



普通高校继续教育“十二五”规划教材·安全工程

# 系统可靠性

程五一 李季 主编

XITONG KEKAOXING LILUN JIQI YINGYONG

# 理论及其应用



北京航空航天大学出版社  
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

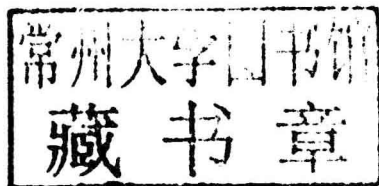


普通高校继续教育“十二五”规划教材·安全



# 系统可靠性理论及其应用

程五一 李 季 主编



北京航空航天大学出版社

## 内 容 简 介

本书介绍系统可靠性的基本理论和工程实际应用方法;详述可靠性的基本知识、可靠性特征量及可靠性预计、分配、设计等相关内容;全面分析人机系统可靠性理论和网络可靠性的基本知识;重点阐述系统可靠性分析方法及其相关理论的应用。

书中内容系统、全面,涉及范围广,可作为工科院校的安全、信息、土木、机械、勘查、电气及自动化、仪器仪表工程等专业的本科生和研究生教材,也可供从事工程设计、研究、质量管理的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

系统可靠性理论及其应用/程五一,李季主编. —

北京:北京航空航天大学出版社,2012.8

ISBN 978-7-5124-0832-6

I. ①系… II. ①程…②李… III. ①系统可靠性

IV. ①N945.17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 114694 号

版权所有,侵权必究。

### 系统可靠性理论及其应用

程五一 李 季 主编

责任编辑 张军香 朱红芳 刘福军

\*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:787×1092 1/16 印张:13.5 字数:346 千字

2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-5124-0832-6 定价:29.00 元

# 普通高校继续教育“十二五”规划教材

## 安全工程系列教材编委会

主任：罗云

副主任：刘云昌 赵乐华 程五一

秘书长：戴朝霞

委员：（按姓氏笔画排序）

吕建国	朱 锴	华心祝	刘庆州
闫 雪	许 铭	吴 祥	陆愈实
金龙哲	赵云胜	姜迪宁	钱新明
徐德蜀	寇丽平	鲁华章	裴晶晶
樊运晓			

# 序

随着贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要》提出的培养人才的新机制和实施“卓越工程师教育培养计划”的要求,安全工程专业的内涵也发生了很大变化,相应的专业培养目标、培养标准以及培养标准实现的矩阵等都有不同程度的变化,要求学生不仅要掌握系统理论知识,而且要成为自我学习能力强、创新能力强和适应经济社会发展需要的工程技术人才。但是,目前教材建设与专业发展并不匹配,无法满足新形势下高等教育及其各类人才培养的需要。因此,组织编写、出版一套新的安全工程专业系列教材,成为安全工程教育的迫切任务。

北京航空航天大学出版社是一家优秀高校出版社,根据当前安全工程专业教育发展,把握前沿,在进行大量调查和研究基础上,组织了一批安全工程领域的教授、专家,成立了编委会,提出了教材体例的设计、编写总体要求,并统筹安排了出版进度和编写工作。计划分批出版近 20 余门课程的教材,以满足“卓越工程师教育培养计划”的要求。

本系列教材的使用对象主要是现代远程教育安全工程、土木工程、勘察技术与工程等专业的本、专科生,也适用于应用型本科院校或重点本科二级学院相关专业的教学。

作为一套全新的安全工程系列教材,编写总体原则是重视学生自学,提高对学生创新能力的培养,其特点主要体现在以下几方面:

**体例新。**本系列教材根据自学和创新思维特点,教材设计了【本章知识框架结构图】【知识导引】【本章重点及难点】【本章学习目标】【教学活动建议】【本章小结】【自我小结】等版式体例,充分体现师生互动、编读互动,有利于学生的知识和技能的螺旋式递进。

**体系新。**本系列教材的突出特点是结合普通高等学校工程教育本科专业认证通用标准和专业补充标准要求,及“卓越工程师教育培养计划”安全工程专业培养和实现标准矩阵,构建安全工程学科的课程体系,按照相关学时,统一协调整合,突出特色,形成一个完整的、各门课程之间有机联系的系列教材。

