



GH

高 等 学 校
工 科 电 子 类

规 划 教 材

计算机可靠性 理论与实践

顾子天

JISUANJI
KEKAOXING

LILUN

YUSHIJIAN

UEST

PUBLISHINGHOUSE

电子科技大学出版社

计算机可靠性理论与实践

顾子天

电子科技大学出版社

• 1994 •

[川] 新登字 016 号

内 容 提 要

本书介绍计算机和电子设备设计、制造和维护过程中涉及的可靠性理论和工程实践问题。

全书共分八章，前三章介绍可靠性的基本理论、可靠性的数量特征描述和失效物理分析；后五章是从元器件工程、热设计、连接设计、电磁兼容设计和供电等方面介绍可靠性工程。全书突出工程实践，引进较多的工程实例，介绍分析问题的方法，帮助读者在实施计算机和其他电子工程时建立起可靠性工程观念。

本书可作为计算机、通信、自动控制、电子仪器类专业的本科生和研究生的选修课教材，对相关专业的工程技术人员也有参考价值。

计算机可靠性理论与实践

顾子天

*

电子科技大学出版社出版

(中国成都建设北路二段四号) 邮编 610054

成都双流新桥印刷厂印刷

四川省新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 18.75 字数 456 千字

版次 1994 年 7 月第一版 印次 1994 年 7 月第一次印刷

印数 1—1500 册

中国标准书号 ISBN 7-81016-617-4/TP·94

定价：14.60 元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定，我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978~1990年，已编审、出版了三个轮次教材，及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神，“以全面提高教材质量水平为中心，保证重点教材，保持教材相对稳定，适当扩大教材品种，逐步完善教材配套”，作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想，组织我部所属的九个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会，在总结前三轮教材工作的基础上，根据教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1991~1995年的“八五”（第四轮）教材编审出版规划。列入规划的，以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300多种。这批教材的评选推荐和编审工作，由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿，其一是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的；其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的；其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会（小组）、教学指导委员会和有关出版社，为保证教材的出版和提高教材的质量，做出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评和建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部电子类
专业教材办公室

前 言

本教材按机械电子工业部的工科电子类专业教材 1991~1995 年编审出版规划,由计算机教材编审委员会征稿并推荐出版。责任编辑委为胡正家。

本教材由西安交通大学顾子天担任主编,国防科技大学金士尧担任主审。

本课程的参考学时数为 60 学时,主要介绍可靠性工程的发展过程、主要内容、可靠性的基本概念,并从数学的高度定义可靠性的数量特征;引进失效分析的概念,沟通宏观失效和微观失效本质的联系;阐述实施元器件工程的重要性,介绍提高元器件使用可靠性的方法;阐述温度对电子设备可靠性的影响,从工程角度介绍各种计算机的热设计技术;从可靠性角度介绍电子设备的组装和互连技术,分析各种组装互连技术对计算机可靠性的影响;计算机供电系统是计算机得以正常工作的能源核心,同时又是各种外部干扰的主要耦合通道,因此加强计算机供电系统的研究,对提高计算机的可靠性有事半功倍的作用。如何使计算机能在恶化了的电磁环境中稳定可靠地工作,而又不影响其他电子设备的正常工作是本教材重点讨论的内容之一。本课程希望将科学理论、工程技术和生产工艺能紧密地结合起来,在使用本教材时注意利用本校、本地区计算机研究、生产和使用的实际环境,尽可能提供一些参观、演示、系统分析等教学环节,在有可能的条件下应开设一些实验课。

胡正家教授、金士尧教授为本书提出许多宝贵意见,在此表示诚挚的感谢。由于编者水平有限,书中难免存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编著者

1993. 9

目 录

第一章 概论	(1)
1.1 可靠性工程是现代工程师的必修课	(1)
1.2 可靠性工程的发展历史	(3)
1.2.1 可靠性工程的萌芽阶段 (40 年代)	(3)
1.2.2 可靠性工程的创建阶段 (50 年代)	(4)
1.2.3 可靠性工程的全面发展阶段 (60 年代)	(4)
1.2.4 可靠性工程的深入发展阶段 (70 年代以后)	(7)
1.3 可靠性工程的主要内容及其特点	(10)
1.3.1 可靠性工程的主要内容	(10)
1.3.2 可靠性工程的特点	(12)
1.3.3 我国可靠性工程研究的发展	(13)
第二章 可靠性工程的基本特征及其数学描述	(15)
2.1 可靠性的基本概念和定义	(15)
2.2 故障和故障的属性	(16)
2.2.1 故障和故障模型	(16)
2.2.2 研究故障的基本方法	(17)
2.2.3 计算机系统故障特征	(19)
2.3 可靠性的数量特征	(21)
2.3.1 规定产品可靠性数量特征的意义及其主要特点	(21)
2.3.2 可靠性的主要数量特征	(22)
第三章 失效物理分析	(37)
3.1 失效物理分析的概念和基本内容	(37)
3.1.1 可靠性与失效物理	(37)
3.1.2 失效物理研究的基本内容	(38)
3.1.3 失效物理与宏观可靠性指标	(39)
3.2 失效分析	(42)
3.2.1 失效分析的概念	(42)
3.2.2 失效分析在可靠性工程中的地位	(43)
3.2.3 失效分析的思路和方法	(45)
3.3 电子元器件的失效机理	(47)
3.3.1 半导体元器件的失效机理	(47)
3.3.2 阻容元件的失效机理	(55)

