

电子元器件 可靠性工程

孙 青 庄奕琪 王锡吉 刘 发 编著

<http://www.phei.com.cn>



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

83

7146
S97

电子元器件可靠性工程

孙 青 庄奕琪 编著
王锡吉 刘 发

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

电子元器件的可靠性是各类电子整机及装备可靠性的基础和核心,而在以往从事整机装备制造的工程技术人员对元器件的可靠性没有全面而透彻的了解,使得元器件的固有可靠性潜力没有得到充分的发挥,而且还可能在装配的过程中对元器件带来可靠性损伤。本书旨在为电子装备可靠性与电子元器件可靠性之间搭建一座沟通的桥梁。它全面介绍了在电子装备研制、设计和生产过程中,为保证所用电子元器件的可靠性,应该在技术、管理和标准等方面采取的各项保证措施及手段,包括元器件的选用与控制、失效分析、可靠性设计、可靠性保证、可靠性评价与试验和可靠性标准等内容。

本书主要供从事电子整机及装备研究、开发、设计和生产的工程技术人员及管理人员阅读,也可作为大专院校相关专业的教学参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电子元器件可靠性工程/孙青等编著. —北京:电子工业出版社,2002.10
ISBN 7-5053-7792-2

I. 电… II. 孙… III. 电子元件-可靠性工程 IV. TN6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 047337 号

责任编辑:陈晓莉 特约编辑:李双庆

印 刷:北京市增富印刷有限责任公司

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×980 1/16 印张:19.5 字数:465 千字

版 次:2002 年 10 月第 1 版 2002 年 10 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:28.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077

前 言

当今电子产品的质量与可靠性已经成为人们普遍关注的焦点,不仅在国防、航天、航空等尖端技术领域倍受青睐,在工业、民用家电等领域也同样为人们所重视。这足以说明注重电子产品的质量与可靠性已深入人心,其身份地位已经可以和电子产品的功能与成本相提并论。但是,怎样才能保证电子产品的质量与可靠性?尤其是在电子产品的体积与重量日益缩小,技术含量不断增加,智能化程度成倍提高的今天,产品的可靠性也在突飞猛进地提高。我们看到,从 20 世纪 90 年代以来,可靠性已不再是附属性学科,而已经成为一支强有力的以可靠性为主体的保证科学与工程体系。几十年来,可靠性工作者经历了战场与商场的严酷洗礼,正在不断转变观念,提高技术,加强服务,更加务实地从传统的事后把关、加强检验、主要靠筛选来保证产品质量转变到从头抓起、预防为主、用内建可靠性来保证产品质量的轨道上来,实施几年来已初见成效。这可能就是出现可靠性突飞猛进增长的关键原因所在。

十多年来,我国电子产品的质量与可靠性也有长足的进展。不管是国防军事电子装备、航天器、通信机,还是计算机和家电设备,在质量与可靠性方面都有了大幅度的提高。但是,也应该清醒地看到,我国电子产品的质量与可靠性水平与世界上发达工业国家相比,还存在着很大的差距。在很多方面,仍没有摆脱传统的观念和管理模式;在很多地方,可靠性工作仍处于较落后的状态。由于从事高、精、尖电子整机系统的科技工作者与从事先进电子元器件设计和制造的科学工作者还缺乏沟通,互不了解,从而造成电子产品质量与可靠性水平低下的实例颇多。正因为如此,可挖掘的潜力应该是很大的。为了使从事电子整机系统的工程技术人员能对当代电子元器件在设计、研制、生产过程中所做的质量与可靠性的保证工作有一个较全面的了解,笔者受原电子工业部科技与质量监督司的委托,编写了这本《电子元器件可靠性工程》。

本书从电子装备的设计、研制、生产、使用各阶段对电子元器件在质量与可靠性方面的要求出发,对电子元器件在设计、研制、生产和产品检验各个过程中所做的可靠性保证工作做了较详细的阐述。由于电子元器件门类繁多,不能一一论述,本书主要以半导体分立器件和集成电路为代表性品种,希望对读者能起到举一反三的作用。

