



高等学校电子信息类专业“十三五”规划教材

电子设备 可靠性工程

朱敏波 曹艳荣 田锦 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校电子信息类“十三五”规划教材

电子设备可靠性工程

朱敏波 曹艳荣 田锦 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

可靠性与维修性是产品质量的决定因素,为提高我国机电产品的质量,在高校开设“电子设备可靠性工程”课程势在必行。

本书在介绍有关可靠性理论的基础上,吸收国内外有关先进技术,结合作者多年从事可靠性工程设计的教学、科研实践,形成了一套较适合于机械电子工程类专业的教学内容与体系。本书主要内容包括:可靠性数学基础、可靠性基本理论、维修性理论、机械可靠性设计、电子产品可靠性工程设计、可靠性试验与数据处理等。

本书可作为高等院校本科、研究生教材,还可供从事电子设备设计与研究的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子设备可靠性工程/朱敏波,曹艳荣,田锦编著. —西安:

西安电子科技大学出版社,2016.4

高等学校电子信息类“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5606-4019-8

I. ① 电… II. ① 朱… ② 曹… ③ 田… III. ① 电子设备—可靠性工程—高等学校—教材

IV. ① TN06

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 023455 号

策 划 李惠萍

责任编辑 李惠萍 杨璠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西大江印务有限公司

版 次 2016年4月第1版 2016年4月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 19

字 数 450千字

印 数 3,000册

定 价 36.00元

ISBN 978-7-5606-4019-8/TN

XDUP 4311001-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

前 言

随着现代化武器装备、通信系统、交通设施、工业自动化系统以及空间技术所使用的电子设备日趋复杂,使用环境的条件愈加恶劣,装置密度不断增加,对电子设备的可靠性也提出了更高要求。而电子设备可靠性工程是以电子产品为对象,旨在提高系统(或产品和元器件)在整个寿命周期内可靠性的一门有关设计、分析、试验的工程技术,该技术不仅在国防、航天、航空等尖端技术领域备受关注,在工业、民用电子等领域也同样得到重视,因此各行业迫切需要大量掌握现代电子设备可靠性知识的专门人才,亟待出现能满足电子信息行业可靠性需求的专门教材。为了适应形势与教学的需求,编者根据多年的教学和科研经验撰写了本书。

本书针对机械电子工程的特点,全面介绍了可靠性与维修性的基本概念,可靠性的主要数量特征,各种典型系统的可靠性模型及可靠度的计算,可靠性预计与分配,可靠性失效分析中常用的故障模式、影响及危害度分析、故障树分析等。结合机电产品的特点,本书介绍了机械可靠性设计、概率工程设计与一般机械设计的不同特点,以及电子元器件降额设计与动态设计、电子装备的热设计与电磁防护设计等可靠性设计技术。对可维修系统,本书则侧重于对马尔可夫维修系统的理论推证。对可靠性试验,本书主要介绍了抽样检验原理、寿命试验、可靠性增长试验与环境试验等。全书共分10章,将可靠性理论、数学基础和工程实际融为一体。为了巩固和加深读者对本书内容的理解,除第1章外,其余各章均附有例题与习题。

本书参考学时数为48~64学时。读者使用本书时,应具有概率论和机械设计的基本知识;教师可结合机械电子工程专业的特点,对本书内容进行合理裁减,以达到更好的教学效果。

本书第1、2、4、5、8、9、10章由朱敏波编写,第3、6章由曹艳荣编写,第7章由田锦编写。本书的部分插图和资料整理由研究生龚志诚、芮喜等人协助完成。

本书的出版得到了西安电子科技大学2013年度教材建设项目资金的资助。在编写过程中,编者借鉴了国内外的一些优秀教材及最新文献,在此向相关作者表示谢意!

由于编者水平有限,书中难免存在一些不妥之处,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

2016年1月于西安

目 录

第1章 可靠性概论	1
1.1 可靠性的基本概念	1
1.1.1 可靠性的定义和学习本课程的目的	1
1.1.2 可靠性理论的研究领域	2
1.1.3 电子设备可靠性工程的特点	3
1.1.4 产品质量、费用与可靠性的关系	3
1.2 可靠性技术发展简介	4
1.3 电子设备可靠性与维修性的基本内容	6
1.3.1 可靠性工作的基本内容与特点	6
1.3.2 产品各阶段的可靠性工作	7
第2章 可靠性的主要数量特征	10
2.1 可靠性特征量	10
2.1.1 可靠度与不可靠度	10
2.1.2 失效概率密度函数	11
2.1.3 失效率	12
2.1.4 平均寿命	13
2.1.5 寿命方差和寿命均方差(标准差)	15
2.1.6 可靠寿命、中位寿命和特征寿命	16
2.2 产品可靠性指标之间的关系	16
2.3 电子设备产品失效率曲线和失效规律	17
2.3.1 典型的失效率曲线	17
2.3.2 机械产品常见的失效率曲线	18
2.4 电子设备常见的失效分布	19
2.4.1 正态型失效分布 $X \sim N(\mu, \sigma)$	19
2.4.2 对数正态失效分布	26
2.4.3 韦布尔型失效分布	27
2.4.4 指数型失效分布	33
2.5 可靠性计算中常用的概率分布	35
2.5.1 二项分布	35
2.5.2 泊松分布	35