第四章 元器件工程	(60)
4.1 整机系统实施元器件工程的重要性	(60)
4.1.1 整机系统中元器件工程的主要内容	(61)
4.1.2 元器件质量与可靠性保证	(62)
4.2 元器件可靠性筛选	(67)
4.2.1 可靠性筛选	(67)
4.2.2 可靠性筛选方案设计和筛选方法	(68)
4.2.3 可靠性筛选的效果	(73)
4.2.4 产品失效的 S 形曲线	(75)
4.3 元器件的降额设计	(76)
4.3.1 降额设计的基本概念	(76)
4.3.2 降额设计方法	(78)
4.3.3 降额设计的原则	(82)
4.4 瞬态过应力防护	(82)
4.4.1 暂态效应引起的失效现象	(82)
4.4.2 瞬变过应力的产生和传递	(83)
4.4.3 浪涌吸收器	(83)
4.4.4 半导体器件的瞬变过应力抑制	(85)
4.5 电子元器件的静电损伤及其防护	(88)
4.5.1 电子元器件的静电损伤	(88)
4.5.2 静电的产生	(88)
4.5.3 静电放电造成半导体器件失效的原因	(89)
4.5.4 电子元器件的防静电措施	(90)
第五章 可靠性热设计理论与方法	(92)
5.1 温度对可靠性的影响和热交换理论	(93)
5.1.1 温度对可靠性的影响	(93)
5.1.2 良好的可靠性热设计的经济效益	(96)
5.1.3 热交换理论	(97)
5.2 电子设备的散热与冷却	(102)
5.2.1 电子设备中的散热器和散热器的工程应用	(102)
5.2.2 电子设备中的冷却技术	(106)
5.3 计算机的热设计	(113)
5.3.1 地面商用计算机的热设计	(113)
5.3.2 加固计算机的热设计	(119)
5.3.3 高性能大型计算机的液冷技术	(125)
第六章 计算机组装和连接设计	(133)
6.1 印制电路板	(134)
6.1.1 印制电路板的种类及基本工艺	(134)
6.1.2 印制电路板的设计与布线	(139)

6.2 计算机的组装设计	(159)
6.2.1 组装设计	(159)
6.2.2 计算机高密度组装	(163)
6.2.3 高密度组装实例	(167)
6.3 计算机的连接设计	(169)
6.3.1 电气互连设计	(169)
6.3.2 电气互连的失效分析及互连可靠性设计	(181)
第七章 计算机供电设计	(184)
7.1 计算机系统的供电	(184)
7.1.1 交流电源	(185)
7.1.2 直流电源	(195)
7.1.3 供电方式	(198)
7.2 计算机电源的抗干扰	(200)
7.2.1 交流净化电源	(200)
7.2.2 其他净化电源和提高计算机电源抗干扰能力的措施	(203)
7.3 电源保护	(210)
7.3.1 电源保护的发展	(210)
7.3.2 UPS 电源的保护	(213)
第八章 计算机的电磁兼容及安全性设计	(218)
8.1 电磁兼容设计技术基础	(218)
8.1.1 电磁兼容的基本概念	(218)
8.1.2 电磁噪声、电磁干扰及其属性	(224)
8.1.3 电磁干扰的测量	(232)
8.2 噪声抑制技术	(239)
8.2.1 噪声抑制技术基础	(239)
8.2.2 数字系统的噪声抑制技术	(247)
8.2.3 工业控制系统中的噪声抑制技术	(261)
8.2.4 用软件手段的噪声抑制技术	(271)
8.3 计算机设备的噪声及噪声抑制	(282)
8.3.1 计算机设备的噪声	(282)
8.3.2 计算机设备噪声的抑制	(285)
8.3.3 TEMPEST 计算机和防止信息泄漏	(288)
参考文献	(292)

第一章 概 论

1.1 可靠性工程是现代工程师的必修课

人类有史以来,直到近几十年前,所使用工具的性能一直都很低,工具的寿命与人的寿命相比较长,因此,工具的寿命在人类生活中并没有引起特别关注。随着人类社会的发展,技术的进步,人类使用的工具、装备越来越复杂,渗透到生活的各个领域,严重影响和支配着人类的一切生存活动。在当今社会中,如果发电厂不能发电,通信系统瘫痪,计算机不能执行运算等等,可以想象人类社会会出现什么样的景象。所以,到本世纪初,人类逐渐对工具、装备的寿命关心起来,可靠性问题开始萌芽。然而,可靠性作为一门工程学孕育于本世纪40年代,特别是第二次世界大战中,由于产品的不可靠,带来了血的教训,使人们逐步加深对可靠性问题的认识。所以,可靠性问题是人们在社会实践的基础上,随着客观形势的需要而产生和发展起来,社会需要是促进可靠性工程发展的动力。