本书的第 1,2,3 章由王锡吉执笔,第 4,7,8,10 章由孙青执笔,第 5 章由刘发执

笔,第9章由庄奕琪执笔,第6章选自原电子工业部可靠性办公室主编的“军用电子元器件可靠性设计指南”和“军用半导体集成电路可靠性设计实施导则”中的部分内容。其中,第5章中失效分析技术各节分别由施明哲、何小琦、来萍、谭超元、焦惠芳等同志供稿。第7章的部分内容参考了“中国军用电子元器件”第六篇有关章节的内容。最后全书由孙青、庄奕琪统一编校。

可靠性涵盖的学科非常广泛,而且技术本身也在不断发展革新的过程之中,加之编者水平有限,全书内容难免有不当或欠缺之处,谨请读者不吝赐教指正。

作 者
2002 年 5 月

目 录

第 1 章 概论	(1)
1.1 可靠性历史与发展	(1)
1.1.1 冷兵器时期	(1)
1.1.2 热兵器时期	(1)
1.1.3 高技术兵器时期	(4)
1.1.4 我国可靠性工作的历史和现状	(7)
1.2 当代质量观与可靠性	(9)
1.3 可靠性基本概念	(10)
1.3.1 机-环关系	(10)
1.3.2 人-机关系	(12)
1.4 可靠性工作主要内容	(13)
1.5 系统可靠性与元器件工程	(18)
第 2 章 系统研制与生产各阶段中元器件工程项目	(19)
2.1 论证阶段	(19)
2.2 方案阶段	(20)
2.3 工程研制阶段	(23)
2.4 设计定型阶段	(24)
2.5 生产定型阶段	(24)
第 3 章 电子元器件选用与控制	(26)
3.1 概述	(26)
3.2 电子元器件选择和应用	(27)
3.2.1 电子元器件选用准则	(27)
3.2.2 半导体集成电路的选择和应用	(28)
3.2.3 半导体分立器件的选择和应用	(30)
3.2.4 电阻器选择和应用	(35)
3.2.5 电容器选择和应用	(37)
3.3 电子元器件控制	(42)
3.3.1 元器件选择	(42)
3.3.2 元器件采购	(43)
3.3.3 元器件监制	(43)

3.3.4	元器件验收	(43)
3.3.5	元器件筛选	(44)
3.3.6	元器件储存与保管	(45)
3.3.7	元器件超期复验	(45)
3.3.8	元器件使用	(45)
3.3.9	元器件失效分析	(45)
3.3.10	元器件信息管理	(45)
3.4	电子元器件管理	(46)
3.4.1	电子元器件管理基本方法	(46)
3.4.2	优选电子元器件生产厂家及动态管理	(47)
第4章	电子元器件可靠性数学表征	(48)
4.1	可靠性的定义	(48)
4.2	可靠度	(48)
4.3	累积失效概率	(49)
4.4	失效分布密度	(49)
4.5	失效率	(50)
4.6	寿命	(51)
4.6.1	平均寿命	(51)
4.6.2	可靠寿命	(51)
4.6.3	中位寿命	(52)
4.6.4	特征寿命	(52)
4.7	通用的失效分布函数	(52)
4.7.1	指数分布	(53)
4.7.2	正态分布	(53)
4.7.3	威布尔分布	(54)
第5章	电子元器件失效分析技术	(56)
5.1	光学显微镜分析技术	(56)
5.1.1	明、暗场观察	(57)
5.1.2	微分干涉相衬观察	(57)
5.1.3	偏振光干涉法观察	(58)
5.2	红外显微镜分析技术	(58)
5.3	红外热像仪分析技术	(60)
5.3.1	基本测量结构	(61)
5.3.2	主要技术指标	(62)
5.3.3	显微红外热像仪的应用	(62)
5.4	声学显微镜分析技术	(63)
5.4.1	SLAM 的应用	(64)

