

电子可靠性工程

系统设备的可靠性理论与实践

陈炳生 主编

内 容 简 介

本书介绍了电子可靠性工程中的基础理论和行之有效的可靠性保障技术。上篇共分十章，按总体设计程序介绍了可靠性工程的数学基础、总体设计、费用设计和试验规则等。下篇共分十七章，按具体设备的设计和研制程序从方案、元器件选用、电路、结构及工艺等各个方面介绍了可靠性的保障技术。最后一章介绍如何组织和实施可靠性管理以及在管理过程中如何应用前述各章中的技术。本书既有理论的纵深又有工程实践的指导原则。与其它同类著作相比，本书具有工程实用性强的突出特点。它给出了许多工程实用的数据资料，便于查阅使用。

本书可供从事电子及机电产品设计和制造的工程技术人员作进修教材或设计手册使用，同时也可作为大专院校的教学参考书。为教学方便，本书还配有录像带。

电 子 可 靠 性 工 程

系统设备的可靠性理论与实践

陈炳生 主编

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张29 668千字

1987年5月第一版 1987年5月第一次印刷 印数：0,001—2,350册

统一书号：15034 3180 定价：5.90元

主编 陈炳生

审稿 董志鹏

执笔

第一章 陈炳生
第二章 陈炳生 章治本
第三章 章治本 陈炳生
第四章 章治本
第五章 章治本
第六章 陈炳生 夏忠 章治本
第七章 陈炳生
第八章 陈根座
第九章 陈炳生 夏忠 刘守勤
第十章 彭景先
第十一章 陈炳生
第十二章 周德昌
第十三章 徐立生
第十四章 陈炳生

第十五章 陈炳生 刘宝瑛
第十六章 刘宝瑛
第十七章 陈炳生
第十八章 章治本
第十九章 叶平光
第二十章 高时明
第二十一章 陈根座
第二十二章 陈炳生 高时明
第二十三章 刘守勤 陈根座
第二十四章 陈炳生
第二十五章 陈炳生
第二十六章 陈炳生 章治本
第二十七章 夏忠

责任编辑 贾山

序

电子技术在国民经济中的应用日益广泛。随着电子技术的迅猛发展，可靠性理论与技术在产品设计与工程实践中的应用也得到了日益广泛的重视。可靠性工程在我国经历了约三十年曲折发展的道路，现在，它在理论研究、工程设计以及实践方面都有了一定的基础，并且已经进入到可靠性定量控制阶段。

在电子和信息产业将其服务重点转移到为发展国民经济、为四化建设、为整个社会生活服务的轨道上来的今天，可靠性理论与技术的应用的重要性在提高产品质量、增加经济效益以及赢得产品信誉和占领国内外市场等方面日益突出。许多工厂、研究部门不仅重视了产品的可靠性设计，而且已把可靠性工作纳入计划管理与技术管理之中。因此，可靠性理论与技术已成为从事电子技术的工程设计及质量管理人员所必备的知识。

本书是在总结了几代军事系统工程设备研制中的可靠性工作经验的同时又消化了国内外许多新的资料的基础上编写而成的。它偏重于工程应用，特别强调理论与实践的密切结合。它试图为工程设计人员和质量管理人员提供一把直接解决工程实际问题的钥匙。

纵观全书，在理论上它有一定的深度，同时又有实际设计与应用的指南与守则。它对当前这门学科所涉及的诸多问题在理论上作了简明的综合叙述。更重要的是这本书对设计技术、试验技术以及诸如工艺、筛选、价格、管理等多方面的工程实际问题作了较为详尽的阐述，它可以作为工程技术人员以及质量管理人员的可靠性工作手册。这本书在实用性方面有其突出的特点，选材也有许多新颖之处。

由于该书系多人合作写成，因此在风格上还不尽和谐，各章间有粗细、浓淡、繁简之差异。但这在许多作者执笔的情况下也是很难避免的。

相信这本书的出版和发行将对我国电子及其他行业可靠性工作的提高能起到重要的推动作用。

电子工业部副部长谢高觉

一九八五年九月三日

前 言

目前,随着工业、军事和民用等部门对电子产品的质量要求日益提高,电子系统的可靠性问题受到了越来越广泛的重视。小至电视机,大到导弹、卫星的控制系统以及计算机通信网络,如果不进行以可靠性为中心的全面质量管理,它们的质量就无法保证。因此,可靠性工程已经成为系统工程的一个重要的组成部分。

关于可靠性工程的实践有两个基本问题要解决:一是可靠性工程应该抓什么项目?二是这些项目应如何去做?第一个问题现在已有不少书籍论述。第二个问题,特别是从工程实践出发系统地讨论可靠性工程的专著,在国内尚不多见。为了适应国内可靠性工程的需要。在电子工业部的大力支持和帮助下,经过电子工业部二十七所、雷达局系统工程部、十三所以及五十四所四个单位的十一位有长期工程实践经验的作者的通力合作,将我国电子系统与设备的可靠性工程技术问题加以总结并写成此书。力求结合我国的国情重点论述和回答上述第二个问题。

