

高等学校工程技术系列教材

GAODENG XUEXIAO GONGCHENG JISHU XILIE JIAOCAI

XITONG KEKAOXING LILUN  
**系统可靠性理论**

程五一 王贵和 吕建国 编著

中国建筑工业出版社

高等学校工程技术系列教材

# 系统可靠性理论

程五一 王贵和 吕建国 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

系统可靠性理论/程五一, 王贵和, 吕建国编著.

—北京: 中国建筑工业出版社, 2010

(高等学校工程技术系列教材)

ISBN 978-7-112-11793-2

I. 系… II. ①程…②王…③吕… III. 系统可靠性-高等学校-教材 IV. N945.17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 020488 号

本书系统介绍了可靠性基本理论和工程应用方法。详述了可靠性的基本知识、可靠性特征量及可靠性预计、分配、设计等相关内容; 全面分析了人机系统可靠性理论和网络可靠性的基本知识; 重点阐述了系统可靠性分析方法及其相关理论在工程上的应用。

该书内容系统、全面, 可以作为工科院校的勘察、土木、机械、安全、信息、电气及自动化、仪器仪表工程等专业领域的本科生和研究生教材使用, 也可供从事工程设计、研究、质量管理的工程技术人员参考。

\* \* \*

责任编辑: 张伯熙

责任设计: 崔兰萍

责任校对: 赵颖 关健

高等学校工程技术系列教材

系统可靠性理论

程五一 王贵和 吕建国 编著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 12 字数: 298 千字

2010 年 3 月第一版 2010 年 3 月第一次印刷

定价: 20.00 元

ISBN 978-7-112-11793-2

(19044)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

## 前 言

可靠性理论的诞生可以追溯到 20 世纪 40 年代，它虽然提出较晚，但发展得非常迅速；它首先在美国的航空、电子等工业部门应用发展起来，随即在前苏联、日本等国家相继应用推广。20 世纪 70 年代，由于各种各样的电子设备或系统广泛应用于各科学技术领域、工业生产部门以及人们的日常生活中，大大提高了生产、生活中的安全可靠。

进入 21 世纪后，提高产品的可靠性和系统可靠性，已成为保障系统安全性和产品质量的有效途径，同时系统可靠性理论已经在土木、勘察、机械、安全、信息等领域得到了广泛应用。

可靠性理论的重要性被各行业认识的同时，许多高校特别是理工院校已把可靠性理论课程列入到教学计划中。1994 年我校在工程技术学科研究生课程中开设了可靠性工程课程，2002 年又在本科生中开设可靠性理论课程。本书就是在此基础上，根据近年来的教学体会和我校专业的特点，收集国内外近年来的最新成果，整理编写而成。本书的特点是每章有学习要点、阅读材料和习题，便于进一步理解和掌握所学相关内容。本教材适用 32~48 学时。

本书在编写过程中，得到了中国地质大学（北京）国家特色专业及北京市特色专业——勘察技术与工程建设的资助，得到了众多学者的大力支持。谭志伟、王仙、彭景和瞿叶高参与了本书部分章节编写工作，在图表绘制和校对方面得到了张琴、王兆芹、李季、戴联双、岳仁田等给予的帮助，我们在此谨表诚挚的谢意。同时，在本书诞生之际，借此机会感谢本书引用参考文献的所有作者和学者！

由于作者水平有限，在编著本书中定会存在不足和错误之处。希望广大读者批评和指正。

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
<b>第一节 可靠性的基本概念</b> .....	1
1. 可靠性的定义 .....	1
2. 狭义可靠性和广义可靠性 .....	2
3. 固有可靠性和使用可靠性 .....	3
4. 工程可靠性 .....	4
<b>第二节 材料的随机变异性与可靠性</b> .....	4
<b>第三节 工程产品失效原因</b> .....	5
<b>第四节 可靠性的发展历史与现状</b> .....	7
<b>第五节 可靠性在生产中的重要作用</b> .....	9
<b>第六节 可靠性的研究内容</b> .....	10
<b>【阅读材料】</b> .....	11
<b>习题一</b> .....	11
<b>第二章 可靠性工程中的特征量</b> .....	13
<b>第一节 概率论基础知识</b> .....	13
1. 概率论的基本概念 .....	13
2. 大数定律和中心极限定律 .....	19
<b>第二节 可靠性工程中的特征量</b> .....	19
1. 可靠度与不可靠度 .....	20
2. 失效率及失效分布 .....	22
3. 平均寿命 .....	25
4. 可靠寿命 .....	27
<b>第三节 可靠性理论中常用的概率分布</b> .....	29
<b>第四节 可靠性特征量的选取</b> .....	35
1. 指数分布 .....	35
2. 正态分布 .....	35
3. 其他分布和未知分布 .....	35
4. 特征量的选取序列 .....	36
<b>【阅读材料】</b> .....	36
<b>习题二</b> .....	39
<b>第三章 系统可靠性预计与分配</b> .....	41
<b>第一节 系统的工程结构图和可靠性框图</b> .....	41
<b>第二节 不可修复系统可靠性模型预测</b> .....	42



