

可靠性工程

徐维新 秦英孝 编

电子工业出版社

可靠 性 工 程

徐维新 秦英孝 编

電子工業出版社

内 容 提 要

本书系统地阐述了可靠性工程的基本理论和方法，共分三篇二十章：第一篇为可靠性基本理论；第二篇为可靠性试验；第三篇为维修性分析。内容全面，简明扼要，并有实例，便于自学。

本书可供具有中专以上的产品定货、设计、试验、管理、以及质量控制人员学习之用，也可作为大专院校及可靠性工程学习班的教材。

可靠性工程

徐维新 秦英孝 编

电子工业出版社出版（北京海淀区万寿路）
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
西安军航印刷厂印刷

*

开本：787×1092毫米 1/16 印张：24 $\frac{1}{8}$ 字数：580千字

1988年8月第一版 1988年8月第一次印刷

印数：1-3000册 定价：7.35元

ISBN7-5053-0238-8/TB·2

前 言

目前,可靠性理论和技术伴随着科学技术以突飞猛进的速度在发展,已成为一门独立的边缘性科学,且在军事科学、管理科学以及工程实践中被广泛重视和应用。历次战争的教训、市场的竞争以及产品不可靠造成的巨大损失,使人们清醒地认识到,可靠性不仅影响产品的有效性,而且关系到一个国家的经济及安全。军工产品不可靠还直接影响战斗力,甚至战争的胜负。所以,系统地学习可靠性工程,并用可靠性理论来提高产品的有效性是定货、设计、科研、管理人员刻不容缓的一项任务。

本书分为三篇:第一篇为可靠性基本理论,介绍了可靠性的基本概念,系统可靠性的评价,系统可靠性和有效性的分析,故障模式、影响及危害性分析,故障树分析,系统可靠性和有效性的预计、分配和评审,机械可靠性设计,人的可靠性测量和预计等内容;第二篇为可靠性试验,介绍了可靠性试验方案的设计,寿命试验,加速寿命试验,可靠性筛选试验等;第三篇为维修性分析,主要介绍了维修性的定性概念和定量分析,全寿命费用等概念。

本书侧重于概念叙述和工程应用,对数学推导删繁就简,力求简明扼要,并对每一可靠性数学模型给以实例说明,以便自学,既可作为从事科研、设计、试验、生产管理、质量监控人员学习可靠性工程之用,又可作为工科大学各专业及工业管理专业的参考书。

本书由徐维新(第一~十一章)、秦英孝(第十二~二十章)同志编写,谢高第高级工程师审阅了第二篇初稿后,由徐维新修改定稿。在编写中,何宏程等同志给以大力支持。另外,我们在编写中还参考了许多教授、专家的著作和论文。在此对上述同志及先生们表示衷心的感谢和深切敬意。

由于编者水平有限,书中定有不少缺点和错误,恳切希望广大读者不吝批评指正。

编 者

1988年2月于西安

目 录

第一篇 可靠性基本理论

第一章 概述

§ 1.1 可靠性的重要性	(1)
§ 1.2 可靠性工程的内容和程序	(6)
§ 1.3 可靠性工程的历史概述	(12)

第二章 可靠性特征量

§ 2.1 可靠度函数	(15)
§ 2.2 故障密度函数	(18)
§ 2.3 故障率	(20)
§ 2.4 寿命	(22)
§ 2.5 故障率曲线	(27)

第三章 部件可靠性的评价

§ 3.1 概述	(32)
§ 3.2 故障/维修模型	(35)
§ 3.3 故障模型的选择	(39)
§ 3.4 可靠性的评价方法及图表的应用	(45)

第四章 典型系统可靠性和有效性分析

§ 4.1 概述	(81)
§ 4.2 系统可靠性框图的画法	(83)
§ 4.3 串联系统的可靠度	(86)
§ 4.4 并联系统的可靠度	(89)
§ 4.5 串—并联系统和并—串联系统的可靠度	(92)
§ 4.6 贮备系统	(93)
§ 4.7 用二项式展开法求系统的可靠度	(100)
§ 4.8 用条件概率求系统的可靠度	(101)
§ 4.9 用最小割集法求系统的可靠度	(101)
§ 4.10 有效性模型	(108)

第五章 故障模式、影响与危害性分析

§ 5.1 概述	(109)
----------------	-------

§ 5.2 FMECA的适用范围	(110)
§ 5.3 故障模式和危害度的分类	(110)
§ 5.4 FMECA的实施步骤	(114)
§ 5.5 举例	(117)