2.5.3 χ^2 分布	36
2.5.4 t 分布	38
习题	40
第3章 典型系统的可靠性分析	41
3.1 可靠性框图	41
3.2 串联系统的可靠性	43
3.3 并联系统的可靠性	45
3.3.1 纯并联系统	46
3.3.2 串并联系统	48
3.3.3 并串联系统	48
3.3.4 n 中取 k (表决)系统	51
3.3.5 非工作储备系统	53
3.4 网络系统	56
3.4.1 概述	56
3.4.2 状态枚举法(真值表法)	57
3.4.3 概率图法	58
3.4.4 路径枚举法	59
3.4.5 简化网络的方法	62
习题	66
第4章 可靠性预计与分配	68
4.1 可靠性预计的目的及分类	68
4.2 可靠性预计方法	69
4.2.1 系统可靠性预计的一般方法	69
4.2.2 电子、电气设备可靠性预计	71
4.2.3 机械产品特殊的可靠性预计方法	77
4.2.4 保证可靠性预计正确性的要求	79
4.2.5 研制阶段不同时期可靠性预计方法的选取	80
4.2.6 进行可靠性预计时的注意事项	80
4.3 可靠性分配	80
4.3.1 无约束条件的系统可靠性分配方法	81

4.3.2 有约束条件的系统可靠性分配方法	90	6.4.2 失效模式与失效机理	155
习题	93	6.4.3 失效分析的一般程序	156
第5章 可维修系统的可靠性	95	6.4.4 电子元器件失效分析技术	158
5.1 维修性的确定及指标的确定	95	习题	164
5.1.1 维修性要求	95	第7章 电子设备可靠性设计技术	165
5.1.2 维修性参数的选择	98	7.1 可靠性热设计	165
5.1.3 确定维修性指标	102	7.1.1 热设计基础	165
5.1.4 维修分布	103	7.1.2 冷却方法的选择	171
5.1.5 可用度	103	7.1.3 电子设备的自然冷却	172
5.2 马尔可夫随机过程	105	7.1.4 电子设备的强迫风冷	178
5.2.1 随机过程的基本概念	105	7.1.5 其他冷却方法	181
5.2.2 马尔可夫过程	106	7.2 电磁防护设计	181
5.3 维修系统的可靠性计算	107	7.2.1 耦合方式	182
5.3.1 单部件维修系统	107	7.2.2 屏蔽原理	183
5.3.2 串联维修系统	110	7.2.3 屏蔽效能计算	185
5.3.3 并联维修系统	114	7.2.4 电屏蔽结构	187
习题	117	7.2.5 低频磁屏蔽结构	188
第6章 电子元器件的可靠性技术	118	7.2.6 滤波设计	190
6.1 元器件的使用可靠性控制	118	7.2.7 接地设计	193
6.1.1 元器件使用可靠性与质量	118	7.3 机械防振设计	194
6.1.2 元器件的使用质量管理	119	7.3.1 振动与冲击对电子设备产生的危害	194
6.1.3 元器件选用分析评价和优选目录	123	7.3.2 隔振设计	194
6.1.4 元器件使用可靠性设计	126	7.3.3 冲击隔离设计	197
6.1.5 军用元器件质量保证及其标准	127	7.3.4 阻尼减振技术	199
6.2 元器件的降额设计与动态设计	128	习题	200
6.2.1 降额设计的定义及基本原理	128	第8章 电子设备失效分析技术	202
6.2.2 降额设计的基本原则	129	8.1 故障模式、影响及危害度分析 (FMEA、FMECA)	202
6.2.3 降额设计的内容	130	8.1.1 概述	202
6.2.4 降额使用	132	8.1.2 FMECA 方法中的一些基本概念	203
6.2.5 降额设计应注意的问题	132	8.1.3 FMECA 的列表分析法	203
6.2.6 降额设计示例	133	8.1.4 FMEA 的矩阵分析法	209
6.2.7 动态设计	135	8.1.5 FMEA 和 FMECA 的评价	212
6.3 元器件的典型可靠性问题	136	8.2 故障树分析法	212
6.3.1 栅氧的经时击穿(TTDB)效应	137	8.2.1 故障树分析法的特点	212
6.3.2 应力导致泄漏电流(SILC)效应	143	8.2.2 故障树的应用	213
6.3.3 负偏置温度不稳定性(NBTI)	150	8.2.3 故障树中使用的符号	213
6.4 电子元器件的失效分析技术	155	8.2.4 故障树的建立	216
6.4.1 失效分析的作用与意义	155		