1. 串联系统 .....	43
2. 并联系统 .....	44
3. $m/n$ (G) 表决系统 .....	45
4. 混联系统 .....	48
5. 旁联系统 .....	49
<b>第三节 可靠性预计</b> .....	51
1. 概述 .....	51
2. 应力分析预计法 .....	52
3. 元器件计数法 .....	56
4. 上下限法 .....	58
5. 蒙特卡洛法 .....	63
<b>第四节 可靠性指标分配</b> .....	64
1. 概述 .....	64
2. 等同分配法 .....	65
3. 阿林斯分配法 .....	66
4. AGREE 分配法 .....	68
<b>【阅读材料】</b> .....	69
习题三 .....	71
<b>第四章 可靠性设计方法</b> .....	73
<b>第一节 概述</b> .....	73
1. 可靠性设计的重要性及必要性 .....	73
2. 可靠性设计的基本内容 .....	75
<b>第二节 电子元器件的选择与降额设计</b> .....	75
1. 元器件的选择 .....	75
2. 降额设计 .....	76
<b>第三节 容差与漂移设计</b> .....	77
1. 均方根偏差设计法 .....	78
2. 最坏情况设计法 .....	80
<b>第四节 概率设计工程方法</b> .....	81
1. 概述 .....	81
2. 应力—强度分布干涉理论 .....	82
3. 安全系数与可靠度关系 .....	90
4. 拉伸载荷下的拉杆设计 .....	99
<b>【阅读材料】</b> .....	101
习题四 .....	102
<b>第五章 人机系统的可靠性</b> .....	104
<b>第一节 人机系统的分析</b> .....	104
1. 人机系统的定义 .....	104
2. 影响人的可靠性因素 .....	105



3. 人因差错的表现类型 .....	106
4. 人因差错的概率估计 .....	107
第二节 人机系统的可靠度和故障率 .....	108
1. 人机系统的故障率 .....	108
2. 人机系统可靠性设计原则 .....	110
3. 人机系统可靠度的计算 .....	112
4. 提高人机可靠性的途径 .....	114
【阅读材料】 .....	114
习题五 .....	118
<b>第六章 系统可靠性失效分析</b> .....	119
第一节 系统故障树分析 .....	119
1. 概述 .....	119
2. 故障树建立的数学基础 .....	120
3. 故障树的编制 .....	121
4. 故障树的定性分析 .....	125
5. 故障树的定量分析 .....	127
6. 故障树分析法的优缺点 .....	129
第二节 故障树与可靠性框图比较 .....	129
1. 可靠性框图与故障树关系 .....	129
2. 可靠性框图和故障树计算结果的讨论 .....	132
第三节 系统事故风险分析 .....	133
1. 风险概念 .....	133
2. 风险计算步骤 .....	139
第四节 事件树分析 .....	143
1. 事件树的编制 .....	143
2. 事件树分析 .....	144
3. 应用举例 .....	145
第五节 失效模式、后果与严重度分析 .....	145
1. 概述 .....	145
2. 失效模式与后果分析 (FMEA) .....	146
3. 严重度分析 (CA) .....	148
【阅读材料】 .....	150
习题六 .....	151
<b>第七章 网络可靠度的计算方法</b> .....	153
1. 状态枚举法 .....	153
2. 全概率分解法 .....	155
3. 最小径集法求可靠度 .....	155
4. 最小割集法求可靠度 .....	156
5. 最小径集与最小割集转换 .....	157

---

6. 不交布尔代数求解网络可靠度 .....	157
<b>【阅读材料】</b> .....	158
习题七 .....	159
<b>第八章 系统可靠性的工程应用</b> .....	162
<b>第一节 可靠性在矿山领域的应用</b> .....	162
1. 通风系统可靠性 .....	162
2. 矿山排水设备可靠性优化 .....	167
<b>第二节 可靠性在土木工程中的应用</b> .....	168
1. 边坡稳定性的可靠性分析 .....	168
2. 基坑工程的故障树分析 .....	172
<b>第三节 可靠性工程在设备安全管理上的应用</b> .....	176
<b>附表</b> .....	179
<b>参考文献</b> .....	182



# 第一章 绪 论

## 【学习要点】

本章通过讲解可靠性的基本概念，详细全面地阐述了可靠性的内涵及可靠性四个要素的内容，进而提出了可靠度及其相关概念，在此基础上通过一个阅读材料说明如何应用可靠性理论解决实际工程问题。本章需要掌握可靠性、可靠度的概念以及产品失效的原因，熟悉狭义、广义、固有、使用和工程可靠性的内涵，了解可靠性的发展历史和现状。