本书按产品研制的一般程序讨论。上篇介绍系统总体的可靠性工程以及相应的可靠性专题技术。下篇介绍产品在研制生产中的可靠性保障技术,大体按照电路、结构、工艺、评审和管理几大部分顺序安排。这样,结合工程实践查阅方便。本书的每一章都有一定的独立性,可分别供设计参考。关于各章的内容特点,读者可看§ 1.4。其实,可靠性保障技术的很多题目都可以分别写成一部专著,因此,我们要将诸多内容压缩成一本书是十分困难的。尽管我们竭力想结合国情向读者提供比较系统的结合实际的工程方法,但是,能否满足读者的要求还有待广大读者评论。

本书之所以能较快地完稿,是和电子工业部的大力支持分不开的。电子工业部谢高觉副部长十分关心并大力支持本书的编写工作,特为此书作序。电子工业部副总工程师童志鹏教授在百忙中仔细审阅了全部书稿并提出许多宝贵意见。何国伟同志对本书的内容提出过指导性的建议。质量司为本书的编写和迅速出版提供了许多方便条件,其中陈章豹同志为本书的出版作了许多工作。电子工业部雷达局质量处,电子工业部二十七所领导对本书的编写工作都给予了有力的支持。二十七所许多同志为收集资料、整理文稿做了许多有益的工作。如果没有以上各方面的支持,则本书很难在这样短的时间内与读者见面。为此,我们谨对以上单位和同志表示深切的谢意。

目 录

上篇 系统可靠性模型与可靠性设计	
第一章 概论	2
§ 1.1 可靠性工程是现代工程师的必修课	2
§ 1.2 可靠性工程的历史	2
§ 1.3 可靠性工程的内容	4
§ 1.4 本书的结构及特点	4
参考文献	6
第二章 可靠性指标及常用概率分布	7
§ 2.1 引言	7
§ 2.2 常用定量指标的建立	8
2.2.1 概率与可靠性	8
2.2.2 瞬时失效率	9
2.2.3 可靠度函数的一般表达式	9
2.2.4 可靠度的图示表示	9
2.2.5 失效率曲线	9
2.2.6 平均寿命、MTTF 与 MTBF	10
2.2.7 平均维修时间 (MTTR)	11
2.2.8 有效度	12
§ 2.3 常用的概率分布	12
2.3.1 二项分布 (贝努利分布)	12
2.3.2 泊松分布	13
2.3.3 正态分布 (高斯分布)	14
2.3.4 对数正态分布	14
2.3.5 威布尔 (Weibull) 分布	14
2.3.6 负指数分布	16
2.3.7 伽马 (Γ) 分布	16
2.3.8 贝塔 (β) 分布	16
2.3.9 自由度为 n 的 χ^2 分布	16
2.3.10 自由度为 n 的 t 分布	17
2.3.11 自由度为 (m, n) 的 F 分布	17
§ 2.4 小结	17
2.4.1 关于常用指标	17
2.4.2 关于分布函数	18
2.4.3 有关的拉普拉斯变换式	20
参考文献	20
第三章 不维修系统可靠性的模型与算法	21
§ 3.1 串联系统	21
§ 3.1.1 串联系统	21
3.1.2 一般串联系统	21
3.1.3 并联单元失效率与正常单元数有关的 情况	22
3.1.4 含公共原因失效的串联系统	22
3.1.5 二状态单元组成的串联系统	23
§ 3.2 (N, K) 系统	23
3.2.1 一般 (N, K) 系统	23
3.2.2 三状态单元组成的 (N, K) 系统	24
3.2.3 含公共原因失效的情况	25
§ 3.3 旁行系统 (非工作储备系统)	25
3.3.1 旁行 $(N, 1)$ 系统	25
3.3.2 计入单元旁行失效的旁行 $(2, 1)$ 系 统	27
3.3.3 同单元旁行 (V, K) 系统	27
§ 3.4 混合串-并与混合并-串系统	28
3.4.1 混合串-并系统	28
3.4.2 混合并-串系统	28
3.4.3 举例	29
§ 3.5 复杂系统	29
3.5.1 全概率公式	29
3.5.2 典型的复杂系统	30
3.5.3 桥式系统	30
3.5.4 二状态单元组成的复杂系统	31
§ 3.6 网络系统	31
3.6.1 割集法	31
3.6.2 扎集法	32
§ 3.7 不维修系统可靠性的马尔科夫模 型及其算法	34
3.7.1 马尔科夫模型	34
3.7.2 单机系统	35
3.7.3 旁行 $(N, 1)$ 系统	36
3.7.4 建立尽可能少的状态数	37
3.7.5 简化	38
参考文献	38
第四章 可修复系统可靠性的模型与算法	39
§ 4.1 马尔科夫模型与算法	39
4.1.1 单机系统	39
4.1.2 串联系统	39
4.1.3 二单元冗余单元	40
4.1.4 同单元 (V, K) 或旁行 (N, K) 系统	41