8.2.5 故障树的定性分析	218	10.2 可靠性抽样试验	268
8.2.6 故障树的定量分析	221	10.2.1 两类错误及其风险	268
8.3 潜在通路分析	222	10.2.2 接收概率与抽样特性曲线	268
8.3.1 概述	222	10.2.3 定时截尾寿命试验抽检方案	269
8.3.2 潜在通路的特点及产生原因	223	10.2.4 序贯寿命抽检方案	271
8.3.3 潜在通路的主要表现形式	223	10.3 寿命试验设计	273
8.3.4 潜在通路分析方法	225	10.4 电子设备产品寿命试验的数据处理	275
8.3.5 潜在通路分析方法的特点	226	10.4.1 指数分布寿命试验的数据处理	275
8.4 设备的故障诊断技术	227	10.4.2 韦布尔分布寿命试验的数据处理	277
8.4.1 故障诊断技术的内容	227	10.5 加速寿命试验	278
8.4.2 诊断信息的采集和处理技术	229	10.5.1 加速寿命试验的原理与类型	278
8.4.3 润滑油样分析	231	10.5.2 恒定应力加速寿命试验设计	279
8.4.4 运行状态的监测	232	10.5.3 加速寿命曲线与加速寿命方程	280
习题	232	10.5.4 加速系数	281
第9章 机械零部件的可靠性设计	233	10.5.5 加速寿命试验结果的数据处理	282
9.1 机械可靠性设计的基本特点	233	10.6 可靠性环境试验	282
9.2 静态应力-强度干涉模型	235	10.6.1 环境试验的目的及分类	282
9.3 几种常用分布的可靠度计算	237	10.6.2 环境试验方法及检测	283
9.3.1 应力和强度均为正态分布时的可靠度计算	238	10.6.3 环境试验的顺序、操作程序和结果处理	285
9.3.2 应力和强度均为对数正态分布的可靠度计算	239	10.7 可靠性筛选试验	286
9.3.3 应力和强度均为指数分布的可靠度计算	241	10.7.1 筛选方法	286
9.3.4 应力为指数(或正态)而强度为正态(或指数)分布时的可靠度计算	241	10.7.2 筛选用典型环境应力及筛选度	287
9.3.5 应力为正态分布,强度为韦布尔分布时的可靠度计算	243	10.7.3 筛选试验方案的拟定	287
9.3.6 强度和应力为任意分布时的可靠度图解算法	244	10.8 可靠性增长试验	289
9.3.7 用蒙特卡罗模拟法求可靠度	247	10.8.1 可靠性增长过程及其模型	289
9.4 安全系数与可靠度	247	10.8.2 可靠性增长试验方案(计划)的拟定	291
9.4.1 经典意义下的安全系数	247	10.8.3 可靠性增长的监测	291
9.4.2 可靠性意义下的安全系数	248	习题	291
9.5 机械零件的可靠性设计	251	附录	293
9.5.1 函数的数学期望与方差计算	251	附表1 标准正态分布表	293
9.5.2 机械零件的概率工程设计	255	附表2 χ^2 分布的分位数表	296
习题	265		
第10章 可靠性试验及数据处理	267		
10.1 概述	267		

第1章 可靠性概论

1.1 可靠性的基本概念

“可靠性”这个概念早已为人们所熟知,它是衡量产品质量的一个重要指标。只有那些可靠性好的产品,才能在长期使用中发挥其良好的使用性能,从而赢得用户。随着科学技术的快速发展,在各个领域,尤其在国防、尖端技术等高科技领域,可靠性受重视的程度越来越高。美国“挑战者”号航天飞机失事、前苏联切尔诺贝利核电站泄漏等不可靠事件的发生,轰动全球,令人震惊;而1957年前苏联第一颗人造卫星发射成功、1969年美国阿波罗11号宇宙飞船载人登月又是运用可靠性技术获得成功的典范。这些事实进一步说明高新技术的发展更需要以可靠性技术为基础。

1.1.1 可靠性的定义和学习本课程的目的

1966年,美国军用标准 MIL-STD-721《可靠性维修术语定义》中给出了最早的可靠性定义,即“产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力”。该定义已为世界各国的标准引用,我国1982年的国家标准中对可靠性的定义也与此相同。由于上述定义只反映了成功完成任务的能力,在实际应用中有局限性,于是,1980年美国按《国防重要武器系统采办指令》(DODD5000.40指令)颁布了 MIL-STD-785B《系统与设备研制的可靠性大纲》。在这个大纲中将可靠性分为任务可靠性和基本可靠性。任务可靠性定义为“产品在规定的任务剖面内完成规定任务的能力”,它说明了产品执行任务成功的概率,只统计危及任务成功的致命故障。基本可靠性定义为“产品在规定条件下,无故障的持续时间或概率”,它包括了全寿命单位的全部故障,也反映了产品维修人力和后勤保障等要求。我国1988年颁布的国家军用标准 GJB 450—88《装备研制与生产的可靠性通用大纲》已引用了这两种新的可靠性定义。按不同用途把可靠性概念分为两种,是对以往的可靠性工作实践经验的总结,也是对这一问题认识的深化,是可靠性工作的一个新的重要发展。

