

国防工业出版社
National Defense Industry Press

SHIYAN JISHU

HANGKONG CHANPIN

GAOKEKAOXING

试验技术

高可靠性航空产品



李金国 傅志高 刘永坚 马志宏 等编著

高可靠性航空产品 试验技术

李金国 傅志高 刘永坚 马志宏 等编著

国防工业出版社

北京·1084133·(010)88473264
北京·1084133·(010)88473264

图书在版编目(CIP)数据

高可靠性航空产品试验技术 / 李金国等编著. —北京:
国防工业出版社, 2011. 1

ISBN 978 - 7 - 118 - 07191 - 7

I. ①高... II. ①李... III. ①航天器 - 电子器件 -
可靠性试验 IV. ①V443

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 251212 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)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 10 $\frac{7}{8}$ 字数 320 千字

2011 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

序

武器装备可靠性是战斗力的直接构成要素,也是武器装备安全使用和安全发展的基本保证。军委胡主席指出:“要牢固树立安全发展的理念,处理好装备技术先进性同性能稳定性、可靠性、安全性的关系”。因此,深入研究和大力加强武器装备可靠性工作,既是提升武器装备质量和战斗力的技术需要,更是实现武器装备安全发展和科学发展的政治要求。

空军装备系统历来重视装备可靠性工作,在空军装备可靠性论证、可靠性设计、可靠性试验、可靠性验证等方面,组织开展了一系列技术攻关和理论研究,为空军装备建设发展提供了重要支撑。特别是“十一五”以来,为适应现代军事变革和装备信息化发展需要,在抓紧组织装备可靠性增长和可靠性改进的同时,积极开展了高可靠性航空产品试验技术、软硬件结合航空产品可靠性试验技术、航空发动机健康监控技术、第三代作战飞机“四性”评估技术等基础性、前沿性、通用性专项研究,取得了一批重要成果。

随着装备可靠性工作的发展,可靠性试验技术研究出现了许多新理念、新方法、新技术。通过一系列早期试验把产品缺陷消除在出厂前,以实现产品零故障的可靠

性试验理念得到了广泛认同;综合运用可靠性摸底试验、可靠性鉴定试验和可靠性验收试验,实现可靠性不断增长的方法日趋成熟;运用装备研制、生产、使用、维修等不同阶段的试验数据进行可靠性持续评价的机制正在逐步建立,为装备质量持续改进提供了依据。但在信息化条件下,如何寻求时间较短、耗费较少、结论可信的试验方法考核高可靠性产品的可靠性水平,国内外航空界尚在摸索之中。

本书以高可靠性航空产品的试验技术为研究对象,具有前瞻性和针对性。希望以此为新的起点,进一步加强空军装备可靠性试验工作,提升空军装备质量可靠性水平,为空军装备建设和战斗力成长作出新的贡献。

魏 钢

2010年11月

前 言

目前航空装备电子产品的可靠性越来越高,寿命越来越长,如果采用传统的可靠性试验技术会需要很多试验样本或者较长的试验时间,同时验证这些产品的可靠性指标也存在一定的困难。因此为了解决传统的可靠性试验既费钱又费时的问题,迫切需要研究出一种经济而有效的新的可靠性技术和方法,来适应缩短研制周期、减少试验费用、使产品获得高可靠性的需求。

为此,空军装备部科研订货部根据“十一五”可靠性工作要求,从2006年开始,组织指导空军装备研究院雷达与电子对抗研究所空军装备环境与可靠性试验中心,对航空装备高可靠电子产品的可靠性试验技术开展了深入研究。在此基础上,组织试验中心的有关专家编著了《高可靠性航空产品试验技术》。

本书共分9章,第1、2、3章由李金国主编,先后参与编写工作的有辛文波、赵书平、马杰、羊军等,第4、5章由傅志高主编,先后参与编写工作的有李冬炜、徐凤金、葛莉、蔡春阳等,第6、8章由刘永坚主编,先后参与编写工作的有纪敦、董欧、吕玉泽、李进等,第7、9章由马志宏主编,先后参与编写工作的有张雷、朱清亮、祝东明、张绪光、李静等,参与该书编写的还有赵美、勾小燕等,这里不

