

可靠性与维修性工程

——系统与电路结构的分析和设计

丁定浩 编 著

电子工业出版社

可靠性与维修性工程

——系统与电路结构的分析和设计

丁定浩 编著

电子工业出版社

内 容 简 介

本书内容包括可靠性工程管理,各种系统数学模型,兼容、冗余、简化、软化等可靠性系统设计,故障诊断、单元更换、维修周期和维修制度等维修性系统设计,可靠性、维修性预计及分配方法,电路结构中的减额、简化、接口、安全等可靠性设计,以及失效模式和效应分析,潜在通路分析等。书中提供了新的理论成果和大量工程方法与实例,以及供设计、分析用的计算机Fortran程序。

读者对象,工程技术人员,可靠性、质量管理人员,高等院校工科和管理专业师生。

可 靠 性 与 维 修 性 工 程

系统与电路结构的分析和设计

丁定浩 编著

特约责任编辑 丁燮华

电子工业出版社出版(北京市万寿路)

南京科技印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

开本: 787×1092 1/16 印张: 26.5 字数: 640千字

1986年10月第1版 1986年10月第1次印刷

印数: 1—6000册 定价: 5.10元

统一书号: 15290·427

前 言

本书是作者多年来从事可靠性理论研究、产品可靠性系统设计和可靠性教学工作的总结。

本书阐述可靠性基本理论和产品可靠性、维修性的工程管理及设计技术。全书吸取了国内外许多有关文献资料，提出了作者的一些研究结果，列举了大量工程实例。

作者认为，要使可靠性理论及其分析、设计技术用于工程实践，一方面，要与专业技术紧密结合，在专业技术设计中贯彻和体现可靠性理论；另一方面，就可靠性理论本身来说，一是要能导出具体的数学模型，使之真实反映产品的实际组成结构和工作状态，从而正确地作出为实现产品可靠性指标应采取的工程措施的决策，为节约成本和加速研制、生产周期创造条件，同时，只有导出了具体产品的可靠性模型，才能推动可靠性理论模型的发展；二是要积累资料，分析研究资料，提供产品可靠性、维修性设计和分析中必须具备的工程数据，没有这些工程数据，实际的工程设计是难以进行的；三是要用计算机进行可靠性设计的辅助计算和分析，解决可靠性分析计算中的难点和繁杂的数值计算。作者多年来的工作正是在上述前提下开展的，本书的内容也是按照上述观点阐述的。

全书共分十一章，包括可靠性工程管理，多种系统数学模型，兼容、冗余、简化、软化等可靠性系统设计，故障诊断、单元更换、维修体制、维修周期等维修性系统设计，减额、简化、接口、安全等电路结构可靠性设计，这些章节的许多内容是可靠性理论与具体工程设计相结合的尝试；可靠性和维修性分析、预测、分配各章，不仅介绍、提出了各种技术和方法，而且还提供了许多工程数据和计算机程序，这些计算机程序多数可直接用于工程设计、计算和分析，少数稍加变动后适用范围更广泛。书中，作者介绍了自己的研究结果，提出了一些新概念和新方法。例如，在系统可靠性数学模型中导出了新的权联结构，确切地解决了一类系统发生性能退化或丧失局部功能对可靠性的定量影响；首次提出了在各种冗余系统中单次使用系统与不设故障检测指示装置的多次使用系统可靠度表达式之间的重大差别；在可靠性指标预测、分配方面，提出、改进了若干方法和提供了工程数据等。

可靠性、维修性工程中的性能稳定性设计、热设计、电磁兼容性设计以及可靠性试验及其分析等将另作讨论。

本书是由电子工业部组织作者为从事可靠性设计、分析和试验工作的广大工程技术人员而编写的，对从事技术管理，特别是质量管理和可靠性管理的同志均有参考价值。本书亦可作为大专院校有关工程专业方面高年级学生和可靠性学科研究生进修可靠性专业的参考书。

本书在编著过程中得到了电子工业部李蒙蔚、钟良、程光辉、陈章豹、郝玉锁同志和雷达局李绍清、杜长全等同志的支持和帮助，电子工业部童子鹏副总工程师和雷达局冯世璋总工程师对本书进行了审阅，电子工业部南京电子技术研究所包养浩同志对书中涉及的工程内容进行了校核，所内可靠性工程组的同志提供了一些资料，吴金等同志参与了计算机程序的编制，特此表示感谢。另外，对书中所引用文献的作者，也表示感谢。