产品的先进性和可靠性对一个国家的国际地位、国际声誉及国际贸易都有很大的影响,各国领导集团都很重视这个问题。在第二次世界大战以前,日本厂商以善于仿制别国产品著称,经他们仿制出来的产品质量低劣,因此日本产品在国际市场上有低质仿制品的恶劣名声。第二次世界大战之后,日本政府为了振兴经济,打开国际市场,设立了国际贸易和工业部,并且发出命令,要求日本各工厂设立质量保证部,要求生产出口商品的工厂都应建立可靠性规划,从美国引进可靠性工程的技术成果,把美国在航空、航天及军事领域的可靠性研究成果应用到民用工业中,特别是民用电子工业。由于采取了这一系列重大措施,使战后的日本能够生产出高可靠的产品,特别是电气、电子产品的质量水平提高得很快。现在日本产品的质量水平已列入世界先进行列。

由于设备的失效,将会导致军事行动的失调,战斗任务的失败,兵员的伤亡等,而战斗任务的失败将直接关系到国家的安全,因此,军事当局深知军事装备可靠性的重要性,从总结成功经验和失败教训中,军事当局对装备的可靠性提出了严格的要求。美国国防部技术政策的变化清楚地说明装备的可靠性在军事首领头脑中所占的位置。美国80年代以前投入使用的许多武器系统,由于过分追求先进的武器性能,忽视了可靠性及维修性,其结果是武器系统战备完好率低,维修及后勤支援费用猛增。一系列的教训使美国国防部的技术发展政策发生变化——从只追求武器系统性能转变为强调武器系统的可靠性及维修性,可靠性与武器性能要求并驾齐驱。1985年美国空军制定2000年以后装备研究计划时提出,在装备的研制中,可靠性与维修性应优先于性能,至少应受到与性能同等的重视。

工业部门的领导深知每台设备失效都会影响生产,造成经济上的损失。特别是大型自动化程度较高的企业,有时一台关键设备失效将会导致工厂停产,蒙受巨大的经济损失。同时因事故工厂不能按时向用户提供产品,还要承担合同责任和赔偿费用等。如带钢热轧机采用计算机控制以后,轧速可从20米/分钟提高到1500米/分钟,提高工效75倍。可是如

果计算机出故障，在短时间内就会造成数千米钢带报废，损失是极其严重的。随着技术进步，工业部门的装备愈来愈复杂，运行速度愈来愈高，也强烈要求设备具有高的可靠性。

提高产品质量是人类的一种基本愿望。产品的质量是产品能满足给定要求的全部特性和特征，即适用性。所谓全部特性和特征，包括性能、可靠性、维修性、安全性、经济性以及产品的外观质量。维修性、安全性、经济性又与可靠性密切相关。产品质量是企业争得市场、获得信誉的决定因素，也是企业取得经济利益的重要保证。因此，从市场竞争及企业经济利益考虑，也十分需要产品的高质量。

由此可见，可靠性工程孕育和产生于社会实践中，人们在不断总结经验教训中发展了可靠性工程。可靠性工程的发展，反过来又推动了社会政治、经济和文化的发展。研究与提高产品的可靠性是要付出一定代价的。从生产角度看，要增加产品的研制和生产成本。但是，从使用角度看，由于产品可靠性提高了，可以大大减少使用费和维修费，从而减少了产品寿命周期成本。所以从总体上看，研究可靠性在提高一个国家综合国力，包括一个国家的国际地位、军事实力等等有无可估量的意义，就是在经济上投入产

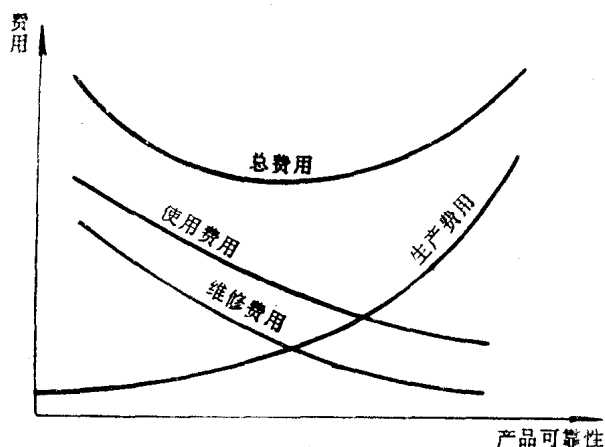


图 1-1 可靠性与总寿命费用关系图

出比也是非常高的。图 1-1 是产品的可靠性与寿命费用的关系图。随着产品可靠性增加，总的寿命费用下降，可靠性要求进一步提高，而总寿命费用又会急剧上升，因此应该综合考虑。一般情况下，应从总费用曲线的最低点来确定产品的可靠性指标。

