整机步进试验问题描述和统计分析基本思路	111
5.3.2	步进试验突发型失效模式统计分析	112
5.3.3	步进试验退化型失效模式统计分析	114
5.3.4	应用实例	115
5.4	老产品整机恒定应力加速试验分析	118
5.4.1	老产品整机恒加试验的寿命模型和退化模型	118
5.4.2	老产品整机恒加试验问题描述和统计分析基本思路	121
5.4.3	老产品整机恒加试验突发型失效模式统计分析	122
5.4.4	老产品整机恒加试验退化型失效模式统计分析	124
5.4.5	应用实例	125
	参考文献	128
第6章	仿真基加速试验优化设计	129
6.1	仿真基加速试验优化设计基本理论	129
6.1.1	仿真基加速试验优化设计理论框架	129
6.1.2	加速试验数据的 Monte Carlo 仿真	137
6.1.3	加速试验数据的统计分析	149
6.1.4	加速试验方案优化要素	157
6.2	仿真基恒定应力加速寿命试验优化设计方法	163

6.2.1	模型假设	163
6.2.2	优化问题描述	163
6.2.3	仿真基优化设计方法	164
6.2.4	算例	167
6.2.5	最优方案敏感性分析	171
6.3	仿真基步降应力加速寿命试验优化设计方法	172
6.3.1	模型假设	172
6.3.2	优化问题描述	173
6.3.3	仿真基优化设计方法	174
6.3.4	算例	176
6.3.5	最优方案敏感性分析	179
6.4	仿真基加速退化试验优化设计方法	180
6.4.1	模型假设	180
6.4.2	优化问题描述	181
6.4.3	分位寿命 MSE 的估计	182
6.4.4	仿真基优化设计算法	184
6.4.5	可行方案集中的试验方案选取方法	186
6.4.6	算例	187
6.4.7	最优方案敏感性分析	190
6.5	竞争失效场合加速试验仿真基优化设计	191
6.5.1	主要失效模式定量分析	191
6.5.2	竞争失效场合加速试验仿真基优化设计	198
	参考文献	205
第 7 章	加速试验一致性分析及融合评估	207
7.1	整机加速试验一致性分析	207
7.1.1	整机加速试验一致性的影响因素分析	207
7.1.2	一致性分析的量化指标	208
7.2	整机加速试验 Bayes 融合评估	210
7.2.1	基于 Gamma 先验分布的 Bayes 融合评估	210
7.2.2	基于 Dirichlet 先验分布的 Bayes 融合评估	215
7.2.3	Bayes 融合评估的性质分析	221
7.2.4	Weibull 分布场合的 Bayes 融合评估	223
7.2.5	应用实例	226

7.3	整机加速试验 MLE 融合评估	229
7.3.1	老产品整机加速试验 MLE 融合评估	229
7.3.2	MLE 融合评估仿真对比分析	231
7.3.3	应用实例	233
7.4	本章小结	236
	参考文献	236
第 8 章	加速试验的设计、分析与评估方法综合应用案例	237
8.1	背景简介	237
8.1.1	铯原子频标系统简介	237
8.1.2	铯束管简介	238
8.1.3	电子倍增器简介	239
8.2	电子倍增器多应力 CSADT 基本思路	240
8.3	电子倍增器摸底试验	241
8.3.1	试验系统	241
8.3.2	试验方案	241
8.3.3	试验数据	242
8.4	摸底试验数据分析	243
8.4.1	问题描述	243
8.4.2	模型假设	244
8.4.3	统计分析模型	245
8.4.4	参数估计方法	247
8.4.5	电子倍增器摸底试验数据的统计分析	248
8.5	电子倍增器双应力 CSADT 方案优化设计	250
8.5.1	方案要素基本设计	250
8.5.2	方案要素详细设计	251
8.6	基于优化方案的电子倍增器双应力 CSADT	254
8.6.1	试验过程	254
8.6.2	试验数据分析结果	255
8.6.3	进一步的讨论	256
	参考文献	257
第 9 章	总结与展望	259

第1章 绪 论

1.1 基本概念及内涵

1.1.1 寿命与寿命评估

寿命是对产品可靠状态持续能力的时间描述,是重要的可靠性参数。比如,在导弹、鱼雷等“长期贮存,一次使用”装备的服役过程中,装备主要处于非工作的贮存状态,贮存寿命反映了装备可靠贮存状态的持续能力,决定了装备在贮存寿命期内由贮存状态转化为工作状态的能力,因此贮存寿命水平的高低对于这一类装备的战备完好率具有重要的意义。此外,武器装备的工作寿命、民用装备的使用寿命都属于该研究范畴。