由于本人水平有限，成书时间仓促，缺点和错误之处在所难免，恳请读者批评指教。

作 者

1985年3月于南京电子技术研究所

目 录

第一章 引论	
1.1 可靠性工程是质量控制技术的历史发展	1
1.2 可靠性工程的特点	1
1.3 可靠性工程的基本任务和内容	2
1.4 寿命周期费用	3
第二章 产品研制的可靠性管理	
2.1 可靠性管理的基本要求	6
2.2 方案论证阶段的可靠性管理	7
2.3 工程设计阶段的可靠性管理	8
2.4 试制生产阶段的可靠性管理	8
2.5 批生产阶段的可靠性管理	9
2.6 可靠性组织	11
第三章 可靠性基础数学	
3.1 集合的基本概念	13
3.1.1 集合的表示方法	13
3.1.2 集合间的关系	13
3.2 布尔代数	14
3.3 概率基础	15
3.3.1 事件与概率	15
3.3.2 事件间的关系	16
3.3.3 事件的频率与概率	17
3.3.4 排列与组合	17
3.3.5 古典概率模型与概率的性质	18
3.3.6 条件概率与事件的独立性	20
3.4 随机变量及其分布函数	22
3.4.1 随机变量及其分布函数	22
3.4.2 离散型随机变量的分布律	23
3.4.3 连续型随机变量的分布函数	26
3.4.4 二元随机变量及其分布函数	27
3.4.5 随机变量函数的分布	28
3.5 随机变量的数字特征	31
3.5.1 数学期望	31
3.5.2 方差	32
3.5.3 切比雪夫不等式	34
3.6 卷积与积分变换	34
3.6.1 卷积	34
3.6.2 拉普拉斯变换	34
3.6.3 Laplace-Stieltjes变换	35
3.7 回归分析	36
3.7.1 一元线性回归	36
3.7.2 化曲线为直线回归	37
3.7.3 多元线性回归	39
3.8 矩阵代数	40
3.9 马尔柯夫随机过程	42
3.9.1 状态的随机转移及其转移概率	42
3.9.2 系统瞬时状态概率的求解	45
3.9.3 系统稳态概率的求解	48
3.9.4 转移到吸收状态的平均步数或平均时间	50
第四章 可靠性与维修性函数	
4.1 可靠性函数	53
4.1.1 可靠度函数	53
4.1.2 累积失效概率	54
4.1.3 失效密度函数	54
4.1.4 失效率函数	55
4.1.5 平均寿命与等效平均寿命	56
4.1.6 常用寿命分布函数	58
4.2 寿命为负指数分布的性质	59
4.2.1 无记忆性	59
4.2.2 复杂产品的寿命	60
4.3 维修性函数	63
4.3.1 维修度函数	63
4.3.2 维修密度函数	63

4.3.3	修复率函数	63
4.3.4	平均修复时间	64
4.3.5	常用的维修性函数	64
4.4	有效度函数	65
4.4.1	瞬态有效度和平均有效度	65
4.4.2	稳态有效度和固有有效度	65
4.4.3	平均工作时间和平均停机时间	66
4.4.4	平均失效频率与平均循环周期	67
4.4.5	平均失效次数和平均修复次数	67
4.4.6	有规定时间要求的有效度	68
4.4.7	失效率、修复率或停机率均为常数时的有效性函数	69

第五章 系统可靠性和维修性的数学模型与分析

5.1	不计维修的串并联系统	70
5.1.1	串联系统	70
5.1.2	并联系统	72
5.1.3	复合系统	74
5.1.4	表决冗余系统	77
5.1.5	旁待冗余系统	78
5.1.6	非独立冗余系统	84
5.1.7	顺序表决系统	88
5.2	不计维修的复杂系统	89
5.2.1	状态枚举法	89
5.2.2	路径枚举法	91
5.2.3	割集分析法	97
5.2.4	贝叶斯分析法	99
5.3	开关型三状态系统	103
5.4	权联系统	108
5.4.1	组合权联系统	108
5.4.2	单元权联系统	109
5.5	马尔柯夫模型的可修系统	110
5.5.1	可修串联系统	110
5.5.2	可修并联系统	113
5.5.3	串并联复合可修系统	117
5.5.4	可修表决系统	119
5.5.5	可修旁待冗余系统	122

5.5.6	两单元冗余系统效能的比较	125
5.5.7	可修权联系统	126
5.5.8	可修复杂冗余系统	126
5.6	非马尔柯夫模型的可修系统	130
5.6.1	更新过程	130
5.6.2	补充状态法	136
5.6.3	补充变量法	139
5.6.4	马氏更新过程法	145

第六章 系统可靠性设计

6.1	系统可靠性与维修性指标的论证和确定	155
6.2	性能与可靠性指标间的相互关系及其裕量设计	156
6.2.1	性能指标的裕量设计	157
6.2.2	可靠性指标的裕量设计	157
6.2.3	可靠性指标与性能指标间的相互关系	158
6.3	技术方案的可靠性论证	159
6.4	建立系统可靠性模型	162
6.4.1	建立可靠性框图程序	162
6.4.2	建立系统状态转移图程序	163
6.5	选择性能与可靠性兼容体制	164
6.5.1	相控阵体制	165
6.5.2	频率分集制	169
6.6	系统的简化设计	170
6.6.1	依靠软件功能减少硬设备	170
6.6.2	基本单元电路的简化组合设计	171
6.6.3	采用新技术和新器件	172
6.6.4	压缩电源品种与数量	172
6.6.5	优选与采用标准组件	172
6.7	系统的冗余设计	173
6.7.1	整体冗余和单元冗余	173
6.7.2	并联冗余与旁待冗余	174
6.7.3	冗余与脱机维修	175
6.7.4	多单元冗余系统最优布局设计	176