可靠性研究的对象是产品。所谓的产品是相当广泛的,可以是元器件、组件、零部件、机器、设备及各种系统。研究可靠性问题,不仅要明确具体的产品,而且还应明确它的内容和性质。若研究对象是一个系统,则不仅包括硬件,也应包括软件和人的判断、操作在内。

产品的可靠性与“任务剖面”、“规定条件”密切相关,所谓“任务剖面”、“规定条件”是指产品在执行任务期间或使用、储存、运输时的环境条件、使用条件、维护条件、承载条件及工作方式等,如温度、湿度、气压、风、沙、工业气体等气候条件,又如高山、海上、空中、室内、野外等地域条件。承载条件包括力学的、电学的、光学的等,工作方式可分为连续工作的或间断工作的。同一产品在不同条件下,它的可靠性是不同的。

产品的可靠性是时间的函数,与规定的使用期限关系密切。通常,元器件经过筛选和整机跑合后,产品的可靠性水平将有一个较长时间的稳定使用或储存阶段,在此之后,便随着时间的增长而降低。因此,对时间性的要求一定要明确。“规定的时间”是指产品的规定工作期限,可以用时间或其他相应指标(如里程、周期、次数等)来表示。

产品的“规定功能”就是产品的性能指标。一般来说,“完成规定功能”是指产品在规定的使用条件下能完成所规定的正常工作而不失效或指产品在规定的功能参数下运行。“规定功能”是指产品若干功能的全体,如电阻器的阻值、功率、精度,晶体管的放大倍数、反向漏电流等,计算机的运算速度、字长、容量、指令数,雷达的探测距离、分辨力、测角测速精度、频率范围、脉冲峰值、功率、跟踪精度,通信机的频率范围、输出功率、通信距离、调制制度、信道、保密性、兼容性等。

在清楚产品应具有的功能的同时,还应明确产品丧失功能(失效)的判别准则。可修复的产品失效称为故障。产品的功能有主次之分,故障也有主次之分。有时,次要故障不影响产品的主要功能,所以也不影响完成主要功能的可靠性。

可靠度是可靠性的数量指标。将数理统计与概率论引入可靠性研究中,使得可靠性研究进入定量阶段,才有现今的可靠性工程的发展。

产品运行时的可靠性称为工作可靠性,它包括固有可靠性和使用可靠性。固有可靠性指在生产过程中已经确立了的可靠性,是产品的内在可靠性,它与产品的材料、设计、制造工艺及检测精度等有关。使用可靠性与产品的使用条件相关,受使用环境、操作水平、维修保养及使用者的素质等因素的影响。

学习本课程的目的是:掌握可靠性的基本概念、原理和计算方法等基本知识;结合工程实际,掌握可靠性基本理论和分析解决工程实际问题的基本方法;初步了解可靠性试验的类型、试验方案设计的基本方法以及可靠性维修的基本知识,为进行电子设备可靠性工程进一步研究和实际应用打下基础。

1.1.2 可靠性理论的研究领域

可靠性问题的研究是从第二次世界大战开始的。据有关统计,当时雷达系统中的电子设备,只有 30% 的时间能有效工作,这迫使人们开展对可靠性的正规研究。在科学实验、生产实践及日常生活各个方面,可靠性理论都具有重大意义。可靠性理论形成了以下三个重要领域或三个独立学科。

1) 可靠性数学

可靠性数学是研究可靠性的理论基础。它着重研究解决各种可靠性问题的数学方法及数学模型,研究可靠性的定量问题;主要数学手段有概率论、数理统计、随机过程、运筹学、拓扑学等数学分支;应用于数据收集、数据分析、系统设计及寿命实验中。

2) 可靠性物理

可靠性物理又称为失效物理。它从机理、失效本质方面研究产品的不可靠因素,研究失效的物理原因与数学物理模型、检测方法及纠正措施等,如研究机械零件的疲劳损伤、裂纹的形成和扩展规律等,从而为研制、生产高可靠性产品提供理论依据。

3) 可靠性工程

可靠性工程是指为了达到产品可靠性要求而进行的有关设计、试验和生产等一系列工作。可靠性工程包括对零件、部件、装备和系统等产品的可靠性数据的收集、分析。可靠性设计、预测、试验、管理、控制和评价,是系统工程的重要分支。

1.1.3 电子设备可靠性工程的特点

电子设备可靠性工程是研究电子产品可靠性的评价、预测、分析和提高可靠性的技术。电子产品包括电子元件、器件、设备和系统,1970年以后又包括了软件系统。可靠性工程应用概率论和数理统计方法研究产品故障时间分布、分布类型和分布参数,从而提出一系列评价产品可靠性特征的指标、计算和试验方法,解决产品在研制、设计、制造、试验和使用各阶段可靠性保证的工程应用问题。可靠性分析和预测研究设备、系统可靠度和有效度的分析、预测理论和方法,以及应力条件等各种因素对产品可靠性的影响,对于电子元件、器件,是应用失效物理学对影响产品失效的物理、化学过程进行定性、定量分析,确定这些过程与应力和时间等各种因素的依赖关系,并鉴定证实其失效模式和失效机理,为改进和提高产品可靠性提供依据。