一一列举。第1章介绍可靠性试验发展,谈及了可靠性试验新方法、新技术、新思路。第2章介绍可靠性增长试验的基本概念、增长模型及相关试验步骤。第3章主要分析了可靠性增长摸底试验方案及实施过程,对其技术特点进行了综述。第4章主要以环境应力筛选 ESS 为基础,分析了高应力筛选 HASS 试验。第5章对各种加速试验模型进行了详细阐述,同时对寿命分布和加速试验数据处理进行了研究分析。第6章主要对高加速寿命 HALT 试验的原理进行了阐述,对 HALT 过程进行了设计。第7章对序贯试验方案和定时截尾试验方案进行了分析探讨,指出可靠性鉴定试验综合环境条件制定方法以及试验实施程序。第8章介绍了内外场综合可靠性评价方法,对装备内外场试验和评估总体计划(TEMP)进行了介绍。第9章对 MTBF 保证试验法进行了阐述,指出了 MTBF 保证试验法的具体实施方法。

本书适用于从事武器装备可靠性与质量控制管理方面的技术人员阅读,也可供从事装备环境与可靠性试验与研究的科研人员在进行试验设计与实施和科研工作开展中作为参考。

在本书的编写过程中,参考了部分报告和内部资料,由于受到参考文献著录格式要求的限制,不能一一列出,特此说明并向其作者致谢。

本书的编写是在空军装备部科研订货部和空军装备研究院雷达与电子对抗研究所各级领导、机关和有关同志的大力支持与帮助下完成的,在此特向他们一并表示感谢。诚恳感谢该书主审张文健部长、副主审宫继宏、汪

火光,承德宝副部长在百忙之中对本书的审核,并提出宝贵建议。感谢雷达与电子对抗研究所杨秉喜高工对本书初稿进行审阅并提出宝贵意见。感谢北京航空航天大学姜同敏教授、中航工业集团第301所王欣高工和罗学刚高级工程师、空军装备研究院航空所辛文远高级工程师、总体所杜振华高级工程师,感谢单位领导和同事们的鼓励和支持。

由于本书是多人编写,各人风格、思路不尽相同,虽经数次统稿,可能仍有不统一处。对书中的错误和不足之处,欢迎读者批评指正。

作者

2010年10月

目 录

第1章 导论	1
1.1 概述	1
1.1.1 可靠性试验发展概况	1
1.1.2 高可靠电子装备可靠性试验技术新进展	2
1.1.3 可靠性综合试验——高效费比可靠性试验	3
1.2 装备采办研制过程中可靠性试验地位和作用	4
1.2.1 三类试验与评价	4
1.2.2 试验与评价总体计划	5
1.2.3 结合国情制定可靠性综合试验要求和计划	7
1.3 可靠性试验任务、方法和技术	11
1.3.1 寿命周期各阶段试验任务、方法和相关标准	11
1.3.2 试验策略	12
1.3.3 可靠性试验新方法、新技术、新思路	15
参考文献	17
第2章 可靠性增长试验	18
2.1 定义	18
2.1.1 基本概念	18
2.1.2 可靠性增长途径	19
2.2 增长有效性	22
2.2.1 可靠性增长过程	22

2.2.2	主要信息来源	24
2.3	可靠性增长模型	24
2.3.1	杜安模型	25
2.3.2	AMSAA 模型	27
2.4	试验适用性	32
2.5	可靠性增长试验步骤	33
2.6	可靠性增长估计	35
	参考文献	37
第 3 章	可靠性增长摸底试验	38
3.1	概述	38
3.2	定义及适用范围	38
3.3	试验对象	39
3.4	试验方案及实施	40
3.4.1	统计试验方案	41
3.4.2	试验剖面	42
3.5	试验技术特点	43
3.5.1	试验意义	44
3.5.2	试验优缺点	45
3.5.3	推广及应用	46
3.6	试验案例	46
	参考文献	49
第 4 章	环境应力筛选	50
4.1	概述	50
4.1.1	环境应力筛选定义	50
4.1.2	常规 ESS 与定量 ESS	50
4.1.3	ESS 基本特性	51