5.4.2 C-SAM 的应用	(65)
5.5 液晶热点检测技术	(66)
5.5.1 液晶热点检测设备	(66)
5.5.2 液晶的选择	(66)
5.5.3 液晶热点检测的技术要点	(67)
5.5.4 液晶热点检测技术应用	(67)
5.6 光辐射显微分析技术	(68)
5.6.1 光辐射显微镜	(68)
5.6.2 光辐射显微分析技术在失效分析方面的应用	(69)
5.7 扫描电子显微镜和 X 射线谱仪分析技术	(71)
5.7.1 扫描电镜及其在半导体器件失效分析中的应用	(72)
5.7.2 X 射线谱仪及其在半导体器件失效分析中的应用	(76)
5.8 电子束测试系统	(78)
5.8.1 电子束测试技术在器件失效分析中的应用	(79)
5.8.2 电子束测试系统中自动导航技术	(80)
5.8.3 电子束探针的最佳探测原则	(81)
5.9 俄歇电子能谱分析技术	(81)
5.10 离子微探针分析技术	(84)
5.10.1 原理与性能特点	(84)
5.10.2 离子微探针在半导体器件失效分析中的应用	(85)
5.11 其他分析技术	(86)
5.11.1 X 射线光电子能谱(XPS)技术	(87)
5.11.2 紫外光电子能谱(UPS)技术	(87)
5.11.3 卢瑟福背散射及其离子束联合分析技术	(87)
5.11.4 IDDQ 测试技术	(89)
第 6 章 电子元器件的可靠性设计	(92)
6.1 半导体分立器件的可靠性设计	(92)
6.1.1 概述	(92)
6.1.2 抗恶劣环境的可靠性设计	(93)
6.1.3 热学设计	(95)
6.1.4 完美晶体工艺设计	(95)
6.1.5 特殊使用条件可靠性设计	(95)
6.1.6 长寿命设计	(95)
6.1.7 器件稳定性设计	(96)
6.1.8 冗余设计	(96)
6.2 半导体集成电路的可靠性设计	(96)
6.2.1 概述	(97)

6.2.2	集成电路的可靠性设计指标	(98)
6.2.3	集成电路可靠性设计的基本内容	(99)
6.2.4	可靠性设计技术	(101)
6.2.5	耐电应力设计技术	(101)
6.2.6	耐环境应力设计技术	(107)
6.2.7	稳定性设计技术	(117)
6.3	电阻器与电位器的可靠性设计	(118)
6.3.1	概述	(118)
6.3.2	可靠性设计的基本程序	(119)
6.3.3	可靠性设计的基本内容	(121)
6.3.4	可靠性设计技术	(123)
6.4	电容器的可靠性设计	(125)
6.4.1	电容器可靠性设计的一般要求	(125)
6.4.2	可靠性设计程序	(125)
6.4.3	电容器的可靠性设计	(126)
6.4.4	电容器可靠性设计评审	(127)
6.5	军用连接器的可靠性设计	(128)
6.5.1	可靠性设计的基本原则	(128)
6.5.2	可靠性设计的依据与指标	(128)
6.5.3	可靠性设计的基本程序	(129)
6.5.4	可靠性设计的基本内容	(132)
6.5.5	可靠性设计技术	(132)
6.6	微特电机的可靠性设计	(135)
6.6.1	概述	(135)
6.6.2	可靠性设计的基本程序	(136)
6.6.3	可靠性设计的基本内容	(137)
6.6.4	可靠性设计技术	(139)
6.7	化学物理电源的可靠性设计	(140)
6.7.1	概述	(140)
6.7.2	可靠性设计的基本程序	(142)
6.7.3	可靠性设计技术	(142)
第7章	电子元器件可靠性保证	(148)
7.1	概述	(148)
7.1.1	质量与可靠性	(148)
7.1.2	质量与可靠性保证的特点	(149)
7.1.3	质量与可靠性保证体系	(150)
7.2	可靠性控制技术	(154)
7.2.1	可靠性控制在可靠性保证中的重要作用	(154)