**内容新。**本系列教材注重引入新理论、新技术、新方法、新装备和新法律法规等内容,将工程技术实践成果同理论相结合,充分体现教材的先进性和国际化思路。

安全工程涉及各个行业领域和理论,安全科学与工程的应用也涉及人类生产



的各个方面,本系列教材难免存在一些不足之处,诚恳希望各位专家、学者和有关读者提出建议和意见。我们将在后续的出版中,努力改进,使得该系列教材得到不断完善和提高。

最后,衷心祝愿安全工程专业的发展愈来愈好,为我国的安全生产事业输送更多优秀人才。

普通高校继续教育“十二五”规划教材

安全工程系列教材编委会

2012年6月



# 前 言

进入 21 世纪,提高产品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,可靠性理论已经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。特别是在航空、土木、勘察、机械、安全、信息、交通运输等领域得到了广泛应用。

在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将可靠性理论课程列入教学计划中。1994 年中国地质大学(北京)在工程技术学院研究生中开设了可靠性工程课程,2002 年又在本科生中开设了可靠性理论课程,2010 年出版的《系统可靠性理论》作为中国地质大学(北京)安全、机械、勘察和土木等专业的必修和选修教材。本书是在上述成果基础上收集国内外近年来的最新成果,补充、整理和完善后编写而成。本书的特点是重视学生自学和创新等能力的培养。本教材适用 32 学时至 48 学时。

本书在编写过程中,得到了国家“卓越工程师教育培养计划”教育部“建设国家级工程实践教育中心”的资助,得到了中国地质大学(北京)远程教育的大力支持。张芳、师莉荣、张姣、王志鹏、缪轶、于嘉参与了本书部分章节的编写工作,在图表绘制和校对方面得到了刘武、柏丽娟、高标、梅海楠等给予的帮助,我们在此谨表示诚挚的谢意。同时,借本书诞生之际,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,书中存在的不妥之处,希望广大读者指正。

作 者  
2012 年 6 月

# 目 录

第一章 绪 论	1
第一节 工程人员为什么要学可靠性	2
第二节 工程产品失效原因分析	3
第三节 可靠性的概念和有关定义	4
一、可靠性定义	4
二、狭义可靠性和广义可靠性	6
三、固有可靠性和使用可靠性	7
四、工程可靠性	8
第四节 可靠性在安全生产中的作用	8
第五节 可靠性研究的内容	9
第六节 可靠性理论研究现状	11
本章小结	13
自我小结	13
自测题	13
自测题参考答案	14
第二章 概率论基本知识	16
第一节 概率论中的术语和定义	17
第二节 概率论中的基本理论	20
一、概率论公理	20
二、概率的基本性质	21
三、概率的基本公式	22
本章小结	25
自我小结	25
自测题	25
自测题参考答案	25
第三章 可靠性特征量	26
第一节 可靠度与不可靠度	27
一、可靠度	27
二、累计失效概率	28
第二节 失效率与失效分布函数	29
一、失效率	29
二、失效概率函数与失效分布函数	29
第三节 产品的寿命指标	32





一、平均寿命 .....	32
二、可靠寿命 .....	34
三、寿命方差和寿命均方差 .....	35
第四节 可靠性中常用的概率分布 .....	35
一、离散型随机变量的常见分布 .....	36
二、连续型随机变量的常见分布 .....	38
本章小结 .....	42
自我小结 .....	42
自测题 .....	42
自测题参考答案 .....	43
<b>第四章 典型系统可靠性模型 .....</b>	<b>45</b>
第一节 系统的工程结构图和可靠性框图 .....	46
第二节 典型系统可靠性模型 .....	47
一、串联系统可靠性模型 .....	47
二、并联系统可靠性模型 .....	48
三、混联系统可靠性模型 .....	50
四、 $m/n(G)$ 表决系统模型 .....	51
五、旁联系统 .....	54
第三节 网络系统的可靠性模型 .....	56
一、节点不失效的网络可靠性模型 .....	56
二、节点可失效的网络系统可靠性模型 .....	60
三、网络系统可靠性的有关问题 .....	62
本章小结 .....	62
自我小结 .....	62
自测题 .....	63
自测题参考答案 .....	63
<b>第五章 系统可靠性失效分析 .....</b>	<b>66</b>
第一节 失效及失效分类 .....	67
一、失效及相关定义 .....	67
二、失效的分类 .....	67
三、失效分析 .....	68
第二节 故障模式、影响与危害性分析 .....	69
一、概 述 .....	69
二、FMEA 的分析步骤 .....	69
三、危害性分析(CA) .....	70
第三节 故障树分析 .....	71
一、概 述 .....	71