6.8 采取允许参数漂移的稳定性方案	179
6.9 功能转换冗余设计	181
6.10 计及系统性能退化设计	183
6.11 改进复杂系统的灵敏度分析	187
第七章 可靠性与维修性指标的分配	
7.1 代数分配法	197
7.1.1 功能单元组合代数分配法	198
7.1.2 比例组合代数分配法	199
7.2 均匀分配法	201
7.3 工程加权分配法	202
7.4 顺序分配法	204
7.5 约束条件分配法	206
7.5.1 串联系统单元约束条件分配法	206
7.5.2 非串联系统单元约束条件分配法	209
7.5.3 串联系统多元约束条件分配法	209
7.6 应力变动分配法	214
7.7 单个约束条件冗余单元分配法	214
7.8 动态规划分配法	217
7.8.1 动态规划分配法是冗余组合枚举法的化简	217
7.8.2 动态规划分配法的基本算法	217
7.8.3 动态规划分析法的计算机程序	220
7.9 直接寻查分配法	224
7.9.1 串联系统的直接寻查法	224
7.9.2 非串联系统直接寻查分配法	227
7.10 平均修复时间加权分配法	227
7.11 串联系统稳态有效度分配法	229
7.11.1 稳态有效度的均匀分配法	229
7.11.2 稳态有效度的系数分配法	230
7.12 并联系统稳态有效度分配法	232
7.13 表决系统稳态有效度分配法	233
7.13.1 (k/n) 表决系统稳态有效度的分配	233
7.13.2 (n-1/n) 表决系统稳态有效度的分配	234
7.14 复杂系统稳态有效度分配	234
第八章 可靠性与维修性预测	
8.1 可靠性预测的基本概念	239
8.1.1 可靠性预测的必要性	239
8.1.2 可靠性预测的分类和主要预测方法	239
8.1.3 预测方法的局限性	240
8.2 编制可靠性预计手册是预计方法的基础	240
8.3 元器件计数预测法	241
8.3.1 元器件总数预测法	241
8.3.2 有源器件计数预测法	242
8.3.3 元器件系数预测法	242
8.3.4 元器件分类计数预测法	243
8.3.5 元器件数量类比估计法	247
8.4 相关性能参数预测法	247
8.4.1 系统复杂性与性能参数间的相关性	247
8.4.2 系统内元器件总数的区间估计	252
8.4.3 性能参数预测方法的修正	252
8.4.4 性能参数预测计算程序	253
8.4.5 相关性能参数预测法的计算机程序	254
8.5 元器件应力分析预测法	257
8.5.1 应力分析预测程序	257
8.5.2 元器件失效率预测注意事项	258
8.5.3 元器件电应力的计算机辅助分析	258

8.6	复杂系统可靠度预测	264
8.6.1	路集分析求上、下限的近似预测法	264
8.6.2	割集分析求上、下限的近似预测法	266
8.6.3	计算复杂系统可靠度的计算机程序	267
8.7	性能参数稳定性预测	269
8.7.1	最坏情况分析法	270
8.7.2	阶矩法	271
8.7.3	伴随网络求解网络参数灵敏度	274
8.7.4	蒙特-卡洛法	287
8.7.5	性能参数偏差的试验预测法	287
8.8	结构可靠性的应力-强度预测法	289
8.8.1	传统的结构强度应力分析	289
8.8.2	概率强度应力分析	290
8.9	可修系统的维修性预测	293
8.9.1	线性回归预测法	294
8.9.2	加权因子预测法	294
8.9.3	时间分解预测法	295
8.9.4	预防维修平均时间的预测	297
8.9.5	系统维修性参数的预测	297

第九章 电路结构可靠性设计

9.1	元器件的选择与使用准则	301
9.1.1	不要片面选择高性能元器件	301
9.1.2	少用高失效率元器件	301
9.1.3	元器件选用准则	302
9.1.4	元器件的正确使用	304
9.2	元器件负荷减额设计	309
9.3	电路的简化设计	315
9.3.1	电路集成化	315
9.3.2	数字逻辑电路的简化	317
9.3.3	模拟电路的简化	318
9.4	故障软化设计	320
9.5	抗暂态效应设计	324
9.5.1	暂态效应引起的失效现象	324

9.5.2	暂态效应的检查方法	324
9.5.3	半导体器件瞬态过载抑制方法	325
9.6	减少接触故障的可靠性设计	327
9.7	潜在通路分析	328
9.8	电路接口的可靠性设计	332
9.9	故障安全设计	336

第十章 系统维修性设计

10.1	维修性指标的确定	339
10.2	故障诊断设计	341
10.2.1	故障诊断的一般要求	341
10.2.2	故障诊断的分级	341
10.2.3	故障诊断的基本方法	343
10.2.4	检测点设置原则	344
10.2.5	检测点的优化设计	345
10.3	结构维修性设计	349
10.3.1	更换单元模块化	349
10.3.2	设备内外结构的可达性	349
10.3.3	备件储备	351
10.4	维修体制的选择	352
10.5	预防维修周期设计	353
10.5.1	更新型预防维修周期	354
10.5.2	固定型预防维修周期	356
10.5.3	自动监视装置的测试周期	359