第六章 故障树分析法

§ 6.1 概述	(119)
§ 6.2 确定顶事件建造故障树	(124)
§ 6.3 故障树的结构函数	(129)
§ 6.4 故障树的定性分析	(131)
§ 6.5 故障树的定量分析	(136)

第七章 系统可靠性和有效性的预测和分配

§ 7.1 系统可靠性的预测	(154)
§ 7.2 系统有效性的预测	(161)
§ 7.3 系统可靠性的分配	(162)
§ 7.4 系统有效性的分配	(169)

第八章 系统可靠性和有效性的评定

§ 8.1 系统可靠性的点估计	(171)
§ 8.2 系统可靠性的区间估计	(178)
§ 8.3 可靠性设计评审提要	(180)

第九章 机械的可靠性设计

§ 9.1 概述	(193)
§ 9.2 机械零件可靠度的计算	(200)
§ 9.3 机械零件可靠度的近似解——图解法	(207)
§ 9.4 可靠度与安全系数的关系	(208)

第十章 质量和可靠性

§ 10.1 实现质量和可靠性控制的问题	(213)
§ 10.2 可靠性控制和质量控制	(214)
§ 10.3 需要和展望	(218)

第十一章 人可靠性的测量和预测

§ 11.1 影响人可靠性的因素	(219)
§ 11.2 认识的可靠性	(220)
§ 11.3 人一机系统的数学模型	(220)
§ 11.4 减少人为差错的某些设计惯例	(224)

第二篇 可靠性试验

第十二章 概述

- § 12.1 可靠性试验的目的和内容 (227)
- § 12.2 可靠性试验的原理和程序 (233)
- § 12.3 可靠性数据的收集与分析 (234)
- § 12.4 可靠性试验在可靠性工程中的地位 (236)

第十三章 可靠性统计试验方案

- § 13.1 可靠性抽样试验方案概述 (237)
- § 13.2 可靠性截尾试验方案的设计 (262)
- § 13.3 概率比序贯抽样方案的设计 (267)
- § 13.4 可靠性试验方案的选择 (270)

第十四章 可靠性寿命试验

- § 14.1 寿命试验及其设计原则 (272)
- § 14.2 指数型产品的寿命试验 (374)

第十五章 加速寿命试验

- § 15.1 加速寿命试验的基本概念 (278)
- § 15.2 加速寿命试验的失效物理模型 (281)
- § 15.3 加速寿命试验的方法 (284)
- § 15.4 加速寿命试验的设计 (290)
- § 15.5 加速寿命试验的基本假设 (294)
- § 15.6 恒定应力加速寿命试验数据的图估法 (295)
- § 15.7 恒定应力加速寿命试验的数值分析法 (305)

第十六章 可靠性筛选试验

- § 16.1 概述 (311)
- § 16.2 可靠性筛选方案的确定 (314)

第三篇 维修性分析

第十七章 概述

- § 17.1 维修性的基本概念 (320)
- § 17.2 维修性的要求 (328)
- § 17.3 人素工程 (333)
- § 17.4 维修性审查表 (337)

第十八章 维修性特征量

§ 18.1 维修性特征量 (340)

§ 18.2 有效度与系统效能 (348)

第十九章 维修数据的统计与处理

§ 19.1 维修数据的统计与整理 (353)

§ 19.2 维修数据的分析 (355)

第二十章 全寿命费用

§ 20.1 费用—效果分析的基本概念 (362)

§ 21.2 产品使用与维修费用的分析 (367)

附表

附表 1 一次抽样检验方案的特性函数 $L(p)$ 计算表 (736)

附表 2 一次抽样方案的 np_0 和 C 值表 (376)

附表 3 正态分布单侧容差系数 (377)

主要参考资料 (377)

第一篇 可靠性基本理论

第一章 概 述

本章将介绍可靠性的基本概念,可靠性的的重要性,可靠性工程的基本任务和工作程序,以及可靠性工程的发展史。

§ 1.1 可靠性的重要性

可靠性是产品质量的时间性特征。产品的可靠性水平是一个国家技术队伍的素质、管理以及工业基础水平的重要标志。军用产品的可靠性水平是最重要的质量指标,是战斗力的重要因素。

可靠性工程是研究与产品故障作斗争的科学技术活动的总体。它要求应用现代科学技术,在人力、物力以及时间允许的条件下,对于产品在全寿命周期内所处条件下的性能,从设计、试制、制造、贮存、运输、使用维护直到报废的方式,作全面考虑,统筹安排,提出技术上和组织上的措施,以便尽量减少系统的故障,或允许部件失效而系统不发生故障,尽量延长无故障工作时间,从而保证系统的效用最优。

