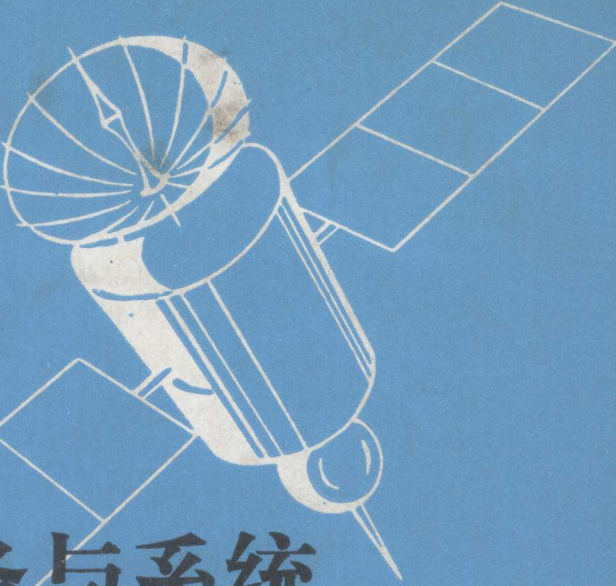


TN



# 电子设备与系统 可靠性设计

周广涛

编著

肖端庄

《航天工业部第二研究院院刊》编辑部

# 电子设备与系统 可靠性设计

周广涛  
肖端庄 编著

《航天工业部第二研究院院刊》编辑部出版

1984年

## 内 容 简 介

可靠性是现代工程的支柱，可靠性设计是提高产品固有可靠性的关键，因此产品可靠性设计方法是工程技术人员的必备知识。本书根据作者多年从事可靠性设计的经验和有关国内外资料编写而成。书中除了介绍可靠性设计基础、预计、分配以外，重点讨论了十个方面的可靠性设计方法，并有较详细的图表和具体实例。全书侧重于可靠性工程的实际应用，关于理论问题只介绍基本原理，目的是帮助了解本书的内容。

本书既适合从事工程设计的技术人员及可靠性工作人员使用，也可作为可靠性设计培训班的教材及大专院校教学参考。

### 电子设备与系统可靠性设计

周广涛 肖端庄 编著

\* \* \*

《航天工业部第二研究院院刊》编辑部出版

(北京市142信箱32分箱)

内 部 发 行

北京市142信箱31分箱印刷

工本费：2.20元

# 目 录

<b>第一章 可靠性及其数量度量</b> .....	( 1 )
1.1 可靠性发展简史 .....	( 1 )
1.2 研究可靠性的现实意义和经济效益 .....	( 2 )
1.3 产品可靠性与系统可靠性 .....	( 3 )
1.3.1 产品可靠性.....	( 3 )
1.3.2 系统可靠性.....	( 4 )
1.4 产品分类法 .....	( 4 )
1.4.1 寿命型产品.....	( 4 )
1.4.2 按产品故障分布函数的类型分类.....	( 5 )
1.5 可靠性的数量度量 .....	( 5 )
1.5.1 系统可靠度与系统故障分布函数.....	( 6 )
1.5.2 系统的平均寿命.....	( 8 )
1.5.3 可靠寿命与中位寿命.....	( 9 )
1.5.4 系统故障率(瞬时故障率) .....	(10)
1.5.5 小结.....	(12)
1.6 常用的系统故障分布函数 .....	(14)
1.6.1 二项式分布.....	(14)
1.6.2 指数分布.....	(15)
1.6.3 正态分布.....	(16)
1.6.4 对数正态分布.....	(18)
1.6.5 威布尔分布.....	(19)
1.7 可靠性分类 .....	(21)
1.7.1 固有可靠性和使用可靠性.....	(21)
1.7.2 性能可靠性与结构可靠性.....	(22)
1.7.3 系统可靠性与元部件可靠性.....	(24)
1.8 广义可靠性.....	(24)
1.8.1 系统的维修性与有效性.....	(25)
1.8.2 系统贮存期.....	(26)
1.8.3 可靠性定义的完善问题.....	(27)
<b>第二章 可靠性设计的基础工作和指标论证</b> .....	(29)
2.1 系统可靠性设计的基本任务和程序 .....	(29)
2.1.1 系统可靠性设计的基本任务.....	(29)
2.1.2 系统可靠性设计的基本程序.....	(30)
2.2 系统可靠性设计的基础工作 .....	(31)
2.2.1 可靠性数据库和数据交换网.....	(32)
2.2.2 技术情报工作.....	(33)

2.2.3	系统设计人员的可靠性教育	(33)
2.2.4	技术贮备	(34)
2.3	系统可靠性设计的组织与机构	(34)
2.4	系统可靠性指标的论证	(36)
2.4.1	引言	(36)
2.4.2	系统可靠性框图	(36)
2.4.3	系统可靠性指标论证中必须分析和预测的因素	(40)
2.4.4	系统可靠性指标需论证的几个方面	(42)
<b>第三章</b>	<b>系统可靠性工程预计法</b>	<b>(44)</b>
3.1	概述	(44)
3.2	相似设备法	(44)
3.3	相似电路法	(46)
3.4	有源器件法	(47)
3.5	最小(或最大)值法	(48)
3.6	元件计数预计法	(49)
3.7	元器件应力分析预计法	(52)
3.8	失效树分析(FTA)预计法	(56)
<b>第四章</b>	<b>可靠性指标分配</b>	<b>(59)</b>
4.1	引言	(59)
4.2	可靠性分配的基本原则	(59)
4.3	可靠性分配方法	(60)
4.3.1	分配因子法	(60)
4.3.2	代数方法	(63)
4.3.3	故障率分配方法	(65)
4.3.4	定值分配方法	(71)
4.3.5	拉格朗日乘子分配法	(74)
4.4	系统可靠性分配中的几点说明	(76)
4.4.1	多约束条件下的系统可靠性分配	(76)
4.4.2	如何对待可靠性分配指标	(77)
4.4.3	可靠性分配中因素问题	(77)
4.4.4	可靠性分配方法的评价尺度问题	(77)
<b>第五章</b>	<b>电子设备和系统可靠性的设计方法</b>	<b>(78)</b>
5.1	冗余设计	(81)
5.1.1	概述	(81)
5.1.2	冗余设计介绍	(81)
5.1.3	冗余设计实例	(88)
5.1.4	元件冗余和整机冗余	(93)
5.1.5	三状态冗余	(95)
5.1.6	美国航天飞机控制系统的冗余设计	(97)



5.2	降额设计 .....	( 98 )
5.2.1	概述 .....	( 98 )
5.2.2	降额设计的理论根据 .....	(100)
5.2.3	推荐的降额设计数据 .....	(103)
5.2.4	降额设计具体实例 .....	(108)
5.3	边缘性能设计 .....	(116)
5.3.1	概述 .....	(116)
5.3.2	边缘性能设计的理论依据 .....	(118)
5.3.3	边缘性能设计的具体方法 .....	(122)
5.3.4	晶体管开关电路的边缘性能设计 .....	(130)
5.4	电磁兼容性设计 .....	(133)
5.4.1	电子系统存在的电磁干扰源及电磁兼容性 .....	(133)
5.4.2	干扰传递途径 .....	(136)
5.4.3	电磁兼容性设计技术 .....	(138)
5.4.4	电子系统的接地设计 .....	(146)
5.4.5	电子系统屏蔽设计 .....	(150)
5.4.6	电子设备抗电磁脉冲加固技术 .....	(152)
5.5	热设计 .....	(157)
5.5.1	概述 .....	(157)
5.5.2	热流动的三种方式及其计算公式 .....	(161)
5.5.3	自然散热下计算温升的例子 .....	(163)
5.5.4	强迫风冷情况下的电子设备的热设计 .....	(166)
5.5.5	集成电路设备的热设计 .....	(171)
5.6	机械部件可靠性设计与计算 .....	(173)
5.6.1	概述 .....	(173)
5.6.2	机械部件可靠性设计方法 .....	(173)
5.6.3	影响失效的应力分布和影响失效的强度分布的确定 .....	(174)
5.6.4	可靠性计算 .....	(177)
5.7	抗振设计 .....	(179)
5.7.1	概述 .....	(179)
5.7.2	电子产品在力学环境下的故障类型 .....	(181)
5.7.3	电子元器件抗力学环境能力 .....	(181)
5.7.4	电子元件抗振设计计算 .....	(184)
5.7.5	整机抗振设计 .....	(188)
5.7.6	抗振设计采用的技术 .....	(192)
5.8	三防设计及贮存期计算 .....	(194)
5.8.1	概述 .....	(194)
5.8.2	三防设计的一般准则 .....	(195)
5.8.3	印制电路板三防设计及三防工艺和材料的选用 .....	(197)
5.8.4	产品贮存期估计 .....	(199)
5.9	抗辐射加固设计 .....	(203)
5.9.1	概述 .....	(203)
5.9.2	辐射对电子产品的影响 .....	(206)

5.9.3 抗辐射的加固设计 .....	(220)
5.10 维修性设计 .....	(226)
5.10.1 概述 .....	(226)
5.10.2 维修性指标MTTR的分配 .....	(231)
5.10.3 维修可达性设计 .....	(233)
5.10.4 提高维修性的快锁设计 .....	(237)
5.10.5 整机维修性设计——内插式和外插式结构 .....	(244)
5.10.6 维修时间的确定 .....	(246)
5.10.7 小结 .....	(248)
<b>第六章 设计评审 .....</b>	<b>(251)</b>
6.1 可靠性设计评审概述 .....	(251)
6.2 设计评审的内容与组织 .....	(253)
6.3 设计评审的主要内容——FMEA和FMECA分析 .....	(256)
6.3.1 概述 .....	(256)
6.3.2 进行FMEA和FMECA所需资料与分析步骤 .....	(258)
6.3.3 失效模式与致命度 .....	(259)
6.3.4 FMEA和FMECA的实施步骤与举例 .....	(260)

# 第一章

## 可靠性及其数量度量

### 1.1 可靠性发展简史

产品可靠性是产品本身所具有的性能之一，因而任何产品都存在可靠性问题。在科学技术和生产力不发达的时代，产品结构比较简单，因此，产品可靠性问题不突出，更没有作为一个专门问题提出来研究。只是由产品的设计者在产品的设计过程中考虑。随着工业技术的日益发展，尤其是近代工业的兴起，产品变得日益复杂，产品的可靠性问题也逐渐为人们所关注。比如在第二次世界大战中，德国曾对V-2火箭做过一些可靠性分析工作。美国从一九四三年开始也组织了一些这方面的研究。但可靠性作为一门工程学科，大量地、有组织地进行研究，则是本世纪四十年代末、五十年代初的事情。为什么会在这个时候提出这个问题呢？主要原因有两方面。首先，产品可靠性的提出是与电子工业，特别是与航空、航天等科学技术的发展密切相关的。四十年代末电子工业得到了很大的发展，电子设备已在军事与民间中广泛应用。在应用中暴露出许多问题，如一九四九年美国的航海设备有70%不能正常工作。第二次世界大战后，美军运往远东的大量设备和装置中，有近一半未经使用就报废了。这些现实迫使美国投入人力、物力进行可靠性研究。其次，由于尖端技术和现代科学实验所使用的系统（或设备）庞大复杂，比如美国的阿波罗登月工程，参加人数达四十二万人，参与制造的厂家达一万五千多家，生产周期达数年之久，像这样一些庞大的系统所涉及的专业面之广，产品之多是可想而知的。一旦某一部件，甚至某一元器件出了故障，就可造成整个工程失败。因此，它的可靠性问题很突出。像这样庞大复杂系统的可靠性，若不专门研究，就难以保证整个系统可靠地工作。

一九五二年美国国防部成立了可靠性顾问小组（AGREE）。这个小组对电子设备的可靠性含义及生产中影响产品可靠性等问题进行了全面研究。他们将艾泼斯坦（Epstein）等人在人寿保险统计和生物统计中所得出的指数分布寿命试验的结果，用作可靠性研究的理论基础。通过实践证明，这种理论在很多情况下是与实际相符合的。所以，在可靠性术语与一些文献资料中至今还有人寿保险统计和生物统计的痕迹。在可靠性顾问小组工作的基础上，一九五七年美国成立了可靠性委员会，IEEE学会出版了可靠性会刊。苏联在一九五八年召开了第一次全苏无线电电子设备可靠性讨论会，会上拟定了提高电子设备可靠性七年规划。这次会议标志着苏联的可靠性研究进入了一个新阶段。日本、加拿大、英国、法国、德国等国相继建立了可靠性的研究机构，或全国性的可靠性委员会或可靠性中心。我国的可靠性研究起步较晚，五十年代末六十年代初才在有关的研究部门设立了可靠性研究机构。

由于实际工程中的许多可靠性问题亟待解决，因此，可靠性研究进展很快，到六十年代



不仅解决了工程中的大量可靠性问题，而且奠定了可靠性工程这门综合性学科。其中服从指数分布的寿命试验的各种问题解决得较好，而且为实际应用提供了一系列军用和民用可靠性标准。

七十年代以来，可靠性研究进一步得到了发展，并向两个方面延伸和扩展。一方面在本学科内部逐渐形成了一些独立分支，如可靠性数学、可靠性物理（也有称失效物理或失效机理）和可靠性管理等。其中可靠性数学更为活跃，它使贝叶斯方法重新活跃起来。如一九七八年以后，国际上已多次召开专门讨论贝叶斯方法的会议。近年来，国内可靠性数学的研究也相当活跃。另一方面，可靠性研究正向其他各个学科渗透。从大型工程到普通设备，并渗透到社会科学的领域，如人的可靠性，工作可靠性等等。

可靠性工程是一个涉及面很广的学科。它的中心是可靠性设计，还包括可靠性试验，可靠性管理等。

目前，可靠性工程处于方兴未艾的发展时期，苏联科学家认为目前探讨中的最重要的应用理论问题就是可靠性数学理论。西方有学者认为八十年代将是贝叶斯的年代。

## 1.2 研究可靠性的现实意义和经济效益

研究可靠性的现实意义：

第一，可靠性的研究带动了有关学科的发展。从可靠性的发展简史看到，可靠性问题是由工程实践中提出来的，它推动着工程技术领域中的有关学科的发展。近十年对贝叶斯统计方法应用的研究很活跃。

第二，航天技术和军事工业与可靠性关系密切。一九八〇年我国的洲际导弹全程试验成功，是与重视可靠性工作分不开的。现在以遥测系统的一五七工程为例作一说明。一五七工程的研制单位，在这之前曾搞过一个与一五七相似的工程，场内有有线联试用了七个月，而一五七工程重视了可靠性，仅用了三天；无线联试用了八个月，而一五七工程只用了一个月；校飞用了十二个月，而一五七工程只用了三天。

第三，改善产品可靠性，不仅可以提高人民的生活水平，而且可以为国家创造更多的财富。

第四，提高产品可靠性，有利于提高产品在国际市场上的竞争能力。产品可靠性是产品竞争能力的一个重要方面。所以欲使我国工业产品能尽快打入和占领国际市场，必须加强可靠性研究，以尽快提高我国工业产品的可靠性。

目前，人们对可靠性的经济效益看法不一致。有人认为可靠性工作是花钱的事，因而阻碍了可靠性工作的开展。确实，开展可靠性工作需要投入一些人力和物力，要增加投资。特别是进行可靠性试验，所耗费的人力和物力更加可观。但这种耗费却能换来经济效益。如我国目前生产的日光灯管，平均寿命只有2000小时，若我们花点代价提高它的可靠性，使其平均寿命达到国际水平（20000小时），那么一支灯管就可以顶现在的十支。

现探讨一下可靠性工作的实际经济效益。

可靠性工作的直接经济效益。一九六三年美国海军航空兵发生了514次重大事故，毁坏飞机275架，驾驶员丧生的272人，损失二亿八千万美元。从这些事故调查中发现，由于产品可靠性低所导致的事故占43%，也就是说由产品可靠性所造成的损失达一亿二千多万美元，

这还没有计算 100 多名驾驶员丧生的损失。澳大利亚仅在一九七六年，由于产品可靠性造成的经济损失就达八十亿美元，并使十五万中小企业破产。六十年代，美国因产品可靠性低和其它一些质量问题，每年损失约四百亿美元。再看看国内黑白电视机的例子。一九七八年，上海生产的电视机平均无故障工作时间不到五百小时，其他厂家就更低，有些只有二百小时。开箱不合格率和平均返修率也很高，上海生产的电视机开箱合格率只有 76.4%，一年内的平均返修率达 86.2%。为此，仅上海电视机公司，每年要付给商业部门售出的电视机维修费高达数百万元。致使全国四十八家主要电视机厂大部分成为亏损户。一九七九年下半年，上海电视机公司狠抓电视机的可靠性，到一九八〇年上海电视机的开箱合格率就提高到 98.7%，一年内平均返修率降至 40.2%，平均无故障工作时间也有大幅度提高。其他厂家也相继效仿。结果全国主要电视机厂除少数厂家外都扭亏为盈。

国内一些无线电元器件厂，近年来对可靠性工作进行了投资，狠抓了产品可靠性，产品成本不仅没有增加，反而有所下降。如有一个半导体器件厂，在半导体器件的可靠性方面花了代价，提高了产品的可靠性，使该产品的合格率从 30% 提高到 65%，销路也好了。结果每只产品的成本由原来的 19 元降低到 10 元。以上实例说明，可靠性工作的经济效益是显著的。

现谈谈可靠性工作的潜在经济效益问题。现在产品费用的概念不仅包括最初的购置价格或制造成本，而应包括使用中产品本身发生故障的费用，即故障造成的损失和维修费用。大量资料统计表明，现在有些产品的维修费用要占总费用（即购置费与维修费之和）的 40%，甚至 50%。这是产品可靠性低造成的。人们开始重视产品可靠性的潜在经济效益。美国空军于一九七五年八月成立了一个生产性、可靠性、有效性和维修计划性（PRAM）办公室。一九七五年八月至一九七八年八月，办公室对空军 379 个项目的可靠性投资的潜在经济效益进行了统计分析。空军三年内在可靠性工作方面的投资为四千二百万美元，由于这些投资，预计在五年内可节省费用七万九千五百万美元。我国国产黑白电视机，二年多的时间内（1979 年下半年至 1981 年）平均无故障工作时间从 500 小时提高到 2000 小时左右，对所节省的维修费用进行了估算。结果大大减少了维修费用。若按现有的 1200 万台电视机、维修费每次 10 元计算，则每年可节省 18000 万元的维修费，比用于提高电视机可靠性的投资要大几十倍。

## 1.3 产品可靠性与系统可靠性

### 1.3.1 产品可靠性

日常生活中，人们在选购商品或评论产品好坏时，特别关心产品的经久耐用。而经久耐用就是产品可靠性通俗化的概念。不过这种说法比较笼统，也不严格。产品可靠性的定义是：产品在给定的条件下和规定的时间内，完成其规定功能的可能性。

从上述定义看出，产品可靠性强调了时间这一因素。而产品性能指标则没有包含时间这一重要因素。产品的性能指标，一般测试时只要达到技术要求就行，不从时间上考虑稳定性和长期性。产品可靠性要求产品性能不仅在测试时达到技术要求，而且要在今后漫长的使用岁月中能长期稳定地满足技术条件的最低要求。在规定的时间内评价其优劣，是产品可靠性与其他性能指标的根本区别，也是产品可靠性的特点。所以，有人认为产品可靠性是“从时间上去看产品动作或性能的可能稳定性或性质”。产品可靠性是否可取代产品性能呢？回答是否定的。比如，同一个制造厂生产的同一类型的机器，运转时都存在出故障的可能性。哪一

部机器正常运转的时间长,说明哪一部机器的时间稳定性好,也就是说它的可靠性好。这里说的正常运转,只是指机器运转过程中,满足规定的技术指标。有的机器正常运转的时间虽长,而其技术指标仅接近规定要求,有的机器正常运转时间虽短,而运转过程中其技术指标却高于规定的最低要求。因此,从产品可靠性上来说,后者不如前者,而从产品性能指标来说,后者优于前者。所以产品可靠性不能取代产品性能指标。

定义中的规定条件是指产品的使用条件、工作方式及其维护条件等等。

由于产品可靠性是对特定的条件而言的,所以不能脱离产品所处的现实客观条件来谈产品可靠性。这就要求在进行产品可靠性设计时,定出产品的可靠性指标,规定产品的条件,或者根据产品将遇到的各种条件去合理地确定产品应达到的可靠性水平。在使用过程中,为了保证产品达到其本身所具有的可靠性,一定要注意其规定的条件,在评价一个产品的可靠性时,尤其应注意其工作时所处的实际条件与所规定的条件是否一致。

一种产品往往有好几种技术性能指标,如果产品的一些单项技术性能指标达到了要求,而另一些却达不到,则不能说产品达到了规定的功能。比如,一台电视机的图象性能很好,却没有伴音,不能说这台电视机达到了规定的功能。因此,产品可靠性要对一种产品的所有技术性能指标作综合评价。

### 1.3.2 系统可靠性

系统(System)是古希腊语,通常定义为:系统是由两个以上相区别而又相互作用的单元有机地结合起来,完成某一功能的综合体。每一单元可称为它的一个分系统(子系统),而它本身又是一个更大的系统的组成部分,也可说它又是一个更大系统的分系统,或者说它是组成一个更大系统的单元。因此,一个大型设备就可以看作是一个系统,例如,雷达是一个系统,导弹也是一个系统。

系统可靠性的定义为:一个系统或设备在给定的条件下,按预计(规定)的时间满意地工作(或完成其规定的功能)的可能性。这里还需要特别强调的是,讨论系统可靠性时,一定要对“规定的功能”做极为具体而又明确的规定,否则容易含混不清,比如导弹发射前的单元测试和综合测试均符合技术要求,但不一定发射成功;导弹发射成功,但不一定命中目标,所以一定要规定得很明确。

## 1.4 产品分类法

产品是人们对所有生产物的总称。但为了便于识别与区分各种不同的生产物,人们又根据产品的特性或用途将产品分成几类。比如,根据产品的用途可将其分为军用产品和民用产品。根据产品所属的生产部门(制造专业),又可将产品分为机械产品、化工产品、电子产品等等。电子产品又可分为两大类:电子元器件和电子设备(整机)。电子元器件和电子设备又可细分下去。在可靠性工作中,主要是根据产品可靠性特点对产品进行分类。

### 1.4.1 寿命型产品

这类产品在使用中所表现出来的共同特点是产品从开始工作到发生故障都有一段长短不等的时间过程。这一段长短不等的时间过程相当于人的寿命,故称为产品寿命。而有些产品如继电器、拉线开关、活塞、阀门等,用时间来表示其寿命就不太合适,而用工作次数来表示则较好。因而产品的寿命应为产品从开始工作到发生故障的工作时间或工作次数。凡具有

寿命的产品均称为寿命型产品。寿命型产品又分为可修复寿命型和不可修复寿命型两大类。

(1) 不可修复寿命型产品。这类产品的特点是，一旦发生故障就无法修复，产品彻底报废。大部分电子元器件均属于这类产品，如灯泡。这类产品都是一次性使用的，所以也称为一次寿命型产品。当不可修复寿命型产品是系统（设备）时，常用出现故障前的平均时间 MTTF (Mean Time To Failures) 作为其可靠性数量度量，这时 MTTF 就是这类产品的平均寿命。

(2) 可修复寿命型产品。这类产品发生故障后，经过修复仍可完成其所担负的功能，其中有些产品经过修复后，甚至可能焕然一新。这类产品所占比重较大。如飞机、舰艇、汽车、雷达、计算机、收音机等大多数电子设备都属于这类产品。这类产品均能多次使用，所以又称为多次寿命型产品。通常用平均无故障工作时间 MTBF (Mean Time Between Failures) 作为其可靠性数量度量指标。MTBF 就是这类产品的平均寿命。

#### 1.4.2 按产品故障分布函数的类型分类

在可靠性工作中，按产品累积故障率所遵从的分布函数类型来分，可将产品分为二项式分布型、指数分布型、威布尔分布型、对数正态分布型等等。

(1) 二项式分布型，也是一种离散分布型。成败型产品就是以二项式分布作为其可靠性的分析基础。

(2) 指数分布型产品。这类产品很多，一般大型复杂系统（设备）的累积故障率分布函数均为指数分布。指数分布型产品的故障率为常数。在可靠性数学中，这种分布研究得最多，解决这一类型产品的可靠性问题有一系列方法。

(3) 威布尔 (Weibull) 分布型产品。机械产品中的一部分产品（零部件）如滚珠轴承等遵从这种分布。威布尔分布是以瑞典人威布尔的名字命名的。他在研究钢球寿命时，最先使用了这种分布函数。

(4) 对数正态分布型产品。对数正态分布型产品所占产品比重也不少，大家熟悉的半导体器件就属于这种类型。近年来，发现电子元器件中有很多产品的累积故障率接近对数正态分布。

### 1.5 可靠性的数量度量

可靠性问题要借助定量研究的结果。在进行问题的定量研究时，必须将其数量化。所谓数量化，首先要用数学模型把工程问题描述出来，即把工程问题转化为数学问题。把工程技术问题转化为数学问题，要特别注意概念准确。

产品可靠的对立面称为产品故障或产品不可靠。故障指产品在给定的条件下和规定的时间内工作时，失去了它完成规定功能的能力（或不能完成规定的功能）。在产品（系统）出现故障之前，无法确切知道它将在什么时候，在什么部位上出现故障。从表面上看产品发生故障是一随机现象，它的出现似乎是毫无规律的，不可捉摸的。但大量的观测结果和科学分析已证明，这种随机现象实际上受内部隐蔽着的一定规律支配。可靠性研究的任务之一就是在于揭示出支配产品（系统）故障这一偶然现象的内在规律。而研究这一规律的有力的数学工具就是概率论和数理统计学。因此，在可靠性研究中，也用了概率论和数理统计学。

### 1.5.1 系统可靠度与系统故障分布函数

既然系统故障是一种随机现象，为了便于研究这一随机现象，引进了一个随机变量  $X$ 。设  $X$  表示系统在规定的条件下和给定的时间内正常工作的时间（即在  $X$  时间内系统能完成正常的功能）， $X$  是一个定义在正实数域内的随机变量。若  $F(t)$  表示系统在规定条件下和规定时间  $T$  内的  $t$  时刻以前发生故障的概率，则有

$$F(t) = P \{ X < t \quad t \geq 0 \} \quad (1.1)$$

$F(t)$  称为系统累积故障概率，也称为系统的累积故障分布函数（以下简称分布函数）。 $F(t)$  具有随机变量分布函数所具有的一切性质，即

$$f(t) = F'(t) \quad (1.2)$$

$f(t)$  称为系统累积故障率的分布密度（简称分布密度）。若已知分布密度，则可通过积分求出分布函数，即

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (1.3)$$

工程实际问题中，先计算出分布密度的值或拟合出分布密度，然后再通过 (1.3) 式求出分布函数  $F(t)$ 。

系统在规定的条件下和规定时间  $T$  内的  $t$  时刻及  $t$  时刻以前正常工作的概率为

$$R(t) = P \{ X \geq t \quad t \geq 0 \} \quad (1.4)$$

$R(t)$  也是以时间  $t$  为变量的函数，称为系统的可靠度函数。对于任意固定时刻  $t_0$ ， $R(t_0)$  就是系统在  $t_0$  时间内的可靠度。利用事件概率的基本性质可知，分布函数  $F(t)$  和系统可靠度函数  $R(t)$  之间有关系

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (1.5)$$

由 (1.5) 式可知  $F(t)$  与  $R(t)$  之间的关系恰好是对立的（见图1—1），所以也称  $F(t)$  为系统的不可靠度。

从 (1.5) 式和  $F(\infty) = 1$ ， $F(0) = 0$  有  $R(0) = 1$ ， $R(\infty) = 0$ 。这说明任何一个系统的

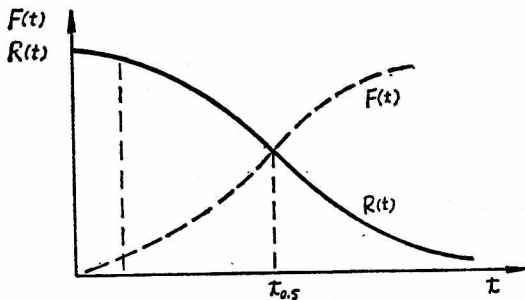


图1—1 分布函数与可靠度函数曲线

寿命都是有限的，即对每一个系统而言，总会在某一有限时刻出现故障；反之，每一个系统开始工作时应是正常的，即是无故障的。

由 (1.5) 和 (1.3) 式可知

$$R(t) = \int_t^{+\infty} f(t) dt \quad (1.6)$$

$$f(t) = -R'(t) \quad (1.7)$$

$f(t)$ ， $R(t)$ ， $F(t)$  的相互关系示于图1—2。

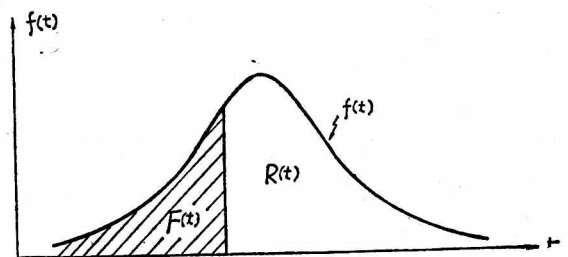


图1—2 分布密度、分布函数与可靠度函数

系统可靠度是衡量系统可靠性的很重要的尺度，它不受系统类型的限制。通过系统故障时间的原始数据求各个时刻内的系统可靠度的方法很多。这里仅介绍一个简便的直接推算算法。

(1) 连续时间离散化。因故障时间是连续的，首先应离散化。作法是将连续时间划分为若干区间，然后，按时间先后从小到大编上序号，比如第*i*个区间的长度以 $\Delta t_i$ 表示，整个故障时间就被离散为 $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_k$ 。为计算方便，令 $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \dots = \Delta t_k = \Delta t$ 。

(2) 编制系统可靠度计算表。为方便计算，根据实际情况编制系统可靠度计算表。

表1.1 系统可靠度计算表

观测区间	观测区间故障数	累积故障数	$f(t_i)$	$F(t_i)$	$R(t_i)$
$\Delta t_1$	$r_1$	$r_1$			
$\Delta t_2$	$r_2$	$r_1 + r_2$			
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$			
$\Delta t_i$	$r_i$	$\sum_{j=1}^i r_j$			
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$			
$\Delta t_k$	$r_k$	$\sum_{j=1}^k r_j$			

$r_i$ 表示第*i* ( $i = 1, 2, 3, \dots, k$ ) 个区间内的故障数。

(3) 由表逐项整理系统故障时间的原始数据。原始数据记录的是故障时间，计算表用的是时间区间内的故障数。

(4) 逐项计算 $f(t_i), F(t_i), R(t_i)$ ，其计算公式推导如下：分布密度 $f(t_i)$ 的定义是单位时间内的故障概率密度，对频数就是单位时间内的故障频率。在 $\Delta t$ 时间内，系统故障频率为 $f(t)\Delta t$ 。若以*N*表示系统总数， $r_i$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) 表示第*i*个区间内的系统故障数，则

$$n_i = N - \sum_{j=1}^i r_j \quad (1.8)$$

是第*i*个区间后系统仍正常工作的个数，又由

$$f(t_i)\Delta t_i = \frac{r_i}{N} \quad (1.9)$$

知

$$f(t_i) = \frac{r_i}{N\Delta t_i} \quad (1.10)$$

而

$$F(t_i) = \sum_{j=1}^i f(t_j)\Delta t_j = \sum_{j=1}^i \frac{r_j}{N\Delta t_j} \Delta t_j = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^i r_j \quad (1.11)$$

或

$$F(t_i) = 1 - \frac{n_i}{N} \quad (1.12)$$

根据(1.5)式有

$$R(t_i) = 1 - F(t_i) = 1 - \left(1 - \frac{n_i}{N}\right) = \frac{n_i}{N} \quad (1.13)$$



通过系统故障时间的原始数据, 求系统可靠度, 还可应用数理统计的方法。

### 1.5.2 系统的平均寿命

对可修复寿命型系统来说, 平均无故障工作时间MTBF 是它的平均寿命, 而对不可修复寿命型系统来说, 故障前平均时间MTTF是它的平均寿命。

1) 平均无故障工作时间 MTBF 又称为平均故障间隔时间, 或称两次相邻故障间的平均时间。由于平均无故障工作时间较通俗和直观, 易为人们所接受和掌握, 所以, 在可修复寿命型系统中被广泛采用作为其可靠性的数量度量。但在实际应用时要注意寿命型系统, 它只适用于可修复寿命型系统。系统发生故障后, 每次都能修复如初。这样才能保证每次故障时间 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 是独立同分布的随机变量。对于不能修复的系统, 即每次故障时间 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 不是独立同分布的随机变量, 采用MTTF作为其数量度量较好。

系统的 MTBF 可用下面四种方法进行计算, 前两种方法必须有足够的原始数据, 但在已知系统分布函数或可靠度函数的情况下, 不再需要任何其他的先验知识。

(1) 一个系统相继在 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 时刻发生故障, 在不计修复时间的情况下, 该系统的MTBF为

$$MTBF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (1.14)$$

(2)  $m$ 个相同系统分别在 $t_1, t_2, \dots, t_m$ 发生故障, 则该系统的MTBF为

$$MTBF = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_i \quad (1.15)$$

若这 $m$ 个相同系统中的第 $i$ 个 ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) 系统相继在 $t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{in_i}$ 时刻发生故障, 则该系统的MTBF为

$$MTBF = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left( \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} t_{ij} \right) \quad (1.16)$$

(3) 若对系统的分布函数或分布密度有先验知识, 则系统的MTBF为

$$MTBF = \int_0^{\infty} x f(x) dx \quad (1.17)$$

或

$$MTBF = \int_0^{\infty} x dF(x) \quad (1.18)$$

(4) 若已知系统的可靠度函数, 则可直接利用可靠度函数来求系统的MTBF。

将

$$f(x) = -R'(x) = -\frac{dR(x)}{dx} \quad (1.19)$$

代入 (1.18) 式, 有

$$MTBF = - \int_0^{+\infty} x \frac{dR(x)}{dx} dx = - \int_0^{+\infty} x dR(x) \quad (1.20)$$

利用分布积分法和 $R(\infty) = 0$ 等条件可导出

$$MTBF = \int_0^{+\infty} R(t) dt \quad (1.21)$$

对于系统故障分布函数为指数分布的系统，其可靠度函数为：

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1.22)$$

将 (1.22) 代入 (1.21) 得：

$$MTBF = \int_0^{+\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{e^{-\lambda t}}{-\lambda} \Big|_0^{+\infty} = \frac{1}{\lambda} \quad (1.23)$$

由此可知，指数分布型系统的MTBF是其分布参数的倒数。

2) 故障前平均时间MTTF 对于不可修复寿命型系统，可用MTTF作为它的可靠性数量度量。MTTF是系统从开始工作到发生首次故障这一段时间的均值，所以它与MTBF是两个完全不同的概念。MTTF也可用作可维修寿命型系统的可靠性的数量度量。

当不可修复寿命型系统的分布函数为指数分布时，其可靠度函数为 $R(t) = e^{-\lambda t}$ ，该系统的MTTF按 (1.21) 式计算

$$MTTF = \int_0^{+\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (1.24)$$

比较 (1.23) 和 (1.24) 可知，在这种特殊情况下，MTBF 和 MTTF 完全相等，但不是任何情况下都相等。

### 1.5.3 可靠寿命与中位寿命

在工程实际中，人们关心系统投入使用后，使用多长时间，仍保持所要求的可靠性水平。这是平均寿命所无法回答的。于是又引进了可靠寿命的概念。用数学语言可陈述为：对于给定的某一可靠度值 $R_0$ ，系统工作时间 $t_0$ 后，它的可靠性水平仍能保持其可靠度 $R_0$ 。可靠函数 $R(t)$ 是时间 $t$ 的单调函数，对于任一给定的 $R_0$  ( $0 \leq R_0 \leq 1$ )，均可找到一个唯一的 $t_0$ ，使 $R(t_0) = R_0$ 。也就是说系统工作到时间 $t_0$ ，系统可靠性仍能保持可靠度为 $R_0$ 的水平。 $t_0$ 称为对应于可靠度 $R_0$ 的可靠寿命，记为 $t_{R_0}$ 。

当系统的分布函数为指数分布时，由 (1.22) 式可得：

$$t = \frac{-\ln R(t)}{\lambda}$$

给于对定的 $R_0$ ，则

$$t_{R_0} = \frac{-\ln R_0}{\lambda}$$

若系统的分布函数不是指数分布时，难于用解析式来求 $t_{R_0}$ ，一般用图解法来求。图解时，先在系统可靠度曲线图的纵轴上找出 $R_0$ 的位置，然后过 $R_0$ 的位置点作 $t$ 轴的平行线与 $R(t)$ 曲线相交于A。过A点作纵轴的平行线与 $t$ 轴相交，则其交点就是所求的 $t_{R_0}$ 。

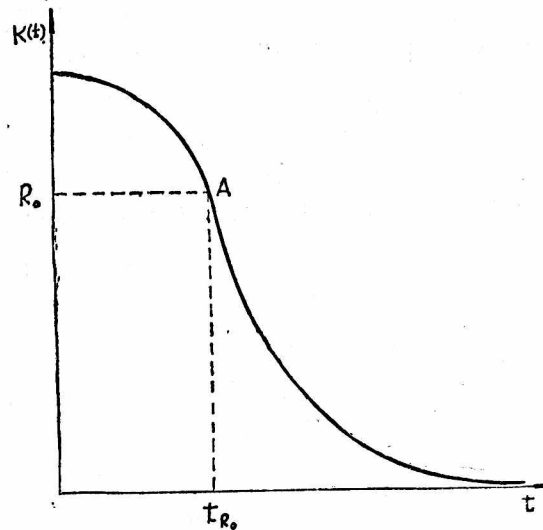


图1—3 可靠寿命示意图

当给定的可靠度 $R_0 = 0.5$ 时，对应的时刻 $t_{0.5}$ 则称为中位寿命。这时正好是系统的分布函数(不可靠度函数)曲线与可靠度函数曲线的交点对应的时刻(见图1—1与图1—3)。

在时刻 $t_0$ 处,系统的可靠度与不可靠度平分秋色,它们的值都是0.5。

#### 1.5.4 系统故障率(瞬时故障率)

工程问题中,人们最关心的问题之一,是一个系统工作 $t$ 后,在时刻 $t$ 这个瞬时发生故障的可靠性有多大。若发生故障的可能性较大,则可提前采取预防措施。为此引进了系统瞬时故障率的概念。瞬时故障率简称故障率。故障率象可靠度一样,可用作所有寿命型产品可靠性的数量度量。可靠度主要用作元器件可靠性的数量度量,而系统可靠性的数量度量习惯上用MTBF或MTTF。

故障率的定义为:系统工作了 $t$ 时间后,在时刻 $t$ 瞬时发生故障的可能性。故障率随着时间的不同而取值不同,它是时间 $t$ 的函数,并用 $\lambda(t)$ 表示。若以 $X$ 表示系统正常工作的时间,那么,系统故障率 $\lambda(t)$ 的数学表达式是

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} P \{ t \leq X < t + \Delta t / X > t \} \quad (1.25)$$

如用工程技术和数学相结合的语言来陈述,故障率则是:系统在工作了 $t$ 时间后,在 $t + \Delta t$ 时间的单位时间内,系统发生故障的个数与 $t$ 时刻系统仍正常工作的个数之比。当 $\Delta t$ 取得很小时就有

$$\lambda(t) \approx \frac{r(\Delta t)}{n(t)\Delta t}$$

其中 $r(\Delta t)$ 是在 $[t, t + \Delta t]$ 内系统发生的故障数, $n(t)$ 是 $t$ 时刻系统仍正常工作的数目。

故障率与可靠度均是时间的函数,下面讨论它们之间的关系。

设 $t = 0$ 时,有 $N$ 个系统投入工作,在时刻 $t$ 有 $r(t)$ 个系统发生故障,则

$$r(t) = NF(t) \quad (1.26)$$

在时刻 $t$ 仍正常工作的系统数为

$$n(t) = N - r(t) = N - NF(t) = NR(t) \quad (1.27)$$

在 $t + \Delta t$ 时间内 $N$ 个系统发生故障的个数是

$$r(t + \Delta t) = NF(t + \Delta t) \quad (1.28)$$

于是在 $\Delta t$ 时间内系统发生故障的个数为

$$\Delta r(t) = r(t + \Delta t) - r(t) = N[F(t + \Delta t) - F(t)] \quad (1.29)$$

那么在 $t$ 时刻后单位时间内系统发生故障的个数

$$\frac{\Delta r(t)}{\Delta t} = \frac{N[F(t + \Delta t) - F(t)]}{\Delta t} \quad (1.30)$$

所以,时刻 $t$ 的故障率为

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{N[F(t + \Delta t) - F(t)]/\Delta t}{NR(t)} \\ &= N \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{N[F(t + \Delta t) - F(t)]/\Delta t}{NR(t)} \\ &= \frac{F'(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \end{aligned} \quad (1.31)$$