7.2.2	设计阶段的控制技术要点	(155)
7.2.3	制造阶段的控制技术	(156)
7.3	可靠性管理概要	(163)
7.3.1	可靠性管理的保证职能	(163)
7.3.2	可靠性组织管理	(164)
7.3.3	可靠性技术管理	(165)
7.3.4	可靠性教育管理	(167)
7.3.5	质量与可靠性认证	(168)
7.3.6	GB/T19000 - ISO9000 系列标准	(171)
第 8 章	电子元器件可靠性评价与试验	(173)
8.1	概述	(173)
8.1.1	可靠性评价	(173)
8.1.2	可靠性评价技术的进展	(173)
8.2	可靠性试验	(176)
8.2.1	可靠性试验的目的与内容	(176)
8.2.2	可靠性试验的分类	(177)
8.2.3	失效判据	(178)
8.2.4	可靠性试验的抽样检查	(180)
8.2.5	用于可靠性试验的技术标准	(182)
8.3	可靠性筛选	(183)
8.3.1	筛选的目的	(183)
8.3.2	失效模式与筛选方法的关系	(185)
8.3.3	筛选方法简介	(187)
8.4	寿命试验	(189)
8.5	加速寿命试验	(190)
8.5.1	加速寿命试验的理论依据	(191)
8.5.2	加速寿命试验的种类	(194)
8.5.3	加速寿命试验的数据处理	(195)
8.6	快速评价技术	(196)
8.6.1	可靠性快速评价的发展	(196)
8.6.2	低频噪声快速评价方法	(197)
8.6.3	栅介质击穿快速评价方法	(206)
8.6.4	晶片级可靠性(WLR)评价方法	(207)
8.7	计算机辅助可靠性评价技术	(215)
8.7.1	电迁移失效模拟	(217)
8.7.2	热载流子退化模拟	(219)
8.7.3	氧化层击穿失效模拟	(221)

第9章 电子元器件的应用可靠性	(222)
9.1 电子元器件的防浪涌应用	(222)
9.1.1 集成电路开关工作产生的浪涌电流	(222)
9.1.2 接通电容性负载时产生的浪涌电流	(224)
9.1.3 断开电感性负载时产生的浪涌电压	(225)
9.1.4 驱动白炽灯时产生的浪涌电流	(228)
9.1.5 供电电源引起的浪涌干扰	(229)
9.1.6 接地不当导致器件损坏	(231)
9.1.7 TTL电路防浪涌干扰应用	(233)
9.2 电子元器件的防静电应用	(235)
9.2.1 器件使用环境的防静电措施	(235)
9.2.2 器件使用者的防静电措施	(238)
9.2.3 器件包装、运送和储存过程中的防静电措施	(240)
9.2.4 器件使用时的防静电管理	(241)
9.3 电子元器件的防噪声应用	(242)
9.3.1 接地不良引入的噪声	(242)
9.3.2 静电耦合和电磁耦合产生的噪声	(244)
9.3.3 串扰引入的噪声	(245)
9.3.4 反射引起的噪声	(247)
9.4 电子元器件的抗辐射应用	(248)
9.4.1 抗辐射加固电子系统的器件选择	(248)
9.4.2 系统设计中的抗辐射措施	(250)
9.5 防护元件	(252)
9.5.1 瞬变电压抑制二极管	(253)
9.5.2 压敏电阻	(255)
9.5.3 铁氧体磁珠	(257)
9.5.4 PTC 和 NTC 热敏电阻	(259)
9.5.5 电花隙防护器	(262)
9.6 电子元器件电路布局的可靠性设计	(263)
9.6.1 电子线路的可靠性设计原则	(263)
9.6.2 常用集成电路的应用设计规则	(266)
9.6.3 印制电路板布线设计	(269)
9.7 电子元器件的可靠性安装	(274)
9.7.1 引线成形与切断	(274)
9.7.2 在印制电路板上安装器件	(275)
9.7.3 焊接	(277)
9.7.4 器件在整机系统中的布局	(278)
9.8 电子元器件的运输、储存和测量	(279)