第十一章 失效模式、效应与危害度分析

11.1	表格分析法	362
11.2	失效树因果分析法	367
11.2.1	失效树分析的主要步骤	367
11.2.2	失效树中的符号说明	368
11.2.3	失效树因果分析法实例	370
11.3	矩阵分析法	370
11.3.1	失效模式与效应分析矩阵	370
11.3.2	失效模式与效应关系矩阵	374
11.4	失效模式对并联冗余系统的影响	376

11.4.1	串联连接结构方式的并联冗余单元最佳数	376
11.4.2	并联连接结构方式的并联冗余单元最佳数	377
11.4.3	计及单元应力改变的最佳冗余数	378
11.5	致命度分析	379

附录

附录 A	电子元器件可靠性预计简编手册	382
一、	微电子器件	383
二、	分立半导体器件	386
三、	电阻器	392
四、	电容器(纸/塑、陶瓷、玻璃、云母、钽电解和铝电解)	394

五、	电感器的失效率	397
六、	旋转电气装置(电动机、鼓风机、低速低负载电机和计时器)	398
七、	继电器的失效率	399
八、	开关的失效率	399
九、	接插件的失效率	400
十、	导线、印制板、焊点	402
十一、	电真空器件	403
十二、	其它	403

附录 B	回归系数标准方差-协方差的P矩阵	405
------	------------------	-----

附录 C	美国通用电气公司关于无人值守雷达研究报告中的可靠性与维修性方案论证	403
------	-----------------------------------	-----

第一章 引 论

1.1 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。本世纪二十年代，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，三十年代诞生了标准化工程专业，以建立各种标准的办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。因此，三十年代又称为标准化的十年。从四十年代起，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。因此，三十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了。这时要求对产品生产过程各道工序中的可变性进行控制。1939年美国军械部队在监察贮存弹药的统计方法方面取得了成功，对把统计数学的理论和方法引入生产过程的质量控制计划中去起了推动作用，从而建立了各种管理图表，控制了生产过程中的质量变化，有利于确保电子产品的质量。

进入五十年代后，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，由于电子设备的应用日益广泛，设备面临严酷的工作环境，失效概率增高，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来性能先进但结构比较复杂的通讯、水声和雷达设备，使用时故障频繁，以致检查和排障时间分别约占了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。从五十年代起到六十年代初，这段时间称为可靠性初期发展的十年。

六十年代起，美国的可靠性工程进入了全面发展时期。经过数十年努力，美国电子设备的可靠性水平有了很大的提高，许多设备的有效度已经超过0.999。用于宇航工程的元器件，其平均寿命已达到几十万年量级。

我国可靠性工作的起步并不算晚。五十年代就在电子工业领域中开始建立了可靠性与环境试验研究机构。七十年代起，可靠性工程从宣传、探讨逐步进入了实践阶段。例如，七十年代中期到八十年代初，电视机的平均无故障工作时间从500小时提高到了5000小时；又如控制测量卫星导弹的军用电子工业产品，其可靠性也有了明显的提高。

1.2 可靠性工程的特点

众所周知，电子产品，特别是大型电子系统，是由成千上万个电子元器件和机电零部件组装而成的。电子元器件和机电零部件与简单机械零件的寿命不同，前者是一种具有很大离散程度的随机变量，除了进行寿命试验或积累现场数据外，无法用仪表直接测量；另一方面，电子元器件和机电零部件参数的离散性和参数随环境条件的变化，也远比简单的机械零件显著。这些特点在产品上的反映，就体现了产品在实际使用中能否稳定和可靠地工作。因此，电工、电子

和机电产品的寿命指标,不能用恒定不变的参量来衡量,而要用“可靠度”、“平均寿命”和“失效率”等这样一些随机变量出现概率及其数字特征来描述,因而出现了可靠性工程学和对产品实施可靠性管理的一套办法。可靠性工程与可靠性管理,首先侧重于研究设计阶段的产品方案和指标。对电工、电子和机电产品(特别是大型整机或系统工程)而言,其固有可靠性是在设计阶段奠定的,生产阶段的质量控制,只是保证产品的实际可靠性水平尽可能接近固有可靠性,而正确的使用与维护则在于保持住生产中已经达到的可靠性水平。可靠性工程及其管理,是一种在时间、费用允许基础上生产高有效性产品并维持产品可靠性所进行的综合性活动。可靠性工程及其管理,既不完全对应于前面提到的依据标准进行“验收把关”的第一个时期,也不完全对应于第二个时期的用数理统计方法实施的“预防控制”,而对应于进行“未来设计”的发展时期。在研究和设计阶段,历来都只是为使产品达到规定的性能要求而对未来电路结构进行设计;至于对使电工、电子和机电产品保持一定性能的寿命特征来说,在可靠性技术出现以前,由于研究对象的随机性,一直是不能事先进行设计(特别是无法进行定量设计)的,只能凭经验或事后试验,或将产品置于现场用坏为止,在真实地记录失效情况以后,才能确切了解产品的可靠性。单凭事后试验和使用来考察设备的可靠性和稳定性,事先对设备本身的固有可靠性能否达到指标要求就必然存在很大的盲目性。