一、问题的提出

(一) 可靠性是战争的产物

二次大战前,在产品的设计、试制、制造、贮存、运输以及使用维护中着重研究性能指标,尽管没有明确地引用“可靠性”一词,但是也考虑到产品的耐久性、寿命、稳定性、维修性,以及安全性等。这实际上已运用了可靠性的概念。

把可靠性问题作为专门的问题来研究,是从二次大战中开始的。当时,交战双方调集了大量的兵力和兵器参战,出现了雷达、飞航式导弹、弹道式导弹等较复杂的新武器。这些武器的核心——电子设备屡出故障,丧失了应有的战斗力。如德军向英国发射的V1飞弹,多数在中途爆炸,有的甚至在发射场上空爆炸,引起德国军方和舆论界的重视,便开始应用概率论建立数学模型来研究可靠性,后因战争失败而中断。美国运往远东地区的装备故障十分严重,空军机上电子设备有60%以上发生故障,海军舰上电子设备有70%以上发生故障。为保障装备的正常工作,美军组成了庞大的维修队伍、后勤保障队伍。这种沉重的教训引起美国政府、军界、企业界和学术界的高度重视,于1943年联合成立了可靠性研究小组。这就是可靠性研究的开始。当时的研究对象是元器件(主要是电子管),虽然取得了不少成果,但整机提高不大,直到四十年代末五十年代初,设备可靠性仍很低。如1949年美军无线电通讯设备约有14%的时间,水声设备约有48%的时间,雷达设备约有84%的时间处于故障状态。1950年美国海军电子设备约有2/3不能正常工作,美军2600种165000台设备在一年内发生了一百多万次故障。据统计,对电子设备每年的维修费是设备

购置费的60%到500%。五十年代成立了不少研究小组，研究生产故障少、维修费用低的产品。直到1959年，美军的维修费用仍占国防预算的25%。1957年美国国防部电子元器件可靠性顾问团AGREE提出了AGREE报告，基本上确定了可靠性工程的研究方向。它的许多思想和结论至今仍有指导作用。六十年代初开始进行维修性设计和评价的研究，到六十年代末，已从狭义的可靠性发展到广义的可靠性（包括狭义可靠性、维修性和有效性）的研究。至今，可靠性工程已成为多学科的边缘学科，已从航空、宇航工业，普及到民用工业。

（二）可靠性是军用产品的首要质量指标

以空军机载电子设备为例说明现代装备具有以下特点：

1. 在质的方面高级化，自动化，人工职能化水平提高很快，作战的效率和威力很大；
2. 在量的方面大型化，电子设备元器件多达几十万个；
3. 在结构方面复杂化；
4. 在工作环境方面范围扩大化，条件严格化；
5. 在研制方面高速化；
6. 在应用技术、材料和器材方面尖端化；
7. 在维修费用方面需要增加，但要求最优化；
8. 在维修技术方面要求高了，而培训和后勤保障困难大了。

如果产品不可靠，将会导致严重的后果：

1. 导致军事任务不能完成 在平时，可使任务和训练不能按期完成，甚至带来巨大损失，如1963年美军海军航空兵飞机的事故率为1.46次/10⁴飞行小时，共发生重大事故514次，毁机275架，死亡飞行员222人，损失2.8亿美元。事故的原因43%是器材不可靠造成的；在战时，会造成侦察不准，指挥失控，情报传不进，送不出，瞄不准，打不上，开不动，追不着，跑不了，贻误战机，不能有效地打击敌人，保存自己，导致战场失利，造成不应有的伤亡和损失，甚至危及部队的生存，危害国家和人民安全。

2. 导致维修工作量繁重 使维修队伍庞大，要求维修技术高超，增加训练负担，使军队臃肿。如二次大战中，美军平均有250个电子管的设备就要一个技术人员来维修。

3. 导致维修费用巨大，造成备件生产、运输、贮存和供应负担很重 据美军统计，五十年代对电子设备每年的维修费用是设备购置费的60%到500%，1959年的维修费用占国防总预算的25%。

不难理解，产品的可靠性是军队战斗力的重要因素，它是一个国家工业现代化的重要标志。要想提高军队战斗力就要用现代化装备武装军队，而现代化的装备，离开了高可靠性是毫无意义的甚至是潜在的危机。国外有人认为：任何武器系统必须能自始至终可靠地工作，即使性能降低了，也仍能可靠地工作，而不需要性能指标先进、可靠性不高的武器系统。还有人认为，可靠性应作为航空产品质量的首要指标。我们认为这种观点是正确的。