应该特别指出的是，许多产品可靠性的经济利益，不应该从局部范围看，应该将眼前利益和长远利益结合起来，将生产厂利益和用户利益以及国民经济的总体利益结合起来进行全面的分析。下面我们举几个例子说明研究与提高产品可靠性的经济效益。美国海军 F14 飞机是 60 年代研制，70 年代投入使用的，在重性能，轻可靠性、维修性的思想指导下，服役三年后，可用率仅 37%，迫使美国海军再投资 5 亿美元，进行 34 项可靠性、维修性补课，直到 1979 年才使可用率达到 89%。美国海军在研制 F18 飞机时，一方面吸取 F14 的教训，另一方面利用阿波罗成功经验，成为美国第一架从设计开始就重视可靠性、维修性的飞机，服役第三年即 1985 年，可用率达 80%。如以服役 20 年计算，总的维修费用可以减少 20 亿美元。我国空军在“七五”期间也进行了可靠性补课，以某机种统计数字为例，投入的补课费用，摊算到飞机每飞行小时是 83 元，使每飞行小时的三项费用（大修费、航材费、装备费）从原来的 30080 元下降到 13390 元，下降 55.48%，取得投资小，获利大的奇效。美国军事将领一再表明，可靠性投资是最有价值的投资。民用产品量大面广，可靠性投入的产出效益是非常可观的，以电视机为例，如果以 1980 年年产 200 万台为基数，以平均年增长率 15% 计算，修理一次的平均费用以 10 元计算，若电视机的平均寿命 500 小时，则人们在 1980~1990 年间付出修理费用 19.6 亿元；若电视机的平均寿命为 1000 小时，则付出

2.3 亿元。因此按整个社会所付出的代价,提高产品可靠性的经济效益是十分明显的。

提高产品质量是人类的一种基本愿望和基本实践,是人类创造财富的基本途径。高质量的产品理所当然地受到欢迎。人类这种愿望不能由少数人的意志来决定,必须通过从事产品设计、制造、使用的人有成效的劳动实践来实现。国际上推行质量管理,在许多国家取得很好的效果,总结出的基本经验是“始于教育,终于教育”。可靠性是一门专门学问,可靠性工程是一项多次反馈的工程过程,高可靠性指标的实现涉及人力、物力、财力和技术、管理、生产水平。由于我国教育中缺少可靠性工程这一环节,因此绝大多数工程技术人员和管理干部不熟悉它,虽然有提高产品可靠性的良好愿望,但没有掌握提高产品可靠性的科学方法。这就迫切需要对在职工程技术人员和管理干部实施可靠性工程教育。我国 21 世纪高可靠产品的设计、制造、维护将由目前在校和将来在校的大学生来承担,因此在大学高年级学生中,实施可靠性工程教育,使他们懂得影响产品可靠性的因素,懂得度量和规定可靠性的方法,掌握在需要的时候,如何提高产品可靠性的技巧,从而使我们培养出来的大学生在走上工作岗位以前,在头脑中就建立起产品可靠性的工程概念。我们相信我国 21 世纪的产品,在世界竞争中是有希望的。

综上所述,把可靠性工程作为现代工程师一门必须学习的基础课是十分恰当的。

1.2 可靠性工程的发展历史

可靠性工程是质量控制技术的历史发展。早期的质量控制工作是从建立各种技术标准开始的。本世纪 20 年代,由于电子元器件逐渐进入大批量生产时期,元器件质量控制问题的重要性日益明显。为了适应形势发展的需要,30 年代诞生了标准化工程专业,以建立各种标准的方法来控制并确保产品质量。首先是确立标准的类型,然后建立标准的规范方法,接着确定测量和试验方法的标准。从 40 年代起,由于战争的需要,新元器件,新电路和功能好且适应各种环境条件的新设备得到了发展,30 年代那种靠标准来检测和验收产品的方法已经不符合新时期的需要,要求对生产过程各道工序中的可变性进行控制。进入 50 年代后,科学技术的飞速发展,电子设备功能的不断扩大和精度要求的提高,导致电子设备日趋复杂化;同时,由于设备的应用日益广泛,设备面临严酷的工作环境,失效率增高,从而使可靠性在电子设备中所处的地位愈来愈突出。美国在朝鲜战场上使用了从当时看性能先进,但结构比较复杂的通讯、水声、雷达设备,使用时故障频繁,以致检查和排障时间分别约占这些设备有效使用时间的 14%、48% 和 84%。这就促使美国迫切需要大力开展可靠性研究。

在世界各国中,美国的可靠性工程发展居领先地位。下面以美国可靠性工程发展为主线,介绍可靠性工程发展概况。

1.2.1 可靠性工程的萌芽阶段(40 年代)

可靠性理论及其应用技术的研究起始于第二次世界大战,在大战中德国研制并使用了 V-1 和 V-2 火箭,根据故障率高和命中率低的实际情况需要出发,开始了对可靠性的研究工作,最早提出系统可靠性的基本理论。根据这一理论研制的火箭,其可靠度达到 0.75。因此,V-1 和 V-2 火箭成为第一个在研制后期运用系统可靠性理论的航空飞行器。在此期间,

雷达等各种复杂的电子设备相继出现,电子设备的可靠性严重地影响着武器系统的使用效果。美国 60% 的机载电子设备运到远东后不能使用,50% 的电子设备在储存期间失效。当时美国海军的十六七万台电子设备,每年需更换 100 万个左右的电子元件,其中电子管的更换比其他元件高五倍。当时美国可靠性研究的重点是研究长命电子管,在 1943 年成立了电子管委员会,专门研究电子管的可靠性问题,不仅重视其电性能,而且重视耐震、耐冲击等方面的因素。为推动可靠性研究和学术交流,在 1949 年,美国无线电工程师学会成立了可靠性技术组——第一个可靠性专业学术组织。