对电工、电子及机电产品进行可靠性设计和管理,就是对产品的可靠性进行未来设计。而可靠性工程学是研究通过可靠性设计、失效预测、控制、试验和分析实现可靠性指标的科学。

1.3 可靠性工程的基本任务和内容

可靠性工程及其管理,对降低产品研制、生产成本和缩短研制、生产周期具有决定性意义。

产品不可靠和研制周期过长的症结在于:课题预研只注重性能指标,忽视可靠性考核,一旦产品着手设计,由于性能不稳定而需重新进行研究和设计;产品研制不重视可靠性控制,以至被迫返工。从这个意义上说,可靠性的发展史是一部不可靠的教训史。

产品的可靠性工程,首先应从设计抓起,可靠性的定量要求应在工程设计中落实,即要预定和分配产品可靠性指标,论证方案的可靠性,结合电路具体实施冗余设计、减额设计、热设计、稳定性设计和电磁兼容性等设计;还应设计制造过程进行全面的可靠性控制,即对元器件加以选用、认定和限制,对方案和电路进行失效模式、影响分析和潜在通路分析,以及对新专题、分机、整机进行环境适应性试验和可靠性试验,对元器件和功能组件进行可靠性筛选。通过失效分析和反馈,把设计与控制两者有机地结合起来,及时改进设计,使产品可靠性得到提高,然后通过使用、维护阶段的可靠性活动保持产品的可靠性。

可靠性设计为产品固有可靠性奠定了基础,通过方案、电路可靠性评审,再在图纸资料阶段消除一部分隐患和缺陷,新专题和分机的环境适应性试验和可靠性增长试验,又使可靠性设计、审查中考虑不周或无法预见的问题提前暴露,经过分析,逐项改进。功能组件和元器件的筛选,起剔除早期失效元器件和改进制造工艺的作用。要采用各种检测和试验手段,使得能在元器件上暴露的问题不留给功能组件,能在功能组件上暴露的问题不留给分机,能在分机上暴露的问题不留给整机,更需要避免问题成堆,互相牵制,总暴露,大改动。也就是说,早期的可靠性活动,虽在图纸资料与试验电路方面为提高产品可靠性花了点费用和时间,但这与直

到产品制造成功发现不可靠后作重大改动时所需花的费用和时间相比,能节省几倍、几十倍乃至几百倍。对于一个研制周期较长的复杂系统来说,严格执行可靠性工程管理的意义更大。

可靠性是一项全面性的工作。从工程观点来看,可靠性工程的基本内容有:

(1)明确设备在规定周期内完成任务的成功概率,这是可靠性工程的目标。

(2)研究失效原因,找出防止和减少失效的方法。当施加在材料、元器件上的各种应力超过强度时,就会发生失效。这些应力可以来自设备内部,也可以来自作用于设备的外部环境,必须对各种应力和材料强度加以比较和分析,进行可靠性计算,并研究采用什么样的措施、使用什么样的方法以及需要多长时间实现规定指标。

(3)为了达到高可靠性水平,可能会与产品性能以及体积、重量和功耗等其他特性发生矛盾,故需在定量分析基础上寻求合理的折衷。

(4)改进设计和提高可靠性水平受时间、费用和人力的限制,必须研究采用何种技术才能获得最佳效果。

(5)设备在使用阶段的维修性,涉及设备诊断故障的能力、修复失效的时间、备件的和设备操纵人员的水平等,因此需研究设备可靠性与维修性的最佳组合。

上述诸因素最后可归结为经济效益问题。我们知道,可靠性要求越高,虽然可减少现场维修费用。但是研制、材料和试验费用也就越大。那么究竟可靠性水平多高才最经济实用呢?这就是我们下节将要讨论的“寿命周期费用”问题。

1.4 寿命周期费用

五十年代后期,美国通过调查发现:许多设备五年内为维持其正常工作而支付的总维修

表 1-1

可靠性、维修性和费用	雷达	通讯	航空设备
可靠性			
元器件总数	6100	1600	540
总工作时间	20960	21076	20887
随机失效次数	382	54	62
平均无故障工作时间	55	390	337
平均无故障工作时间的90%置信限	51~60	319~496	278~418
维修性			
不能工作时间	925	516	231
更换的元器件数	1256	185	129
平均停机时间	2.42	10.4	3.73
费用(千美元)			
设备原价	400	6	5
消耗物资费用/年	12	1.2	0.6
维持工作费用/年	240	70	36

费用往往会超过购置设备所需费用的十倍。1961年,据统计,美国国防预算费用中有25%用作维修费用。美国空军当时对其所属三项地面电子设备的复杂性、可靠性、维修性和费用进行统计分析后得出的数据如表 1-1 所示。

表中,通讯和航空设备每年的维修费用分别约为购置费用的 11.67 和 7.2 倍。这除了表明设备的工作与维修费用所占的比重外,也说明在可靠性发展的初期还没有很好开展维修性设计。因此,对费用的考虑,已经不能只限于设备的购置费用,而必须以设备寿命周期费用(LCC)来衡量。所谓寿命周期费用,是指从购置设备开始,直到设备退役报废的整个过程中所支付的全部费用。它既包括购置设备的费用,又包括维持设备