机电一体化电子设备是电子、机械、光学、声学、控制理论等有机结合的电子设备或系统,例如雷达天线及其伺服系统、计算机、飞机、宇宙飞船、洲际导弹、卫星及发射系统等。它们都具有电子系统、机械系统、光学系统等,因而其可靠性具有复杂性与特殊性,需要综合机械、电子、光学等各个方面,不仅要计算电子元器件及其组成的电子线路方面的可靠性,还要考虑机械刚度、强度、精度、密度以及腐蚀和内应力造成的变形对可靠性的影响。

严格讲,当代任何设备或仪器、系统必然是机、电、光结合的。因此,机、电、光的综合系统的可靠性研究,是一个亟待发展的重要课题。

1.1.4 产品质量、费用与可靠性的关系

当代的质量观念,既重视产品“符合规定要求”的“符合性”要求,更强调产品的“适用性”要求,也就是说,只有产品在使用时能成功地适合需要才是高质量的。需要是多方面的,所以产品质量是产品满足规定或潜在需要特性的总合。一个好的产品不仅要具备所需要的性能(固有能力),而且还要能长期保持其性能,在使用中无故障、少故障,出现故障易修理,功能恢复迅速,使用安全,易于保障。产品的质量包括产品的性能、可靠性、维修性、安全性、适应性、经济性及时间性。性能、可靠性(含维修性)、安全性和适应性是产品的内在质量特性,经济性和时间性则是产品的外延特性。所以,可靠性是产品的基本质量指标之一,是产品质量的重要组成部分。只有当产品引进了可靠性指标后,才能与产品的其他质量指标一起,对产品的质量作出全面的评定。

可靠性指标与其他质量指标(技术性能)既有联系又有区别。可靠性是“用时间尺度来描述质量”的指标,它反映在使用条件下产品质量的时间效应,即:对一批产品,使用到一定时间时,产品不出故障的百分比;对同一件产品,使用到一定时间时不出故障的百分比。产品的可靠性数据是对以往相同产品进行大量试验和现场调查,再进行统计估算获得的;而技术性能指标则说明该产品在出厂时的质量状态,它可通过各种仪器直接测出来。若产

品不可靠, 技术性能再好也得不到发挥; 若产品的技术性能低劣, 它的可靠性肯定也很差。

从经济的观点来看, 为了减少维修费用, 提高产品的利用率, 提高产品的可靠性是非常必要的。但可靠性与总的消耗费用要受到产品的设计和生费用、使用费用及维修费用的制约, 应综合考虑, 优化选择。从图 1-1 可以看出, 在 A 点前, 提高产品可靠性可以有效地减少维修费用, 而为了提高可靠性, 设计和生费用当然也会有所增加, 总费用呈下降趋势; 在 A 点后, 再提高可靠性, 需采取特殊措施, 必然使设计和生费用迅速上升, 使用费用、维修费用虽然继续下降, 但总的费用呈上升趋势。显然, A 点附近是优选区域。

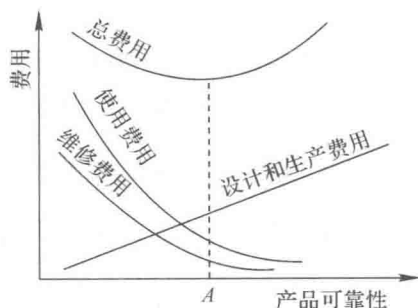


图 1-1 可靠性与费用的关系

显然, A 点附近是优选区域。

1.2 可靠性技术发展简介

可靠性技术的发展始于第二次世界大战, 概括起来可分为三个阶段。

第一阶段(从 20 世纪 40 年代至 1957 年)是可靠性研究起步阶段。美国的可靠性研究最早, 早期研究重点放在故障率很高的电子管方面, 在研究电子管电性能的同时, 注重其耐振、耐冲击等可靠性的研究。1942 年美国麻省理工学院对真空管的可靠性进行了深入研究。1952 年美国成立了电子设备可靠性顾问团(Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment, AGREE), 该团由科学、技术、生产和经营方面的权威人士组成, 对电子产品的设计、试制、生产、试验、储存、运输、使用等各个方面的可靠性问题都进行了全面的调查研究, 并于 1957 年 6 月发表了《军事电子设备的可靠性》报告。该报告全面论述了产品在各环节中的可靠性问题, 较完整地介绍了可靠性的理论基础及研究方法, 为可靠性的研究和发展奠定了基础。

第二阶段(从 1957 年至 1962 年)是制定军用规格、标准, 进行统计试验阶段。此阶段建立了可靠性标准体系基础, 并对可靠性环境试验到生产过程进行全面质量管理。20 世纪 60 年代以来, 空间科学与宇航技术的发展, 提高了可靠性的研究水平, 扩展了其研究范围, 并取得了可喜的成果。日本、英国、前苏联也都开始了对可靠性理论及应用的研究, 对可靠性的研究已经由电子、航空、宇航、核能等尖端部门扩展到电机、电力、机械、动力、土木等各个领域。