“可靠性”这个词的应用已有很长的历史，但过去对其含义的理解往往是顾名思义。随着科学技术的发展，可靠性已成为一门专门的学科，并不断地得到发展，对其含义已有了特定的严格定义，包含的内容也在不断丰富。

## 第一节 可靠性的基本概念

### 1. 可靠性的定义

在日常生活中，我们都希望产品能够尽量完好地为使用者所用，不论在什么时候、什么条件下都能完成它的功能。但实际上，要产品完成其既定功能，在时间和条件上都会有一定限制，不可能是无限制的。人们对于可靠性(Reliability)的一般理解，就是认为可靠性表示元件、组件、零件、部件、机器、设备或整个系统等产品，在正常使用条件下工作是否长期可靠，性能是否长期稳定。这里除了有概率统计的概念外，还包含有预期使用条件、工作的满意程度、正常工作时间的长短等内容。

可靠性定义为：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，这种能力用概率表示，含有以下因素：

#### (1)对象

可靠性问题的研究对象是产品，它泛指元件、组件、零件、部件、机器、设备，甚至整个系统；研究可靠性问题时首先要明确对象，不仅要确定具体的产品，而且还应明确它的内容和性质。如果研究对象是一个系统，则不仅包括硬件，还应包括软件和人的判断和操作等因素在内，需要以人机系统的观点去观察和分析问题。

#### (2)规定条件

1) 环境条件，如气候环境(包括温度、湿度、气压等)，生物和化学环境(包括生物作用中的物质霉菌、化学作用中的物质盐雾、臭氧和机械作用的微粒灰尘等)，机械环境(包括振动、冲击、摇摆等)，电磁环境(如电场、磁场、电磁场等)；

- 2) 动力、负载条件(如供电电压、输出功率等);
- 3) 工作方式(如连续工作、间断工作等);
- 4) 使用和维护条件等。

“规定的条件”是产品可靠性定义中最重要而又最容易被忽视的部分。产品的可靠性受“规定的条件”所制约,不同条件产品的可靠性可能截然不同,离开了具体条件谈论可靠性是毫无意义的。

### (3) 规定时间

与可靠性非常密切的是关于使用期限的规定,因为可靠性是一个有时间性的定义。对时间的要求一定要明确。时间可以是时间 $(0, t)$ ,也可以是区间 $(t_1, t_2)$ ,有时对某些产品给出相当于时间的一些其他指标可能会更明确,例如对汽车的可靠性可规定行驶里程(距离);有些产品的可靠性则规定周期、次数等会更恰当些。

### (4) 规定功能

所谓完成“规定功能”是指研究对象(产品)能在规定的功能参数和使用条件下正常运行(或者说不发生故障或者失效),完成所规定的正常工作。亦指研究对象(产品)能在规定的功能参数下保持正常的运行。应注意“失效”不一定仅仅指产品不能工作,因为有些产品虽然还能工作,但由于其功能参数已漂移到规定界限之外了,即不能按规定正常工作,也视为“失效”。

对于产品可靠性这一概念的理解,除了要弄清该产品的功能是什么,其失效或故障(丧失规定功能)是怎样定义的。还要注意产品的功能有主次之分,故障也有主次之分。有时次要的故障不影响主要功能,因而也不影响完成主要功能的可靠性。还要注意,即使同一产品,在不同条件下其功能往往是不同的。因此,生产方或质量认证方对产品性能的规定是十分严密的,通常在产品说明书上列出全部性能参数作为规定功能的度量,但使用者往往只考虑在具体使用条件下所需要的功能而忽视其认为不影响正常工作的其他功能上的失效。产品的可靠性可以针对产品完成某种功能而言,也可以针对产品的多种功能综合而言。

### (5) 概率

用概率来度量产品的可靠性时就是产品的可靠度,把可靠性的概念用具体的数学形式—概率表示,这是可靠性技术发展的出发点,也是可靠性数量化的标志。因为用概率来定义可靠度后,对元件、组件、零件、部件、机器、设备、系统等产品的可靠程度的测定、比较、评价、选择等才有了共同的基础,对产品可靠性方面的质量管理才有了保证,对系统的安全性才可以评价,才能够研究系统的风险等问题。

综上所述,讨论系统的可靠性问题时,必须明确对象、使用条件、使用期限、规定的功能等因素,可靠度是可靠性的定量表示,其特点是具有随机性。因此,概率论和数理统计理论是可靠性理论进行定量计算的数学基础。