（三）可靠性是企业的命脉

企业的兴旺，决定于产品的竞争力，企业丧失竞争力就难以生存。而决定产品竞争力的重要因素是产品的可靠性。现在，军用产品都要求达到一定的可靠性指标，否则就不能接收，成为废品，从研究到生产的一切费用都报销了，而且以后可能失去用户。美国

六十年代中期，每年因产品质量不可靠要损失约400亿美元。苏联1958年损失1500~2000亿卢布；澳大利亚1976年外贸损失8~10亿美元，造成15万个中小企业濒于破产。而日本人把可靠性当作“国家兴旺”的大事，其产品可靠性相当高，博得世界用户的称赞，赢得了市场，成为经济强国。

现在，国内对于产品的可靠性已有相当的重视，产品可靠性增长得很快。如卫星的火箭发射系统的可靠性相当高，连美国也来签订合同，要求为其发射卫星。

总之，在科学和技术迅速发展的今天，产品的可靠性显得尤其突出。国家已把可靠性列为评价产品的重要质量指标，它直接关系到产品研制的成败。产品的可靠性与性能、成本以及研制周期等基本价值目标有着密切的关系。如果在确定价值目标的价值时，忽视了可靠性或在设计和生产中不能保证产品所应有的可靠性，其性能就不能充分地发挥，甚至无实用价值，从而可能造成不可估量的损失，为之付出的一切代价都会丧失，即使应用这种产品，也可能带来不可估量的潜在危害（包括生命安全和政治上的损失）。但是，如果不适当地提出可靠性指标也是不应该的，它会带来技术上的困难，资金和时间的浪费，也会损害其它基本价值目标，从而降低产品的总价值。那么如何控制产品的可靠性呢？这就是可靠性工程的主要课题。

二、可靠性、维修性和有效性的定义

可靠性和维修性的定义比较多，这里主要根据国家标准来介绍。本章只介绍定性的定义，可靠性定量的定义将在第二章里介绍，维修性和有效性的定量定义将在第三篇中介绍。

（一）可靠性

所谓**可靠性**是指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。

此定义中包含产品、规定的条件、规定的时间以及规定的功能等四个要素，并指明可靠性的特点是产品的一种能力，而不是一种性能。下面分别介绍各要素的含义。

1. **产品**——指研究对象是什么？因为不同产品的可靠性可能不同，为了进行比较，因此一提到可靠性就应明确是哪种产品的可靠性，这种产品包括哪些组成部分。有时某设备的一部分发生故障，但是由于人的控制并不影响完成规定的功能；有时，不是硬件问题，而是由于人或软件差错导致故障。所以，还应指出研究对象是否包括人和软件。一般不特别指出，就不包括人和软件。本书中所谓产品是指系统、设备、部件、元器件等任何装配等级上的硬件。使用这一术语是为了避免研究对象的大小或复杂程度，便于叙述。

2. **规定的条件**——预先规定的产品在其全寿命周期内所受的全部外部作用条件。所谓全寿命周期是指产品从设计、生产、运用到退役的全过程。所谓外部作用条件是指环境、运用和维修等条件。

环境条件包括自然环境条件和诱发环境条件。自然环境条件包括气候、地理等地球表面存在的各种因素。气候因素包括温度、湿度、大气压、盐雾、尘埃、风、雨、雾、霜、冰、雷击、电晕、放电、太阳辐射等。地理因素包括海拔高度、土壤、植物、动物、昆虫、微生物等。诱发环境条件包括人工制造的与人工改变的两种环境条件。前者是指人为放射现象、核爆炸冲击波、燃料燃烧引起的空气污染以及电磁干扰等；后者是指人的活动对自然

环境条件的作用而产生的环境条件，例如城市的存在引起地面和空气温度的提高，植物的变迁引起水土流失和地面湿度的降低等等。此外，诱发环境条件还包括振动、冲击、碰撞、跌落、惯性力等。

使用条件包括工作模式（是连续工作还是间歇工作）；工作时间和使用频度；输入信号的要求和误差；工作时能源特性和误差（如电压、功率、电磁场强度等）；机械应力（静载荷、动载荷的振幅和频率）；设备的操作程序；使用人员的技术水平等。

维修条件包括维修体制、维修方式；维修人员的素质；维修设备和工具等。

外部条件的各种因素都在其某个范围内随机地变化着，并且互相交织在一起作用于产品。

产品的可靠性受外部条件的影响很大，因此必须在产品设计任务书中明确规定产品所处的条件，不能不予限制。为了便于管理，有些环境条件已经标准化，例如日本将温度环境分为13种，湿度环境分为4种，振动环境分为4种。