二、故障树建立的数学基础 .....	72
三、故障树的构成 .....	73
四、故障树分析的步骤 .....	76
五、故障树的定性分析 .....	76
六、故障树的定量分析 .....	79
第四节 故障树与可靠性框图的比较 .....	80
一、可靠性框图与故障树关系 .....	80
二、可靠性框图法和故障树计算结果的讨论 .....	84
第五节 事件树分析 .....	85
一、概 述 .....	85
二、ETA 的基本程序 .....	85
三、ETA 实例 .....	86
本章小结 .....	86
自我小结 .....	87
自测题 .....	87
自测题参考答案 .....	88
<b>第六章 可靠性预计 .....</b>	<b>92</b>
第一节 可靠性预计概述 .....	93
一、可靠性预计的目的 .....	93
二、可靠性预计的步骤 .....	93
三、可靠性预计的局限性 .....	93
第二节 元器件计数法 .....	94
第三节 上下限法 .....	95
第四节 数学模型法 .....	99
第五节 应力分析法 .....	102
本章小结 .....	105
自我小结 .....	106
自测题 .....	106
自测题参考答案 .....	109
<b>第七章 系统可靠性分配 .....</b>	<b>111</b>
第一节 概 述 .....	111
第二节 可靠性分配的原则 .....	112
一、可靠性指标分配的定义和目的 .....	112
二、可靠性指标分配的准则 .....	113
三、可靠性指标分配方法的选择 .....	113
第三节 等同分配法 .....	114
第四节 比例分配法 .....	115





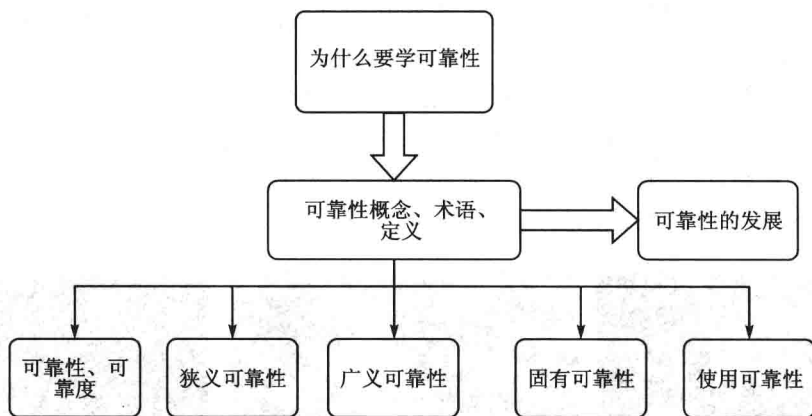
第五节 综和评分分配法	116
第六节 阿林斯分配法	117
第七节 代数法	118
第八节 按重要度分配法	121
本章小结	122
自我小结	122
自测题	122
自测题参考答案	122
<b>第八章 可靠性设计</b>	<b>124</b>
第一节 概 述	125
一、系统可靠性设计的定义	125
二、可靠性设计的意义	125
三、系统可靠性设计的内容	126
第二节 元器件的选择与降额设计	127
一、元器件的选择	127
二、降额设计	127
第三节 元器件的容差和漂移设计	130
一、容差设计的概念	130
二、漂移设计的概念	131
三、容差和漂移设计的方法	131
第四节 系统的“三防”设计	132
一、“三防”问题产生的机理	132
二、“三防”设计的具体考虑	133
第五节 概率设计工程方法	134
一、概 述	134
二、应力—强度分布干涉模型	134
第六节 冗余设计	138
一、冗余设计概述	138
二、并联冗余模型	138
三、表决冗余模型	140
四、旁联冗余模型	141
本章小结	142
自我小结	142
自测题	142
自测题参考答案	142
<b>第九章 人机系统的可靠性</b>	<b>145</b>
第一节 人机系统的分析	146