1958 年日本科学技术联盟设立了可靠性研究委员会。

1962 年美国召开了第一届可靠性与可维修性会议(此后每年举行一次)。同年美国还召开了第一届电子设备故障物理学术会议(以后也是每年举行一次)。这些会议的成果将可靠性的研究扩展到对可维修性的研究, 并深入到了了解产生故障的机理方面。这一年, 英国出版了《可靠性与微电子学》杂志。法国国立通讯研究所也在这一年成立了“可靠性中心”, 进行数据的收集与分析。

第三阶段(1968 年以后)是可靠性保证阶段, 即全面实现以可靠性为中心的管理阶段。该阶段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《电子设

备可靠性预计手册》、MIL-STD-781《工程研制、鉴定和产品可靠性试验》和 MIL-STD-785《系统与设备的可靠性大纲要求》。在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,使电子设备的可靠性有了大幅度提高。在这个阶段,日本全面引入美国的可靠性技术,推行全面质量管理,获得了巨大效益,使其产品在世界市场上占据重要地位。

提高产品的可靠性已成为当今提高产品质量的关键。可以预见,今后只有那些高可靠性的产品及其企业,才能在竞争日益激烈的世界上生存下来。现代生产中,已将可靠性技术贯穿于产品的开发、设计、制造、试验、使用、运输、储存、保管和维修保养之中。进行可靠性设计,能有效地利用材料,减少加工工时,得到体积小、重量轻的产品。因此,国外已把可靠性研究工作提高到节约能源的高度来认识。

近半个世纪的可靠性技术的发展,可概括成如下几个方面:

(1) 从重视产品性能、轻视可靠性,转变为树立可靠性、费用及性质同等重要的概念,实现了观念转变。

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

(3) 在电子元器件方面,从电子管失效机理的研究发展到对超高速集成电路的研究,使电子元器件可靠性以每年平均约 20% 的速度在提高。

(4) 从电子设备的可靠性研究发展到重视机械设备、光电设备及非电子设备的可靠性研究,以全面提高产品的可靠性。

(5) 从只重视硬件可靠性研究发展到硬件、软件并举,以确保大型复杂系统的可靠性。

(6) 从重视可靠性宏观统计试验发展到强调微观分析、重视可靠性工程试验,以便更准确地确定产品的故障模式、可靠性及寿命。

(7) 从定性的可靠性分析设计发展到计算机辅助定量分析,大大提高了可靠性设计水平。

(8) 从以固有值作为产品的可靠性指标发展到以使用值作为指标,确保产品在使用条件下具有规定的可靠性水平。

(9) 从分散、部门管理发展到统一、集中的可靠性领导机构管理,完善了管理体系。

我国的可靠性工程起步于 20 世纪 60 年代,到 80 年代才有所发展,并取得了不少成就。

随着科学技术的进步,系统、设备日益复杂化,使用环境日趋恶劣,提高产品的可靠性、维修性势在必行,未来产品会对可靠性和维修性提出更高要求。因此,国家及各部门都十分重视这一工作。

1980 年以来,我国颁布了一系列有关可靠性方面的国家标准和国家军用标准、规范等,形成了法规性文件,对推动与可靠性和维修性相关的各项活动的法制化、规范化起到了重要作用。

在对现役设备、武器装备延长寿命和维修方法改革方面,以及在对新研制设备进行可靠性设计、加工、管理等方面,我国由于运用了可靠性理论,均取得了显著的社会效益和经

济效益。我国的可靠性信息系统建设发展迅速，尤其是在航天和航空领域中实行了质量监控，使系统及设备的可靠性得到增长。

我国的可靠性基础研究及学术活动十分活跃，为推动我国的可靠性理论发展做出了贡献。

由于起步晚，基础薄弱，我国的可靠性技术水平与世界先进水平相比差距甚大。为赶超世界先进水平，迅速提高我国的可靠性和维修性技术和管理水平，还需要不懈的努力。

1.3 电子设备可靠性与维修性的基本内容

1.3.1 可靠性工作的基本内容与特点

可靠性工作是一个复杂的系统工程，是根据可靠性工程学基本理论，为提高产品可靠性，对人-机-环境进行综合研究与控制的工程。

可靠性工作包括可靠性工程技术与可靠性管理两个方面。一切可靠性工程技术活动都应在可靠性管理之下去规划、组织、协调、控制与监督。因此，可靠性管理在可靠性活动中应处于领导与核心地位。

可靠性的具体工作内容可参见国家军用标准 GJB 450《装备研制与生产的可靠性通用大纲》中的可靠性工作项目实施表进行，如表 1-1 所示。

可靠性工作应该贯穿于产品寿命的全过程，它与产品的设计、制造、使用、维护、管理、人员因素和环境状况密切相关。设计、制造决定了产品的“固有可靠性”，使用、维护则能保持“使用可靠性”。因此，为提高电子设备的可靠性，需采取综合性措施。