4.1.4	ESS 与有关试验的联系	51
4.2	ESS 典型环境应力	54
4.2.1	温度循环	54
4.2.2	恒定高温	55
4.2.3	随机振动	55
4.2.4	扫频正弦振动	56
4.3	ESS 设计基本准则	56
4.3.1	筛选组装等级选择	57
4.3.2	筛选应力选择和安排	58
4.3.3	通、断电和性能检测	61
4.4	高加速应力筛选试验	61
4.4.1	概述	62
4.4.2	HASS 的目的和作用	63
4.4.3	HASS 基本原理	64
4.4.4	HASS 选择筛选量值	66
4.4.5	典型的 HASS 过程	67
4.4.6	HASS 试验的实施过程	69
4.5	应用案例	73
	参考文献	74
第 5 章	加速试验	75
5.1	概述	75
5.1.1	加速寿命试验	76
5.1.2	加速应力试验	77
5.1.3	加速退化试验	78
5.2	加速试验的应用对象	79
5.2.1	设备级加速试验	79
5.2.2	元器件级加速试验	79

5.3	加速试验模型	80
5.3.1	阿伦尼斯加速模型	80
5.3.2	逆幂律加速模型	84
5.3.3	艾林模型	85
5.3.4	温度—湿度模型	86
5.3.5	综合试验模型	87
5.4	加速试验寿命分布类型	93
5.4.1	指数分布	93
5.4.2	威布尔分布	94
5.4.3	对数正态分布	95
5.5	加速试验数据处理	96
5.5.1	指数分布	96
5.5.2	威布尔分布	109
5.5.3	正态分布和对数正态分布	136
5.6	加速试验数据分析和纠正措施	155
5.7	应用案例	156
	参考文献	158
第6章	高加速寿命试验	159
6.1	概述	159
6.2	试验目的和意义	160
6.3	浴盆曲线	161
6.4	HALT 技术原理	163
6.5	HALT 过程	164
6.5.1	试验夹具设计	165
6.5.2	试验剖面设计	165
6.5.3	产品试验	166
6.6	试验设备	167

6.6.1	设备组成	167
6.6.2	箱体结构	171
6.7	试验要求	172
6.7.1	人员要求	172
6.7.2	设备要求	173
6.7.3	试验样品	174
6.7.4	功能测试要求	175
6.7.5	试验报告和记录	176
6.8	试验实施	176
6.8.1	温度步进应力试验	177
6.8.2	快速温度变化应力试验	178
6.8.3	振动步进应力试验	179
6.8.4	综合环境应力试验	180
6.9	应用案例	181
6.9.1	试验设备与试验过程	181
6.9.2	实施过程	182
6.9.3	试验结果	182
	参考文献	183
第7章	可靠性鉴定试验	184
7.1	概述	184
7.2	术语和定义	186
7.2.1	规定两个 MTBF 检验值的原因	187
7.2.2	OC 曲线	192
7.3	定时试验方案	194
7.3.1	概述	194
7.3.2	权衡可靠性设计目标与 α 、 β 流程图	194
7.3.3	标准型定时试验方案导出流程图	195