9.8.1 运输	(279)
9.8.2 储存	(279)
9.8.3 测量	(280)
第 10 章 电子元器件质量与可靠性依据的标准	(282)
10.1 标准对电子元器件质量与可靠性的保证作用	(282)
10.1.1 标准化的作用	(282)
10.1.2 军用电子元器件的标准化工作	(283)
10.2 电子元器件的质量与可靠性军用标准体系	(283)
10.2.1 质量与可靠性军用标准体系	(283)
10.2.2 质量与可靠性标准体系构成	(284)
10.2.3 国外质量与可靠性标准简介	(286)
10.3 质量与可靠性标准与规范	(289)
10.3.1 标准与规范	(289)
10.3.2 质量与可靠性保证要求	(289)
10.3.3 标准的配套支持	(292)
10.3.4 总规范与详细规范	(292)
10.4 电子元器件的质量等级及其标准化	(293)
10.4.1 失效率等级	(293)
10.4.2 质量与可靠性保证等级	(293)
10.5 质量认证	(294)
10.5.1 电子产品的质量认证	(294)
10.5.2 军用电子元器件的质量认证	(295)
参考文献	(297)

第 1 章 概 论

1.1 可靠性历史与发展

质量与可靠性伴随着兵器的发展而诞生和发展。兵器的发展大体可分为三个时期,即:冷兵器时期、热兵器时期和高技术兵器时期。

1.1.1 冷兵器时期

冷兵器时期以公元前 26 世纪使用石兵器开始,经历了石兵器时期、铜兵器时期、铁兵器时期,到 1703 年法英两国完全取消了长矛为止,前后经历了 4000 年发展的漫长过程。据考证,在石兵器时期,人类对生产不仅有了朴素的质量意识,而且对当时所制作的石兵器进行了简单检验。殷商时代是中国最早有文字的记载的可考证的一个朝代。在已出土甲骨文卜辞中,就有对生产状况和产品质量进行监督、检验的记载。在青铜器时代及其稍晚些时期,成书于公元前 239 年的《吕氏春秋》中记载,不仅进行质量检验,而且实行质量责任制,称为“物勒工名”。历代一直延续,并以法律形式加以规定。成书于公元前 403 年的《周礼·考工记》记载了技术规程,“或审曲面势,以飭五材,以辨民器”。石兵器时期主要有了朴素的质量意识,在质量管理上以产品检验为主。

1.1.2 热兵器时期

从公元 10 世纪发明火药,热兵器诞生并开始发展,逐步取代冷兵器,到 18 世纪初取得了完全的统治地位,一直延续到今天,仍在继续发展。

热兵器的发展可以分为四个时期:以燃烧、爆炸器为主的时期,这是热兵器的胚胎期;以炮为代表的时期,从 18 世纪到第一次世界大战,是热兵器的成长期;以坦克、飞机、军舰为代表的时期,从 20 世纪初到 20 世纪中第二次世界大战,是热兵器的发展期;以原子弹和导弹为代表的时期,从第二次世界大战末期到 20 世纪后期,是热兵器的成熟期。

在我国,北宋军事家曾公亮主编的《武经总要》(1044 年)总结了前人在兵器制造方面的经验,对各类兵器生产提出了严格质量和生产标准(特别是火药制造)。宋代科学院沈括的《梦溪笔谈》及明末宋应星的《天工开物》则是继《考工记》之后,介