寿命已成为装备可靠性指标一个非常重要的组成部分,在新研装备及在役装备中大量存在着寿命研究需求:①在研制阶段如何通过有效的设计提高装备的寿命能力;②在使用阶段如何通过有效的延寿措施延长装备的寿命期。在以上两项研究中需要解决的共同问题是寿命评估,即如何通过有效的试验方法对装备寿命进行量化,为装备寿命设计、延寿提供可信的寿命信息。随着装备可靠性水平的不断提高,寿命不断延长,我国的各类型号导弹、鱼雷装备的贮存寿命要求也都超过了10年,因此寿命评估研究的难点又在于长寿命评估。

通常,产品的可靠性主要从可靠度和可靠寿命两个角度去衡量。可靠度(Reliability)是对产品在规定的条件下及规定的时间内维持规定功能的概率描述。设产品的最大功能持续时间为 T , T 是 $[0, \infty)$ 上取值的随机变量,则产品在时刻 t ($t \geq 0$)的可靠度 $R(t)$ 是指产品最大功能持续时间超过时刻 t 的概率,即

$$R(t) = P\{T > t\} \quad (1-1)$$

寿命(Life)是对产品在规定的条件下,满足规定可靠度要求的持续时间描述。设 r ($r \in [0, 1]$)为规定的可靠度,则相应的寿命 t_r 则为

$$t_r = R^{-1}(r) \quad (1-2)$$

式中 $R^{-1}(\cdot)$ ——式(1-1)的逆函数。

例如, $t_{0.95}$ 表示为可靠度下降至0.95时的寿命,其物理含义是产品在规定的条件下,时间持续到 $t_{0.95}$ 时产品仍能保持规定功能的概率为95%。

寿命评估(Life Evaluation)是通过合理的试验及试验数据分析量化产品寿命

指标的过程。准确评估寿命,有助于确保装备的安全服役,实现装备的战备完好性,提高装备可用性,最大效益发挥装备的资源效益。由式(1-1)和式(1-2)可以看出,寿命评估的核心内容是获取装备的可靠度函数 $R(t)$,然后根据式(1-2)并结合规定的可靠度计算出装备的可靠寿命。

寿命评估主要应用于装备全寿命周期设计定型阶段的定寿以及服役阶段的延寿,如图1-1所示。其中,定寿是指在设计定型阶段对装备进行寿命评估,以验证寿命;延寿是指在服役即将到期时对装备寿命进行再评估,若可靠性仍满足(或通过维修或更换等措施后仍满足)要求则可继续服役,否则进行报废处理。

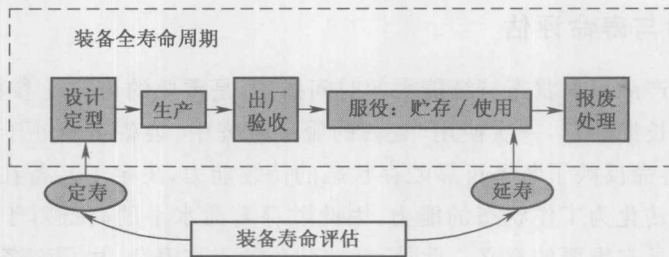


图 1-1 寿命评估在装备全寿命周期中的应用

1.1.2 寿命试验与加速寿命试验

按照试验中加载的不同应力类型,寿命评估主要通过两种基本试验方法获取寿命数据:寿命试验和加速寿命试验。

寿命试验(Life Testing)是指在装备使用现场或者通过实验室对使用现场进行模拟,对装备加载真实的环境应力和载荷,获取产品的失效或性能退化数据,并通过对这些数据进行统计分析来量化寿命指标的一种技术途径。寿命试验的理论和方法相对比较成熟,而且评估结果相对真实可信。但寿命试验在本质上是在寿命实际消耗基础上的寿命统计,因此试验周期长、费用代价高,对于装备使用和保障的指导意义不强。

美国罗姆航空发展中心(Rome Air Development Center)在1967年的一份报告中给出了加速寿命试验的定义^[1-6]:加速寿命试验(Accelerated Life Testing)是在进行合理工程及统计假设的基础上,利用与物理失效规律相关的统计模型对在超出正常应力水平的加速环境下获得的可靠性信息进行转换,得到试件在额定应力水平下可靠性特征的可复现的数值估计的一种试验方法。通俗地说,加速寿命试验是指在不改变产品失效机理的前提下对产品加载高于正常使用条件的应力等级,加快产品失效或性能退化过程,通过对加速应力下获得的数据进行统计分析,预测产品正常使用寿命指标的一种技术途径。

