

高等学校教材

Reliability Design

# 可靠性设计

主编 谢里阳



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

# 可靠性设计

Kekaoxing Sheji

主 编 谢里阳

副主编 陈文华 吴 纬

主 审 白广忱



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容提要

本书深入浅出地介绍了可靠性-时间关系、失效率-时间关系、载荷-强度干涉关系、系统可靠性与零件可靠性之间的关系等可靠性基本理论与观点的新认识与新发展。在零件可靠性方面,从一般的数学意义上解释载荷-强度干涉概念与模型,拓展了传统模型的应用范围;在系统可靠性方面,采用系统工程思想方法,讲述直接在系统层进行可靠性分析、建模的方法,突破了“从零件到系统”的传统可靠性分析框架。

本书共 11 章,第 1 章可靠性概论,第 2 章可靠性数学基础,第 3 章可靠度计算基本原理与模型,第 4 章系统可靠性基本模型,第 5 章系统可靠性直接建模方法,第 6 章可靠性分配,第 7 章机构可靠性,第 8 章零件可靠性设计,第 9 章故障模式、影响及危害性分析,第 10 章故障树分析,第 11 章可靠性试验。本书既包括可靠性设计的基本内容,也剖析传统可靠性分析方法与模型中存在的问题及其局限性,还包含许多可靠性分析新方法与新模型,反映了可靠性研究的最新进展。

本书可作为高等学校机械类专业的教材,也可供有关工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

可靠性设计 / 谢里阳主编. -- 北京: 高等教育出版社, 2013. 1  
ISBN 978-7-04-036676-1

I. ①可… II. ①谢… III. ①机械设计-可靠性设计-高等学校-教材 IV. ①TH122

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第308495号

策划编辑	卢广	责任编辑	卢广	封面设计	李树龙	版式设计	王莹
插图绘制	于博	责任校对	刘娟娟	责任印制	张泽业		

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街 4 号  
邮政编码 100120  
印 刷 三河市华东印刷装订厂  
开 本 787mm×960mm 1/16  
印 张 12  
字 数 220 千字  
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landraco.com>  
<http://www.landraco.com.cn>  
版 次 2013 年 1 月第 1 版  
印 次 2013 年 1 月第 1 次印刷  
定 价 19.30 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换  
版权所有 侵权必究  
物料号 36676-00

# 前 言

设计是产品的灵魂。可靠性设计是传统安全设计理念的重大发展,曾被称之为“设计领域的革命”。由于材料性能及零部件制造、装配过程中各种随机因素的影响,机械装备的性能通常都会表现出不同程度的不确定性。另一方面,机械装备大都在不确定的环境条件下服役,且载荷历程也具有随机性。在机械设计方面,传统的、基于确定性理论的安全设计理论、方法及准则,在不确定性显著的场合会导致频繁的“意外”失效。应用可靠性设计理论与方法客观地反映各种不确定因素的影响,能更合理、有效地保证装备服役安全。

可靠性技术是 21 世纪的战略技术,可靠性设计理论与方法是现代机械设计人员必备的基础知识。本书比较全面地介绍了机械可靠性设计的基本内容,指出了传统可靠性设计理论及方法的局限性,详细地阐释了分析可靠性问题的新思路,并展示了一些新方法和新模型。

本书由谢里阳任主编,陈文华、吴纬任副主编。参加本书编写的有东北大学谢里阳(第 1~5 章、第 8 章),中国人民解放军装甲兵工程学院吴纬(第 6 章),东北大学张晓瑾(第 7 章),东北大学钱文学、吴宁祥(第 9 章、第 10 章),浙江理工大学陈文华(第 11 章)。

北京航空航天大学白广忱教授对书稿进行了精心审阅,提出了许多建设性意见。书中参阅了大量文献资料,有些引用未能一一列出,谨此一并致谢。

由于作者水平有限,书中难免有错误和不当之处,欢迎读者批评指正。

编 者

2012 年 12 月

# 目 录

<b>第 1 章 概论</b> .....	1
1.1 可靠性发展历史与现状简述 .....	1
1.2 可靠性设计概要 .....	2
1.3 可靠性表征 .....	2
1.3.1 寿命分布及其特征参数 .....	2
1.3.2 可靠度与失效概率 .....	4
1.3.3 失效率 .....	5
1.3.4 维修性 .....	9
1.3.5 可用性 .....	9
习题 .....	9
<b>第 2 章 可靠性数学基础</b> .....	11
2.1 随机事件及其概率 .....	11
2.1.1 随机试验与随机事件 .....	11
2.1.2 事件之间的关系与运算 .....	11
2.1.3 概率的定义 .....	12
2.1.4 概率基本运算法则 .....	12
2.2 随机变量及其分布的数字特征 .....	14
2.2.1 随机变量 .....	14
2.2.2 随机变量分布的数字特征 .....	15
2.3 随机变量函数的分布 .....	17
2.3.1 一维随机变量函数的分布 .....	17
2.3.2 二维随机变量函数的分布 .....	18
2.4 二项分布 .....	19
2.4.1 二项分布律及其数学特征 .....	19
2.4.2 二项分布的性质 .....	19
2.5 泊松(Poisson)分布 .....	20
2.5.1 泊松分布率及数字特征 .....	20
2.5.2 泊松分布的性质 .....	20
2.6 指数分布 .....	20
2.7 正态分布 .....	22
2.7.1 正态分布的概念 .....	22
2.7.2 标准正态分布 .....	22
2.8 对数正态分布 .....	23