一、人机系统定义 .....	146
二、人的可靠性影响因素 .....	147
三、人的不安全行为分析 .....	150
四、人因差错的表现类型 .....	152
五、人因差错的概率估计 .....	152
第二节 人机系统的故障率和可靠度 .....	153
一、人机系统的故障率 .....	153
二、人机系统可靠性设计原则 .....	156
三、人机系统可靠度的计算 .....	158
四、人机系统的设计方法 .....	159
五、提高人机可靠性的途径 .....	160
本章小结 .....	161
自我小结 .....	161
自测题 .....	161
自测题参考答案 .....	162
<b>第十章 系统可靠性的工程应用 .....</b>	<b>164</b>
第一节 可靠性理论在公共安全领域的应用 .....	164
一、公共安全系统可靠性模型 .....	164
二、公共安全系统可靠性分配 .....	166
三、应用实例 .....	167
第二节 可靠性在矿山领域的应用 .....	169
一、通风系统可靠性 .....	169
二、矿山排水设备可靠性优化 .....	174
第三节 可靠性在土木工程中的应用 .....	176
一、边坡稳定性的可靠性分析 .....	176
二、基坑工程的故障树分析 .....	180
第四节 可靠性工程在设备安全管理上的应用 .....	183
第五节 可靠性理论在石化行业中的应用 .....	186
一、液化石油气储罐的可靠性分析 .....	186
二、压力容器的可靠性分析 .....	190
本章小结 .....	191
自我小结 .....	191
自测题 .....	192
自测题参考答案 .....	192
<b>附 录 .....</b>	<b>197</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>200</b>

# 第一章 绪 论

## ◎ 本章知识框架结构图



## ◎ 知识导引

20世纪50年代,现代工业迅速发展,大量电子设备应用于军事中,人们投入了大量人力和物力对电子设备的可靠性进行了研究。随着可靠性的进一步发展,人们逐步发现在工程应用上的均匀介质理论,往往解决不了工程上由于材料变异、疲劳带来的安全性问题,于是,提出了材料应力—强度干涉理论。随后,可靠性研究逐步迈上了历史的舞台。我国自1964年起,在钱学森教授的大力倡导下,开始了系统可靠性工程理论的研究与实践。开始可靠性工程理论主要应用于航天军事工业,随后逐步扩展到建筑、电力、通信、家电等许多民用行业,其发展十分迅速,现已成为一门独立成熟的学科。

## ◎ 本章重点及难点

本章通过对可靠性现阶段研究和可靠性概念的概述,重点阐述可靠性的内涵和四个要素,在此基础上提出可靠度及其相关概念。要求掌握可靠性的基本概念,熟悉狭义、广义、固有、使用和工程可靠性的含义。

## ◎ 本章学习目标

通过本章的学习,应达到以下目标:

- ◇ 了解可靠性现阶段的研究方向;
- ◇ 熟悉并掌握可靠性的基本概念、术语和定义;
- ◇ 了解工程中材料失效的原因;
- ◇ 了解安全工程专业为什么学习可靠性;
- ◇ 了解可靠性的应用。

## ◎ 教学活动建议

搜集可靠性发展的历史事件,并集中组织播放可靠性相关视频,以提高学生的学习兴趣。本章重点为可靠性的定义,可以结合学生的实际情况,组织讨论学习。



## 第一节 工程人员为什么要学可靠性

经典工程,如材料力学、理论力学以及机械制造、机械原理的内容主要讲授产品是如何制造和工作的,并不涉及后续产品失效的模式和影响,同时,在设计、制造、维护和使用等方面涉及可能影响材料失效的内容一般也很少。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。

从根本上说,经典理论针对的材料是确定性的,而对变异性通常不会给予充分的关注。随着现代化技术的发展、科技的进步,特别是电子、军事、宇航、机电工业及对地质工程深入的研究,人们发现了元器件、材料的变异性。例如煤的显微结构实际上有啐粒、粉粒和鳞片等结构,如图 1-1 所示,而不是传统认识的均质结构。

