

结论	1
第一篇 可靠性基本理论	3
第一章 概述	3
§1.1 可靠性问题的重要性	3
§1.2 可靠性工程的内容和程序	8
§1.3 可靠性工程发展的概况	14
第二章 可靠性指标	17
§2.1 可靠度函数	17
§2.2 故障密度函数	20
§2.3 故障率	22
§2.4 平均寿命和方差	24
§2.5 故障率曲线	30
第三章 可靠性数据的统计分析	34
§3.1 可靠性数据	34
§3.2 可靠性特征量的非参数估计	35
第四章 典型系统可靠性的分析	41
§4.1 系统可靠性和可用性分析概述	41
§4.2 系统的可靠性模型	42
§4.3 串联系统的可靠度	47
§4.4 并联系统的可靠度	50
§4.5 串—并联系统和并—串联系统的可靠度	53
§4.6 k/n 系统的可靠度	54
§4.7 贮备系统的可靠度	55
第五章 故障模式、效应及危害性分析	58
§5.1 概述	58
§5.2 故障模式和危害性的分类	59
§5.3 完成 FMECA 所需的资料	64
§5.4 FMECA 的实施步骤	65
§5.5 举例	67

第六章 故障树分析法	69
§6.1 概述	69
§6.2 确定顶事件建造故障树	74
§6.3 故障树的结构函数	79
§6.4 故障树的定性分析	82
§6.5 故障树的定量分析	88
第七章 维修性和可用性	95
§7.1 维修性及其特征量	95
§7.2 可用性	100
第八章 人可靠性的测量和预测	103
§8.1 影响人可靠性的因素	103
§8.2 认识的可靠性	104
§8.3 人一机系统的可靠性数学模型	104
§8.4 减少人为差错的某些设计惯例	108
第二篇 维修管理基础	113
第九章 概述	113
§9.1 维修管理的现代化	113
§9.2 现代维修管理者的职能	115
第十章 维修策略	117
§10.1 维修方式	117
§10.2 确定预防维修周期的原则	118
第十一章 维修数据的统计与处理	120
§11.1 维修数据的统计与整理	120
§11.2 维修数据的分析	122
第十二章 维修管理中的PDCA循环	132
§12.1 概述	132
§12.2 PDCA循环的步骤	133
§12.3 应用举例	134
第十三章 计划评审技术	138
§13.1 概述	138
§13.2 网络图	139

§13.3 网络图的计算	147
第十四章 存贮论	162
§14.1 基本概念	163
§14.2 控制库存量的方法	164
§14.3 确定性存贮模型	165
§14.4 随机性存贮模型	169
第十五章 全寿命费用分析	172
§15.1 全寿命费用分析	172
§15.2 装备使用与维修费用的分析	176
§15.3 降低全寿命费用的措施	185
附篇 可靠性数学基础	187
第一章 预备知识	187
§1.1 集合的基本概念和表示法	187
§1.2 集合的运算规则	189
§1.3 布尔代数及其运算规则	193
§1.4 组合	194
第二章 随机事件及其概率	196
§2.1 随机现象与随机事件	196
§2.2 随机事件的概率与频率	199
§2.3 概率运算法则	204
第三章 随机变量及其分布	214
§3.1 随机变量及分类	214
§3.2 随机变量的分布	215
§3.3 常用随机变量的分布	218
第四章 随机变量的数字特征	228
§4.1 随机变量的数学期望	228
§4.2 随机变量的方差	230
第五章 样本及抽样分布	233
§5.1 随机样本和统计量	239
§5.2 抽样分布	236

第六章 统计推断的数值分析法	238
§6.1 参数估计	238
§6.2 假设检验	243
第七章 图分析法	250
§7.1 指数分布概率纸的应用	250
§7.2 正态分布概率纸的应用	251
§7.3 对数正态概率纸的应用	252
§7.4 威布尔分布概率纸的应用	253
附表1 正态分布分布密度函数表	263
附表2 正态分布表	265
附表3 χ^2 分布表	269
附表4 泊松分布表	271
附表5 泊松累积分布表	275
附图 正态分布概率纸	
附图 对数正态分布概率纸	
附图 威布尔分布概率纸	
参考资料	281

绪 论

任何技术装备(或称产品)在贮存、运输和使用过程中,总是受到内部和外部因素的影响,使其技术状态恶化而不能充分发挥,甚至不能发挥其技术性能,不能完成任务。因此,需要进行维修。

所谓维修是指对产品进行维护和修理的全部活动的总称。其任务是对产品实施有效的监控和管理,使其保持或恢复良好状态,以便能随时可用,随时好用,充分发挥其效能。对部队来讲,维修的基本任务是使军用装备经常保持和迅速恢复到良好状态和战斗准备状态,确保反应时间最短,出动强度最大和持续作战时间最长。为此,不仅要技术上确保装备具有良好的可靠性、维修性和技术性能,而且对整个维修工作的组织管理应科学化现代化,确保以最少的人力、物力和时间获得最大的维修效果。

由于技术装备尤其是军用装备随着科学技术的迅速发展,其功能日益多样化。规模大型化、结构复杂化、技术尖端化、研制周期短期化,以及应用环境不断扩大和恶劣,这就使得维修的重要性大大增加了,维修能力已成为战斗力的重要因素。同时,维修费用也在惊人地增加。50年代末,美军的维修费用竟达国防装备费用的1/3。在这种情况下,传统的维修管理已不适应,要求以现代科学作指导,开展了对可靠性理论和技术、维修管理思想、维修策略、维修体制编制、维修技术、维修计划管理和备附件供应等的研究。于是,逐步形成了以可靠性为中心的维修思想指导拟定维修策略,和用全系统全寿命费用的观点综合评定装备的订货、使用、维修等,逐渐形成了现代维修管理科学——维修工程学。

所谓维修工程学是以技术装备为对象,研究维护和修理的理论、技术和管理的综合性科学。

维修工程学是一门新兴的边缘性科学,已有三十年的历史,在国内的研究是近十年的事,而普及教育则是近几年的事。它尚不完善,仍在发展中。它所包括的内容众说纷纭,大体上可归纳为维修技术和维修管理两方面。

一、维修技术方面

1. 可靠性理论

主要包括可靠性数学、可靠性物理、可靠性工程(设计、生产、试验和管理)三部分。它是研究故障发生规律的科学是使产品如何经久耐用的科学。因此它能指导人们在产品的设计阶段就能估计出其可靠性水平,以便把故障因素消灭在设计 and 生产阶段,或将故障因素最大限度地排除在设计 and 生产阶段。当然,它也能指导使用维修者和管理者正确地使用和维修产品,根据产品的可靠性水平正确地选择维修策略等进行维修管理。它是维修管理的理论基础。

2. 维修性理论

它主要研究如何使产品设计得在发生故障后能很快地容易地维修的问题,是使产品恢复可靠性的科学。它不仅要考虑到产品本身,还必须考虑人的因素。例如,人的体形、反应能力、心理特征、工作环境对人的情绪和技能的影响等。

3.故障诊断理论

它主要研究如何显示和发现产品故障状态和故障部位的问题。是产品维修性的一部分。发现故障部位是维修复杂产品占用时间相当多的工作项目。现代维修技术要求复杂产品的故障状态和故障部位能自动显示，要求产品备有自动检测、自动记录产品的状态的装置（或称监控系统）。

4.维修技术

二、维修管理方面

它主要研究如何应用现代管理科学指导维修工作。在维修工作中，管理的作用是很大的，没有现代化的管理，就没有现代化的维修。它主要包括维修指导思想、维修条令条例研究、维修组织机构、维修决策分析、维修计划管理、维修经济分析等。

维修工程学涉及的学科很多，当然不止上述内容，它还涉及到产品的构造原理等。因为不了解产品的构造原理，就无法进行维修。由于这方面内容很多，习惯上把它划在另外的专业课中，这里就没有列入。

总之，维修工程学是现代科学理论与维修工程相结合的产物，它涉及的科学领域和研究的问题都是十分广泛的。它既研究物理（如工程技术方面的理论），又研究事理（如组织管理方面的理论）；它既研究管理部门的决策性问题，又研究基层的组织实施和技术问题。

目前，国内正在开展现代维修管理的研究和普及教育工作，部队院校普遍开课。部队正在逐渐实施现代维修管理，已收到了明显的效果。

考虑到，目前部队的情况和学员培养目标，本书不系统地阐述维修工程学的全部内容，仅阐述工作中必须的基本理论和方法，重点介绍可靠性理论，故本书取各《可靠性与维修管理基础》。

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 可靠性问题的重要性

可靠性是产品质量的时间性指标，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

在第二次世界大战前，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，是从第二次世界大战中开始的。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年美国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、维修性和可用性)的研究。至今,可靠性工程已成为多学科的边缘科学,已从航空、宇宙工业,普及到民用工业。

(二) 可靠性是军用产品的首要质量指标

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,条件严酷化;
5. 在研究方面高速化;
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 $1.46\text{次}/10^4\text{飞行小时}$,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。事故的起因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,导致战败失利,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,国内尤其是军方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,即使应允这种产品,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,如果不适当地提高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,也就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、维修性和可用性的概念

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,可靠性定量的描述将在第二章里介绍,维修性和可用性的定量描述将在第七章中介绍。

(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——研究对象是什么?因为不同产品的可靠性可能不同,不宜进行比较,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类环境条件。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温度的降低等等。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；输入信号要求的误差；工作时的能源特性和误差（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、日、月、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，是指完成所有规定的功能，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等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，并且在生产中的各阶段得以确立。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	80 %
		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,读者可视情况推广到另一个。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,常称之为可用性。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。可用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就较大。所以说可用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护条件下,达到某种技术或经济指标极限(可以认为是其寿命终止)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”的可用性,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配备等。

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,但却是维修性设计所必须考虑的一些因素。

关于维修性的其它问题,将在第三篇中介绍。

(三) 可用性

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,对可修产品用可用性综合表示产品不发生故障的能力和易维修的能力。

所谓**可用性**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、维修性和可用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,这种关系将在第七章讨论。

§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故障机理、故障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 它包括制订可靠性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(故障模式、效应及危害性分析、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。

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设计、生产、试验和评价, 包括建立可靠性数学模型, 故障模式、效应及危害性分析, 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、故障分析, 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	xxxxxxx	xxxxxxAAAA	A.....		
可靠性模型	xxxxx	xxxxxxx	xxxx.....		
可靠性预计	xxxxx	xxxxxxx	xxxx.....		
可靠性分配	00000	0000000000	0000.....		
失效模式分析	00000	0000000000	xxxx.....		
可靠性设计	00000	xxxxxxx	xxxxxxx		
元件选择	00000	xxxxxxx	AAAA.....		
设计审查	00000	xxxxxxx	xxxx.....		
编制设计规范	xxxxxxx	xxxxxxx	x.....		
编制验收规范	xxx	xxxxxxAAAA	A.....		
可靠性评价试验	---	xxxxxxx	xxxxx		
故障分析	---	xxxxxxx	xxxxxxx	0000000000	0000000000
数据收集系统	---	xxxxxxx	xxxxxxx	00000000-00	0000000000
质量管理		0000000000	xxxxxxx	xxxxxxx	0000000000
环境试验		xxxxx	AAAA	A.....	
可靠性验收试验		xx	AAA	A000000000	

说明 ----- 为获得最高成功概率所规定的措施；

xxxxxxx 非常重要的措施（误差常有影响）；

..... 不太重要的措施（用以修正以前的结果）；

0000000000 必要的措施（误差影响极少）；

AAAA AA 关键性的措施（误差影响很大）。

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）
原材料和外购件可靠性水平、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性

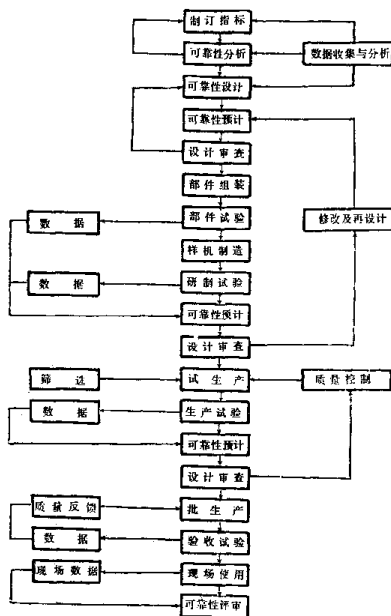


图 1.1 可靠性设计程序

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、效应及危害性分析 (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故障,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 故障模式分析 对元器件每一故障模式进行分析,以便确定可能故障的部位、故障模式和故障机理。

③ 故障效应分析 对系统中元器件可能发生的潜在故障进行研究,以便确定每一种元器件故障对系统及其它元件产生的影响。

④ 故障后果分析(故障危害性分析) 对系统的潜在故障与系统其它部分的关系进行研究,以便根据对系统安全可能造成的威胁以及不能接受的性能退化,或系统的可用期、可用性降低的情况,确定每一个故障模式影响的严重性。

在进行故障模式、故障及危害性分析后,应提出可能采取的预防措施和改进措施,以提高产品的可靠性。

⑤ 故障树分析 在系统(整机)设计过程中,通过对可能造成系统故障的各种因素(包括硬件、软件、环境、人为因素等)进行的分析绘出相应的故障树,从而确定系统故障原因的各种可能组合方式及其发生的概率,以便计算系统故障的概率,采取相应的纠正措施,提高系统的可靠性。

⑥ 电子元器件及电路容差分析 分析由于组成电路元器件公差而造成电路参数超差的现象。

⑦ 贮备分析 根据产品故障对安全、费用、停工时间等可能造成的后果来确定是否需要贮备,并提出万一产品故障,为完成任务可供选择的办法,以及分析由于加入了贮备导致产品可靠性的变化。

⑧ 功能试验及环境条件对产品可靠性影响的分析 确定功能试验及各种环境条件,如气候、生化、电磁、机械(工作时的振动、贮存、运输、安装)等条件对产品可靠性的影响。

⑨ 潜在通路分析 确定在正常工作时,潜在通路导致产品出现不需要的功能,或使需要的功能受到抑制的现象。

4. 可靠性设计 可靠性设计包括:

① 可靠性分配 可靠性分配是把系统总的可靠性指标合理地分配给下一级,直至分配给元器件的工作。分配的方法有等分配法、代数法和重要度分配法等等。从系统分配到部件时,可用重要度分配法;从部件分配到元器件时,可用代数法。详见第七章。

② 可靠性预计 可靠性预计是对所采用的设计能否满足既定可靠性要求的估算工作。

③ 漂移设计 漂移设计是避免由于元器件参数随时间改变等随机因素而导致产品故障的一种设计技术。

④ 贮备设计 贮备设计是根据贮备分析的结果进行定量设计的方法。

⑤ 耐环境设计 耐环境设计是对于气候、生化、机械和电磁环境造成产品故障的一种对策性设计。

⑥ 考虑安全裕度的设计 产品的故障是由于产品受到的应力(包括电应力,如电压、电流、功率等),或机械应力(力、力矩等)超过其强度极限。因为应力和强度都是有一定变化范围的随机变量,因此,安全裕度设计就是从统计角度出发来考虑元器件或零部件如何不易失效的一种方法。由于电子元器件和机械零部件的失效机理是不同的,所以有两种考虑安全裕度的设计方法。

1° 机械概率设计 它是应用应力和强度的干涉理论而导出的机械可靠性设计方法。

2° 减额设计 它是用降低额定应力的方法来提高可靠性的方法。

⑦ 热设计 事实表明,元器件的工作温度是电子产品失效的重要因素。热设计就是通

过降低产品内元器件的工作温度来提高产品可靠性的设计方法。它除了设法将输入的热降低到最低限度外，还要设法提供低热阻的散热通道。

⑧ 维修性设计 这是考虑一台设备能方便地维修的设计技术，例如模块化设计法，故障诊断技术的应用等。

5. 可靠性预计与审查 可靠性预计就是根据元器件零部件的可靠性数据，估计系统的可靠性特征值。在不同的阶段，可靠性预计的内容不同，其差异在于数据来源。在新产品研制之前，数据主要来源于手册或同类型产品，这就是设计阶段的可靠性预计；在研制试验即可靠性增长试验中得到的数据可能是可靠性估计的唯一来源，随后所生产的产品试验数据将相继可利用；投入使用后，数据来自现场试验。此外，在评审时的可靠性预计，称为可靠性评定。

各阶段的可靠性审查就是要求判断上述各阶段的可靠性估计值（特征指标的估计值）是否满足既定要求，或达到什么程度，并推断潜在的不可靠因素，提出对策。只有可靠性评审通过后才能进入下一程序的工作。

6. 样机试制 样机试制包括部件组装、部件试验及样机制造等程序。样机应严格按照设计要求制造，以便给可靠性增长试验提供样品。

7. 可靠性研制试验（可靠性增长试验） 可靠性研制试验（增长试验）即预先鉴定试验，它是在产品的研制阶段进行的性能监控、失效检测、失效分析、设计更改和验证，以便解决可靠性的大部分问题，并在生产开始之前尽早采取措施来防止问题再发生。这样，随着产品设计、研制、生产各阶段工作的相继进行，产品的可靠性特征值是逐渐提高的。

8. 试生产 通过可靠性研制试验后即可进入试生产（小批生产）阶段。为了达到并保持可靠性，应对元件和加工过程实行质量控制。为了确保可靠性，为了使质量控制充分有效，应采取计数和计量验收抽样方案来检查产品质量，这就是质量一致性检验。此外，为了减少产品的早期失效，元器件的筛选工作是极为重要的。一般工厂除固定元器件的供应点外，都提出筛选规范，以保证产品性能的稳定性。

9. 生产试验（可靠性鉴定试验） 可靠性生产试验常称为可靠性鉴定试验，其目的是向上级提供证据，说明该产品在投入生产前已满足可接收的设计的最低可靠性要求。本试验可按有关标准进行。

10. 可靠性验收试验 在通过可靠性鉴定试验后可进行批量生产。为了保证设计、工艺、生产过程、工作流程、零部件质量等因素的改变不致于降低硬件的可靠性，应对产品进行可靠性验收试验。必须按有关标准进行试验。

11. 数据 可靠性数据是设计过程中各种可靠性活动的重要资料。无论在最初制定可靠性指标和可靠性分析中，还是在以后的设计、预计、生产和评定中，都要依靠数据来进行工作。在产品的使用和维修中，要广泛地应用各种可靠性数据。

12. 可靠性评定 前面提到，根据现场试验、试验室试验或从车间试验收集到的验证数据，通过可靠性数学模型，用统计计算方法估计产品已达到的可靠性水平，称为可靠性评定。

13. 可靠性管理 经验表明，对于复杂的电子设备，在研制阶段所取得的可靠性水平并不能保证在成批生产时达到同一可靠性水平。在一般情况下，在生产之后的使用和维修阶