4.1.5 多态单元可修复系统	43	6.4.4 提高薄弱环节的可靠度分配法	77
4.1.6 复杂修理过程的情况	43	6.4.5 按各分系统的可靠度预测值进行可靠度分配的方法	78
4.1.7 可修复随机服务系统	49	§ 6.5 可靠度分配的优化	80
§ 4.2 补充变量法	59	参考文献	87
4.2.1 单机系统	59	第七章 维修度的要求、预计和分配	82
4.2.2 同单元(2, 1)系统	52	§ 7.1 引言	82
4.2.3 二单元系统	53	§ 7.2 数学模型和基本方法	82
4.2.4 带一同样备件的同单元(N, N)系统	54	§ 7.3 可维修性指标的提出	86
参考文献	55	§ 7.4 维修度预计	87
第五章 预防性维修系统可靠性的模型与算法	56	7.4.1 评分法	88
§ 5.1 一般概念	56	7.4.2 内插法	88
5.1.1 预防性维修与修复性维修	56	7.4.3 检验表法	89
5.1.2 基本的预防性维修方针	56	7.4.4 时间组合法	89
§ 5.2 预防性维修系统可靠性的算法	56	7.4.5 模拟法	92
5.2.1 可靠度的算法	56	§ 7.5 维修度分配	92
5.2.2 瞬时失效率的特征	57	7.5.1 预计分配法	92
5.2.3 平均寿命的算法	57	7.5.2 加权分配法	92
5.2.4 预防性维修系统的近似可靠度	55	§ 7.6 小结	95
5.2.5 预防性维修的改进因子	58	参考文献	95
5.2.6 举例	58	第八章 可靠性费用设计	96
§ 5.3 最优维修周期	59	§ 8.1 引言	96
5.3.1 最优的含义	59	§ 8.2 寿命周期费用	96
5.3.2 最优维修周期的方程式	60	8.2.1 寿命周期费用组成	96
§ 5.4 第二种预防性维修方针	62	8.2.2 寿命周期费用估算	98
5.4.1 第二种预防性维修方针的定义	62	§ 8.3 最佳可靠性投资模型	102
5.4.2 第二种预防性维修方针的最优维修周期	62	8.3.1 可靠性投资与寿命周期费用的关系	102
参考文献	63	8.3.2 最佳可靠性投资模型(RIO)	104
第六章 可靠度的要求、预计与分配	64	§ 8.4 可靠性投资的综合权衡	106
§ 6.1 引言	64	8.4.1 ARM与CRM特性曲线	107
§ 6.2 可靠度指标的提出	64	8.4.2 有效度、可靠性和可维修性的综合权衡	108
§ 6.3 可靠度预计	66	§ 8.5 解题程序举例	109
6.3.1 可靠度预计的目的与方法	66	本章部分术语解释	109
6.3.2 元器件失效率的预计	66	参考文献	111
6.3.3 心理预测法	69	第九章 抽样试验原理与方案设计	112
6.3.4 相似系统法	70	§ 9.1 经典方案	112
6.3.5 有源单元估算法	70	9.1.1 点估计原理(最大似然法)	112
6.3.6 元器件计数法	71	9.1.2 χ^2 区间估计原理	114
6.3.7 功能预计法	71	9.1.3 序贯区间估计原理	116
6.3.8 元器件应力分析预计法	71	9.1.4 0_01_1 与设计指标MTBF值的关系	119
6.3.9 设备变换使用环境的可靠度预计	71	§ 9.2 常用的可靠性试验方法	119
§ 6.4 可靠度指标分配	72	9.2.1 试验分类	119
6.4.1 等分配法	72	9.2.2 失效判据	119
6.4.2 加权分配法	73		
6.4.3 代数分配法	75		

9 2 3 试验的基本程序	120	§ 13 1 引言	157
9 2 4 可靠性寿命试验报告内容	121	§ 13 2 筛选的基本原理	157
§ 9 3 贝叶斯抽样试验原理及方法	121	13 2 1 筛选的必要性	157
9 3 1 μ 估计	121	13 2 2 筛选的基本原理	158
9 3 2 区间估计	124	13 2 3 筛选效果分析	158
参考文献	125	§ 13 3 筛选方法和应力条件的选择原则	159
第十章 可靠性增长试验方案设计	126	§ 13 4 常用的筛选项目及其效果	160
§ 10 1 引言	126	§ 13 5 半导体器件筛选方案设计	162
§ 10 2 可靠性增长试验的准备工作	127	13 5 1 二极管筛选程序	163
§ 10 3 可靠性增长模型	127	13 5 2 三极管典型筛选程序	163
10 3 1 可靠性时变分析方法	127	13 5 3 半导体集成电路典型筛选程序	164
10 3 2 可靠性增长模型	128	13 5 4 结温老炼	164
§ 10 4 Duane模型的理论	130	13 5 5 峰值结温老炼	164
10 4 1 Duane模型的另一种表示式	130	§ 13 6 电阻器筛选方案设计	165
10 4 2 瞬时的(或当前的)MTBF与累积的MTBF之间的关系	130	§ 13 7 电容器筛选方案设计	165
10 4 3 Duane模型中MTBF的上限	131	13 7 1 失效模式和机理	166
10 4 4 有关Duane模型的几种表示式	132	13 7 2 非极性电容的筛选方法	166
10 4 5 增长率 m 的数值	132	13 7 3 钽电容器典型筛选程序	166
§ 10 5 Duane模型的应用	133	§ 13 8 密封继电器筛选方案设计	167
10 5 1 拟定增长模型的步骤	133	§ 13 9 电感元件筛选方案设计	168
10 5 2 试验过程中可靠性增长的估计	136	§ 13 10 接插件筛选方案设计	168
10 5 3 可靠性增长的监测	137	13 10 1 失效模式和机理	168
§ 10 6 Compertz模型的应用	137	13 10 2 筛选方案设计	169
10 6 1 Compertz曲线的拟合	138	§ 13 11 其它元器件典型筛选程序	169
10 6 2 应用举例	139	13 11 1 晶体谐振器典型筛选程序	169
参考文献	140	13 11 2 陶瓷滤波器典型筛选程序	169
		§ 13 12 小结	170
		参考文献	170
下篇 可靠性保障技术		第十四章 降额设计	171
第十一章 简化设计方案	142	§ 14 1 引言	171
第十二章 元器件的选用	144	§ 14 2 降额设计原理	171
§ 12 1 引言	144	§ 14 3 常用元器件的降额设计	172
§ 12 2 半导体器件的选用	145	14 3 1 电阻器的降额设计	173
12 2 1 分离半导体器件的选用	145	14 3 2 电容器的降额设计	173
12 2 2 集成电路的选用	146	14 3 3 半导体器件的降额设计	174
§ 12 3 电阻器与电位器的选用	146	14 3 4 电感器件的降额设计	175
12 3 1 固定电阻器的选用	146	14 3 5 继电器的降额设计	175
12 3 2 电位器的选用	149	14 3 6 接插件的降额设计	175
§ 12 4 电容器的选用	149	14 3 7 电子管的降额设计	176
§ 12 5 电感器的选用	152	14 3 8 其它元件的降额设计	176
§ 12 6 继电器的选用	153	§ 14 4 小结	176
§ 12 7 电线电缆的选用	155	参考文献	177
§ 12 8 其它元器件的选用	156	第十五章 “三次设计”及容差设计基础	178
参考文献	156	§ 15 1 引言	178
第十三章 元器件筛选方案设计	157		

