

# 可靠性基础入门

翁朝曦 周源泉 编著

中国统计出版社

**可靠性基础入门**  
KE KAOXING JICHURUMEN

翁朝曦 周源泉编著

\*

中国统计出版社出版

新华书店北京发行所发行

中国科学院印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 32开本 9.5印张 19万字

1991年4月第1版 1990年4月北京第1次印刷

印数：1—2500

ISBN 7-5037-0504-3/O·8

定价：7.80元

## 前 言

随着科学技术的飞速发展，质量第一、质量工作以可靠性为中心的思想，日益被人们所理解。

为满足广大工程技术人员、管理人员学习可靠性技术的需要，作者根据多年从事可靠性实践的经验及举办数十期初、中、高级可靠性培训班的体会，编著了本书。努力以尽量少的篇幅深入浅出地介绍可靠性工程的基础入门知识，一方面尽量将基本概念讲清，另一方面将介绍若干有重要实际意义的可靠性新技术，希望能为读者提供一条进入可靠性工程领域的捷径。

本书的前几章，承《强度与环境》杂志连载，这促进了本书的写作，各章分别承魏宗舒等教授审阅，谨此深表谢意！

当前可靠性工程已经发展成为范围广阔而且十分精深的庞大学科，限于作者水平，挂一漏万及不要失当之处在所难免，恳请专家及读者不吝指正。

编 著 者

1990年6月于北京东高地

# 目 录

<b>第 1 章 可靠性工程概述</b> .....	( 1 )
1.1 什么是可靠性 .....	( 1 )
1.2 可靠性工作的内容 .....	( 2 )
1.3 可靠性与其他工作的关系 .....	( 16 )
<b>第 2 章 概率统计基础知识</b> .....	( 20 )
2.1 概率 .....	( 20 )
2.2 概率密度函数与概率分布列 .....	( 26 )
2.3 几种常用的概率分布 .....	( 29 )
2.4 数字特征 .....	( 35 )
2.5 大数定律与中心极限定理 .....	( 39 )
2.6 总体与样本 .....	( 42 )
2.7 统计量与枢轴量的分布 .....	( 43 )
2.8 参数估计 .....	( 47 )
2.9 假设检验 .....	( 56 )
<b>第 3 章 可靠性的测度</b> .....	( 64 )
3.1 与失效有关的可靠性测度 .....	( 64 )
3.2 与维修有关的可靠性测度 .....	( 73 )
3.3 可用性测度 .....	( 77 )
3.4 可靠性的经济测度 .....	( 79 )
<b>第 4 章 可靠性设计</b> .....	( 82 )
4.1 系统方案的制定 .....	( 82 )

4.2	任务与环境分析 .....	(86)
4.3	可靠性模型的建立与系统可靠性的计算 .....	(88)
4.4	可靠性预计 .....	(103)
4.5	可靠性分配 .....	(109)
4.6	优化设计 .....	(113)
4.7	三次设计 .....	(118)
4.8	可靠性分析与保证技术 .....	(120)
<b>第5章</b>	<b>结构可靠性</b> .....	<b>(124)</b>
5.1	引言 .....	(124)
5.2	干涉理论及其应用 .....	(125)
5.3	二阶矩理论的验算点法 .....	(138)
5.4	结构可靠性估计与设计的统计方法 .....	(151)
<b>第6章</b>	<b>可靠性试验</b> .....	<b>(152)</b>
6.1	可靠性试验的类型 .....	(152)
6.2	可靠性试验与其它试验的关系及系统的试 验安排 .....	(154)
6.3	制定试验方案应考虑的因素 .....	(158)
6.4	试验场所的选择 .....	(160)
6.5	试验应力的确定 .....	(161)
6.6	加速寿命试验 .....	(166)
6.7	可靠性试验管理 .....	(171)
<b>第7章</b>	<b>可靠性增长</b> .....	<b>(173)</b>
7.1	引言 .....	(173)
7.2	Duane 模型 .....	(178)
7.3	AMSAA 模型 .....	(183)
7.4	AMSAA-BISE 模型 .....	(188)

7.5	可靠性增长管理 .....	(189)
7.6	数值例 .....	(192)
<b>第8章</b>	<b>可靠性评定</b> .....	(195)
8.1	引言 .....	(195)
8.2	单元可靠性评定 .....	(195)
8.3	系统可靠性评定 .....	(211)
<b>第9章</b>	<b>可靠性验证</b> .....	(220)
9.1	可靠性验证的基本概念 .....	(220)
9.2	计数抽检及抽检基本原理 .....	(225)
9.3	指数分布下的失效率抽检 .....	(238)
9.4	指数分布下的寿命抽检 .....	(240)
9.5	Weibull分布下的寿命抽检 .....	(243)
<b>第10章</b>	<b>维修性与可用性</b> .....	(245)
10.1	基本概念 .....	(245)
10.2	维修策略 .....	(252)
10.3	维修性设计 .....	(260)
10.4	维修性验证与评定 .....	(271)
10.5	可用性评定 .....	(278)
<b>结束语</b>	.....	(292)
<b>参考文献</b>	.....	(293)

# 第 1 章 可靠性工程概述

## 1.1 什么是可靠性

可靠性是产品的一种内在属性。它表征产品保持其性能指标的能力。

不同产品按其用途都有各自的性能指标。如电冰箱有容积、降温、耗能等性能指标；电视机有图象、音质、选择性、灵敏度等性能指标，等等。尽管性能指标千差万别，但人们在使用它们时总有一个共同的要求，希望它们经久耐用。甚至像火柴、炸药等一次性使用的产品，人们也希望它们可存放一定时间，随时能提供使用、完成任务。可靠性正是反映人们对不同产品的这种共同要求。它与时间紧密相关，即可靠性是产品在给定时间内、在预期的使用中能正常工作的能力。近些年来，可靠性指标已成为许多产品的重要技术指标之一。

可靠性与其他性能指标不同，

1. 可靠性指标是一个综合性的质量指标。它建立在其他性能指标都满足使用要求的基础上。因此，离开其他性能指标就谈不上可靠性。

2. 其他的性能指标参数可在产品使用之前，用仪器从每

个产品上直接测得，而可靠性的指标参数则不能用仪器从某一个产品上直接测得。它们要根据使用或各种运行试验的信息进行统计推断而得。

## 1.2 可靠性工作的内容

可靠性工作贯穿于产品的整个寿命过程之中，即从产品的开发准备、方案规划、研制、生产、使用、维修，一直到产品最后被报废。它涉及到决策机关、研制部门、原材料供应、生产制作、运输、安装、使用等单位的各种人员的工作情况。因此，要使产品具有预期的可靠性，就必须使所有的这些有关人员了解可靠性知识，有意识地共同做好可靠性工作。

在产品的可靠性研究中，需要用到各种管理、工艺、数学、物理、化学、气象、生物等多种学科的知识。因此，可靠性是一门综合科学，称之为可靠性工程。近些年来，可靠性工程已成为系统工程学的一个重要分支。随着可靠性工程的发展，可靠性数学、故障物理学、人机工程学等都应运而生。与可靠性密切相关的维修工程学、安全工程学也得到迅速发展。

可靠性工程的领域现已发展到了分门别类、各据一方的地步了。在这些专门分支中，主要有可靠性管理、寿命周期费用、可靠性设计、可靠性优化、可靠性增长、可靠性评定、可靠性检验、机械可靠性以及软件可靠性等。然而，无论它们所辖范围如何划分，它们的工作都是围绕着一个共同的目标——定量控制产品的可靠性，以保证提高效益、杜绝



浪费。可靠性工作的主要内容如下(详见 GJB 450-88<sup>[1]</sup>, MIL-STD-785B<sup>[2]</sup>):

### 1.2.1 可靠性设计

它是可靠性工程的核心, 主宰着产品的固有(内在)可靠性。产品在生产、使用、维修各阶段中所出现的许多可靠性问题取决于设计阶段的可靠性工作。因此, 在设计时就必须考虑到全寿命过程中与可靠性有关的诸因素。例如, 各阶段中可能遇到的各种环境应力(包括工作环境、自然环境以及运输、贮存等环境的应力)对产品可靠性的影响; 防护、维修影响; 操作时失误等各种影响。

从产品的方案制定开始, 就应对同类老产品进行调研; 对新产品的使用要求, 包括各种使用场合的环境应力、工作状况进行研究; 对现有技术条件与资金人力投入可能性进行了解; 根据这些数据, 才能拟定出一系列的技术指标, 进行指标论证和方案论证与确认。经论证与确认后的这些指标, 就是可靠性定量控制的依据。

在研制阶段, 则必须逐步深入地对各种影响可靠性的因素进行测定与统计分析。从而对产品可靠性作出每一阶段的预计, 并对可靠性指标进行分配与调整。这种可靠性预计将指出产品的薄弱环节, 以便改进。同时, 也应通过各种可靠性试验和各种可靠性保证技术来取得信息并改进产品的可靠性。

在产品的设计阶段中, 从方案制定开始, 经历模样、初样、试样各阶段, 一直到完成正样, 投入批量生产; 每一个研制阶段的交接点都必须根据各种试验的实测数据, 对产品

的可靠性进行评定。这种评定包括使用、维修、及环境适应性等各方面的定量指标。与此同时，还应论证下一阶段的可靠性保证措施和工作计划，通过各级有关人员的考核、评审或鉴定之后，才能转入下一个研制阶段或正式投产。

### 1.2.2 可靠性优化与寿命周期费用

在产品设计中，经济效益是个首要问题。可靠性的优化技术就是要使产品在规定的研制费用以及时间进度、重量体积等条件限制之下达到最佳的可靠性；或使产品在满足规定的可靠性指标的前提下，尽量减少其体积重量、节省费用和缩短研制时间。

除了优化设计，对决策机构来说，还必须进一步考虑到整个社会效益问题，即产品在整个寿命周期中的总费用。这种总费用与可靠性的关系一般如图 1.1 所示，即当可靠性不高时，产品的研制费用随可靠性缓慢增长，但当可靠性较高时，要增高可靠性将会使研制费用剧增，而维修费用却随着可靠性的改善逐步降低。各项费用的总和随着可靠性的不同

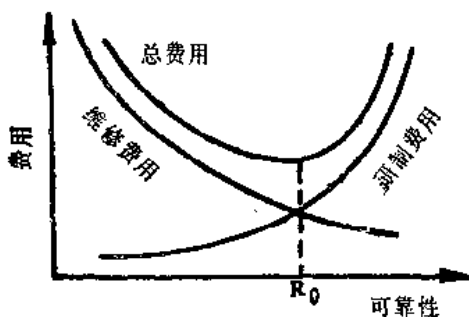


图 1.1

将出现一最低点，与此对应的可靠性 $R_0$ 即为确定产品可靠性指标的最佳选择点。

由于整个寿命周期总费用所计算的是在不同时间里付出的经费，存在时间价值上的折算和资金流动问题，因此它又涉及到一些经济分析的知识。

### 1.2.3 可靠性增长

在产品的研制过程中，总需经过一系列的“试验-改进-再试验”的不断循环，直到产品各种指标和可靠性都符合要求。也就是说，产品在这段时间内，正经历着一个可靠性增长过程。在这个过程中，无论是设计、工艺、器材、还是人员的操作、管理都必须尽量让它们在试验中暴露出隐藏的缺陷。每次暴露出问题并经纠正或改进之后，就会使产品的可靠性发生一个阶跃。这样就使产品的可靠性随试验时间呈阶跃式随机增长。除此之外，产品在试验中由于其元件、材料经过电流、温度等应力的“老炼”与“退火”作用，消除了在制作或安装时所累积下来的内应力，使其性能逐渐稳定可靠；各种机械部件经过“磨合”作用，其动作逐渐平稳协调；有关人员的操作、管理也日趋熟练和富有经验。因此，即使在试验中对产品的各方面没做明显的更改，其可靠性还是处在不断地增长之中。总之，在这些试验中，使产品可靠性增长的因素是多方面的，其增长方式与增长速度取决于在试验中对产品所施加的应力类型与应力大小，以及采取的改进措施的快慢及有效程度。

如何对产品的可靠性增长过程进行定量控制，即如何根据其试验数据动态地分析与评价产品的可靠性，并预计需要

再做多久才能使它获得规定的可靠性，是否需要加大应力或改变试验方式，这些问题属于总体处在变动之中的统计分析问题（即变动统计学问题）。这些问题从五十年代末期被正式提出之后，至今已研究出许多种类的可靠性增长的数学模型以供使用。其中根据 Duane-Crow 的 AMSAA 模型加以改进的 AMSAA-BISE 模型是目前最先进和实用的可靠性增长模型之一（见周源泉、翁朝曦<sup>[3]</sup>）。

#### 1.2.4 可靠性评定与抽样检验

可靠性不像产品的其他性能指标，可用仪器来直接测定；为得知产品的可靠性，必须由使用或试验获得各种有关数据，再根据这些数据用可靠性评定技术进行统计推断，才能得出相应的各种可靠性指标参数。因此，在产品的研制过程中，若离开可靠性评定，则对产品可靠性的定量控制就无法进行。

可靠性评定分为单元可靠性评定与系统可靠性评定。对于大型复杂系统，由于不可能对它进行很多的试验而获得足够的的数据以供可靠性评定之用，此时需用金字塔式综合评定方法，它可充分地利用组成该系统的元器件→组合件→整机→分系统→系统的各级可靠性试验所获得的有关信息，进行综合推断，最后得出系统的可靠性参数（见周源泉、翁朝曦 1990<sup>[4]</sup>）。

抽样检验一般用于生产阶段的产品验收。由于许多可靠性试验，如寿命试验、抗应力强度（即环境适应性）试验，都属破坏性试验。不可能将整批产品都拿来做这种试验，只能从其中抽取一部分进行试验，再从这一部分产品的试验信息

来推断整批产品的可靠性参数。

抽样检验除了用于有破坏性的试验检测之外，对于许多非破坏性的检测，由于产品的批量大或检测手续过于繁杂，进行全检要耗费大量的人力物力，因此也必须采用抽样检验。所以对于产品的质量管理工作，抽样检验也是必不可少的一种手段。

### 1.2.5 可靠性试验

从试验的目的来讲，可靠性试验可分为两类：为了改进产品可靠性而进行的工程试验和为了评价、检验产品可靠性而进行的统计试验。

#### (1) 工程试验

在工程试验中，为使产品尽快地和全面地暴露出可能在使用中出现的各种问题和隐患，以配合工程上的分析改进措施，消除或软化这些问题和隐患，在试验时所施加的环境应力和工作应力通常要高于实际使用状态；但是又必须控制这些应力，使它们只能加速产品中隐患的暴露而不引入新的隐患或缺陷。因此，在设计这种试验的各应力与工程剖面时，必须参照产品设计中对各应力所考虑的设计余量和各种应力水平对缺陷暴露的有效程度，并与试验设备、改进中可能动用的人力、经费、时间等实际条件综合平衡，才能取得最佳效果。典型的工程试验是可靠性增长试验与筛选试验。

在产品研制或生产的初期，由于设计、工艺及管理操作程序不完善而引起产品的共同性隐患，统称为系统性缺陷。为暴露这类隐患，只要从产品中抽取有代表性的几个样品进行试验分析，并针对设计、工艺或管理程序存在的问题进行改

进。而改进是否有效、是否又引进了新的问题、又需通过试验来检验。通过这种试验和改进就可保证此后的产品不再出现原有的缺陷而使其可靠性得到根本性的改善，这种试验称为可靠性增长试验。

在产品的研制、生产、装卸、运输、贮存、安装等过程之中，经常存在着一些造成产品隐患的偶然因素，如人为失误或环境变化对产品造成各种应力冲击、化学和辐射等污染。产品由此而产生的隐患称为残余缺陷。为消除这类缺陷，必须对每一个产品都进行试验，才能使存在的问题得到暴露和纠正。这种试验称为筛选试验。当产品进入稳定生产阶段，筛选的应力条件与试验程序通常被确认，并作为生产工序中必不可少的固定环节。

## (2) 统计试验

为了给工程管理的决策和判断提供依据，必须根据产品的试验结果来分析、评价其可靠性水平或验证其可靠性是否达到了规定的指标。为此而进行的试验称统计试验。统计试验通常总希望能尽量反映实际使用的状况。对于使用环境恶劣的产品，除了做现场使用试验(如导弹的发射等)之外，还要用综合应力试验来模拟使用的实况。对于使用环境良好的长寿命或多次使用产品(如电子设备等)，若按实际使用环境进行试验就要花费许多时间和人力资源，不能及时得出所需的结果。对这种产品的试验往往要适当地提高其环境应力或工作应力来缩短试验时间，以便及时取得产品的可靠性信息和节约试验费用，这种试验即加速寿命试验。

在产品研制各阶段的转接点上或从研制转入生产、从小批试产转入大批生产，都必须对产品可靠性进行鉴定。此时

需要通过试验来分析评价产品的可靠性水平。这种试验称可靠性评价(或鉴定)试验。这种试验一般都要求根据产品的失效数据,计算产品可靠性参数的区间估计。

在生产稳定的时候,生产过程中对各种低层次的部件、元器件的可靠性控制和产品交付给使用方时,通常只要得知其可靠性不低于规定水平。为此而进行的试验称为验收试验。在验收试验中不一定能得到失效数据或发现产品存在的问题。在这类试验中失效是人们不希望发生的事件。

然而,不论失效发生在哪种试验中,都能为工程改进提供宝贵的信息,为提高产品可靠性做出贡献。同样地,在工程试验中获得的失效数据,经分析处理也可评价出产品的可靠性水平,为管理决策提供信息。因此,工程试验与统计试验之间并无绝然的分界。

由于产品可靠性与其性能参数分不开,因此在研制中的调试和许多性能试验都可为可靠性的改进与评价提供信息。能否充分利用这些信息,取决于以下两个条件:1)建立起健全有效的“故障报告、分析和纠正措施系统”;2)掌握统计分析技术。

### 1.2.6 机械结构可靠性

任何产品都离不开机械结构。一旦机械结构失效就必然要影响产品的使用。尤其是有些机械结构一旦发生故障就会立即造成灾难性的后果,如锅炉爆炸、桥梁断折、飞机失事等。因此在机械结构设计中要进行应力计算,并采用安全系数的方法。但是以前的安全系数方法,没有按照环境应力(或载荷)与结构强度都在随机地变化着的这一客观事实,去

寻找它们的变化规律进行分析，只是对它们作了定值计算，凭主观经验将安全系数取一个“足够高”的数值。这样设计出来的机械结构往往过于笨重，有时即使取了很大的安全系数其结构却仍然毁于一旦。

随着技术的发展，尤其在航天、航空工程中对于各种结构件既要求安全可靠，又要求体积小、重量轻，传统的安全系数方法不能适应这种要求。正确的机械结构设计方法应当根据应力与强度都是随机变量的事实，分别通过对使用条件及材料构造的研究，得出应力与强度的分布(变化)规律，按概率统计方法对它们进行计算，这样设计出来的机械结构就可以既保证安全可靠，又不至于留过多的余量而造成浪费。

这种设计方法除了用于机械结构设计之外，还被推广到其他方面的设计。此时应力的概念被扩展为电、磁、热、湿等各种可能对产品可靠性造成影响的因素；而强度则是产品对于这些因素的承受能力。因此，这种设计方法在各种类型的产品可靠性设计中都可被采用，甚至有时就将产品的可靠性定义为产品的强度大于它所承受应力的概率。由此可见它在可靠性工程中所占的地位。

### 1. 2. 7 软件可靠性

硬件是由各种器材、能源组成的实体。软件则是由各种知识、信息和逻辑思维“加工”而得的，包含在计算机等硬件的系统中的一个逻辑部件。

随着计算机技术的推广与应用，软件的研制与服务已形成一种新兴工业，即软件工程。据预测到本世纪末，软件将成为一个庞大的现代化产业部门，故有“抓住了软件就等于



抓住了未来的关键”一说。现在软件已不再是硬件的附属品。它所涉及的人力、物力、规模及复杂程度早已远远地超过了硬件。也正因为其庞大与复杂，其可靠性问题就随之显露出来。六十年代末期，美国的多次航天事故就是由软件故障所引起的，其中首次飞向金星的火箭试验失败就因在其软件上少了一个逗号，惨痛的教训促进了软件可靠性的研究。

软件的寿命周期，研制内容与失效机理都和硬件不同。因此，其可靠性的含意和研究方法也有许多与硬件不同之处。

A、软件的错误或缺陷主要来自于其寿命周期的前三个阶段、①分析阶段(相当于硬件的方案阶段)对于使用要求的调研、预测及文件规定不够准确；②设计阶段对软件功能及其间的逻辑关系考虑不周；③编码阶段对符号、地址等的混乱或遗漏，以及其他的各种人为失误。这些错误与缺陷在大型软件中总是难免的。因此，必须通过测试阶段的大量试验来发现并修正它们，直到软件的可靠性符合要求，才能提供使用而进入使用阶段。

由于软件错误属人为因素，一经排除就不复重现，因此①通过纠错，软件越用越可靠；②软件不磨损，不受外界环境中各种应力的影响；③软件的老化与报废是由于其中的信息与知识过时，使用对象有新的要求而不适应新情况。故其使用寿命的长短主要取决于分析与设计阶段是否深谋远虑。而硬件故障除了由于人为因素之外，更有器材本身的各种缺陷隐患和使用环境中各种应力的影响。故其老化报废主要是由于器材的磨损。其使用寿命的长短不仅取决于设计、生产还和使用的环境条件密切相关。