## 2. 狭义可靠性和广义可靠性

可靠性与可靠度有广义与狭义之分。

狭义可靠性:上述的可靠性我们常称为狭义可靠性,它仅表示产品(或者一个评价系统)在某一稳定时间内发生失效(或者故障)的难易程度。但是事实上,除了一部分

元件外，大多数的设备（子系统）和系统都是可以维修的。所以要表示其完成功能的能力还必须考虑其维修性，即系统失效后能否很快地恢复其功能而继续工作。这样，从维修产品的角度出发，可靠性的含义就应该更广泛一些。

广义可靠性：是指“产品在其整个寿命期限内完成规定功能的能力”。它包括可靠性（即狭义可靠性）与维修性。由此可见，广义可靠性对于可修复的产品和不可修复的产品有不同的意义。对于可修复的产品来说，除了要考虑提高其可靠性外，还应考虑提高其维修性；而对于不可修复的产品来说，由于不存在维修的问题，只需考虑提高其可靠性即可。

与广义可靠性相对应，不发生故障的可靠度（即狭义可靠度）与排除故障（或失效）的维修度合称为广义可靠度。

在进一步研究可靠性内容前，先介绍一下可修复与不可修复的概念。

不可修复是指系统或其组成单元一旦发生失效，不再修复，系统处于报废状态。不可修复是指技术上不能够修复，经济上不值得修复，或者一次性使用，不必要进行修复，如图 1-1 (a) 所示。

可修复是指系统或组成单元（或零部件）发生故障后，经过修理使系统恢复到正常工作状态。系统发生故障后，一般要寻找故障部位，对其进行修理或更换，一直到最后验证系统确已恢复到正常工作状态，这一系列的工作就称为修复过程，如图 1-1 (b) 所示。

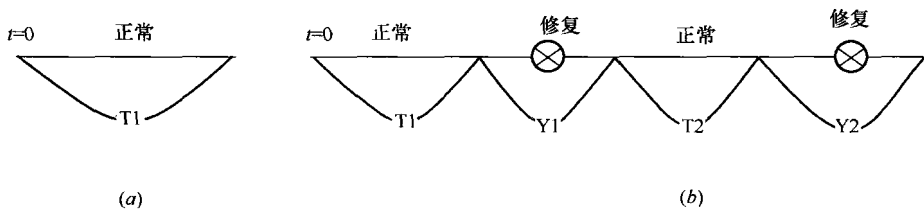


图 1-1 不可修复系统和可修复系统

(a) 不可修复系统；(b) 可修复系统

研究可修复产品的可靠性，不仅包含系统的狭义可靠性，而且还应包括维修因素在内的广义可靠性。绝大多数设备是可修复系统，但不可修复系统的分析方法是研究可修复系统的基础。

### 3. 固有可靠性和使用可靠性

产品运行时的可靠性，称为工作可靠性（Operational Reliability），它包含了产品的制造和使用两方面因素，用“固有可靠性”和“使用可靠性”来反映。

固有可靠性（Inherent Reliability）：即在生产过程中已经确立了的可靠性。它是产品内在的可靠性，是生产厂在模拟实际工作条件的标准环境下，对产品进行检测并给以保证的可靠性。它与产品的材料、设计与制造工艺及检验精度等有关。

使用可靠性（Use Reliability）：与产品的使用条件密切相关，受到使用环境、操作水平、保养与维修等因素的影响。使用者的素质对使用可靠性影响很大。因为，即便是一个可靠性很好的产品，如果由于包装、运输、安装、使用、维修等环节中受到各种不良因素的影响也会降低其可靠性。譬如运输过程中受到的冲击，使用中环境的变化，操



作的失误，都会使产品失效或寿命下降。因此，可靠性不仅和产品的设计、制造等有关，而且和产品所涉及使用的环境、维修等环节也有关。

表 1-1 列举了产品不可靠的原因及比例。

产品不可靠的原因及比例

表 1-1

项目	类 别	百分比	备 注
不可靠性	零部件材料缺陷	30%	属于固有可靠性类
	设计技术缺陷	40%	
	制造技术缺陷	10%	
	使用（运输、环境、操作、安装、 维修、技术）不当	20%	属于使用可靠性

#### 4. 工程可靠性

可靠性是从工程实践中发展起来的，是在分析设备故障的基础上提出的一种工程理论，进而创立了可靠性学科。按照理论与工程相结合的辩证关系，要发挥可靠性理论和方法的作用，可靠性必须与工程相结合，也正是由于可靠性理论与工程实际的结合才产生了可靠性技术。

现代系统是一个复杂、综合的系统工程，包括硬件、软件、操作的人和所处的环境等要素。构成系统的设备越复杂，系统规模越大，系统所处的环境越多样，发生系统故障的可能性也就越大，对操作维护人员的要求也就越高，设计制造的难度自然越大，可靠性的问题必然越多，对可靠性技术的要求也就越迫切。由此可见，可靠性与系统工程的关系是相辅相成的。离开了工程，可靠性就没有存在的必要；离开了可靠性，就无法实现系统工程。