§ 15.2	质量损失函数	178	§ 17.1	引言	238
§ 15.3	敏感度	180	§ 17.2	常用的防护设计	228
§ 15.4	用增量网络法作容差分析	181	17.2.1	半导体器件的防护	228
§ 15.5	用伴随网络法作容差分析	185	17.2.2	其它元件的防护设计	231
§ 15.6	其它容差分析方法及应用软件	189	17.3	瞬变过应力信号的测试	232
15.6.1	最劣值法	189		参考文献	232
15.6.2	蒙特卡罗 (Monte Carlo) 法	189			
15.6.3	试验检查法	189			
15.6.4	应用软件	189			
§ 15.7	三次设计方法的应用	191			
	参考文献	197			
第十六章	电磁兼容设计	198	第十八章	软件可靠性	233
§ 16.1	引言	198	§ 18.1	引言	233
§ 16.2	电磁干扰模型	198	18.1.1	软件在电子系统工程中的地位	233
16.2.1	干扰源	198	18.1.2	软件的寿命期	233
16.2.2	耦合方式	199	§ 18.2	软件可靠性的特点	234
16.2.3	敏感设备	200	18.2.1	软件可靠性与硬件可靠性的比较	234
§ 16.3	电磁干扰的预测	200	18.2.2	软件可靠性的实践	234
§ 16.4	系统电磁兼容设计	201	§ 18.3	提高软件可靠性的途径	235
§ 16.5	几种耦合条件的计算	204	18.3.1	“要求/技术条件”阶段	235
16.5.1	静电耦合感应	205	18.3.2	设计阶段	235
16.5.2	互感耦合感应	206	18.3.3	编码阶段	238
16.5.3	辐射电磁场感应的干扰电压	208	18.3.4	测试阶段	239
16.5.4	共阻抗耦合	209	18.3.5	维护阶段	241
§ 16.6	屏蔽设计	210	18.3.6	错误记录	241
16.6.1	静电屏蔽设计	210	§ 18.4	软件可靠性的模型	241
16.6.2	磁屏蔽设计	210	18.4.1	泊松模型	241
16.6.3	电磁屏蔽	211	18.4.2	Musa 模型	242
16.6.4	屏蔽设计实例	212	18.4.3	Je Linski-Moranda 模型	243
§ 16.7	接地设计	214	18.4.4	Mills 模型	243
16.7.1	系统与大地连接	214	§ 18.5	软件错, 硬件错还是接口错	244
16.7.2	设备之间的地线连接	216	§ 18.6	小结	245
16.7.3	设备内部的地线连接	221		参考文献	245
§ 16.8	抑制干扰源的一些方法	221	第十九章	自动故障检测设计	246
16.8.1	用金属机壳作电磁屏蔽	221	§ 19.1	引言	246
16.8.2	电网电源滤波器	221	§ 19.2	故障检测的一般概念	246
16.8.3	变压器静电屏蔽	222	19.2.1	故障和错误分类	246
16.8.4	直流电源的去耦滤波	222	19.2.2	故障检测方法	247
16.8.5	屏蔽线的接地	223	19.2.3	故障诊断的性能参数	247
16.8.6	布线的隔离	223	§ 19.3	自检查电路技术	248
16.8.7	抑制断电器的火花干扰	223	19.3.1	一般概念	248
16.8.8	其它干扰源的抑制	224	19.3.2	全自检查电路和系统	249
§ 16.9	电磁环境的安全防护	225	19.3.3	自检查电路技术的特点	249
16.9.1	电磁环境对人体的影响	225	§ 19.4	数字系统的自检查器	249
16.9.2	安全防护措施	226	19.4.1	检错编码	249
	参考文献	227	19.4.2	检查(校验)器	251
第十七章	瞬态过应力防护设计	228	19.5	数字系统的错误自检查设计	255
			19.5.1	设计基本原则	255
			19.5.2	自检查系统组成举例	255
			19.5.3	组合逻辑校验实例	256
			19.5.4	计数逻辑校验实例	257
			19.5.5	运算逻辑校验实例	259