3. 规定的时间——规定产品完成规定功能的时间。任何产品的可靠性总是随着时间的增长而下降，不同质量的产品下降的速度不同。因此，在提到产品的可靠性高低时，必须同时指出规定的时间是多长的可靠性；否则，就无法用可靠性高低来说明产品的质量。没有明确的时间要求，生产者与用户就没有共同语言，厂方无法预计和测量，用户无法判断产品是否合格，至于在发生故障时追究责任和索赔就更麻烦了。

规定时间的长短依不同产品不同情况而异。对于一般产品可用累计工作时间的长短来表示规定时间，如要求瞄准具工作200小时具有完成规定功能的能力，这时规定的时间就是200小时；又如海底电缆在20年内应能不发生故障，这时规定的时间就是20年。

规定时间的单位可以是时间单位如秒、分、小时、月、日、年；也可以是相当于时间的单位，如开关、继电器需保证开关多少次无故障，这时用次数作单位；而汽车往往要求行车多少公里无故障，这时的公里数相当于“规定的时间”，用“公里”作单位；航炮要求打多少发炮弹无故障，要求打的炮弹数相当于“规定的时间”，用“发”作单位。

4. 规定的功能——产品的性能指标。要强调指出，这里所指的完成规定功能，是指完成所有规定功能的能力而不是其中的一部分。如航炮的功能包括射速、射程和命中精度。只是射速和射程达到要求而命中精度达不到要求，就不能说它完成了规定的功能。在判断产品是否具有完成规定功能的能力时，人们往往有不同的理解，争执不休，因此必须规定明确的故障判据。有的产品在规定的时间内不允许发生故障；有的虽发生小故障，但因人的控制（如修理）仍能在规定的时间内完成规定的功能，这时就允许小故障发生，计算可靠性时不计算此故障。这一点也应该用故障判据规定出来。例如，乘汽车从咸阳到西安规定1小时内到达，如果途中汽车发生故障，司机及时排除了，汽车仍能在1小时内到达，这时就认为汽车具有完成规定任务的能力，即认为汽车是可靠的。

产品的几项功能往往有主次之分，各项功能的丧失引起的后果也不同。有时，要分别讨论各项功能的可靠性。

最后要指出，产品的可靠性不是产品的性能，而是产品抵抗外部条件的影响而保持完好的能力，是产品质量的时间性指标。任何产品最终都要发生故障，但是，发生故障前的工

作时间（即寿命）长短不同，越长说明越可靠。

一个产品的可靠性是由固有可靠性和使用可靠性两部分组成的。固有可靠性是产品早在设计阶段就确定了的可靠性指标，并在生产的各阶段得以确立。固有可靠性是产品本身具有的属性，由生产方在模拟实际工作条件的标准环境下，进行检测并予以保证的可靠性。

但是，产品生产出来后要经过包装、运输、贮存、安装、使用、维护保养、修理诸环节，在这个过程中产品的可靠性会受到种种条件，如环境、技术条件、维修方式的影响，即使一个本来不会失效的产品也可能由于这些环节中的不利因素，如包装不良、运输时的强烈冲击、使用时的错误操作等等造成失效。在这些环节中的可靠性称为使用可靠性。

一般认为，产品的工作可靠性可近似看作固有可靠性和使用可靠性之积。本书只讨论固有可靠性。国外介绍电子设备不可靠的原因及其比例如表1.1所示。

表 1.1 产品不可靠的原因及其比例

可 靠 性	固 有 可靠性	设计技术	40%	技 术	电 气	30%
		材 料	30%		机 械	10%
		制造技术	10%	制 造	20%	
	使用 可靠性	使用（运输、环境、操 作、安装、维修技术）	20%	现场使用	30%	
				其 它	10%	

失效是指产品丧失功能的现象，它是“可靠”的对立面。但多数整机或部件，仅由于元器件失效而导致整体丧失功能的现象可通过更换元器件或修理予以消除，这类产品称为可修产品。对可修产品来讲，失效可称为故障。

也有许多产品，如电阻、电容、晶体管之类的电子元件或集成电路之类的电子器件，一旦失效就难以修复，或修理的费用会超过制造的成本使得经济上是不值得修理的；还有些产品属于一次性使用的，如熔断器，导弹上的部件，发射卫星的火箭。上述两类产品一旦丧失规定功能，则或者不可能或者不值得或者不要求修复，这类产品称为不可修产品。对不可修产品而言，丧失规定功能的现象只能称为失效。在未涉及修理问题时，失效和故障都指丧失功能，所以许多定义和规律是一样的，我们往往只提出其中之一，读者可视情推广到另一个。一般书上并不严格区分失效和故障。