表 1-1 可靠性工作项目实施表(引自 GJB 450)

工 作 项 目	类型	研制生产阶段			
		战术技术 指标论证 阶段	方案论 证及确 认阶段	工程 研制 阶段	生产 阶段
制定可靠性工作计划	管理	△	△	√	√
对转承制方和供应方的监督和控制	管理	△	△	√	√
可靠性大纲评审	管理	△	△ ^①	√ ^①	√ ^①
建立故障报告、分析和纠正措施系统	工程	×	△	√	√
故障审查及组织	管理	×	△ ^①	√	√
建立可靠性模型	工程	△	△ ^①	√ ^①	O ^①
可靠性分配	计算	△	√	√	O ^①
可靠性预计	计算	△	△ ^①	√ ^①	O ^①
故障模式、影响及危害度分析	工程	△	△ ^①	√ ^①	O ^①
潜在电路分析	工程	×	×	√ ^①	O ^①
电子元器件和电路的容差分析	工程	×	×	√	O

续表

工作项目	类型	研制生产阶段			
		战术技术指标论证阶段	方案论证及确认阶段	工程研制阶段	生产阶段
制定元器件大纲	工程	△	△ ^①	√ ^①	O ^①
确定可靠性关键件和重要件	管理	△ ^①	△ ^①	√	√
确定功能测试、包装、储存、装卸、运输、维修对可靠性的影响	工程	×	△ ^①	√	O
环境应力筛选	工程	×	△	√	√
可靠性增长试验	工程	×	△ ^①	√ ^①	×
可靠性鉴定试验	计算	×	△ ^①	√ ^①	√ ^①
可靠性验收试验	计算	×	×	△	√ ^①

符号说明：管理——可靠性管理；工程——可靠性工程；计算——可靠性计算；√——适用；O——仅设计更改时适用；△——根据需要选用；×——不适用。

① 要综合考虑费用效益或其他标准要求后确定。

1.3.2 产品各阶段的可靠性工作

产品的可靠性工作阶段可划分为论证阶段、方案阶段、工程研制阶段、设计定型阶段和生产定型阶段，共五个阶段。

1. 论证阶段

此阶段应根据设备的使命、对象确定设备特点和使用要求，同时也应该提出可靠性与维修性的定性要求。

根据设备的特点与使用要求确定其寿命剖面和任务剖面，同时也要确定设备的使用环境剖面，这些条件是确定可靠性与维修性定量指标、可靠性与维修性指标验证方法及方案，以及确定可靠性与维修性保证大纲、可靠性设计准则与规范，进行可靠性与维修性设计评审及确定工程制造的可靠性保证工艺等的依据。

可靠性与维修性定量指标包括系统(设备)完好性、任务成功性、平均维修时间(MTTR)的定量要求、平均故障间隔时间(MTBF)的定量要求及维修人力费用和后勤保障费用等。同时，在论证阶段应拟制出可靠性与维修性指标要求及其依据的分析报告。

在形成初步技术指标与可靠性指标后，需进行可靠性与维修性指标及实现的可行性论证，包括：对可靠性与维修性指标体系、指标要求的必要性进行论证；对可靠性与维修性指标的可行性进行论证；对相似设备的比较及达到可靠性与维修性指标的途径、方法、措施等进行论证。

针对论证所确定的技术指标，应制定出验证方法及要求。同样，对可靠性与维修性指标的论证，也应拟定出验证方法及要求，如可靠性与维修性试验大纲、可靠性与维修性试验计划、可靠性与维修性鉴定与验收试验方案、可靠性试验参数、失效判据、失效分析与处理等，都应列入产品研制任务书或合同中。

论证后,应提出初步的设计方案及满足可靠性与维修性要求的可靠性方案构思,如方案简化设计、技术成熟性方案设计、冗余方案及系统环境适应性方案设计、系统功能框图及可靠性框图等。在该过程中还必须对设备技术性能、可靠性与维修性进行权衡和评审。

2. 方案阶段

在此阶段,按我国国家军用标准 GJB 450《装备研制与生产的可靠性通用大纲》及 GJB 841《故障报告、分析和纠正措施系统》的规定,产品设计师必须提出产品的故障报告、分析与纠正措施,简称 FRACAS,其目的是及时发现故障和故障原因,经过认真分析制定和实施有效的纠正措施,防止再出故障,以改善和提高产品的可靠性和维修性。此项工作应贯穿于产品的全寿命周期中。

在初步方案构思的基础上,拟定较为详细的设计方案,并进行技术方案论证、可靠性与维修性方案论证。可靠性与维修性论证报告内容包括:可靠性和维修性与经济性、技术性的综合论证及择优方案,能满足合同要求的可靠性与维修性指标的优化方案,后勤保障系统、维修等级及其他约束条件的最佳构成方案及由于采用新技术对可靠性与维修性影响的风险,寿命周期费用的综合权衡方案及完成规定功能的优化方案等。