工作所必需的消耗和维修等费用。

寿命周期费用一般可以分成两类：一类是非周期性或一次性支出的费用，另一类是周期性支出的费用^[7]。

非周期性或一次性支出的费用通常包括下列各项：

1. 研制费用(C_{RD}) 这种费用取决于按任务书或合同要求而研制的系统的具体内容。若要求设备符合现代化最新技术水平，则研制费用就较高。

2. 可靠性与维修性工程费用(C_{RM}) 这项费用与系统的可靠性和维修性指标的高低有关。系统的平均无故障工作时间要求越高，平均修复时间要求越短，则费用就会相应提高。

3. 测试设备费用(C_{TE}) 测试设备也是一次性费用的主要项目之一。对于复杂系统来说，自动化测试不仅有硬件费用，还有软件的费用。

4. 产品合格鉴定费用(C_Q) 产品交付和接收前，要求进行一系列使用性鉴定试验。对于大型设备来说，通常这种试验难以在工厂中进行，要求选择其他合适地点试验，并需筹备测试设备和组织人员测试。

5. 寿命周期管理费用(C_{LCM}) 从方案论证阶段开始，就要有专门人员对设备的研制过程全面进行管理和协调。

6. 设备安装费用(C_I) 对大型设备，必须组织人员、准备机械器具和按照规范要求安装。

7. 运输费用(C_{TR}) 设备从出厂到达使用场所，必须经过各种运输途径，尤其是大设备的长途运输或向偏僻地区的运输，均需花费大量运输费。

8. 培训费用(C_T) 设计旨在奠定可靠性的基础，制造在于保证可靠性的实现，维护则是保持已有可靠性水平的关键。对操作人员进行技术培训，是设备正确使用和维护的根本条件。

9. 资料、文件编制费用(C_D) 各种文件图纸的编制，数据的收集、处理和存储，均须支出一定的费用。

周期性支出的费用一般包括以下各项：

1. 能源消耗费用(C_G) 任何设备的运转都离不开能源。例如，要使雷达系统运行，就应供给它电能、油料和水；发电机有了燃料、油和水等才能工作。

2. 维修费用(C_{MT}) 这是周期性支出费用的主要部分，在整个寿命周期费用中占了很大的比重，也是权衡系统可靠性与维修性费用关系的依据。

3. 人员配置费用(C_M) 通常，绝大多数设备都需配置操作人员；此外，对于设备的定期维护和排障、修理也需配置维修人员。

4. 保障费用(C_S) 这是设备正常运转的必备物资条件。例如，计算机配置的打印机必须具备纸张，设备维修要有备份件等。

5. 储备费用(C_{IN}) 这是指能源和消耗保障物资等所必需的储备量费用。

于是，若以 NRC、RC 分别表示一次性和周期性支付费用，则寿命周期费用 LCC 为：

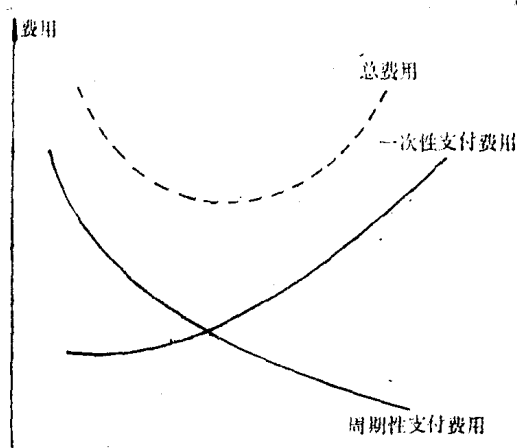
$$LCC = NRC + RC \quad (1-1)$$

$$NRC = C_{RD} + C_{RM} + C_{TE} + C_Q + C_{LCM} + C_I + C_{TR} + C_T + C_D \quad (1-2)$$

$$RC = C_G + C_{MT} + C_M + C_S + C_{IN} \quad (1-3)$$

由式(1-3)可知,周期性支付费用除第一项外,均与系统可靠性和维修性水平有关。

以 NRC 和 RC 为参量,可以分别画出寿命周期费用与产品可靠性(图 1-1)和维修性(图 1-2)的关系曲线。



修复率 (图位元互换)

图1-1 寿命周期费用与产品可靠性关系曲线

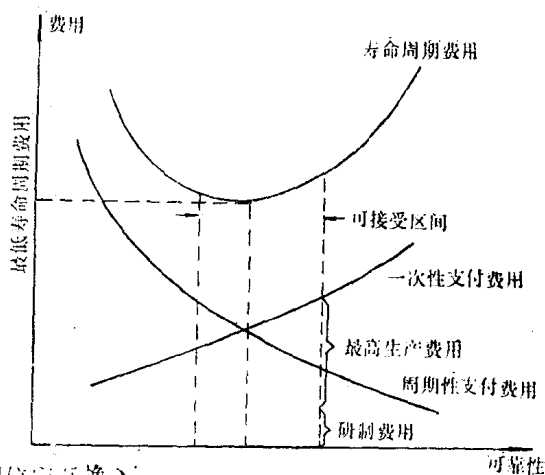


图1-2 寿命周期费用与产品维修性关系曲线

由图1-1可见,一个系统设计、制造得越可靠,故障就越少,维修费用也就相应降低。另一方面,为了得到高可靠性,研制费用和生产成本就必然增加,从而系统的造价也要提高。在图1-1的某一点上,如果为提高可靠性而增加的费用等于工作中节约的维修费用,那么这一点就表示总费用最低时所能获得的可靠性。由此可知,对于获得同等可靠性所采取的措施,它们的技术难度与费用是各不相同的。一般说来,最先采取的应是费用较少而难度又较低的措施,最后才采取费用较高难度又较大的措施。反映系统修复速率的修复率与费用之间的关系,也有类似的性质。因此,必须对产品的性能、可靠性、费用和工程进度进行全面的权衡。