1.2.2 可靠性工程的创建阶段 (50 年代)

50 年代初期,美国人在朝鲜战争中发现,不可靠的电子设备不仅影响战争的进行,而且需要大量的维修费用,军用设备的维修费用往往是它采购费用的数倍。为解决面临的可靠性问题,美国军方、制造公司及学术界都卷入了可靠性研究。

1950 年 12 月 7 日,美国人成立了“电子设备可靠性专门委员会”。该委员会于 1952 年 3 月 12 日提出如下建议:

- (1) 从现场可以得到设备及元器件失效率的较好数据;
- (2) 可靠的元件是可靠设备的基础;
- (3) 对设备和元器件应建立定量的可靠性要求;
- (4) 在批准新设计产品进入批量生产前,应对它进行可靠性试验,评估其可靠性;
- (5) 需要建立永久性的可靠性委员会。

上述建议被美国国防部接受,并于 1952 年 8 月 21 日成立了“电子设备可靠性顾问委员会”(AGREE)。

1957 年 6 月 4 日,AGREE 发布了“军用电子设备的可靠性”报告,即著名的“AGREE 报告”。AGREE 报告的最重要的成果是明确了产品的可靠性是可建立的、可分配的及可验证的,建立了可靠性工程学的框架。报告中研究了最低可接受的可靠性水平、可靠性模型、可靠性分析、效益费用比、可靠性验证及储存运输的可靠性等问题;提出要制订可靠性大纲及加强可靠性教育。尽管在这些方面以后都有很大的发展,但 AGREE 报告已成为美国可靠性工程发展的奠基性文件。

美国在 50 年代,军方就对产品提出可靠性指标。如美国空军在 1956 年 5 月 16 日的文件中就明确提出设备采购中要有可靠性要求。1958 年 6 月 2 日发布的 MIL-R-26484 军用标准,对飞机的电子分系统提出 MTBF 最小为 300 小时的定量可靠性指标要求。仅仅提出定量的可靠性指标,如果没有相应的验证方法,那么这种要求也将流于形式。在 40~50 年代,概率论和数理统计的发展,奠定了可靠性数学的基础。特别是对产品寿命研究从指数分布向威布尔及其他分布的扩展,为可靠性参数的评估及验收试验开辟了新领域。

1.2.3 可靠性工程的全面发展阶段 (60 年代)

60 年代是美国经济发展较快的时期,也是航空及航天工业迅速发展的年代,故被称为“宇航年代”。在这 10 年中,美国先后发展了一批先进的航空航天产品。50 年代由 AGREE 发展起来的可靠性设计及试验方法被 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 及国防部接受,在航空及航天工业,特别是在航空电子系统中,得到广泛应用并迅速发展。

主要表现在：

(1) 改善可靠性管理，建立可靠性研究中心

60年代开始，美国国防部致力于改善可靠性管理。1965年颁发了MIL-STD-785《系统与设备的可靠性大纲要求》，把可靠性工程活动与传统的设计、研制及生产的工程活动结合起来。1969年修订为MIL-STD-785A。美国空军司令部决定在罗姆航空发展中心(RADC)组建可靠性分析中心。该中心主要从事与电子设备有关的电子及机电、机械元器件及整个电子系统的可靠性研究，包括可靠性预计、可靠性试验、可靠性物理、数据采集、分析与分配等。

(2) 制定可靠性试验标准，发展新的可靠性试验方法

为了给可靠性参数的评估及验证试验提供依据，统计学家在大量理论研究的基础上设计了有关的统计试验方案及抽样方案。这些成果总结成：MIL-STD-690《失效率抽样方案和程序》；MIL-STD-781《可靠性试验指数分布》；DOD-H-108《寿命和可靠性试验抽样程序和表格》。其中，MIL-STD-781于1965年修改为MIL-STD-781A，1967年又进一步修改，颁布了MIL-STD-781B，改名为《可靠性设计鉴定试验及产品验收试验（指数分布）》。该标准规定了一组完善的可靠性试验计划、试验程序及试验条件，并附有各种图表可供使用。这一标准在国际上得到广泛应用。

由于晶体管及半导体集成电路等新式器件的出现，电子元器件的可靠性大大提高，要验证一种用于“民兵”导弹、失效率为 10^{-6} /小时的功率晶体管，需要投入23000个晶体管，试验10000小时，而不出现失效。这是非常费钱费时的事情，因此需要更有效的试验方法。60年代初，美国罗姆航空发展中心发展了两种新的试验方法：一种是加速寿命试验，通过加大试验应力的方法来缩短寿命试验时间；另一种是快速筛选试验，它能够在规定时间及应力条件下，挑选出95%的可能失效元件，以便尽早发现并剔除不可靠的元器件。