可靠性有狭义和广义两种意义。狭义可靠性仅指产品在其规定的条件下规定的时间内完成规定功能的能力。以后对“可靠性”一词若不加另外注明，均指狭义可靠性。广义可靠性通常包含狭义可靠性和维修性两方面内容，常称之为有效性。而耐久性、环境适应性和安全性也是广义可靠性所涉及的内容。

维修是为了保持或恢复产品能完成规定功能而采取的技术控制措施，当然仅适用于可修产品。维修性则是在规定的条件下在规定的时间内，按规定的程序和方法进行维修时，使产品保持或恢复到能完成规定功能的能力。有效性是指可修产品在某时刻具有或者维持规定功能的能力（当然是在规定的条件下）。可靠性好，产品不易产生故障，维持其功能的能力强；维修性好，一旦发生故障则容易修复，故障持续时间就较短，大部分时间仍能维持其功能的正常发挥，则具有规定功能的能力也较大。所以说有效性由可靠性与维修性综合

而成。耐久性是指产品在规定的使用和维修条件下，达到某种技术或经济指标极限（可以认为是其寿命终了）时，完成规定功能的能力。因此，可以把耐久性看作某一种特定“时刻”的有效性，但这个时刻不是预定的时间终点，而是达到某种技术或经济指标极限的“时刻”。

（二）维修性

所谓**维修性**是指产品在规定的条件下，规定的时间内能使其恢复功能的能力。亦即，它表示产品容易维修的程度。

维修性是产品的设计品质，主要决定于产品发生故障易于发现和排除的程度。很多产品维修时间的相当大的一部分是用于判断故障部位。现在一些复杂产品都有故障监控系统，一旦某部件发生故障，会很快地自动显示出来。此外，也有的产品在易发生故障的部件上设置检测接口，以便应用故障诊断仪进行检查。

产品的维修性直接影响着维修工作量的大小、维修人员的水平和数量、维修经费的高低以及维修设施的优劣等。

如同可靠性包含四个要素一样，维修性也包含四个要素：产品是什么，规定的条件是什么，规定时间是多长，恢复的功能是什么等。此外，它也是一种设计特性，可反映设计水平。

要特别指出，维修性同可靠性一样都是产品的固有属性，它是设计奠定的，生产和管理保证的。而维修性主要表示维修的难易程度，但它不仅决定于产品本身，而且还决定于与维修有关的其它因素。例如，维修人员的素质、维修的设施、维修方式和方法以及组织管理水平等。这些因素不是产品本身的问题，但却是维修性设计的不可分割的一些因素。

关于维修性的其它问题，将在第三篇中介绍。

（三）有效性

对于可维修产品来说，用可靠性表示其不易发生故障的能力，在使用中无故障工作时间越长越好；用维修性表示产品发生故障后容易维修的程度，维修时间越短越好。前者是产品处于能工作状态的时间，属于“可用时间”；后者是产品处于维修状态的时间，属于“停用时间”。它们以不同的侧面反映了产品的可用性。通常，对可修产品用有效性综合表示产品不发生故障的能力和易维修的能力。

所谓**有效性**是指产品在规定的条件下，当任务需要的时刻能完成规定功能的能力。

可靠性、维修性和有效性从三个不同方面反映了产品的可靠性问题。它们之间存在着内在的关系，这种关系将在第三篇讨论。

§ 1.2 可靠性工程的内容和程序

可靠性工程的任务很多，其基本任务概括起来就是两句话：确定产品可靠性和获得产品可靠性。在时间上，这两个基本任务是交织在一起的。

确定产品可靠性就是通过各种途径，如设计、预计、试验、系统分析等来确定产品的失

效机理、失效模式以及各种可靠性特征量的全部数值或范围等。

通过产品的全寿命周期（包括仅存在于意识、图纸、计划、公式中的“虚”的产品时期和产品从生产、出厂到报废为止的“实”的产品时期）中的一系列活动（即从构思、审查、研制、生产、使用、维修等）来得到并提高产品可靠性的各项措施，从而实现产品可靠性的最优化。

可靠性工程的基本内容可分为以下三部分

1. 可靠性管理 它包括制订可靠计划和其它可靠性文件(如可靠性标准等),对生产过程的可靠性监督,计划评审,建立失效报告、分析和改进系统。建立失效评审小组,收集可靠性数据和进行可靠性教育等。