19 5 6	数据通道校验实例	250
19 5 7	写作器件校验实例	261
§ 19 6	模拟系统故障自动检测设计	263
19 6 1	故障检测方法	263
19 6 2	故障检测多旋器	264
§ 19 7	机内测试 (BIT) 设计	266
19 7 1	BIT 结构	266
19 7 2	测试卡选择和评价	268
19 7 3	故障处理	269
19 7 4	BIT 设备的组成	275
19 7 5	BIT 性能及成本计算	276
参考文献		278
第二十章 热设计		
§ 20 1	引言	277
§ 20 2	电热模拟	277
20 2 1	热阻 R_j	277
20 2 2	热容 C_j	277
20 2 3	电网模拟法	281
§ 20 3	传导冷却	281
20 3 1	多层PCB导热	281
20 3 2	导热板与导热条	283
20 3 3	印制板的热传导	283
§ 20 4	接触热阻	284
20 4 1	元件与散热器之间的接触热阻	284
20 4 2	导热硅脂的选择与配制	286
§ 20 5	自然对流散热	286
20 5 1	边界层的基本概念	286
20 5 2	空气经过平板时的散热	288
20 5 3	自然对流时的散热	289
20 5 4	自然散热	290
20 5 5	机柜通风孔	291
20 5 6	柜式电子设备机盒的散热	293
§ 20 6	辐射散热	294
20 6 1	辐射散热原理	294
20 6 2	辐射方程式	295
§ 20 7	散热器的选择与设计	297
20 7 1	散热器的种类	297
20 7 2	散热器的选用	298
§ 20 8	强制风冷散热	300
20 8 1	风道水力计算	300
20 8 2	风道台的阻力	301
20 8 3	风机选择	302
20 8 4	风冷系统的典型形式	303
§ 20 9	强制水冷散热	305
§ 20 10	热管	309
§ 20 11	热管	311
20 11 1	热管及其工作原理	311

20 11 2	热管用于电子器件及设备的冷却	312
§ 20 12	其它特殊冷却方式	313
§ 20 13	温度测试	313
20 13 1	接触式测温	313
20 13 2	非接触式测温	313
§ 20 14	小结	315
参考文献		315

第二十一章 气候环境“三防”设计

§ 21 1	引言	316
§ 21 2	气候环境效应及其防护	316
21 2 1	气候环境条件	316
21 2 2	气候环境条件对电子产品的影响	316
§ 21 3	防潮设计	321
21 3 1	湿热环境条件	321
21 3 2	湿热环境对电子产品的危害	327
21 3 3	防潮设计原则	327
§ 21 4	霉菌的危害及其防护	327
21 4 1	霉菌的生长和传播	327
21 4 2	霉菌对电子产品的危害	327
21 4 3	防霉设计原则	332
§ 21 5	盐雾的危害及防护	331
21 5 1	盐雾的成因及传播	331
21 5 2	盐雾的作用	332
21 5 3	防护设计原则	332
§ 21 6	三防材料与工艺	333
21 6 1	三防材料选择	333
21 6 2	表面保护涂层	341
21 6 3	元件防护工艺和材料	344
参考文献		346

第二十二章 机械防振设计

§ 22 1	引言	347
§ 22 2	机-电类比分析法的理论基础	347
22 2 1	阻尼元件 R_m	347
22 2 2	质量元件 M_m	347
22 2 3	弹性元件 C_m	348
22 2 4	联接方式的类比	348
§ 22 3	机-电等效电路	349
§ 22 4	机-电类比分析	350
§ 22 5	防振设计	351
§ 22 6	现代防振设计方法	353
参考文献		360

第二十三章 电气互连技术

§ 23 1	引言	361
§ 23 2	电气互连的可靠性设计	361

23.2.1	电气互连的类型及其故障分析	361
23.2.2	电气互连可靠性设计原则	363
§ 23.3	锡焊互连	364
23.3.1	锡焊互连的可靠性设计	364
23.3.2	原理及材料选择	365
23.3.3	工艺参数选择	367
23.3.4	波峰焊接	369
§ 23.4	绕接	370
§ 23.5	压接互连	371
§ 23.6	连接器互连	372
§ 23.7	无引线片状元件互连	373
§ 23.8	高密度组装中的互连技术	375
23.8.1	再流焊	375
23.8.2	激光焊接	377
23.8.3	电子束焊接	377
§ 23.9	带状电缆和穿刺压接	378
§ 23.10	导线捆扎	379
§ 23.11	小结	379
	参考文献	380
第二十四章 可维修性、可使用性和安全性设计		
§ 24.1	引言	381
§ 24.2	人体活动范围及操作空间	382
24.2.1	我国人体的尺寸	382
24.2.2	人体数学模型与空间布置	383
24.2.3	用手操作的空间布置	384
24.2.4	用脚操作的空间布置	386
§ 24.3	人体出力特性及操纵装置安排	386
24.3.1	出力特性	386
24.3.2	动作的速度和频率	388
24.3.3	操纵机构设计	390
§ 24.4	人眼视觉特性及指示装置设计	393
24.4.1	人的视觉特性	393
24.4.2	指示装置设计	394
§ 24.5	听觉特性及其应用	396