(3) 发展新的可靠性预计技术，颁发可靠性预计手册和标准

60年代初发展了按系统功能及参数预计可靠性和蒙特卡罗模拟等新的可靠性预计技术。

在对电子元器件的失效率进行了有效的质量控制，并收集了大量现场及试验的失效率数据之后，美国国防部1962年发布了MIL-HDBK-217《电子设备可靠性预计手册》，1965年修改成MIL-HDBK-217A。该手册提供了大量的电子元器件可靠性数据及分析方法，作为电子设备及系统可靠性预计的基础，在世界各国得到广泛应用。此外，1961年10月美国国防部颁发了MIL-STD-756《可靠性预计》的军用标准，1963年5月修改为MIL-STD-756A。该标准作为飞机、导弹、卫星及电子设备等在各个研究阶段可靠性定量预计的标准，以便工程技术人员及时地发现设计弱点，为定量的可靠性分配打下基础。

(4) 建立有效的数据系统

60年代初，美国空军、海军及某些制造公司都建立起综合数据系统。例如：空军建立了AFM66-1数据采集系统；罗姆航空发展中心建立了可靠性数据中心；海军所属的海军航空安全中心，航空供应办公室等五个部门也建立了专门向合同商提供可靠性数据的数据采集系统，后来又发展了海军维修、材料及管理数据系统(3M系统)。60年代中期，桑得斯特朗公司建立了自动数据采集系统，它可采集来自空军基地、维修中心及修理厂的数据，这些数据经计算机分析处理，自动地输出设备的拆卸及修理信息。此外，海陆空三军，还建

立了军种间弹道导弹数据交换网 (IDEP), 海军建立了导弹数据交换网 (GMDEF) 及失效率数据交换网 (FARADA), 并于 1969 年与 NASA 数据系统合并, 构成全国性的数据交换网。

(5) 重视维修性的研究

直到 50 年代末, 维修性才引起人们的重视。人们发现, 要保持设备的可靠性必须进行维修, 维修费用随着武器系统复杂性提高而增加。在 50 年代中期, 美国国防部每天平均花费 2500 万美元用于武器的维修, 每年 90 亿美元, 占国防部总预算的 25%。罗姆航空发展中心在 50 年代末开始了一个为期三年的维修性研究计划, 研究影响维修性的因素, 发展维修性验证及预计的技术, 并于 1963 年出版了第一个维修性技术报告。在此报告的基础上, 美国国防部于 1966 年 3 月颁发了第一个维修性军用标准 MIL-STD-470《维修性鉴定、验证及评估》和维修性军用手册 MIL-HDBK-472《维修性预计》。这些标准标志着维修性已成为一个独立分支, 与可靠性并驾齐驱发展起来。60 年代后期, 出现了以可靠性为中心的维修理论。1968 年 7 月, 美国联邦航空局组织制定了第一个以可靠性为中心的维修大纲 MGS-1, 由此引起在装备维修领域的一系列变革。

(6) 苏、法、日相继全面开展可靠性工程的研究

苏、法、日这些工业发达国家的可靠性工程研究工作约比美国晚起步 5~10 年, 但是在发展的过程中, 各有自己的特点。

60 年代初, 前苏联从技术上、组织上采取措施来促进可靠性工程的发展。对工程师及科学家进行可靠性教育, 召开各种可靠性学术会议, 出版可靠性书籍。1962 年, 苏联出版第一本较完善的可靠性教科书——《可靠性及质量控制的统计方法》, 建立由总工程师领导下的可靠性组织机构及有关的可靠性试验室。苏联重视可靠性理论研究, 有不少研究成果已被世界所公认, 如 K-S 统计检验法及马尔可夫过程等, 都已成为可靠性研究中常用的工具。同时苏联也注重研究实用的可靠性工程方法, 如余度技术、降额技术等, 并通过提高原材料质量及采用专门电路来保证产品的可靠性, 以弥补电子元器件可靠性差的不足。在军用系统和航天飞行器中, 通过余度技术、改进工艺及采用经过实践证实可靠的部件来保证整个系统的部件可靠性。苏联在可靠性工程发展中, 注意吸收美国的现成经验, 在可靠性标准中, 大量吸取美国军用标准的内容。

法国可靠性工程发展的特点是强调集中管理, 重视元器件的可靠性研究。在法国总理的建议下, 成立了电讯协调委员会来协调电话系统、广播系统、原子能中心、燃气及电子公司、铁道及民用航空公司、空间研究中心等部门对电子元器件的可靠性要求。1960 年后, 为了节省对通用电子元器件进行验收试验的费用, 在电讯协调委员会的倡议下, 建立中心验收试验系统, 即验收试验不再由单个用户在交付的产品上进行, 而是在电讯协调委员会的监督下, 由制造商在批量生产产品上进行。1962 年, 在国立电讯研究中心建立了可靠性中心, 负责收集、综合并出版各种可靠性资料, 收集、分析、处理和分配各种可靠性数据, 研究可靠性试验方法。1964 年, 法国第一次在军用电子设备的合同中提出可靠性要求。1966 年, 可靠性中心开始制订各种可靠性文件来规定产品各个研究阶段的可靠性要求。

日本从美国引进可靠性工程, 把美国在航空、航天及军事领域的可靠性研究成果应用到民用工业中, 特别是民用电子工业; 注意把可靠性、经济性及生产性结合起来, 以适应世界市场的竞争。日本的可靠性工程活动主要在企业界, 企业重视对所有人员, 包括生产工人的可靠性培训; 还注意整机厂、元件厂、销售部门及维修部门之间的合作。在 60 年代