由于采用高应力量级加速产品的失效或退化过程,加速寿命试验可以在产品

的真实寿命消耗实现之前提前获得寿命过程数据,因此使得寿命指标的提前评判成为可能,也就是说,加速寿命试验使寿命评估具有了预测能力。同时,加速寿命试验在试验周期上大大缩短了寿命试验的时间消耗,提高了试验效率,降低了试验成本,因此使高可靠长寿命产品的寿命评估在工程上具有了实现的可能性。

表1-1对寿命试验和加速寿命试验进行了对照分析,具体说明如下:

表1-1 寿命试验与加速寿命试验

试验方法	寿命试验	加速寿命试验
适用范围	可以在装备使用现场进行,试验产品不受尺寸限制	需要在实验室进行,试验产品尺寸受到设备尺寸的限制
试验条件	使用中的真实环境和载荷条件	加速环境和载荷
评估结果	相对真实,可信度高	具有一定的评估风险
实施代价	耗时长,费用大	耗时短,费用少
预测能力	无预测能力	预测能力强

1. 适用范围

寿命试验可以通过结合现场使用收集现场数据进行,因此不受产品大小限制,装备的系统、分系统、整机、元器件材料等各个级别,以及各种尺寸的产品均适用;而加速寿命试验则往往需要通过实验室设备来加载加速条件,因此受到设备尺寸及设备能力的限制。

2. 试验条件

寿命试验采用现场条件或者通过实验室设备模拟现场条件,加载的应力追求真实性;而加速寿命试验加载的应力高于产品的正常使用条件,而且通常只针对主导应力进行加速。

3. 评估结果

由于试验条件真实,寿命试验获得的寿命评估结果也相对真实,可信度高;而加速寿命试验得到寿命评估结果需要经过建模与外推过程,因此评估结果存在一定的风险。

4. 实施代价

寿命试验往往需要经历较长的时间,有时甚至需要数年,试验费用巨大;而加速寿命试验通常只需要数月时间,耗时短,费用相对少。

5. 预测能力

由于寿命试验是在寿命消耗实现基础上的寿命统计,因此只能被动评估寿命,不具备预测能力;而加速寿命试验则可以通过加速过程提前获得产品失效或者退化,进而通过建模过程预测在正常条件下的产品寿命。

从装备使用和保障的实际需求来看,寿命评估必须带有一定的预测提前量,才能给使用和保障提供有价值的指导信息,保证装备寿命期的服役可靠性和安全性。

因此,加速寿命试验目前已成为可靠性工程领域备受关注的一项热点技术,特别是在重大装备的定寿、延寿、服役安全保障中受到高度重视。1994年,在美国航空航天局(NASA)的资助下,美国科学院和工程院下设的国家研究委员会(National Research Council)专门成立了“基于加速试验方法的材料和结构长期退化评估研究组”(Committee on Evaluation of Long-Term Aging of Materials and Structure Using Accelerated Test Methods),研究各种先进材料的退化问题,提出量化新一代航天器材料和结构寿命的加速试验和分析方法,其核心内容是利用加速寿命试验方法测试和预测材料在航天器各种可能运行环境中的特性退化。1999年,该研究委员会将此项研究进一步扩展到运输、通信、环境、能源等领域的各种设施,研究其材料在各种应用环境中的长期退化,在其研究计划“重大设施材料加速老化模拟的试验方法和模型”(Research Agenda for Test Methods and Models to Simulate the Accelerated Aging of Infrastructure Materials)中,将加速寿命试验方法作为量化材料在实际系统中长期退化特性的可能途径开展专项研究。

1.1.3 加速试验分类

1. 以试验中的失效模式划分

一般情况下,产品主要包括两类失效模式:突发型失效模式和退化型失效模式。根据产品在试验中失效模式的不同,加速试验可分为以下三种类型:

1) 加速寿命试验

加速寿命试验(Accelerate Life Testing, ALT)主要针对产品失效模式为突发型失效模式的情况,在试验中得到的数据是产品失效时间。

2) 加速退化试验

加速退化试验(Accelerate Degradation Testing, ADT)主要针对产品失效模式为退化型失效模式的情况,在试验中得到的是产品性能退化数据。加速退化试验是将退化失效引入加速寿命试验形成的试验方法。

3) 竞争失效场合加速试验

对于结构复杂的产品,可能存在多种失效模式,任意一种失效模式发生均可导致产品失效,这种情形称为竞争失效场合。对于此类产品进行的加速试验,称为竞争失效场合加速试验(Accelerate Testing with Competing Failure Modes),其试验数据既可能有失效时间也可能有性能退化数据。