工程可靠性 (Engineering Reliability)：表示系统从工作时刻开始，在规定的条件和时间下，为完成预定功能的能力所进行的设计、研究、制造、试验和使用的科学方法，是一种对所有系统都有普遍意义的科学技术方法。内容包括从产品设计、研制、生产的实际需要出发，按照可靠性理论和方法开展工程管理、工程设计、阶段评审、试验鉴定和综合评价等可靠性活动，从而用最少的资源使产品达到有关要求，实现降低产品成本、减少维修费用、提高产品安全性的目标。

#### 【链接】

[工程]：完成某项任务提供决策、计划、方案、方法和顺序等一系列的组织、管理和技术。

[技术]：技能、技巧；劳动手段的体系；科学的应用；《辞海》给出泛指根据生产实践经验和自然科学原理而发展成的各种工艺方法和技能，如电工技术、焊接技术、木工技术等等，还应包括生产工具和其他物质设备，以及生产的工艺过程或作业程序、方法。

## 第二节 材料的随机变异性与可靠性

经典工程内容主要注重讲授产品是如何制造和工作的。关于产品失效的模式、失效

的影响,以及由于设计、制造、维护和使用等方面可能影响材料失效内容一般涉及甚少。而作为工程技术人员的任务是设计和维护产品,以便使产品或系统失效的状态得以延缓。在这些任务当中,工程技术人员面临着工程材料等与生俱来的变异性等问题。

经典理论教育从根本上说是确定性的,而对变异性通常不会给予充分的关注。但是随着现代化技术的发展、科技的进步,特别是电子、军事、宇航、机电工业以及对地质工程深入的研究,必须考虑元件、材料的随机性或者变异性。如图 1-2 所示,实际煤的显微结构有碎粒、粉粒和鳞片等结构,而不是传统认识的均质结构。

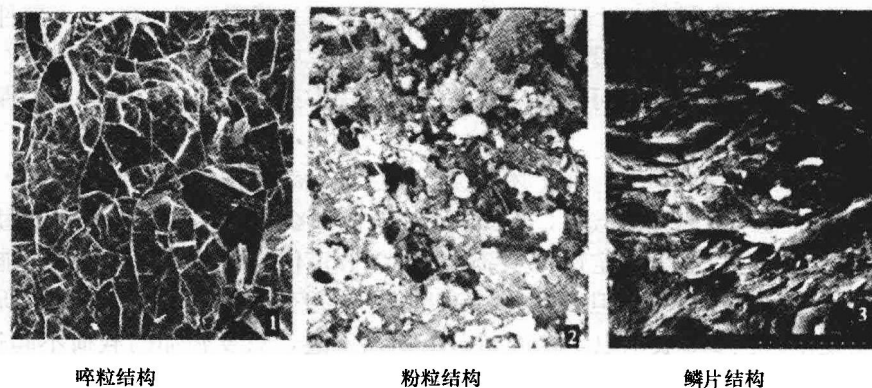


图 1-2 材料的变异性(煤的显微结构)

例如在经典力学中,见图 1-3,人们从安全角度出发,提出直观、易懂、使用方便的安全系数  $n$  这一概念。 $n = \frac{\sigma_s}{[\sigma]}$ , 其中:  $\sigma_s$ —塑性材料的屈服极限,  $[\sigma]$ —材料的许用应力。该指标只考虑了诸多参数在均质情况下的工作状态,但诸如质量、尺寸、摩擦系数、强度和应力等基本参数从来就不是绝对的,同时由于加工和材料的变化、人的因素及应用等原因,这些参数在实践中反而易于改变,有些参数还会随时间变化,因而提出的安全系数存在着认识上的盲目性和保守性。

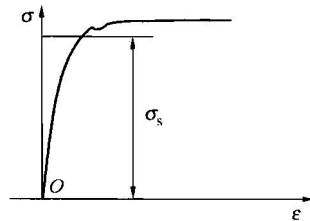


图 1-3 材料的应力-应变曲线

所以,了解材料随机性和变异性的起因和影响,是生产可靠产品和解决不可靠问题所必需的。

### 第三节 工程产品失效原因

失效(Failure,对于可修复的产品,称故障)表示“产品丧失规定的功能”,这里不仅包括规定功能的完全丧失,亦包括规定功能的降低等。

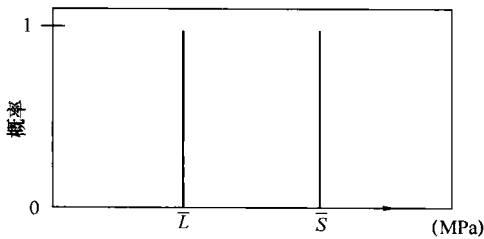
产品可能会失效的原因有很多。就实际情况而论,了解失效的潜在原因是防止失效的根本所在。要预知所有这些原因是不切实际的,更重要的是考虑到所涉及产品的不确定性。在产品的设计、开发、制造和服务的过程中,可靠性工程方面的努力应注重所有预计和没有预计的失效原因,以防止产品发生失效或确保发生失效的概率较小。