经过论证确立了设计方案,也就确立了系统的模型,为建立可靠性模型打下了基础。建立可靠性模型是可靠性工程的重要工作之一,为可靠性指标的预计和分配、可靠性设计及可靠性分析做好了准备。

3. 工程研制阶段

工程研制阶段主要进行技术设计,为设计定型做准备。对于大型复杂产品,为了减小研制与生产的风险,通常增加样机的研制与性能试验、环境适应性试验及可靠性摸底试验。对于不进行试验样机研究的产品,应加强对方案中的关键技术进行研究。可靠性与维修性的关键设计与分析研究工作包括:电路动态设计,电路环境适应性设计,软件可靠性设计,电路容差分析,潜在电路分析,失效模式、影响及致命度分析(简称 FMECA),故障树分析(简称 FTA),计算机辅助设计,元器件可靠性应用研究,关键、主要件制造工艺研究等。

研制阶段中制定可靠性与维修性保证大纲、质量保证大纲和元器件大纲是一项重要的工作。制定可靠性与维修性保证大纲主要是在研制阶段,尤其是在技术设计中实施;质量保证大纲则主要是在制造过程中进行质量控制。

随着产品研制的进展,需要不断对这三个大纲进行修订、补充和完善。随着产品的研制过程,可靠性模型也将不断被修改、完善与细化。

系统可靠性模型是可靠性与维修性指标分配、预计与分析的基础,模型建立得越正确、越详细,对可靠性与维修性指标分配、预计与分析得就越准确。

同时,此阶段需将系统构成模型进行分解,落实到分系统及单元中,即开展技术设计,确保达到系统的性能指标。

4. 设计定型阶段

产品设计定型是对产品性能进行全面考核的主要形式,以确认其达到研制任务书的要求。该阶段也是实施可靠性试验和可靠性增长管理的主要阶段。其主要工作有:设计定型样机、定型样机制造、技术鉴定试验、技术设计审查和设计定型评审。

5. 生产定型阶段

生产定型是在批量生产条件下进行全面考核的主要形式,用以确认其符合批量生产的标准。通过小批量生产、验收试验及使用后才能进行生产定型。

机电一体化的电子设备产品,通常可按电子电路系统、机械系统、光学系统分别处理。电子电路及电子元器件的失效分布通常遵循指数分布,利用已有的同样环境和使用条件的失效数据进行可靠性分析与预测。

对机械系统,则应根据长期积累的故障教训,制定出不同情况下的设计准则。只要遵守这些设计标准和准则设计机械系统,就能间接地得到可靠性保证。

第2章 可靠性的主要数量特征

前面介绍了可靠性的定性的概念,在工程中只有定性的概念是不够的,还必须有定量的参数,用来表示可靠性水平的高低,以便在用户和生产方签订合同时提出和商定适当的可靠性指标。生产方在设计时将可靠性指标设计到产品中,奠定产品的固有可靠性,并在生产中通过各种手段来保证产品的固有可靠性。可靠性指标使生产方在设计阶段就可以预计产品是否能满足用户要求,缩短研制周期,并且可以预计维修周期、维修所需的备件等。

定量表示可靠性水平的参数通常又叫做可靠性特征量。

对于不可维修产品来说,可靠性特征量有可靠度、不可靠度、失效率、失效概率密度、平均寿命和可靠寿命等;对可维修产品来说,可靠性特征量除上述几种外还有维修度、维修率、维修密度、平均维修时间和可用度等。

本章将介绍可靠性主要特征量的概念和计算方法,以及可靠性主要特征量之间的关系。

2.1 可靠性特征量

2.1.1 可靠度与不可靠度

可靠度(reliability)是产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的概率。一般将可靠度记为 R ,它是时间 t 的函数,故也记为 $R(t)$,称为可靠度函数。就概率分布而言,它又叫可靠度分布函数,且是累积分布函数。它表示在规定的使用条件下和规定的时间内,无故障地发挥规定功能而工作的产品占全部工作产品(累积起来)的百分率。因此可靠度 R 或 $R(t)$ 的取值范围为

$$0 \leq R(t) \leq 1 \quad (2-1)$$

若“产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能”这一事件 E 的概率以 $P(E)$ 表示,则可靠度作为描述产品正常工作时间(寿命) T 这一随机变量的概率分布可写成

$$R(t) = P\{E\} = P\{T \geq t\} \quad 0 \leq t \leq \infty \quad (2-2)$$

对于不可修复的产品,可靠度的观测值是指直到规定的时间,能完成规定功能的产品数与在该区间开始时刻投入工作的产品数之比,即

$$R(t) \approx \frac{N_s(t)}{N} = 1 - \frac{N_f(t)}{N} \quad (2-3)$$

式中: N 为开始时刻投入工作产品数; $N_s(t)$ 为到 t 时刻完成规定功能产品数,即残存数; $N_f(t)$ 为到 t 时刻未完成规定功能产品数,即失效数。