参 考 文 献

- [1] 丁定浩,“可靠性工程在电子工业企业中的作用、地位和实施办法”,中国质量管理学会第二次年会学术论文选,1980年。
- [2] Benware L.T.,“Cost Versus Reliability Trade-off”, Proceedings of the 1967 Annual Symposium on Reliability, January 1967.
- [3] Bazorsky I.,“Reliability Theory and Practice”, Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, N.J., 1961.
- [4] 丁定浩,“电子新品研制过程中的可靠性管理”,中国电子学会可靠性专业学会第二届年会论文选,1983.10。
- [5] Earles D.R.,“LCC—Commercial Application—Ten Years of Life Cycle Costing”, Proceedings 1967 Annual Reliability and Maintainability Symposium, IEEE N.Y., 1975.
- [6] Kiaug T.P.,“Life Cycle Management Cost Model”, Proceedings 1978 Annual Reliability and Maintainability Symposium, IEEE N.Y., 1978.
- [7] J.E.Arsenault and J.A.Roberts,“Reliability and Maintainability of Electronic Systems”, Computer Science Press, Inc., 1980.

第二章 产品研制的可靠性管理

可靠性工程管理，是使产品可靠性达到规定指标而组织实施的可靠性设计、分析和试验等工程技术管理活动，是整个产品研制、生产计划程序的一个重要组成部分，是一种全局性的管理。

产品可靠性取决于采用的材料、器件、线路、工艺和结构等各个方面，要在具体产品的研究、设计、试制和生产过程中得到体现，并需通过产品的实际使用加以证实，还要依靠技术开发部门、加工制造车间、器材配套供应单位和计划组织管理科室的密切配合才能奏效。任何环节出现可靠性管理失控，那怕是在电路中发生小小的“接触不良”现象，均会造成产品不可靠。

2.1 可靠性管理的基本要求

为保障产品在整个寿命周期特别是研制过程中的可靠性管理，应满足以下基本要求：

(1) 根据产品的工作和环境条件，在权衡可靠性要求、性能、成本和周期的基础上，规定所能接受的产品最低可靠性指标，并分析和论证指标的现实性，说明在什么阶段达到规定的可靠性指标和用什么方案验证可靠性指标。

(2) 产品开始研制，就应着手制订一个有效的可靠性规划。可靠性规划应对每一项可靠性计算和工程设计工作的主要内容、参加单位、参加人员、完成日期作出安排和说明，确定在执行每项工作中组织单位与执行单位之间的相互关系和职权，划分各个阶段的可靠性工作，规定每个阶段结束后写出总结材料，还应明确采用何种通用的可靠性设计准则和标准，并制订对设计进行可靠性审查的细则和进程。

(3) 制订和实施可靠性标准规范。可靠性标准规范一般应包括：可靠性管理办法，可靠性设计准则、设计程序和设计审查要求，可靠性试验方法，设计文件审签程序，可靠性保障措施，元器件筛选规范和优选手册等。

(4) 在研究和设计过程的各个阶段，应对产品进行可靠性分析和可靠性预测，应用可靠性设计技术及时改进设计中的可靠性薄弱环节，以达到预定的可靠性要求。

(5) 建立可靠性设计评审制度。涉及方案性和体制性的可靠性问题应组织集体评审，单元电路和部件应由专职可靠性与质控部门审查。

(6) 开展元件可靠性工作。产品选用的元件，要进行质量认定、压缩品种，并规定产品使用元件清单。电路使用的元件，要避免错选类型规格。元件要降额使用。对上机的元器件，要按规范进行可靠性筛选。

(7) 加强关键件和生产工序的质量控制。从设计转入生产阶段，应规定防止产品加工制造过程中可靠性退化的程序，规定试验和检验措施，并将质量控制要求列入工艺规程。关键件与关键工序应作为关键质量控制点，及时纠正失控现象。

(8) 开展失效分析。通过分机、整机的各种可靠性试验(包括环境试验)和使用性试验，针

对不同的失效情况，着重寻找和逐一改正设计、工艺和结构方面的缺陷。

(9)建立产品研制单位内外的质量信息反馈网。也就是说，除了单位内部的信息及时反馈处理外，还要建立使用单位与研制单位、元器件工厂与整机工厂和研究所之间的质量信息反馈网，保证质量信息的传递、处理和应用，使出现的问题及时得到纠正。