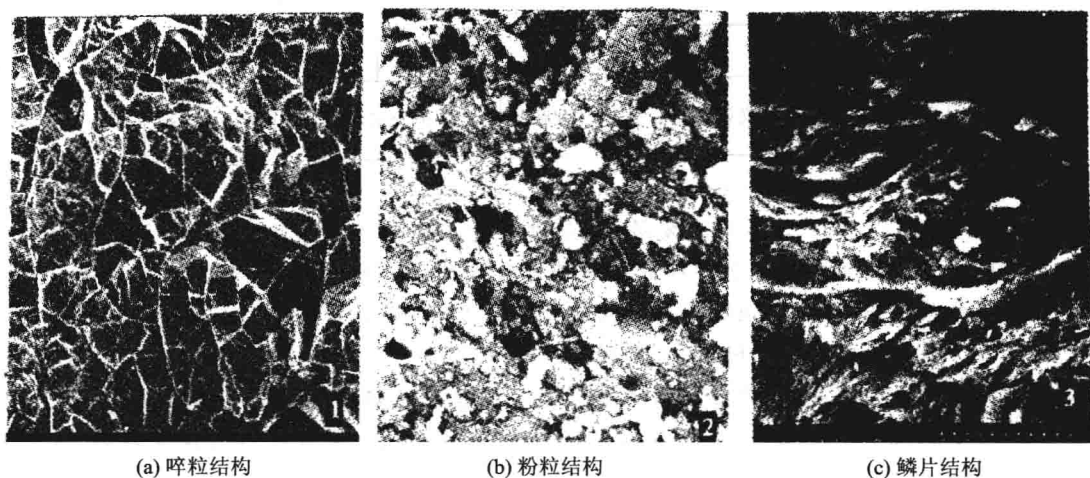


图 1-1 材料的变异性

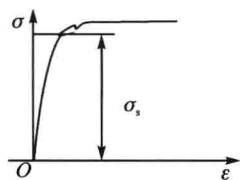


图 1-2 材料的应力—应变曲线

在经典力学中,如图 1-2 所示,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,即  $n = \frac{\sigma_s}{[\sigma]}$ ,其中  $\sigma_s$  为塑性材料的屈服极限,  $[\sigma]$  为材料的许用应力。该安全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,同时由于在进行加工、计算时存在人为因素和应用等方面原因,使得这些参数在实践中易于改变,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。

材料的失效与安全,严重影响了产品的可靠性。所以,了解工程材料及其产品的随机性和变异性起因和影响,是生产可靠产品和解决不可靠问题所必需掌握的内容。



## 第二节 工程产品失效原因分析

失效表示“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。

产品失效的原因很多。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。要预知失效的所有原因是不切实际的，所以还必须考虑到所涉及的不确定性。在设计、开发、制造和服务过程中，可靠性工程方面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。

发生失效的主要原因在于以下几点：

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。每项设计问题都预示着出差错的可能性、遗漏和疏忽。设计越复杂，需要解决的问题就越困难，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产品就会发生失效。如果施加的电应力（电压、电流）超过电子元器件的承受能力，它就会失效；如果所施加的压应力超过机械支柱的屈服强度，它将会屈曲。这类超应力失效确实会发生，不过好在不是很经常，因为设计者会提供一个安全系数。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。通常情况下，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 1-3 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，所加的载荷也是可变的。图 1-4 所示即为这类情况。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，如图 1-5 所示，这时就会发生失效。

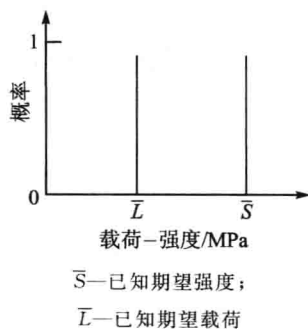


图 1-3 载荷-强度——离散值

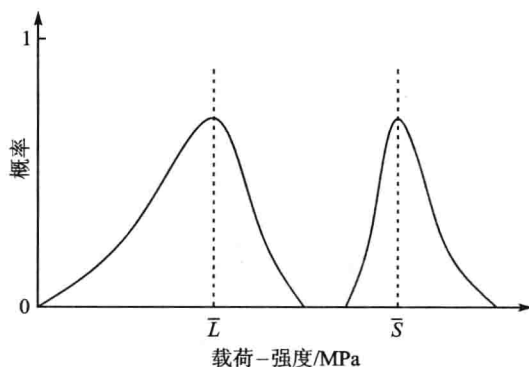


图 1-4 载荷-强度——可能的分布值

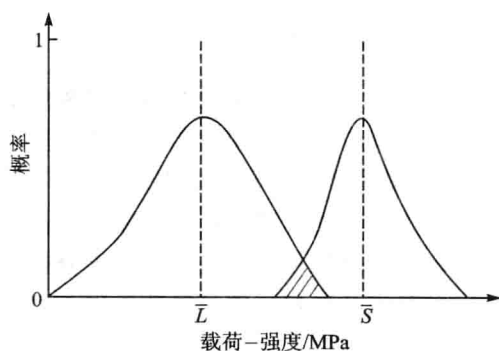


图 1-5 载荷-强度——存在干涉的分布



④ 磨损等情况能导致失效。材料疲劳、表面之间的磨损、腐蚀和绝缘退化等都可能导致失效,图 1-6 所示说明了这种情况。开始时工件强度足以承受所施加的载荷,随着时间的推移,工件强度减弱。无论是材料的疲劳还是表面的磨损、腐蚀等状况下,材料强度的平均值都下降,并且强度分布扩展得更宽。这是很难精确预计此类工件寿命的主要原因。