2. 以试验加载的应力类型划分

如图1-2所示,按照加速试验中加载的不同的应力类型,加速试验又可分为恒定应力(Constant-Stress)加速试验、步进应力(Step-Stress)加速试验、序进应力(Progressive-Stress)加速试验,分别简称为恒加试验、步加试验和序加试验。

恒定应力加速试验的实施过程、数据分析等相对简单,寿命评估结果比较准

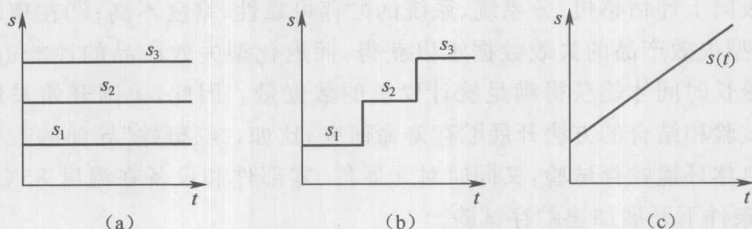


图 1-2 加速试验的应力类型

(a) 恒加试验; (b) 步加试验; (c) 序加试验。

确;步进应力加速试验可以使样品失效更快,所需样本量更少,但寿命评估结果准确性不如恒加试验;序加应力加速试验对设备要求很高,且数据分析十分复杂,在实际工程中应用较少。

严格地说,加速寿命试验与加速退化试验在基本方法层面可统称为加速试验,但是工程上习惯认为加速退化试验是加速寿命试验的发展分支,加速寿命试验包括加速退化试验,这也是本书书名得来的原由。

1.2 装备贮存寿命评估

贮存寿命是一类具有典型代表性的寿命问题,目前在世界各国均得到了高度重视。本节以贮存寿命为例,介绍在寿命及寿命评估问题研究中加速试验具有的重要研究价值。

装备贮存寿命问题的专门研究始于 20 世纪 60 年代,美国开始组织实施导弹装备贮存可靠性计划(the Storage Reliability of Missile Materiel Program, SRMMP)和贮存可靠性研究计划(the Storage Reliability Research Program, SRRP),收集导弹现场贮存数据并辅以加速试验、特殊测试等,获得了大量导弹元器件、材料及部分整机设备贮存可靠性数据,然后由下至上逐级评估出分系统直至导弹的贮存寿命。这 2 项研究计划历时十几年,分别在 1976 年和 1978 年结束,形成了 4 份导弹贮存可靠性研究报告:

- LC-76-1, Device storage reliability analysis report;
- LC-76-2, Storage reliability summary report;
- LC-78-1, Missile materiel reliability prediction handbook - part count prediction;
- LC-78-2, Missile storage reliability analysis summary report.

这 2 项计划的实施使美国对导弹贮存可靠性有了全面细致的掌握,但是 LC-78-2 报告同时也指出了所采用的贮存寿命评估方法的不足:①采用元器件、材料

的数据逐级向上评估整机、分系统、系统的贮存可靠性,精度不高;②在现场贮存环境下,突发型失效产品的失效数据难以获得,而退化型失效产品的性能退化缓慢,需要经历漫长时间才能获得满足统计要求的数据量。因此,美国开始采用现场贮存与加速试验相结合的方法开展贮存寿命研究,比如,“红斑蛇”导弹的贮存试验采用了全弹自然环境贮存试验,又同时对元器件、零部件和设备在温度 85℃、相对湿度 85% 的条件下开展加速贮存试验。

20 世纪 80 年代,美国罗姆航空发展中心相继发表了多份贮存可靠性研究报告:

- NONOP-1, Nonoperating reliability databook;
- RADC-TR-85-91, Impact of nonoperating periods on equipment reliability;
- AD-A107519, an Approach for assessing missile system dormant reliability.

其中,RADC-TR-85-91 建立了预测贮存周期对装备可靠性影响的定量分析方法,并给出了元器件、材料的贮存失效率评估模型及相应的基础数据,可用于评估多种贮存环境下元器件的贮存失效率。

20 世纪 90 年代以后,通过收集现场贮存数据进行寿命评估的寿命试验方法在美国开始受到新的挑战:①经费开支难以支持多项长达十几年、几十年的导弹现场贮存监测计划;②装备更新换代加快,若对新研产品采用现场贮存实施长期监测,在给出贮存寿命结论时该型产品在技术上可能已被淘汰。因此,加速试验开始成为获得产品贮存可靠性信息,在较短时间内实现贮存寿命评估的重要技术途径。