2. 可靠性设计 它包括建立可靠性模型,进行可靠性预计、可靠性分配和各种分析(失效模式、影响及危害性分析、故障树分析、潜在通路分析、容差分析、贮备分析、功能试验、贮存、装卸、包装、运输及维修的影响分析,并提出必要的对策),以及选择和控制部件,确定可靠性关键部件等。

3. 可靠性试验 包括环境应力筛选试验、可靠性增长试验、可靠性鉴定试验、可靠性验收试验等。

此外,维修性工程 主要是研究把产品设计得易于维修的学科。实际上,它是可靠性设计的一部分。事实上,还有许多内容可作为可靠性工程的分支。例如,从组成系统的单元可靠性出发研究系统可靠性问题的系统可靠性工程;专门研究可靠性工程数学基础的可靠性数学;专门研究机械结构可靠性问题的机械工程概率设计;研究在人—机系统中,人为因素造成的系统故障及对策的人—机工程学也与可靠性工程有关;还有研究软件故障及其对策的软件可靠性等等。

实现可靠性工程的工作程序

要实现高可靠性,必须在产品投入现场使用前做大量的工作。这就需要从产品的方案论证开始直到报废为止的全寿命周期内有计划地开展可靠性活动。

一个产品的全寿命周期包括以下六个阶段

1. 方案构思的论证阶段 在该阶段中要发现和探索能满足规定要求的各种可能解决方法和初步方案,还包括拟定可靠性等级、对可靠性与成本的初步分析工作。

2. 评审阶段 该阶段的工作主要是完善所提出的方案,进行必要的硬件研制、试验,以及对产品的可靠性进行初步评价。

3. 设计研制阶段 在该阶段中要对产品及其主要辅助设备的设计、生产、试验和评价,包括建立可靠性数学模型,故障模式、影响及危害性分析,潜在通路分析(异常功能的出现与抑制),电子元器件及电路的容差分析,贮备分析,可靠性数据搜集和分析,制定元器件规划(控制元器件的选择与使用),进行可靠性预计与分配,实施可靠性增长试验,考虑功能试验和各种环境因素及维修对产品可靠性的影响,估计生产及现场使用的蜕化系数。

4. 生产阶段 该阶段是产品从批准生产开始直到最后交货与接收的过程。其工作内容如下:提出质量一致性检验方案,元器件筛选规范,可靠性验证试验(包括早期生产批的鉴定试验与最后生产批的验收检验),还有确定是否存在耗损失效模式的耐久试验。

5. 使用阶段 在该阶段, 应通过使用与维修, 搜集现场数据以测定产品的现场可靠性, 为改进设计和改进工作提供依据。

6. 报废处理阶段 在该阶段主要进行典型产品的技术状态分析、失效分析, 积累资料。

设计人员最感兴趣的是规定在系统的研制阶段必须进行哪些可靠性工作。在美国文件 AFSCP—800—XX《可靠性和维修性管理指南》中有明确的规定。现摘录可靠性设计规范如表1.2所示, 它反映了产品的可靠性计划内容及每一内容在全寿命周期各阶段的重要性。表1.2也符合美国MIL—STD—785《系统和设备的研制和生产可靠性管理规划》的要求。

表 1.2 可靠性工程的内容

内 容	全 寿 命 周 期 各 阶 段 的 工 作 内 容				
	方案论证	评 审	设计研制	生 产	使 用
确定要求	××××××××	××××××A A A A	A		
可靠性模型	×××××	××××××××××	××××		
可靠性预计	×××××	××××××××××	××××		
可靠性分配	0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0		
失效模式分析	0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	××××		
可靠性设计	0 0 0 0 0	××××××××××	××××××××××		
元件选择	0 0 0 0 0	××××××××××	A A A A		
设计审查	0 0 0 0 0	××××××××××	××××		
编制设计规范	××××××	××××××××××	×		
编制验收规范	×××	××××××A A A A	A		
可靠性评价试验	---	××××××××××	×××××		
失效分析	---	××××××××××	××××××××××	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0000000000
数据收集系统	---	××××××××××	××××××××××	0 0 0 0 0 0 0 0 - 0	0000000000
质量管理		0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	××××××××××	××××××××××	0000000000
环境试验		×××××	 A A A A	A	
可靠性验收试验		××	 A A A	A 0 0 0 0 0 0 0 0	

说明 ----- 为获得最高成功概率所规定的措施; 0000000000 必要的措施(误差影响极少);
 ×××××× 非常重要的措施(误差常有影响); A A A A A A 关键性的措施(误差影响很大);
 不太重要的措施(用以修正以前的结果)。