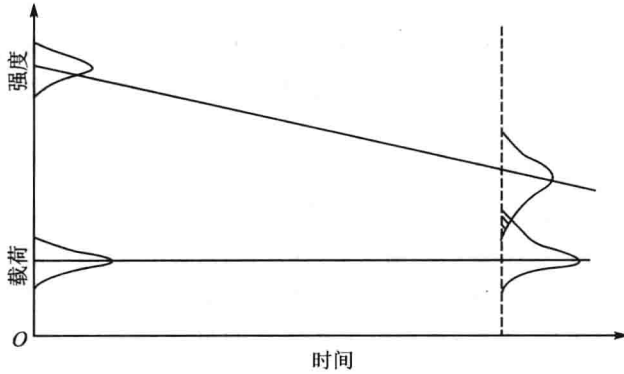


图 1-6 与时间相关联的载荷和强度变化

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等导致失效;使用不正确而导致的失效等属于人为因素导致的失效。

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,等等。

### 第三节 可靠性的概念和有关定义

#### 一、可靠性定义

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。产品的可靠性与外界环境的应力状态和对产品功能的需求密切相关。理解产品的可靠性需要从两个角度出发,其一是按照产品的层次结构理解可靠性,其二是按照产品的全寿命周期理解可靠性。按照产品的层次结构理解可靠性是指需要根据产品各层次特点开展相应的可靠性工作;按照产品的全寿命周期理解可靠性是指在需求分析、总体设计、分项设计和生产、试验、使用、维修维护等过程中都需开展相应的可靠性工作。

产品的可靠性是设计出来的、生产出来的、管理出来的。可靠性工程是为了达到系统可靠性要求而进行的有关设计、管理、试验和生产一系列工作的总和,它与系统整个寿命周期内的全部可靠性活动有关。可靠性工程是产品工程化的重要组成部分,同时也是实现产品工程化





的有力工具。利用可靠性的工程技术手段能够快速、准确地确定产品的薄弱环节,并给出改进措施和改进后对系统可靠性的影响。

产品在需求分析阶段、设计阶段、工程研制阶段和生产制造阶段都需要开展一定的可靠性设计分析、管理、试验工作。

按照产品的层次结构,产品的系统层次、装置层次、部件层次和零件层次都分别有相应的可靠性工作内容,即产品不同层次的可靠性影响因素和薄弱环节各有特点,需要分别开展相应的可靠性设计、管理、试验工作项目。影响器件可靠性的主要因素包括器件的种类和数量、器件的额定工作电参数和电应力、额定工作温度和环境温度、元器件的质量等级和品质保证等级,器件的降额特性和热敏感特性,器件的储存可靠性;影响部件可靠性的主要因素包括器件本身的可靠性与器件相互影响,需要考虑的主要因素为热分析、电磁兼容、耐环境、信号完整性、潜通路和工艺工装;影响装置可靠性的主要因素包括部件之间的相互影响和结构、工艺、连接;影响系统可靠性的主要因素包括冗余设计、人机工程和系统可靠性设计。

建立可靠性工程体系,开展和实施可靠性工程是产品高可靠性的必要条件,可靠性设计分析是可靠性工程的基础,可靠性设计水平差的产品可靠性必然低;可靠性的设计需要可靠性管理,可靠性管理是开展可靠性设计的技术管理保证和组织结构保证;设计出的产品在生产阶段难免被引入“瑕疵”,需要可靠性试验进行“暴露”。

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 5 种因素。

## 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与操作等因素,需要以人机系统的观点去观察和分析问题。

## 2. 规定条件

规定的条件包括以下几点:

- ① 环境条件,包括气候环境(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

与可靠性密切联系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。时间可以是区间 $(0, t)$ ,也可以是区间 $(t_1, t_2)$ ,有时对某些产品给出相