绍生产技术规范 and 标准最多的著作。在这个时期开始了质量的抽样检查。在明代,何士晋等人编写了《工部厂库须知》,其中规定了逐级取样的抽样方法。鸦片战争以后,清朝的洋务派办了一系列兵工厂,开始了我国的热兵器发展期。这一时期的生产技术和质量管理方法都来自国外,但无检验机构和专职检验人员。第一次世界大战后,帝国主义侵略中国,中国军阀割据,内战连年,不仅需要武器多,而且需要质量好。于是,借鉴资本主义国家的管理思想和经验,有了质量检验机构和专职检验人员,进入了质量管理的初级阶段,即质量检验阶段。

在国际上,从第二次世界大战开始,纳粹德国使用火箭和美国使用原子弹,开始了热兵器的成熟期。由于纳粹德国发射的 V-1、V-2 火箭的不可靠及美国运往远东的航空无线电设备有 60% 不能工作,引起了对可靠性问题的认识。1944 年纳粹德国用 V-2 火箭袭击伦敦,有 80 枚火箭没有起飞就在起飞台上爆炸,还有不少火箭没有到达伦敦就掉进英吉利海峡。当时美国海军统计,电子设备在规定的工作期内仅有 30% 的时间能有效地工作。在此期间,因可靠性问题损失飞机 2100 架,这是被击落飞机的 1.5 倍。通过大量现场调查和故障分析,采取了对策,诞生了可靠性这门学科,

当时德国在 V-1 火箭研制后期,提出并运用了串联系统理论,得出火箭系统可靠度等于所有元器件、零部件数目乘积的结论。根据可靠性乘积定律,计算出该火箭的可靠度达 0.75。因此,V-1 火箭成为第一个运用系统可靠性理论的飞行器。美国对运往远东的航空无线电设备的可靠性问题进行了调查统计分析,找出主要原因是电子管的可靠性太差。于是,在 1943 年成立了电子管研究委员会,专门研究电子管的可靠性问题。20 世纪 40 年代被认为是可靠性萌芽时期。

20 世纪 50 年代是可靠性兴起和形成的年代。为解决军用电子设备和复杂导弹系统的可靠性问题,美国军方及工业界有组织地开展了可靠性研究。在这期间,具有影响的是 1952 年美国国防部成立了一个由军方、工业部门和学术界组成的电子设备可靠性咨询组(AGREE)。1955 年 AGREE 开始实施一个从设计、试验、生产到交付、储存、使用的全面的可靠性发展计划,并于 1957 年发表了题为《军用电子设备可靠性》的研究报告。该报告从 9 个方面阐述了可靠性设计、试验及管理的程序及方法,确定了美国可靠性工程发展的方向,成为可靠性发展的奠基性文件,标志着可靠性已成为一门独立的学科,是可靠性工程发展的重要里程碑。

20 世纪 60 年代是可靠性工程全面发展的阶段,也是美国武器系统研制全面贯彻可靠性大纲的年代。在这 10 年中,美国先后开发出 F-111A、F-15A 战斗机、MI 坦克、“民兵”导弹、“水星”和“阿波罗”宇宙飞船等装备。这些新一代装备对可靠性提出了更加严格的要求,因此 1957 年 AGREE 报告提出的一整套可靠性设计、试验及管理方法被国防部及国家航空航天局(NASA)接受,在新研制的装备中

得到广泛应用并迅速发展,形成了一套较完善的可靠性设计、试验和管理标准,如 MIL-HDBK-217、MIL-STD-781 和 MIL-STD-785 等。在这些新一代装备的研制中,都不同程度地制订了较完善的可靠性大纲,规定了定量的可靠性要求,进行可靠性分配及预计,开展故障模式及影响分析(FMEA)和故障树分析(FTA),采用冗余度设计,开展可靠性鉴定试验,验收试验和老练试验,进行可靠性评审等,使这些装备的可靠性有了大幅度提高。例如,50年代的“先驱者号”卫星发射11次只有3次成功,而60年代发展的阿波罗登月船,除阿波罗13以外,每次发射都成功着陆在月球上并安全返回。在这10年中,美、法、日及前苏联等工业发达国家也相继开展了可靠性研究。