7.3.4	备选定时试验方案制定方法	197
7.3.5	零失效定时试验方案设计	201
7.3.6	定时可靠性试验方案的选用	202
7.3.7	IEC 61124—2006 和 ГocT 27 - 402—1995 定时试验方案	205
7.3.8	定时试验 MTBF 的验证值	210
7.4	序贯试验方案	224
7.4.1	概述	224
7.4.2	试验方案设计原理	224
7.4.3	序贯试验判决标准图表	228
7.4.4	试验方案特性值	230
7.4.5	用图解法精确计算调整型序贯试验方案 决策风险	231
7.4.6	IEC 61124—2006 序贯试验方案	234
7.4.7	MTBF 验证值	235
7.5	SV、MAV 等参数在阶段性管理中的应用	247
7.6	综合环境条件制定方法	251
7.6.1	概述	251
7.6.2	可靠性试验综合环境条件制定方法	252
7.6.3	综合环境条件确定	254
7.7	可靠性鉴定试验实施程序	256
7.7.1	试验方案	256
7.7.2	试验大纲	257
7.7.3	试验程序	258
7.8	综合试验剖面案例分析	258
	参考文献	261
第 8 章	内外场可靠性综合试验	263
8.1	概述	263

8.2	内场试验分析与评价方法	263
8.2.1	常规内场试验方法	263
8.2.2	内场可靠性分析与评价方法	266
8.3	外场可靠性试验方法	268
8.3.1	可修系统数据处理方法	269
8.3.2	建立 R. M. S 数据库时应考虑的因素	280
8.4	内外场可靠性综合评价法	287
8.4.1	用贝叶斯方法综合内外场试验数据	287
8.4.2	用贝叶斯方法制定装备可靠性验证 试验方案	293
8.4.3	变母体变环境数据的可靠性综合评估法	298
8.4.4	基于信息融合技术的可靠性评估法	303
8.4.5	纳入装备内外场试验和评价总体计划	308
	参考文献	315
第9章	MTBF 保证试验	317
9.1	概述	317
9.2	ESS 环境应力筛选方法	317
9.2.1	估算 ESS 时间区间	317
9.2.2	ESS 图解法	318
9.2.3	标准的 ESS	319
9.3	MTBF 保证试验基本内容	320
9.3.1	通过概率计算	321
9.3.2	具体实施方法	322
9.3.3	具体实施步骤	324
9.4	MTBF 保证试验特点	325
9.4.1	试验要求	325
9.4.2	试验风险	326

9.4.3	试验程序	326
9.4.4	试验优缺点	327
9.5	MTBF 保证试验案例	327
9.5.1	制定试验方案	328
9.5.2	试验结果	328
9.5.3	数据处理	328
	参考文献	328

第 1 章 导 论

1.1 概 述

1.1.1 可靠性试验发展概况

产品可靠性试验从 1952 年 AGREE(美国“电子设备可靠性咨询组”)提出,至今已有 58 年。从 1960 年美军发布国防部手册《质量控制与可靠性手册》H108,正好 50 年,从 1963 年发布了 MIL-STD-781《可靠性试验》,至今也有 47 年,中间虽然经历了 MIL-STD-781B、C、D 和 MIL-HDBK-781A 数种版本,但所采用的可靠性方法都是假设产品寿命分布为指数分布,其试验目的都是以一定置信水平评价产品可靠性指标(平均故障间隔时间 MTBF)是否满足合同要求,因此也称为寿命评估试验。20 世纪 80 年代,随着电子产品,尤其是计算机的快速发展,出现了一系列高可靠电子产品。高可靠电子产品对可靠性试验方法提出了更高的新要求。在推动可靠性试验评估方法改进的过程中,美国于 1994 年初成立了国防试验与评价统计方法研究小组,经过四年努力,在 1998 年发表了研究报告《统计、试验与采办——新的途径与方法改进》,报告重点探讨了四个领域的统计方法:①可靠性、可用性、维修性(RAM)评估;②建模与仿真的使用;③软件测试方法;④试验设计技术与应用。提出了 RAM 评估是统计密集程度最高的观点,论述了“在系统研制与采办中如何增加利用统计方法的机会”,并建议采用威布尔分析等方法来替代相对比较保守的指数分布假设方法。在统计方法上另一个进展就是加快了贝叶斯方法的应用步伐。美国《可靠性、可用性和维修性指南——任务成功