产品发生失效的主要原因在于：

(1) 设计可能先天不足。材料强度可能太弱，消耗功率太大等原因。每项设计存在的问题都预示着出差错的可能性。设计越复杂，需要解决的问题越困难，出差错的可能性就会越大。

(2) 产品可能以某种方式处于过应力状态。如果施加的应力超过了强度就会发生失效。如果施加的电应力（电压、电流）超过其承受能力，电子元器件就会失效；而如果所施加的压应力超过其屈服强度，一个机械支柱将会屈曲。实际中，这类超应力失效确实会发生，由于设计者提供一个安全系数，这种现象不是经常发生。电子元器件规范规定了最大额定使用条件，电路设计师要关注在使用过程中不会超过这些额定值。在大多数情况下，所设计的产品会尽可能地确保在使用过程中或者最坏情况下，应力保持在额定应力值条件以下——“降额”。

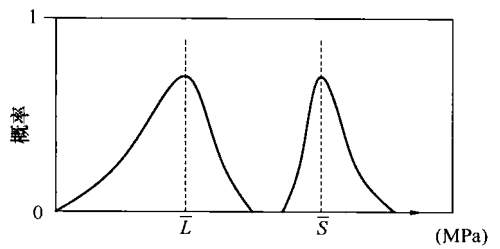
(3) 变异也可能导致失效。在上述情况中，强度和载荷值是固定和已知的。如果这个已知的强度总是超过已知的载荷，如图 1-4 所示，那么就不会发生失效。不过，大多数情况下，二者都有一些不确定性。零部件的实际强度值是会变化的：有些可能相对大一些，另一些则相对小一些，但大多数会接近平均强度值（期望值）。同样，所加的载荷也将是可变的。图 1-5 表示出了这类情况。如前所述，只要施加的载荷不超过强度，失效就不会发生。但是，如果载荷和强度分布之间有重叠，而且当一个处于载荷分布高端尾部的载荷值施加到一个处于强度分布尾部的物件上时，在载荷和强度分布之间就会出现重叠或干涉（图 1-6），这时就会发生产品失效。



载荷—强度

图 1-4 载荷—强度——离散值（一）

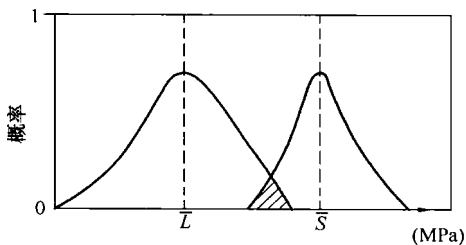
$\bar{S}$ —已知期望强度； $\bar{L}$ —已知期望载荷



载荷—强度

图 1-5 载荷—强度——离散值（二）

$\bar{S}$ —已知期望强度； $\bar{L}$ —已知期望载荷



载荷—强度

图 1-6 载荷—强度——存在干涉的分布

$\bar{S}$ —已知期望强度； $\bar{L}$ —已知期望载荷

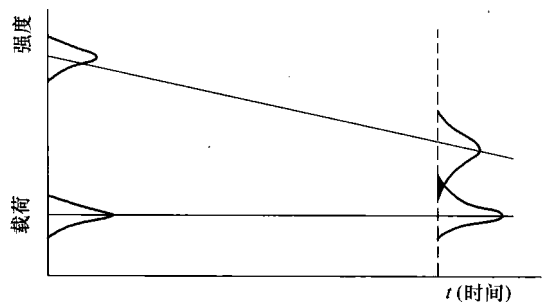


图 1-7 与时间相关联的载荷和强度变化

$\bar{S}$ —已知期望强度； $\bar{L}$ —已知期望载荷



(4) 磨损能导致失效。材料疲劳、表面之间的磨损、腐蚀、绝缘退化等都可能导致失效。图 1-7 说明了这种情况。开始时材料强度足以承受所施加的载荷,但随着时间的推移不断发生弱化,强度减弱,平均值下降,并且强度分布扩展得更宽。这也是很难提供此类产品寿命精确预计的主要原因。

(5) 其他与时间相关联的原因导致的失效。如电池的电能耗尽、软焊接缝承受高温和拉应力引起的塑性变形,以及电子元器件参数值的逐渐漂移等,都是这类原因造成失效的例子。