24.5.1	人的听觉特性	396
24.5.2	声报警装置设计	397
§ 24.6	设备面板及控制台设计	398
§ 24.7	人的工作环境设计	399
§ 24.8	“三性设计”核对表	399
	参考文献	403
第二十五章 故障模型、效应及危害度分析		
§ 25.1	引言	404
§ 25.2	FMEA 的列表分析法	405
§ 25.3	FMEA 的矩阵分析法	412
§ 25.4	故障树分析 (FTA)	416
	参考文献	417
第二十六章 储备设计		
§ 26.1	引言	418
§ 26.2	简单并联储备	418
§ 26.3	串-并、并-串储备	419
§ 26.4	表决储备	421
§ 26.5	运转状态的非工作储备	422
§ 26.6	非运转状态的非工作储备	423
§ 26.7	储备设计的优化	425
26.7.1	最不可靠的分系统加一	425
26.7.2	“效益”大的级并联数加一	427
26.7.3	拉格朗日乘子法	428
26.7.4	动态规划法	430
	参考文献	433
第二十七章 电子系统可靠性管理		
§ 27.1	引言	434
§ 27.2	小批量研制性产品的管理方法	434
§ 27.3	大批量产品的管理方法	432
附表一	负指数函数表	444
附表二	$\chi^2(f, P)$ 分位点表	445
附表三	β 分布数值表	445

上 篇

系统可靠性模型与可靠性设计

第一章 概 论

§ 1.1 可靠性工程是现代工程师的必修课

可靠性就是指产品在规定的时间内,规定的条件下,完成规定功能的能力。产品的质量就是指产品满足用户要求应具备的所有特征。这里,“所有特征”主要指产品的技术性能、可靠性、适应性、经济性等。质量是指所有这些特征的综合,其中最主要的是技术性能和可靠性。比如一部雷达,它的作用距离、精确度、分辨度等技术指标都很高。这样的雷达只有当它也同时具有很高的可靠性指标时才能称为高质量的雷达。又如我国七十年代有些电视机,声、光指标并不低,但能正常工作的时间太短。有的平均故障间隔时间仅几十小时。但到八十年代,狠抓了电视机的可靠性,不少名牌电视机的平均故障间隔时间超过了四千小时,有的接近一万小时。因此,评定产品质量至少要综合技术性能和可靠性指标两个方面,而决不应片面强调技术性能而忽视可靠性。尽管工程师都希望自己设计的产品具有较高的质量,然而在实际工作中,重性能指标忽视可靠性的情况仍经常出现。

战场上,离电台几十米处的爆炸,弹片没有击中电台,强烈的振动却使电台停止工作——缺乏冲击振动防护设计。一场山洪暴发,上游通讯线路中断,下游无法得到告警情报——缺乏有效的冗余设计。舰载制导雷达中的脉冲变压器经常击穿损坏——缺乏“三防”设计。正在航行的客机,因乘客开放收录机,突然导航雷达误指偏航 10° ——缺乏电磁兼容设计……。产品中出现的这些故障给战争、政治、经济、人民生命财产带来严重危害的事件不胜枚举。随着电子产品性能要求日益提高,其构成也日趋复杂。这样,可靠性问题也就尖锐地摆在了设计师的面前。不重视可靠性的工程师是设计不出“有生命力”的产品的。上述事例中的不可靠因素似乎都是些“偶然原因”,若要认真分析,每一次故障中都包含着必然因素。可靠性工程就是要研究影响产品可靠性的各种必然因素,以达到控制产品可靠性的目的。

可靠性工程是一门涉及面十分广泛的综合性新学科。因为它涉及的技术领域十分广泛,不能只靠少数人做这项工作,也不能靠短期突击,更不能只靠自上而下地抓可靠性。要抓好产品的可靠性必须自上而下地抓,必须广泛地、全面地、全员地、全过程地开展可靠性工作。即应对所有参与产品研制、设计、生产、使用、维护及管理人员进行可靠性理论教育,开展技术交流。因此,作为一个现代工程师,可靠性工程是一门必需学习的基础课。

§ 1.2 可靠性工程的历史

可靠性问题的提出,起源于军用电子设备。第二次世界大战时,军用雷达长期处于停机待修状态。这时,可靠性问题就被提出来了。美国最早把它作为一门新学科加以研究。1952年8月,美国国防部成立了专门研究电子设备可靠性的机构“电子设备可靠性常设顾问团”,即著名的“AGREE”。苏联于1955年开始研究可靠性问题。日本从1958

年开始研究。东欧、西欧国家也大体在五十年代末至六十年代初相继开始可靠性研究工作。近三十年来，可靠性研究在国外受到了充分的重视，其发展大体上经历了以下四个阶段：

第一阶段：大体上是在1950~1957年。这个阶段的重点是深入地调查摸底，确定可靠性总体工作的内容。

第二阶段：大体上是在1957~1962年。这个阶段的重点是统计试验，定量地摸清电子元件的可靠性水平和它们在各种使用环境条件下的失效率。初步制定出一套环境试验方法和试验标准，提出了部分可靠性规范。

第三阶段：大体上是在1960~1967年。在前两个阶段的基础上，对已掌握的大量的失效模式、失效数据、失效原因进一步从物理本质上分析元器件的失效机理，提出整机设计中的“故障模式、影响及危害性分析”(FMECA)。因而对影响可靠性的关键因素和真实原因的认识更加深刻、全面，并据此提出了各种加速试验方法。