俄罗斯在装备贮存可靠性研究领域公开的信息较少。据报道,俄罗斯火炬设计局的自然环境实验室以 C-300 整弹为研究对象,通过 6 个月的加速试验评估 C-300 导弹贮存寿命为 10 年。从技术可行性分析,所采用的技术途径应该也是现场贮存的寿命试验结合实验室加速试验的方法。

图 1-3 对装备贮存寿命评估发展进行了归纳,从中可以总结以下的结论:

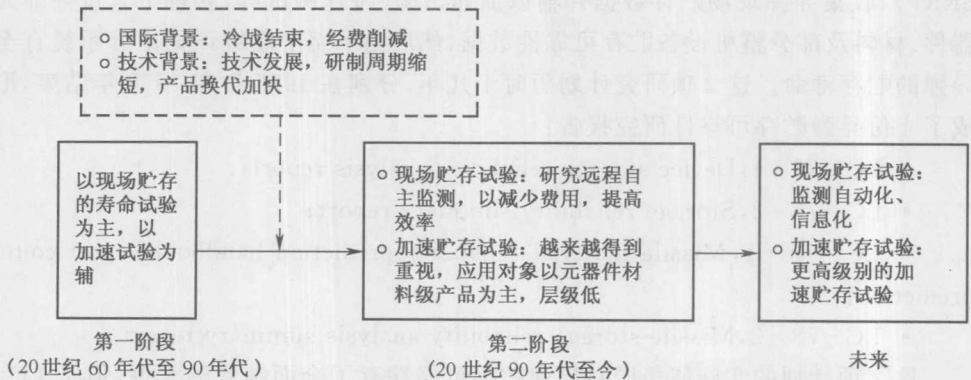


图 1-3 装备贮存寿命评估发展历程

(1) 采用现场贮存的寿命试验进行贮存寿命评估,存在耗时长、费用大、预测能力不强的问题;加速试验方法耗时短、费用少、预测能力强,为贮存寿命评估提供了有效、可行的技术途径。

(2) 加速贮存试验目前主要针对单失效模式的元器件材料级产品,需要通过向上综合给出装备贮存寿命,该过程存在较多近似,容易导致评估结果出现可信度危机;元器件材料级加速试验无法模拟元器件、材料之间联结关系所形成的失效模式,难以模拟其在系统集成中的贮存条件,因此加速贮存试验存在提升应用对象层级的问题。

总之,装备贮存寿命问题研究的发展脉络也体现了加速试验的研究发展脉络,说明加速试验结合贮存问题而诞生的加速贮存试验在今后一段时间将是贮存寿命问题研究的热点,其研究与应用具有重要的实际工程价值。

1.3 加速试验研究现状

1.3.1 加速试验统计建模分析

1. 加速寿命试验统计建模分析

加速寿命试验统计分析的研究始于20世纪60年代,首先发展起来的是恒定应力加速寿命试验^[7,8-20]。Nelson^[7]研究了恒定应力加速寿命试验的模型以及图分析、最小二乘、极大似然估计(Maximum Likelihood Estimation, MLE)等统计分析方法。Bugaighis对恒定应力加速寿命试验的MLE和BULE(Best Linear Unbiased Estimation, BULE)进行了精度对比,得出了前者估计性能更好的结论^[8],并讨论了各种截尾方式(定时、定数)对MLE的影响^[9]。Watkins^[11]深入研究了恒定应力加速寿命试验MLE的数值解法。张志华、茆诗松等^[17-20]提出了恒定应力加速寿命试验分析的简单线性无偏估计和非参数统计方法。

步进应力加速寿命试验^[7,21-36]具有高效率的优点,成为研究关注的重点。1980年,Nelson^[21]针对步进应力加速寿命试验不同应力下试验时间的折算问题,提出了著名的累积失效模型(Cumulative Exposure Model, CEM),从而使得步进应力加速寿命试验的统计分析取得重大突破。Teng和Yeo^[29]建立了步进应力加速寿命试验的最小二乘分析方法,费鹤良^[32]研究了指数分布步进应力加速寿命试验的区间估计。近年来,Nelson^[34]对步进应力加速寿命试验进行了残差分析,Wang^[35]对CEM等模型进行了验证。在步进应力试验方法的基础上,张春华^[3]提出了步降应力加速寿命试验方法,建立了相应的统计分析方法,并通过仿真和实验证实步降试验相对于步进试验具有更高的效率,从而可减少试验时间,降低试验成本。在此基础上,贾占强^[37]、徐广^[38]分别研究了双应力交叉步降和对数正态步降加速寿命试验分析方法。

与其他试验类型相比,变应力试验的工程实施以及统计分析过程比较复杂,因