(6) 潜在现象导致的失效。潜在现象是一种尽管系统的各个部分工作正常但该系统仍不能正常工作的情况。例如阿波罗宇宙飞船驾驶舱中的致命火灾就是这样造成的,当机组人员执行了一个特定的指令序列时发生电气短路,虽不会造成飞船的爆炸,但造成驾驶舱火灾,导致飞船的失效。

(7) 不正确的规范、设计或软件编码等错误导致的失效;错误的组装或测试所导致的失效;维修不适当或不正确操作等导致失效。

(8) 还有很多其他可能导致失效的原因。如油封可能渗漏,显示屏可能闪烁,操作指令可能错误或模糊,电子系统可能遭受电磁干扰等。

#### 第四节 可靠性的发展历史与现状

可靠性是一门新兴的工程学科。近年来,世界各发达国家已把可靠性技术和全面质量管理紧密地结合起来,有力地提高了产品可靠性水平。

可靠性工程的诞生可以追溯到 20 世纪 40 年代,即第二次世界大战期间。当时,由于战争的需要,迫切要求对飞机、火箭及电子设备的可靠性进行研究。最早提出可靠性理论的是德国的科学技术人员,德国在 V1 火箭的研制中,提出了火箭系统的可靠度等于所有元器件可靠度乘积的理论,即把小样本问题转化为大样本问题进行研究。到了 20 世纪 50 年代初期,美国为了发展军事的需要,投入了大量的人力、物力对可靠性进行研究,并先后成立了“电子设备可靠性专门委员会”、“电子设备可靠性顾问委员会”(American group reliability of electronic equipment 简写 AGREE) 等研究可靠性问题的专门机构。1957 年 6 月 4 日,美国的“电子设备可靠性顾问委员会”发布了《军用电子设备可靠性报告》。这就是著名的“AGREE”报告。这一报告提出了可靠性是可建立的、可分配的及可验证的,从而为可靠性学科的发展提出了初步框架。

20 世纪 50 年代,前苏联为了保证人造地球卫星发射与飞行的可靠性,开始了可靠性的研究工作。同时,为了解决作战对导弹可靠性的要求,一些国家也先后开展了对可靠性的研究与应用。也就在这一时期,日本企业家认识到,要在国际市场的竞争中取胜,必须进行可靠性的研究。1958 年日本科学技术联盟成立了“可靠性研究委员会”,专门对可靠性问题进行研究。

1961 年,前苏联发射第一艘有人驾驶的宇宙飞船时,宇航员对宇宙飞船安全飞行和安全返回地面的可靠性提出了 0.999 的概率的要求,可靠性研究人员把宇宙飞船系统的可靠性转化为各元器件的可靠性进行研究,取得了成功,满足了宇航员对宇宙飞船系



统提出的可靠性要求。从此，前苏联对可靠性问题展开了全面的研究。这时，法国、日本、英国等国家也相继开展了可靠性工程的研究。20世纪60年代我国在雷达、通信机、电子计算机等方面也提出了可靠性问题。

20世纪70年代，各种各样的电子设备或系统广泛应用于各科学技术领域、工业生产部门以及人们的日常生活中。由于电子设备的可靠性直接影响着生产、系统、设备的效率以及人们的生命安全，对可靠性问题的研究显得日益重要。同时，人们也开始了对机械设备可靠性的研究，以解决已有的电子设备可靠性设计及试验技术对机械设备使用时受到限制和结果不理想的问题。由于我国国家重点工程的需要（元器件的可靠性问题），以及消费者的强烈要求（电视机的质量问题），对各行各业开展可靠性的研究起到了巨大的推动作用。1978年，国家计划委员会、电子工业部及广播电视总局陆续召开了有关提高电视机质量的工作会议。对电视机等产品明确提出了可靠性、安全性的要求和可靠性指标，组织全国整机及元器件生产厂家开展大规模的、以可靠性为重点的全面质量管理。在5年的时间里，使电视机平均故障间隔时间提高了一个数量级，配套元器件使用可靠性也提高了1~2个数量级。

20世纪80年代，可靠性研究继续朝广度和深度发展，中心内容是实现可靠性的保证。1985年，美国军方提出在2000年实现“可靠性加倍，维修时间减半”这一新的目标，并已开始实施。20世纪80年代初，我国掀起了电子行业可靠性工程和管理的一个高潮。1984年组建了全国统一的电子产品可靠性信息交换网，并颁布了国家军用标准GJB/Z299《电子设备可靠性预计手册》，有力地推动了我国电子产品可靠性工作。同时还组织制定了一系列有关可靠性的国家标准、国家军用标准和专业标准，使可靠性管理工作纳入标准化轨道。在20世纪80年代，软件可靠性理论研究停滞不前，没有质的飞跃，但软件可靠性的工程实践经验得到不断积累，不少软件可靠性技术在软件工程实践中得以应用。某些技术达到实用化程序，如软件可靠性建模技术、管理技术等。可以说这一时期，软件可靠性从研究阶段逐渐迈向工程化阶段。

20世纪90年代初，原机械电子工业部提出了“以科技为先导，以质量为主线”，沿着“管起来—控制好—上水平”的发展模式开展可靠性工作，兴起了我国第二次可靠性工作的高潮，取得了较大的成绩。进入20世纪90年代后，由于软件可靠性问题的重要性更加突出和软件可靠性工程实践范畴的不断拓展，软件可靠性逐渐成为软件开发者需要考虑的重要因素，软件可靠性工程在软件工程领域逐渐取得相对独立的地位，并成为生机勃勃的分支。

1991年海湾战争的“沙漠风暴”行动和科索沃的战争表明，未来战争是高技术的较量。现代化技术装备，由于采用了大量的高技术，极大地提高了系统的复杂性。为了保证战备的完好性、任务的成功性以及减少维修人员和费用，可靠性工程范围将大大扩展，需要更多的可靠性技术作保证，需要更加严密的可靠性管理系统，可靠性研究需要上一个台阶。

进入21世纪之后，提高产品的可靠性，更是提高产品质量的关键。只有那些高可靠性的产品及其企业，才能在竞争日益激烈的世界上生存下来。不仅如此，国外还把对产品可靠性的研究工作提高到节约资源和能源的高度来认识。这不仅是因为高可靠性产品的使用期长，而且通过可靠性设计，可以有效地利用材料，减少加工工时，获得体积



小、重量轻的产品。

在现代生产中，可靠性技术已贯穿于产品的开发研制、设计、制造、试验、使用、运输、保管及维修保养等各个环节。

## 第五节 可靠性在生产中的重要作用

对于产品来说，可靠性问题和人身安全、经济效益密切相关。因此，研究产品的可靠性问题，显得十分重要，非常迫切。如，飞机某一系统或某一元器件如果发生故障，就有可能造成机毁人亡的恶性灾难。1971年，前苏联三名宇航员在“礼炮”号飞船中由于两个部件失灵而丧生。由此可见，提高产品可靠性具有非常重要的意义。

提高产品的可靠性有以下几方面的作用：

(1) 提高产品的可靠性，可以防止故障和事故的发生，尤其是避免灾难性的事故发生，从而保证人民生命财产安全。1986年1月28日，由于两个密封圈失效，美国航天飞机“挑战者”号起飞76秒后爆炸，7名宇航员全部丧生，造成12亿美元的经济损失；1992年，我国发射“澳星”时，由于一个小小零件的故障，使“澳星”发射失败，造成了巨大的经济损失和政治影响。

(2) 提高产品的可靠性，能使产品总的费用降低。要提高产品的可靠性，首先要选用较好的元部件，研制包括部分冗余功能部件的容错结构以及进行可靠性设计、分析、实验，尽管这些都需要增加经费。然而，产品可靠性的提高使得维修费及停机检查损失费大幅度减小，使总费用降低。例如美国在发展F105战斗轰炸机的过程中，花了2500

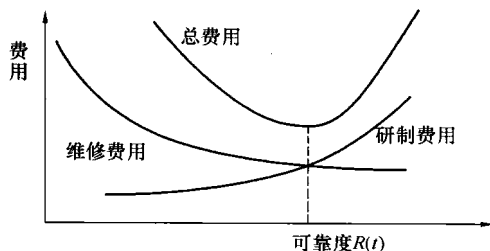


图 1-8 费用-可靠性曲线

万美元，使该机的任务可靠度从 0.7263 提高到 0.986，这样每年可节省维修费 5400 万美元。图 1-8 表示可靠度与费用的关系图。

(3) 提高产品的可靠性，可以减少停机时间，提高产品可用率，一台设备的效率可代替几台设备的工作效率。这样，在投资、成本相近的情况下，可以发挥几倍的效益。美国 GE 公司经过分析认为，对于电力、冶金、矿山、运输等连续作业的设备，即使可靠性提高 1%，成本提高 10% 也是合算的。

(4) 对于企业来讲，提高产品的可靠性，可以改善企业信誉，增强竞争力，扩大产品销路，从而提高经济效益。

(5) 提高产品的可靠性，可以减少产品责任赔偿案件的发生，以及其他处理产品事故费用的支出，避免不必要的经济损失。

为了提高产品的可靠性，必须在生产的各个环节上做出努力，但最重要的是设计阶段。如果设计不合理，想通过事后的维修来达到所期望的可靠性，这几乎是不可能的。因此，从事仪器研制和系统设计的科研人员，应该熟悉和掌握保证可靠性的各种方法与手段。