20世纪70年代是可靠性工程步入成熟的阶段。在这10年中,尽管美国及整个资本主义世界遇到经济困难,军费紧缩,但是可靠性作为降低武器系统寿命周期费用的一种有效工具得到进一步发展。这一阶段的主要特点是建立集中统一的可靠性管理机构,负责组织、协调国防部范围的可靠性政策、标准、手册和重大研究课题;成立全国性的数据交换网,加强政府机构与工业部门之间的技术信息交流;制定了一套较完善的可靠性设计、试验及管理的方法及程序。为解决复杂武器系统投入外场使用后出现的战备完好性低和使用保障费用高的问题,从型号项目论证开始就强调可靠性设计,通过加强元器件控制,采用更严格的降额及热设计,强调环境应力筛选、可靠性增长试验和综合环境应力的可靠性试验,推行可靠性奖罚合同等一系列措施来提高武器装备的可靠性。美国空军的F-16A和海军的F/A-8A战斗机、陆军的M1主战坦克和英国皇家空军的“隼”式教练攻击机的研制体现了70年代的特点。

20世纪80年代以来,可靠性工程向着更深、更广的方向发展。在发展策略上,把可靠性和维修性作为提高武器装备战斗力的重要工具,使可靠性置于与武器装备性能、费用和进度同等重要的地位;在管理上,加强集中统一管理,强调可靠性及维修性管理应当制度化,为此美国国防部于1980年首次颁发可靠性及维修性指令B.005000.40《可靠性及维修性》;在技术上,深入开展软件可靠性、机械可靠性以及光电器件可靠性和微电子器件可靠性等的研究,全面推广计算机辅助设计(CAD)技术在可靠性领域的应用,积极采用模块化、综合化、容错设计,采用光导纤维和超高速集成电路等新技术来全面提高现代武器系统的可靠性。1985年,美国空军推行了“可靠性及维修性2000年行动计划”(R&M2000)。该计划从管理入手,依靠政策和命令来促进空军领导机关对可靠性工作的重视,加速观念转变,使可靠性工作在空军部门形成制度化,以最终实现提高武器装备作战能力,改善生存性、减少空军部队部署的运输量,降低维修保障人力要求和使用保障费用等5项目标。经过近6年的努力,在1991年海湾战争中,美国空军的行动计划见到了成效,

F-16C/D 及 F-15E 战斗机的战备完好性都超过了 95%。

综观近半个世纪以来可靠性的发展,大致经历了如下重大的变化和发展:

(1) 从重视武器装备性能、轻视可靠性,转变为树立可靠性与性能、费用及进度同等重要的观念,实现了观念转变。

(2) 从分散管理、部门负责到集中统一领导,成立由副司令、副总裁直接领导的可靠性机构,完善了管理体系。

(3) 从电子管失效机理研究到开发超高速集成电路,使电子元器件可靠性每年平均约以 20% 的速度提高。

(4) 从电子设备的可靠性研究到重视机械设备、光电设备及其他非电子设备的可靠性研究,全面提高武器装备的可靠性。

(5) 从硬件可靠性研究到软件可靠性研究,确保大型先进复杂系统的可靠性。

(6) 从宏观统计估算到微观分析计算,更准确地确定产品的故障模式、可靠性及寿命。

(7) 从手工定性的可靠性分析设计到计算机辅助可靠性分析设计,大大提高分析设计精度,缩短分析设计时间。

(8) 从重视可靠性统计试验到强调可靠性工程试验,通过环境应力筛选可靠性增长试验来暴露产品故障,进而提高产品的可靠性。

(9) 从单个可靠性参数指标发展到多个参数和指标,建立完善的可靠性参数和指标体系。

(10) 从以固有值作为武器系统的可靠性指标到强调以使用值作为指标,确保投入外场使用的武器装备具有规定的可靠性水平。

1.1.3 高技术兵器时期

1991 年初,历时仅 42 天的海湾战争是第二次世界大战以来军事技术现代化水平最高的战争,使用了品种精确的制导武器、巡航导弹和隐形飞机,并使用了空间侦察系统、先进的 C³I 系统(指挥、控制、通信、情报)和电子设备,从而揭开了高技术兵器时代的序幕。高技术兵器包括高度电子化武器、精确制导武器、人工智能武器、聚能武器、隐形武器、空基兵器等,其中智能化是主要发展方向。高技术兵器特点是:

1. 综合化

随着现代立体战争的出现,要求陆、海、空三军统一指挥协同作战。美国的“空地一体战”理论和原苏联的“大纵深立体战理论”,在海湾战争得到了初步实践。随着立体战争的出现,要求陆、海、空三军统一指挥、协同作战,因而指挥控制与通信

也要实现综合化。这些综合不是分立单元的组合、叠加,而是统一的功能综合设计,提高系统的信息综合利用和资源共享能力。未来的战争将是敌我方两大体系整体综合能力的对抗。

2. 系统化

海湾战争表明,现代战争是系统对系统、体系对体系的战争,任何单个武器装备,即使其性能再先进,如果不能构成有机作战体系,就不能发挥武器系统的整体作战效能。能够构成系统地把陆、海、空军各种武器装备组成一个有机的作战整体,这就是 C³I 系统。还有像通信导航敌我识别综合系统等都是系统化的典型代表。

3. 智能化

计算技术发展的总趋势是武器装备的智能化和指挥系统的智能化,其中包括智能化制导武器、智能化无人载体、智能化机器人、智能化 C³I、智能化后勤支援系统等。美国国防部为 2000 年战斗机制定了“宝石柱”先进综合航空电子系统计划,该计划目标之一是通过采用人工智能先进技术,来提高航空电子系统的可靠性和维修性,减少维修人员。该系统与 F-16 系统相比,72 架飞机所需维修人员从 142 人降为 71 人。智能化水平提高,操控人员可以减少,由于人的差错引起的故障随之减少(如无人职守的雷达和通信设备),相反则要求系统或设备的可靠性更高。

由于高技术兵器的诞生,综合化、系统化、智能化的发展,电子产品将起着主导作用,可以说未来的战争是以军事电子为主导的高技术战争。争夺电子优势是决定战争胜败的重要因素。谁掌握“制电子权”,谁就获得战争的主动权,就像第二次世界大战中争夺制空权一样,因而电子产品在武器系统里所占比例越来越大。据资料报导,美国现在无论在科研费和采购费用的电子含量已达到 48%,21 世纪初将达到 50% 以上。空间武器的装备则更加依赖电子,80 年代初电子所占比例达 65%,80 年代末达到 70%。智能武器所占比例大于 70%。由此,为了提高设备系统的可靠性,减轻重量和减少体积,电子元器件的小型化、大规模集成和高密度封装应运而生,引发以微电子技术为核心的新技术革命。微电子器件正使电子设备发生重大变革,电子产品的可靠性迅速提高,微电子器件的失效率已达每小时 10^{-10} ,换算成寿命可达 112 万年,比人的脑神经细胞失效率低一万倍,正在接近“半永久性”的理想境界。

伴随着高技术兵器时期的到来,将带来新技术革命。对于从事兵器可靠性的工作者来说,出现了新的挑战,也是一个机遇。热兵器时期的一些可靠性技术将要变革,并适应高技术兵器需要而提出一些新的可靠性技术。笔者认为首先要解决下列问题: