

可靠性工程教材之(二)

# 系统可靠性分析与设计

屠庆慈 陆廷孝

中国航空学会 科普与教育工作委员会

1984.4.

可靠性工程教材之(二)

# 系统可靠性分析与设计

屠庆燕 陆廷孝

中国航空学会科普与教育工作委员会

1984.4.

## 内 容 提 要

本教材介绍了系统可靠性分析与设计方法。共分七章。主要内容包括可靠性的基本概念、简单及复杂(网络)系统可靠性的计算方法、失效树分析方法、系统可靠性预测及可靠性分配方法等。扼要阐述了如何应用这些方法进行系统可靠性设计。各章均附有实例。书末附有四个计算机程序、详细的设计评审表及国标“可靠性基本名词术语及定义”。

本教材可供工程技术人员及从事可靠性分析、设计的人员阅读,也可供大专院校师生参考。

## 说 明

为了满足广大读者学习可靠性工程的需要，我们组织编写了这套可靠性工程教材，内容包括《可靠性的数学基础》、《系统可靠性分析与设计》、《系统可靠性数字仿真》、《失效模式影响及其后果分析》、《可靠性数据处理与寿命评估》、《环境工程概论》和《可靠性工程专题选编》等七册。

这套教材在编写过程中，力求作到内容由浅入深、讲述详细、文字通俗，并侧重于实际应用。书中安排有较多的实例和习题，还附有计算机程序、各种图表和有关标准。因此，这套教材可供开设可靠性工程有关课程使用，也可供从事可靠性工程的技术人员和大专院校师生参考，并适合于自学。

这套教材由北京航空学院第一研究所负责编写，并得到航空工业部三〇一研究所的帮助。在编辑出版过程中还得到航空工业部六一二研究所的大力支持和帮助，在此一并致谢。

**中国航空学会科普与教育工作委员会**

一九八四年四月

# 目 录

前 言 .....	( 1 )
第 1 章 概述 .....	( 3 )
§ 1.1 为什么要研究可靠性? .....	( 3 )
§ 1.2 产品可靠性包含的内容 .....	( 5 )
§ 1.3 可靠性科学发展简史 .....	( 5 )
§ 1.4 产品可靠性与它的寿命期内全部可靠性 活动的关系 .....	( 7 )
§ 1.5 设计阶段对可靠性影响最大 .....	( 8 )
§ 1.6 可靠性设计及其环节和目的 .....	( 13 )
§ 1.7 可靠性设计程序举例 .....	( 14 )
第 2 章 可靠性的基本概念及其主要数量指标 .....	( 17 )
§ 2.1 产品的可靠性数量化的必要性 .....	( 17 )
§ 2.2 可靠度和累积失效分布函数 .....	( 19 )
§ 2.3 失效率函数 .....	( 25 )
§ 2.4 可靠性寿命特征 .....	( 33 )
§ 2.5 维修性及其主要数量指标 .....	( 37 )
§ 2.6 有效度 .....	( 43 )
§ 2.7 一个实例 .....	( 45 )
习题 .....	( 49 )
第 3 章 不维修系统可靠性模型的建立与分析 .....	( 52 )
§ 3.1 概述 .....	( 52 )
§ 3.2 简单系统可靠性模型 .....	( 55 )
3.2.1 串联模型 .....	( 55 )
3.2.2 并联模型 .....	( 57 )
§ 3.3 贮备系统可靠性模型 .....	( 60 )
3.3.1 基本概念 .....	( 60 )

3.3.2	简单并联贮备模型 .....	(61)
3.3.3	$n$ 中取 $r$ ( $r/n$ )模型 .....	(61)
3.3.4	混合式贮备模型 .....	(62)
3.3.5	多数表决贮备模型 .....	(64)
3.3.6	非工作贮备模型 .....	(65)
§ 3.4	混联系统可靠性模型 .....	(68)
§ 3.5	设计时选择可靠性模型的原则及设计实例 .....	(69)
习题	.....	(76)
<b>第4章</b>	<b>不维修复杂(网络)系统可靠性分析</b> .....	(79)
§ 4.1	关于网络系统的一些基本概念 .....	(79)
§ 4.2	部件状态列表穷举法(布尔真值表法) .....	(82)
§ 4.3	部件状态图示法(概率图法) .....	(85)
§ 4.4	路集、割集及其相互转换 .....	(92)
§ 4.5	求所有最小路集方法 .....	(100)
§ 4.6	用最小路集/割集法计算网络系统可靠度 .....	(106)
§ 4.7	用全概率分解法计算网络系统可靠度 .....	(111)
§ 4.8	设计时提高网络系统可靠度的方法 .....	(116)
习题	.....	(118)
<b>第5章</b>	<b>失效树分析法及其在设计中的应用</b> .....	(120)
§ 5.1	概述 .....	(120)
§ 5.2	失效树的建造 .....	(122)
5.2.1	建树的一般步骤和方法 .....	(122)
5.2.2	失效树中使用的符号 .....	(123)
5.2.3	故障事件的定义和分类 .....	(125)
5.2.4	建树时的注意事项 .....	(125)
§ 5.3	失效树的数学描述 .....	(131)
5.3.1	失效树的结构函数 .....	(131)
5.3.2	单调关联系统 .....	(134)
5.3.3	可靠性框图与失效树的等价关系 .....	(136)
§ 5.4	失效树的定性分析 .....	(138)
5.4.1	割集与最小割集、路集与最小路集 .....	(138)

5.4.2	求最小割集的方法	(139)
5.4.3	用最小割集/路集表示失效树的结构函数	(142)
5.4.4	对偶树与成功树	(144)
§ 5.5	失效树定量化计算	(147)
5.5.1	概述	(147)
5.5.2	底事件和顶事件发生概率的表达式	(148)
5.5.3	精确计算顶事件发生概率的方法	(150)
5.5.4	近似计算顶事件发生概率的方法	(158)
5.5.5	二个实例	(159)
§ 5.6	重要度及其在设计时的应用	(162)
5.6.1	概述	(162)
5.6.2	概率重要度	(162)
5.6.3	结构重要度	(164)
5.6.4	相对比重要度	(165)
§ 5.7	利用失效树分析法改进系统设计的实例	(167)
§ 5.8	失效树应用范围及不足之处	(178)
习题		(179)
<b>第 6 章</b>	<b>可维修系统可靠性模型的建立与分析</b>	<b>(182)</b>
§ 6.1	概述	(184)
§ 6.2	单部件系统	(184)
§ 6.3	二个不同部件,一个修理工的串联系统	(189)
§ 6.4	二个相同部件,一个修理工的并联系统	(192)
§ 6.5	一个修理工的三中取二系统	(198)
§ 6.6	二个相同部件,一个修理工的旁联系统	(199)
§ 6.7	设计时选择可靠性模型的原则及设计例子	(202)
§ 6.8	系统最佳预防维修周期的确定	(208)
习题		(210)
<b>第 7 章</b>	<b>系统可靠性的预测和分配</b>	<b>(212)</b>
§ 7.1	系统可靠性预测	(212)
7.1.1	预测目的	(212)
7.1.2	预测方法	(212)

7.1.2.1	元件计数法 .....	(213)
7.1.2.2	利用飞机设计/性能参数的预测法 .....	(214)
7.1.2.3	失效率预测法 .....	(219)
7.1.2.4	上、下限法 .....	(223)
7.1.2.5	最坏情况预测法 .....	(230)
7.1.2.6	机械结构可靠性预测法 .....	(238)
§ 7.2	系统可靠性分配 .....	(243)
7.2.1	概述 .....	(243)
7.2.2	串联系统可靠性分配方法 .....	(245)
7.2.2.1	等分配法 .....	(246)
7.2.2.2	比例组合法 .....	(246)
7.2.2.3	评分分配法 .....	(250)
7.2.2.4	考虑系统各组成部份重要度和复 杂度的分配法 .....	(253)
7.2.2.5	可靠度的再分配法 .....	(260)
7.2.3	带约束条件的冗余系统可靠度分配法 .....	(262)
7.2.3.1	在单一约束条件下采用冗余度的 分配法 .....	(263)
7.2.3.2	拉格朗日乘法 .....	(266)
7.2.3.3	动态规划法 .....	(272)
习题	.....	(278)
<b>附录 1</b>	图5.31失效树计算程序 .....	(281)
<b>附录 2</b>	可靠度再分配法的通用程序 .....	(285)
<b>附录 3</b>	在单一约束条件下采用冗余度分配法的 通用程序 .....	(289)
<b>附录 4</b>	用动态规划法作有约束冗余系统的可靠 度分配通用程序 .....	(293)
<b>附录 5</b>	详细的设计评审表 .....	(297)
<b>附录 6</b>	GB3187-82“可靠性基本名词术语及定义” .....	(321)
<b>参考文献</b>	.....	(334)



# 前 言

随着科学技术的发展，由于宇航、军事工业及国际市场竞争的需要，对产品可靠性的要求日益提高。因此可靠性学科发展十分迅速。目前在工业发达国家的工厂、设计单位中，将可靠性工程提高到非常重要的地位，普遍设立了从事可靠性工作的机构。它们对产品提出可靠性指标；与设计人员共同对产品进行可靠性分析、设计；选择设计方案；提出外购件的可靠性标准；进行可靠性增长及验证试验；收集和整理可靠性数据、资料等。在美国，从事这方面工作的工程技术人员多达50万。这些都说明工业发达的国家对可靠性问题是十分重视的。

随着我国国民经济的不断发展，产品的可靠性问题也更加受到人们的重视。航空工业的情况也是如此。国际、国内市场对航空产品的可靠性、维修性要求都越来越高。因此工程技术人员掌握有关可靠性方面的知识及系统可靠性的分析与设计方法已成为迫切需要解决的问题。为此我们编写了这本“系统可靠性分析与设计”教材。

本教材是在为航空工业部举办的“可靠性设计研究班”所编写的“系统可靠性分析与设计”讲义的基础上，经过修改、补充完成的。

本教材共分七章。第一章对可靠性系统分析与设计技术进行概述；第二章介绍可靠性的基本概念及其指标；第三章介绍不维修系统的可靠性模型及其可靠性的计算方法；第四章介绍不维修复杂(网络)系统可靠性计算方法；第五章介绍失效树分析方法；第六章介绍可维修系统可靠性计算方法；第七章介绍可靠性预测与分配方法。为了达到理论联系实际，学以致用目的，每一章

内都列举了大量的例子和一些设计实例。每章后还附有习题。读者可以根据需要进行选读、选做。从教学要求出发，还编写了系统可靠性分析计算程序作为附录 1—4。附录 5，摘引了美国陆军武器装备部组织编写的“详细的设计评审表”，供读者作设计或设计评审时参考。为了统一可靠性的名词术语，在附录 6 中摘引了从 1983 年 8 月 1 日开始实施的国标 GB3187-82 “可靠性基本名词术语及定义”中的部分内容。

由于我们水平有限，教材中难免有错误和不足之处，欢迎读者批评指正。

最后借此机会向在本教材编写过程中给予大力帮助的同志，特别是杨为民、许海宝同志表示感谢。并对本教材所引用的参考文献的作者致以谢意。

# 第 1 章 概 述

## §1.1 为什么要研究可靠性?

可靠性并不是什么新的认识。我们在日常生活中经常可以听到这种说法：“这个厂的产品质量不怎么样”，“这种产品经久耐用”，……。我们自己在买东西的时候，不仅要了解该产品的性能、价钱，也要问它是否容易坏，坏了以后是否容易修。这些，实际上都涉及到可靠性的概念，只不过说得比较含混。那么究竟为什么我们要研究可靠性呢？先从下面几个例子说起：

### 1. 美国防空预警系统事故

美国在科罗拉多州夏延山的山洞中建立了著名的北美防空司令部。这个司令部的大型电子计算机系统同导弹防御网相连。他们声称，当敌人向美国发射洲际导弹时，这个系统能立即发出警报信号。1979年11月9日白天快下班时，突然计算机发出警报信号，指出从美国西海岸外一艘不明国籍的潜艇发射的一枚导弹正向美国袭来。紧接着指示板宣布进入低级“核战争状态”。几分钟内，十余架喷气式截击机从美国和加拿大的空军基地起飞，分布在美国本土心脏地带的一千多个“民兵”导弹地下发射井进入警戒状态。与此同时，美国联邦航空局所属的各空中交通管制中心发出警报，负责官员向民航班机发出无线电信号，命令他们准备着陆。但在警报发出后六分钟，人们才发觉这是由于计算机出了故障而造成的错误，一场虚惊才得以平息。类似的事件在1980年1月3日和6月6日还发生过二次。这就是典型的硬件可靠性问题。

### 2. 美国三哩岛核电站事故

1979年3月28日凌晨，美国三哩岛核电站的二回路冷凝器循环泵发生故障而停转，接着主给水泵按照设计要求也随之停泵。此时备用水泵自动开始工作，但该泵的出口阀因检修后忘了打开，它的指示灯又恰好被一个标牌挡住，所以操作人员误认为备用水泵已将水打入热交换器而没有采取任何纠正措施。因而造成补给水未能流入热交换器，这样，热交换器两侧的水很快被蒸发干。一回路因得不到冷却，温度和压力均升高，使稳压器上的泄压阀自动打开。放水泄压，当压力下降到一定值时本来应当关闭，但又因泄压阀门故障而不能关上，致使水不断流失。当压力降到某个值时，高压注入泵自动工作，不断供水，但因操作人员从未受过小型失水事故的训练，被一些假象所蒙蔽反而将高压注入泵关小，减少了注入的水量，致使载热能力进一步恶化，经过2小时45分钟后，操作人员才发现问题，但堆芯已严重损伤。加上安全壳未能很好地隔离，使放射性物质有所泄漏，造成一次轰动全球的大事故。因此，核电站是否安全一时引起普遍的怀疑。类似事故在别的核电站也曾发生过，但由于操作人员判断正确，得到及时的纠正而避免了事态的扩大。这是一个典型的硬件可靠性及人的可靠性问题。

### 3. 美国水星一号火箭发射事故

水星一号火箭发射失败后，经检查是由于程序中脱落了一个字符，造成几十亿美元的损失。据美空军范登堡中心60年代末统计，多次导弹试验失败事故都是由计算机软件的错误造成。美国列哈特·汉明 (Richard Hamming) 估计，大型软件系统中，每200—400条指令中一般会有一个错误。这是典型的软件可靠性问题。

### 4. 电视机质量问题

某广播电视工业公司1978年统计，某地生产的电视机平均无故障工作时间不到500小时。电视机运到商店后的开箱合格率只有76%。商店销售后一个月内早期返修率高达20%。以全国年产300

万台电视机计算，每年修理费约需2400万元。

由上面几个典型例子我们可以看到，无论是硬件、软件，还是人的不可靠，都会给经济带来损失，企业或国家的信誉也要受到损失，而且会造成人身事故，甚至影响国家安全。因此，必须认真对待。

本教材主要研究硬件（产品）的可靠性。

## §1.2 产品可靠性所包含的内容

产品的可靠性包括固有可靠性，使用可靠性两个方面：

固有可靠性是指产品从设计到制造整个过程中所确定的内在可靠性。它是产品的固有属性。

使用可靠性是指使用、维修对产品可靠性的影响。包括使用维护方法、程序，操作人员技术熟练程度等都会对产品的寿命及功能的发挥产生重大影响。

本教材主要研究产品的固有可靠性。

## §1.3 可靠性学科发展简史

对产品可靠性问题的研究是和工业及科学技术发展水平有着紧密联系的。

第二次世界大战时，交战双方动员了大量兵力和武器参战。这些武器的主要部份——电子设备和自动控制设备却经常发生故障，丧失应有的作战能力。例如，美国空军运往远东的机载电子设备有60%在到达时已经损坏，海军舰艇70%的电子设备处于故障状态。根据这些教训开始了早期的可靠性研究。为了更好地表达可靠性的准确含义，不能仅仅从定性的方面来评述它，而需要用一些定量的尺度来衡量它。第二次世界大战末期，德国的火箭研究者之一R.罗赛尔首先提出了利用概率乘积法则，把一个系统

的可靠度看成是各分系统可靠度的乘积，从而算得V-I型火箭制导系统的可靠度为0.75，第一次定量地表达了产品的可靠性。从50年代初期开始，可靠性问题就作为一门新的学科被系统地加以研究了。

1952年美国成立了“电子设备可靠性顾问团”(AGREE)，于1957年写出了“电子设备可靠性报告”，比较完整地阐述了可靠性的理论基础与研究方法。

1954年美国召开了第一届可靠性与质量管理学术会议。

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学术会议。同年还召开了第一届电子设备故障物理学术会议，以后每年均召开一次，并将可靠性研究扩展到维修性方面去。

同年英国出版了“可靠性与微电子学”杂志。法国国立通讯研究所也成立了“可靠性中心”进行数据的收集与分析。

1964年苏联和东欧各国在匈牙利召开第一届可靠性学术会议，至1977年已开过两次这样的会议。

1965年国际电子技术委员会(IEC)设立了可靠性技术委员会，协调各国间可靠性名词术语和定义、可靠性管理、数据的收集等。

1975年召开了国际软件可靠性学术讨论会。

如上所述，对可靠性的研究是从第二次世界大战时，由于处理电子产品所面临的问题而开展起来的。随着科学技术的迅猛发展，对产品的可靠性和维修性要求更加突出。这是由于：

(1) 产品越来越复杂。以飞机为例，1921年以前，飞机上没有电子设备。1940年电子设备有一千多个元件。1955年战略轰炸机上的电子设备元件已增加到4万多个，1960年则接近9万个。1969年发射的阿波罗飞船共用了7,100,000个以上的零件。设备越复杂，元件越多，就越容易发生故障。

(2) 使用环境条件越来越恶劣。随着军事需要和宇航技术

的发展，产品所承受的各种应力，如振动、辐射、高温、低温等也越来越严重。

(3) 竞争加剧。为了能在国际、国内市场上建立信誉，提高产品的竞争能力，不但要求产品性能良好，而且要求它可靠性好，价格便宜。如日本，由于重视可靠性工作，使一度令人瞩目的劣等“东洋货”变为国际上竞争力很强的商品。

我国有关可靠性问题的研究，从第一个五年计划以来，各工业部的有关厂、所，科学院和高等院校都做了不少工作，并出版了“可靠性与环境试验”和“国外电子产品可靠性与环境试验”等刊物，积极开展可靠性研究工作，取得不少成绩。

## §1.4 产品可靠性与它的寿命期内 全部可靠性活动的关系

实践经验证明，一个复杂系统的可靠性与其整个寿命期的全部可靠性活动有关。为使所给定的系统达到可接受的现场可靠性，必须在投入现场使用之前做大量的工作。这就要在从方案论证开始到系统报废为止的整个寿命期内，有计划地开展可靠性活动。

复杂系统的整个寿命期大致可分为：方案论证，审批，设计研制，生产及试验，使用等五个阶段。各阶段应进行的可靠性工作大致如下：

1. 方案论证阶段。要确定可靠性指标，对可靠性和成本进行粗略的分析，制定投标申请要求。
2. 审批阶段。主要进行可靠性的初步评估，对可靠性和成本进行详细的分析，提出包括有可靠度及其增长、验证试验要求的投标申请要求，评价和选择试制厂家。
3. 设计研制阶段。主要进行可靠性预测、分配和失效模式、效应及后果分析，进行可靠性增长和验证试验，对可靠性和

成本进行更详细的综合分析，监督试制厂家的可靠性试验和评价。进行产品的具体设计。

4. 产品及试验阶段。按规范购买元器件和材料，进行元器件的筛选和寿命试验，进行失效分析和反馈，进行验收试验。

5. 使用阶段。收集现场可靠性数据，以评定现场可靠性，为产品改进可靠性及改型工作提供依据。

美国阿波罗飞船是个极其复杂的系统，共有一万多个协作单位。由于他们在飞船整个寿命期间都非常重视可靠性工作，因此取得成功。图1.1介绍了它的可靠性质量保证流程图。

## §1.5 产品寿命各阶段中设计阶段对可靠性影响最大

根据二十多年来各国开展可靠性工作的经验，认为在产品整个寿命期内，对可靠性起着重大影响的是设计阶段。见表1.1。

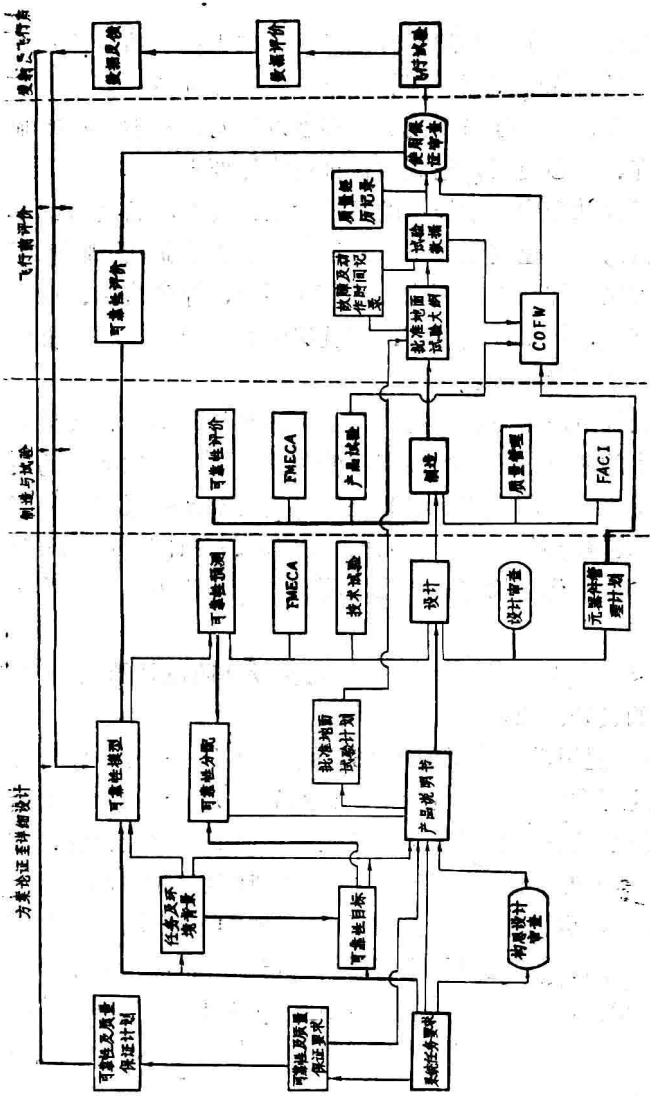
表1.1 各种因素对产品可靠性的影响程度

影 响 因 素		影响程度
可 靠 性	1. 零、部件材料	30%
	2. 设计技术	40%
	3. 制造技术	10%
	4. 使用（运输、操作安装、维修）	20%

注：固有可靠性包括因素1、2、3；使用可靠性包括因素4。

美国原NASA阿波罗计划中负责可靠性、质量和全安的主任J. 威洛比说：“改进可靠性、维修性的最好途径是一开始就进行可靠性、维修性设计”。现在这已成为美国海军发展装备的重要





图中 FACI——最初产品与图纸一致性检验

COFM——对适航资格的认可

FMECA——失效模式、效应及后果分析

图1.1 美国阿波罗可靠性质量保证流程图