第四阶段：大体上是在1968年至今。重点是要加强可靠性管理和可靠性保证，引用其它学科的成果，向更高的目标前进。成立各种数据交换网，制定了可靠性技术标准，研究可靠性试验的新技术、环境防护新技术、失效分析的新方法和新技术。

这四个阶段说明，可靠性的发展史也就是从定性要求到定量描述，经过一系列工程方法实现定量控制，逐步发展成为一个专门的学科及工程技术分支的历史。

我国电子设备的可靠性研究，在五十年代就有零星的但具有较高理论水平的文章发表。作为有组织的工程性的研究，是从六十年代初随着一些尖端军事科学技术的发展与工程实践的需要而开始的。同时，元器件及整机可靠性的研究与试验也在许多单位开展起来，并取得了一定的成绩。到了七十年代，国家对可靠性有了进一步的重视，指出“质量问题也是个路线问题”。为了保证产品质量，国家有关部门对电子元器件的可靠性问题提出了严格的要求。后来，随着电视机的普及，群众对电视机质量的强烈批评进一步激起了有关厂、所对电子元器件和整机可靠性研究、试验和管理工作的重视。与此同时，系统可靠性的研究与试验也取得了巨大成绩。一九八〇年我国向太平洋成功地发射运载火箭，以及随后多次发射卫星的成功，都证明了我国在基础元器件生产到大型系统的可靠性研究与实践已进入了较高的水平。1979年4月，成立了中国电子学会电子产品可靠性与质量管理学会。1981年10月，在广州召开第一届学术年会。电子工业部也成立了质量管理协会。各种有关可靠性的刊物逐渐增多，一些可靠性方面的书籍也相继出版。1980年12月，电子工业部在京召开了第一次整机可靠性工作经验交流会，逐步形成了一些研究整机和大型电子系统可靠性工作的骨干单位和群众队伍。近十年来，我国的可靠性理论和可靠性工程都取得了长足的进步，我国电子设备的可靠性工作已进入定量控制的阶段。随着“四化”的进展，我国的可靠性工程与研究工作的必将会得到更大的发展。

从国内外的可靠性简史可以看到：可靠性工程的历史是一个不断总结经验教训并且不断发展和前进的历史。尽管现在仍有不少新课题尚待进一步研究，但可靠性工程现在已建立了一套可供实用的理论和方法。并且已经在很多民用和国防尖端产品上取得了巨大的成果和显著的效益。

§ 1.3 可靠性工程的内容

可靠性工程就是要对产品的可靠性进行定量控制。为此要抓好这样几个环节：提出可靠性指标的定量要求；可靠性指标的保障设计与实施；可靠性指标的定量检查；可靠性管理。它们所涉及的内容大体可概括如下：

与指标的定量要求有关的数学基础理论，主要有：基础概率，常用的概率分布，如：指数分布、威布尔分布、正态分布、对数正态分布等；可靠性指标的预计与分配，涉及各种结构模型的可靠度、维修度、有效度的计算。在这些计算中还要涉及到马尔科夫过程、拉普拉斯变换、图论等。

与可靠性的保障设计与实施有关的内容主要有：方案简化设计、元器件的合理使用（近来发展成“元件工程”）、降额设计、容差设计、环境保护设计、故障诊断设计、维修性设计、可使用性设计以及标准化设计等。有关的基础理论有电路基础、故障物理学、结构基础理论、人机工程、工艺基础理论及计算机辅助设计等。

与指标定量检查有关的主要内容有：各种环境影响、效应分析及其试验模拟方法；加速试验及环境应力的研究；各种试验标准的制定与实施等。主要的基础理论是统计推断理论，涉及二项分布、泊松分布、 χ^2 分布、 t 分布、 F 分布以及统计数据的回归分析等。

与可靠性管理有关的主要内容有：组织全员培训；制定可靠性监控计划；监督可靠性措施的实施；组织可靠性情报反馈；实施可靠性增长计划等等。作好可靠性管理需要有较宽的知识面，要熟悉生产或科研的全过程，有一定的组织能力，善于了解工作人员的思想、心理，具备一定的“行为科学”知识，善于归纳整理反馈数据、设计报表等。

可靠性工程与全面质量管理是既相互紧密联系又有一定区别的两个体系。前者着重于从技术方面研究控制产品质量的方法；后者则着重于从管理方面研究控制产品质量的方法。二者殊途同归。在工程实践中应该抓好以可靠性为中心的全面质量管理，使两者有机地结合在一起，促进产品质量的提高。

§ 1.4 本书的结构及特点

为了适应我国大型电子系统工程和各类中小型电子设备开展可靠性工作的需要，本书主要从设计工作的角度研究可靠性工程。因为从根本上说，设计决定了产品的可靠性极限水平，确定了产品的固有可靠性。制造只是保障这一水平的实现，而使用只能维持这一水平。因此可靠性设计是有决定意义的一环。在实践中，许多元器件的损坏并不是元器件本身的问题，而是由于设计不合理所造成的。

美国在七十年代的一些统计数据表明，由于设计不当所致故障占故障总数的40%左右。有的电视机故障60%以上是由于设计造成的。因此，要提高设备的可靠性，关键在于搞好可靠性设计。

可靠性设计也同其它设计一样，首先要有一个系统的总体设计，然后围绕系统总体的目标进行具体的保障设计。本书按实际设计工作的程序和需要将可靠性设计技术分成上、下两篇来讨论。