中期成立了日本电子元器件可靠性中心，负责国内元器件可靠性数据收集、分析并进行国际数据交换。

1.2.4 可靠性工程的深入发展阶段（70年代以后）

在70年代中，尽管美国出现严重的经济萧条，航空、航天及军费预算削减，武器系统的寿命费用问题更为突出。但是，人们不断地认识到可靠性工程是减少寿命周期费用的重要工具，它仍然得到深入的发展，并日趋成熟。这一阶段的特点是：

（1）建立统一的可靠性管理机构

随着军用电子设备复杂性的迅速增长，电子设备的可靠性仍是美国国防部所关切的问题。为寻找解决这些问题的途径，美国国防部于1975年5月召开了一次由政府部门、工业及学术界150名代表参加的电子设备可靠性讨论会。根据这次会议对加强电子设备可靠性统一管理的建议，同年9月正式成立了直属美国三军联合后勤司令部领导的“电子系统可靠性联合技术协调组”，来执行会议提出的各项建议。1979年2月，该协调组的职能范围扩大到非电子设备，并改名为可靠性、可用性及维修性联合技术协调组。该协调组下设系统管理、电子设备设计、电子设备试验、机械设备设计、机械设备试验及维修6个分组。

（2）成立全国统一的数据交换网

为加强政府与工业部门之间的技术情报交流，由联合后勤司令部倡导，1970年9月正式成立全国性的政府——工业部门数据交换网（GIDEP），并设立常设机构，制定了交换网章程。1973年，美国联邦航空局的失效率数据交换网并入GIDEP，同时修改了章程。到1980年，已有220个政府机构及404个工业组织参加了该网。在1970~1980年的10年中，该网每年平均收到并处理7000多份资料。据统计，1980年交换网成员单位共节省2900万美元，约为该网开支的14倍。

数据交换网的主要任务是收集、储存、检索并分配有关部件、元件及材料的可靠性试验及使用信息；试验设备数据及标准试验方法与有关计量数据；设备研制、试验及外场使用获得的可靠性及维修性数据，以及交换网成员单位感兴趣的其他技术数据。数据交换包括工程数据库、可靠性及维修性数据库、计量数据库以及警告系统和紧急数据请求系统。

（3）改善可靠性设计及试验方法

70年代以来，可靠性设计及试验的主要进展是采用更严格、更符合实际、更有效的设计及试验方法。

①发展失效物理研究和失效分析技术

随着产品可靠性要求的不断提高，以统计质量控制的传统办法来处理已不现实，不可能投入成千上万的产品进行常年累月的试验来验证。因此需要探索元器件、机械、机电零部件内在本质的缺陷，研究故障产生的物理化学机理及其规律。在某些情况下，需要深入到分子、原子的水平来分析阐明故障的原因，在此基础上进行产品可靠性的分析及改进，这就是所谓“失效物理”或“可靠性物理学”。通过元器件的失效物理模型来预计元器件的失效率已成为元器件失效率预计的一种重要手段。

“FMEA”（故障模式及影响分析）是分析系统中每一个潜在的故障模式，确定它对系统所产生的后果或影响，并把每一个潜在故障模式按它的严重程度来分类。如果再加上危害分析则叫“FMECA”（故障模式、影响及危害度分析）。

目前, FMEA 和 FMECA 不仅在航空、航天、造船、电子等工业, 而且在交通运输、电力机械等工业得到广泛应用。

②更严格的降额设计

降额(降低额定值)设计是早已使用的可靠性设计方法, 但为了提高设备的可靠性, 70 年代以来采用更严格的设计。F18 飞机电子设备所采用的晶体管及微型电路的结温及使用功率值比 NASA 有人驾驶航天飞行器中使用的更严格, 即降额更大。例如, F18 用通用晶体管的结温为 100°C , 使用功率为 15% 额定值; NASA 用的分别为 110°C 、50%。

③计算机辅助可靠性设计

为了减少复杂电子系统可靠性预计的时间、费用及人为误差, 罗姆航空发展中心发展了一种电子设备可靠性预计的软件包。它以 MIL-HDBK-217 中所具有的晶体管、集成电路、继电器及开关等 22000 个标准元件的可靠性数据为基础, 用户只需输入被预计的电子设备的组件数、元件数、印制电路板数、设备的最大使用功率、使用温度及故障模式参数, 便可在几分钟内得到设备的失效率, MTBF、可用度、平均修复时间、可能失效的元件, 以及各种参数之间综合对比的结果。

发热是电子设备失效的主要因素之一, 精确的热分析技术是提高电子设备可靠性的重要方法。70 年代发展了利用计算机辅助热分析及设计技术。

④研究非电子设备的可靠性设计及试验方法

至 80 年代初, 几乎所有编入美国军用标准的可靠性设计及试验程序, 大都是为电子设备制订的。由于非电子设备(机械及机电设备)的标准化差、试验子样小且费用贵、缺少足够的数据来确定它的寿命分布, 影响失效因素多等原因, 现用的可靠性预计及试验技术的使用受限制, 结果不理想。美国国防部分别于 1977 年和 1978 年成立机械设备可靠性设计及机械设备可靠性试验分组来研究目前机械设备的可靠性设计及试验存在的问题, 发展新的方法, 并制定相应的设计及试验程序。