根据设计单位制订的可靠性计划, 拟定在设计、制造各阶段为全面达到既定指标的各项工作顺序, 称为可靠性设计程序。它可用图1.1来说明。

对图1.1中的各项工作说明如下:

1. 制定可靠性指标 一般在产品合同书和设计任务书中应明确提出产品的可靠性指标。可靠性指标常常由用户提出来同厂方协商, 采用折衷的方法确定的。用户提出指标的根据是产品的用途(任务)、重要性、使用的时间、工作环境、维修条件、经费以及产品的体积和重量等; 厂方的根据是本厂的技术水平、管理水平、设备能力、所能得到的(依市场调查)原材料和外构件可靠性水平、成本核算、供货周期等条件。

2. 元器件数据的收集与分析 在设计初期, 要收集原材料、元器件等外购件的基本失效率。虽然这些失效率数据不够精确, 但在设计初期可用元器件计数预计法大概地估计出产品的失效率。在设计后期可采用元器件应力分析法, 把各种条件, 如环境、负载等考虑进去, 对基本失效率加以修正, 得到应用失效率, 从而可比较精确地估计产品的可靠性。

3. 可靠性分析 在开始设计时, 应对产品进行可靠性分析。这种分析是为了在可靠

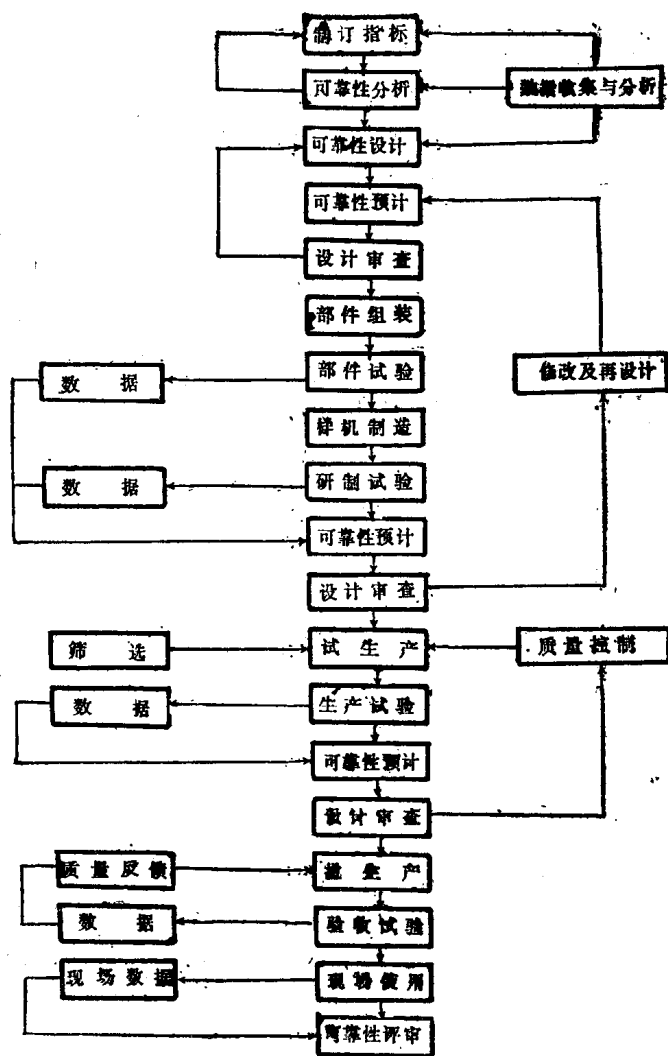


图 1.1 可靠性设计程序

性指标、经济效益、计划及总费用之间进行平衡。

可靠性分析是指建立可靠性模型，失效模式、影响及危害性分析（FMECA），故障树分析（FTA），电子元器件及电路的容差分析，功能试验，环境对产品可靠性影响的分析，潜在通路分析等等。

（1）建立可靠性模型 对于系统整机来讲，可靠性模型是系统和组成系统的各单元之间可靠性关系的表示形式。它可以是网络图，也可以是数学公式或其它形式。它可根据系统的功能框图推导出来。对于可靠性的各种分析，例如分析产品可能产生的各种失效，以及可靠性分配、可靠性预计等工作，可靠性模型是最基本的依据。

（2）失效模式分析 对元器件每一失效模式进行分析，以便确定可能失效的部位、失效模式和失效机理。

（3）失效影响分析 对系统中元器件可能发生的各种潜在的失效进行研究，以便确定每一种元器件失效对系统及其它元件产生的影响。

（4）失效后果分析（失效危害性分析） 对系统的潜在失效与系统其它部分的关系