上篇共十章，讨论系统总体可靠性设计的问题：如何提出定量的可靠性指标？如何

评定和改进系统的可靠性指标?侧重于“需要”和“资源”分配的研究。第一章简要介绍可靠性工程的历史、现状及研究的内容。第二章给出定量评价可靠性的主要指标及常用概率分布。第三、四、五章将系统可靠性模型的许多成果进行综合。要深入研究系统可靠性模型的读者,可从这些章节的推导证明中掌握许多复杂的可靠性模型的计算方法。第六、七章介绍可靠性两个最主要的指标:可靠度和维修度如何提要求?如何预计、分配。这是系统可靠性设计的关键问题,所以列举了一些实际例子以便读者掌握设计方法。可靠性设计是要付出代价的,如何开展可靠性费用设计是近年国际上关心的问题,尽管理论上还不成熟,但是产品设计要贯彻以提高经济效益为中心的方针则必须触及这个问题。第八章我们把被认为是较好的可靠性费用设计方法介绍给读者。仅有可靠性指标而无验收方案则指标就无法检查。在第九章介绍指数分布的寿命试验方案的设计和实施方法。其中对现在实践中出现的一些问题从理论和实际的结合上提出解决办法。一般来说,新研制的产品不能一下子就达到预计的可靠性指标,而是要经过一个反馈——改进——提高的过程,这个过程就是可靠性增长过程。第十章从数学与工程的结合上介绍了定量设计可靠性增长试验的方法。上篇的中心是从系统和总体的角度介绍定量要求控制、评定、改进产品可靠性的设计技术。

下篇主要介绍当系统、总体设计方案确定后,如何在硬件、软件设计中保障产品的可靠性,因此称之为可靠性保障技术。这种安排不同于一般的可靠性书籍,而主要是从工程设计的程序来安排各章内容。开展具体设计工作时首先要简化方案设计。第十一章介绍简化方案设计的一般原则与方法。在设备方案确定后就要正确地选用元件。第十二章介绍各类电子元器件的选用方法及国产电子元件目前的使用注意事项等。第十三章介绍能使元件的整体失效率下降的可靠性筛选方案设计。其中还结合目前工程实践给出一些实用的筛选方案。第十四章从失效分析出发介绍合理降额设计的原理与方法,对各类元器件的降额范围都作了推荐,可供设计参考。十二至十四章的元器件可靠性保障设计只有通过容差设计,特别是近来提倡的“三次设计”才能得到“用三类元件装一类整机”的结果,这样,才能充分发挥其潜在的可靠性,这些就是第十五章要解决的问题。由于国内已有多种计算机辅助设计(CAD)软件可供选用,所以在系统和电子电路的设计中采用各种综合优化的“三次设计”技术已经到了普及推广的时候了。为了读者能掌握CAD基础知识,第十五章重点介绍容差设计。第十六、十七章主要介绍电磁环境条件下的可靠性保障设计技术。其中的公式、曲线、例题、电路图可供设计使用。对于一些大型系统,电磁兼容设计是系统可靠性的一个关键问题。不少系统工程的分系统性能良好,而总系统不能正常工作的主要问题就是缺乏系统的电磁兼容设计。第十八章介绍软件可靠性的保障设计方法。由于计算机的普及,具有特殊性的软件可靠性日益引起重视。本章介绍软件可靠性保障设计的工程方法。在电路和软件设计的同时,必须考虑故障检测问题。第十九章介绍故障检测的一般原理及模拟电路和数字电路的故障检测技术。当与电气性能密切相关的设计完成后,就要重点考虑与结构、工艺有关的设计内容。其中对系统可靠性影响最大的就是热设计。第二十章介绍热-电模拟方法,并以中小电子设备最常用的几种冷却方式为重点。大型电子设备的某些特殊散热方式及计算机辅助热设计在本章也作了简要介绍。最后介绍热设计的检查测量方法,以便在工程中检查热设计效果。第二十一章重点从工艺的角度介绍“三防设计”技术,其中给出一些实用的

工艺配方可供使用。第二十二章是采用电气工程师的语言——电路理论来研究机械共振问题。通过机-电类比，电气工程师既可直接利用CAD程序分析复杂的机械系统，也可用这种方法定性地指导解决实际工作中遇到的共振问题。第二十三章对锡焊、压焊、绕接、插接及导线捆扎等各种互连的原理和实践均作了简要介绍，以便选择合理的互连设计。第二十四章从可维修性、可使用性和安全性出发，介绍人-机匹配设计原则，及各种设计图表。对于“三性”设计均列有检查表，以便设计人员最后核对修改设计时参考。当第一轮设计工作初步完成后就应采用第二十五章的FMECA技术进行分析。若系统不能满足要求，找出薄弱环节后采用第二十六章的冗余设计技术或其它技术来改进设计。在以上电路、结构、工艺的保障设计完成后就应制定可靠性监控流程以便从管理上保证所设计的方案在制造、使用的各个环节中都能得到保障。第二十七章给出的流程可供读者在制订结合自己工作特点的监控流程时参考。

全书二十七章都是以在产品研制过程的各个环节中如何进行可靠性设计为目标而展开讨论的。每章均有一定的独立性，可单独使用。

参 考 文 献

- 〔1〕 陈炳生，刘守勤，周德昌，《电子设备可靠性设计技术》，电光系统编辑部出版，1984.4。
- 〔2〕 林青，“可靠性纵横谈”，天津大学，1983. 10。