⑤采用综合环境应力试验

大量的使用经验表明, 许多电子设备外场使用获得的 MTBF 值与实验室中按照 MIL-STD-781B 试验得到的数值相差悬殊, 高达数倍。造成这种差别的主要原因之一是 MIL-STD-781B 不具备综合环境试验的能力。1977 年颁发的 MIL-STD-781C, 明确规定可靠性试验要在更符合实际工作环境的综合应力环境条件下进行。

⑥加强环境应力筛选试验

筛选试验早已广泛用于元器件。由于复杂电子设备的维修及后勤支援费用不断增长, 为了尽早发现并剔除引起早期失效的薄弱元部件及工艺缺陷, 在 70 年代后期, 环境应力筛选试验更加引起重视。

⑦进行可靠性增长试验

可靠性增长试验是一种在真实或模拟真实的环境条件下对产品进行的试验, 其目的是暴露与确定潜在的故障模式和机理, 从而可采取改正措施防止这些故障模式和机理再现, 这样产品的可靠性就得以增长。

(1) 开展软件可靠性研究

随着计算机技术飞快发展, 计算机软件可靠性问题引人注目。这是因为在一个计算机系统中, 软件的费用远大于硬件费用。美国空军每年对硬件的投资为 4 亿美元, 而软件投

资为 15 亿美元。许多软件系统的故障只有投入使用才能发现,所以在计算机系统的发展中,往往是由于软件问题拖延了研制及生产周期。特别应指出的是,在 70 年代中,由于计算机软件故障曾导致美国 NASA 航天飞行器坠毁,航天飞行员丧命,从而引起 NASA 及国防部的重视。1978 年成立了三军软件可靠性技术协调组来负责国防部范围的软件可靠性研究及协调工作。目前软件可靠性已成为一个新的可靠性分支迅速地发展。

电子计算机作为电子设备中极其重要的一类,其可靠性技术的发展基本上也是同上述各发展阶段同步的。电子计算机硬件的可靠性是电子设备可靠性理论的具体应用。电子计算机发展的最初阶段,即电子管时代,由于当时电子管的失效率只有 10^{-4} /小时,很难满足电子计算机实际应用的要求。在世界上第一台电子计算机 ENIAC 中,使用了多达 18000 只电子管,平均故障间隔时间只有 30 分钟。所以迫使计算机设计师很早就注意利用各种可靠性技术,例如,采用了初步的硬件冗余技术、时间和信息冗余技术,可靠性还是比较低的。1947 年晶体管发明之后,半导体技术突飞猛进。1958 年集成电路,1967 年大规模集成电路,1978 年超大规模集成电路的相继研制成功,才使得电子计算机在小型化、性能、可靠性、节约能耗以及价格方面一次次取得进步。微电子技术的突飞猛进使得电子计算机的最主要的构成元素——器件可靠性迅速提高,为计算机系统的高可靠性打下了坚实的基础。所以说计算机工业的历史几乎完全是工艺推动的一种工业历史。此外,在整机系统方面,由于采用了电路、部件及系统级的冗余技术、差错控制技术、故障的自动诊断等可靠性技术,于是计算机整机的可靠性也在不断提高,计算机系统的可靠性每经过 6 年时间 MTBF 就要提高 10 倍。

尽管计算机可靠性应用的理论方面与其他电子设备有许多相似之处,也有许多不同的特点。在计算机系统的可靠性技术中,一方面是在硬件研制中选用高可靠的元器件,对元器件进行 100% 老化与筛选,进行电磁屏蔽设计、热设计等尽量减少故障出现的概率。这就是所谓避错 (fault avoidance) 技术。另一方面,利用冗余提供的信息来掩盖错误的影响,其中包括额外的硬件、额外的时间、额外的信息,即所谓的硬件冗余、时间冗余、信息冗余。硬件冗余是利用额外的电路、逻辑门、存储单元、分机或整机等来掩盖故障的影响。同一计算机任务执行两次的结果进行比较属于时间冗余,采用检错和纠错编码属于信息冗余。容错计算机是按容错设计思想设计的计算机,它是以投入超过常规设计所需的资源来换取更高可靠性的一种设计方法。

自 1969 年 STAR 容错计算机研制成功以后,容错技术才广泛为人们所重视,成为容错计算机技术研究的开端。IEEE 协会于 1970 年建立了容错计算委员会,自 1971 年起,国际容错计算会议每年召开一次。随着计算机更广泛更深入渗透到社会各个方面,便形成了生产活动、经济活动、社会活动和军事行动全面依赖于计算机的局面。在这种情况下,如果计算机质量低劣、可靠性差、经常发生故障,则其经济效益和社会效益必然大幅度地下降,以至丧失其功能,从而使生产、经济和社会活动陷入混乱状态。显然,计算机系统的可靠性是实现信息化社会的技术关键。人们预言,到 2000 年世界上 95% 的计算机将是高可靠的容错计算机,因此对计算机高可靠技术及容错技术的研究具有更深远的意义。