(10)确定产品可靠性主持师。由产品可靠性主持师组织对产品可靠性指标和总体方案的可靠性论证，向各分系统分配可靠性指标，会同有关人员提出产品可靠性设计的统一要求和规范，组织产品的可靠性评审，起草或会签可靠性文件和资料，主持各种可靠性试验，负责产品可靠性的协调、抓总，并参与产品的验收和鉴定工作。

以上十条是对产品进行可靠性管理的总要求。下面是各个阶段可靠性管理的基本内容。

2.2 方案论证阶段的可靠性管理

方案论证阶段，可靠性管理的主要内容是对可靠性指标和系统总体方案的可靠性进行论证。具体来说，就是：

(1)产品可靠性指标论证。主要是确定产品采用何种可靠性指标、可靠性与维修性指标间的最佳组合和可靠性指标水平的高低。

(2)系统总体方案的可靠性论证。在论证系统总体方案时，同时要论证系统的可靠性设计。系统可靠性设计和可靠性方案论证的目的，是要证明拟议中的总体方案是否能够保证可靠性指标的实现，探讨方案的经济性和合理性。

(3)提供两种以上总体方案以备抉择。要在性能与可靠性、费用和工程进度等方面分析所选方案的特点，绘制出系统功能框图和系统可靠性框图，建立系统可靠性数学模型，以便通过定性和定量比较确定总体方案。

(4)分配分系统可靠性指标。分配的基础是初步预测已确定总体方案的可靠性。分配的原则是保证分配的合理性和可行性，避免造成工程实现上的困难或额外增加成本。

(5)确定系统可靠性技术措施。这是针对具体产品的各个分系统特点采取的可靠性对策。可靠性技术措施内容包括：明确各分系统的主要失效特征和可靠性薄弱环节，确定是否需要采取各种不同性质的冗余体制以及其他有针对性的重大可靠性技术措施，决定结构上需要采用的可靠性和维护性措施。

(6)确定产品在工程设计中应该执行的可靠性设计统一规定和准则。它包括：元器件选用范围，元器件降额规定，热设计要求，电磁兼容性规定，电路容差设计准则，环境适应性试验规定等。

(7)对新采用的技术专题进行预研和试验。要通过可靠性增长试验，严格考核可靠性和稳定性，合格后才准许在产品上使用。

(8)可靠性方案审定。在方案论证和突破关键技术的基础上，根据可靠性技术措施和可靠性统一设计准则，对总体方案进行审定，然后正式下达分机设计任务书。分系统方案也必须经过可靠性方案论证和审定。

(9)方案论证阶段结束时应该具备的可靠性资料和报告：

1.产品可靠性指标和可靠性总体方案论证报告；

2. 根据产品功能框图,建立产品可靠性框图和可靠性数学模型;
3. 产品方案阶段的可靠性预测报告和可靠性分配论证报告;
4. 新技术专题的可靠性增长试验报告;
5. 对各分系统下达的可靠性技术措施、可靠性设计统一规定和准则;
6. 元器件选用清单。

2.3 工程设计阶段的可靠性管理

这一阶段要求按照全机可靠性技术措施和可靠性设计统一规定,进行单元电路设计和结构设计,运用应力分析法对电路进行可靠性预测和可靠性审查,并改进薄弱环节。

(1) 根据分系统方案和总体方案的可靠性要求,建立分系统功能框图。由功能框图建立可靠性框图及其数学模型。用平均应力法或其他方法预测分系统的可靠性水平。分系统方案应保障分系统可靠性指标的实现。

(2) 把分系统的可靠性指标合理地分配到设备单元、电路单元、功能组件乃至元器件上。

(3) 严格按照分系统方案要求和系统可靠性设计规定,进行单元电路的线路和结构设计。

(4) 电路初步确定后,根据元器件可靠性预计手册,进行应力分析和第二次可靠性预测;达不到指标要求时,应进一步改进设计。

(5) 对稳定性要求较高的单元电路,进行性能容差分析和设计,并对单元电路进行环境适应性和电源波动性试验。

(6) 对关键电路进行失效模式与效应分析,及时改进可靠性和安全性的薄弱环节。

(7) 对全机进行潜在通路分析,在按单元电路进行分析时,必须考虑到一切外部通路的连接,按分析程序识别电路中存在的潜在通路。

(8) 由可靠性与质控部门负责单元电路的可靠性审查,签署通过或提出修正意见。可靠性审查的目的在于检查全机可靠性技术措施和可靠性设计统一规定是否在单元电路设计中得到贯彻,可靠性指标是否达到,纠正一切违反可靠性设计原则的错误和缺陷,并提出修改意见。

(9) 工程设计阶段结束时应具备的可靠性资料和报告:

1. 分系统的可靠性数学模型、可靠性预测、分析和总结报告;
2. 单元电路的应力分析与可靠性指标预测报告;
3. 关键电路的失效模式与效应分析报告,容差分析报告,环境适应性报告,电源波动性试验报告,失效分析改进报告;
4. 潜在通路分析与识别报告;
5. 可靠性审查综合分析报告;
6. 全机设计修改汇集和分析报告;
7. 环境试验实施方法和环境试验报告。

2.4 试制生产阶段的可靠性管理

这一阶段要求按照设计阶段确定的工程设计文件进行试制生产、试验分析和修改设计。