## II 目录

2.9 威布尔分布 .....	24
2.9.1 威布尔分布的概念 .....	24
2.9.2 威布尔分布的形状参数 .....	25
2.9.3 威布尔分布的均值和方差 .....	25
2.10 顺序统计量分布 .....	25
习题 .....	26
<b>第3章 可靠度计算基本原理与模型 .....</b>	<b>28</b>
3.1 可靠度计算基本表达式 .....	28
3.2 设计参数的随机性 .....	28
3.2.1 载荷 .....	28
3.2.2 结构尺寸 .....	30
3.2.3 材料与结构性能 .....	30
3.3 随机变量分布参数计算方法 .....	31
3.3.1 一维随机变量的分布参数 .....	31
3.3.2 多维随机变量的分布参数 .....	31
3.4 应力-强度干涉模型的基本概念与表达 .....	32
3.4.1 随机应力-随机强度干涉概念 .....	32
3.4.2 应力-强度干涉模型 .....	33
习题 .....	36
<b>第4章 系统可靠性基本模型 .....</b>	<b>38</b>
4.1 串联系统可靠性模型 .....	38
4.2 并联系统可靠性模型 .....	40
4.3 串-并联系统可靠性模型 .....	41
4.4 并-串联系统可靠性模型 .....	41
4.5 表决系统可靠性模型 .....	42
4.6 贮备系统可靠性模型 .....	43
4.7 复杂系统可靠性分析方法 .....	44
4.8 传统系统可靠性模型的局限性 .....	45
习题 .....	47
<b>第5章 系统可靠性直接建模方法 .....</b>	<b>48</b>
5.1 系统层可靠性分析与建模方法 .....	48
5.1.1 零件之间的失效相关性 .....	48
5.1.2 系统层载荷-强度干涉分析及系统可靠性精确模型 .....	49
5.2 一般系统可靠性模型 .....	51
5.2.1 由不同零件构成的系统的可靠性模型 .....	51
5.2.2 各零件承受不同载荷的系统可靠性模型 .....	51
习题 .....	52

<b>第 6 章 可靠性分配</b> .....	53
6.1 概述 .....	53
6.2 平均分配方法 .....	55
6.3 比例组合分配方法 .....	55
6.4 考虑重要度和复杂度的分配方法 .....	56
6.4.1 按重要度分配 .....	56
6.4.2 按复杂度分配 .....	58
6.4.3 综合考虑分系统(设备)重要度和复杂度的分配 .....	58
6.5 专家评分分配方法 .....	59
6.6 拉格朗日乘法 .....	61
6.7 动态规划法 .....	62
6.8 直接寻查法 .....	65
6.9 可靠度再分配法 .....	67
6.10 基于串联系统可靠性界限的分配原理 .....	69
6.11 基于维修间隔期的可靠性分配方法 .....	70
6.12 可靠性分配的线性规划方法 .....	71
习题 .....	73
<b>第 7 章 机构可靠性</b> .....	75
7.1 概述 .....	75
7.2 机构可靠性模型及评价指标 .....	76
7.2.1 机构可靠性建模方法 .....	76
7.2.2 机构工作过程分解 .....	77
7.2.3 功能可靠性 .....	77
7.3 曲柄滑块机构运动可靠性分析 .....	78
7.3.1 机构运动误差 .....	78
7.3.2 机构运动关系 .....	79
7.3.3 机构可靠性模型 .....	80
习题 .....	85
<b>第 8 章 零件可靠性设计</b> .....	87
8.1 零件可靠性设计概述 .....	87
8.2 载荷多次作用效应及可靠度计算 .....	88
8.3 零件静强度可靠性设计的主要内容与步骤 .....	91
8.4 零部件可靠性设计举例 .....	92
8.4.1 静强度可靠性设计 .....	92
8.4.2 疲劳强度可靠性设计 .....	93
习题 .....	98
<b>第 9 章 故障模式、影响及危害性分析</b> .....	99
9.1 基本概念与方法步骤 .....	99

## IV 目录

9.1.1 基本概念 .....	99
9.1.2 FMECA 的层次与过程 .....	100
9.1.3 FMECA 的实施步骤 .....	101
9.2 危害性分析 .....	103
9.2.1 定性分析 .....	104
9.2.2 定量分析 .....	106
9.3 FMECA 应用 .....	107
习题 .....	111
<b>第 10 章 故障树分析</b> .....	<b>112</b>
10.1 基本概念与基本符号 .....	112
10.1.1 故障树基本概念 .....	112
10.1.2 故障树基本符号 .....	114
10.1.3 故障树的割集与路集 .....	115
10.2 建立故障树的方法与步骤 .....	116
10.2.1 建立故障树的流程 .....	116
10.2.2 建立故障树的原则 .....	117
10.3 故障树定性分析 .....	118
10.3.1 下行法求最小割集 .....	118
10.3.2 上行法求最小割集 .....	119
10.4 故障树定量分析 .....	121
10.4.1 故障树结构函数 .....	121
10.4.2 直接概率法求顶事件发生概率 .....	122
10.4.3 最小割集法求顶事件发生概率 .....	123
习题 .....	124
<b>第 11 章 可靠性试验</b> .....	<b>125</b>
11.1 可靠性试验概述 .....	125
11.1.1 可靠性试验的分类 .....	125
11.1.2 可靠性试验的发展 .....	127
11.1.3 可靠性试验计划 .....	128
11.2 工程试验 .....	129
11.2.1 环境应力筛选 .....	129
11.2.2 可靠性增长试验(RGT) .....	131
11.2.3 可靠性强化试验 .....	136
11.3 统计试验 .....	140
11.3.1 可靠性验证试验 .....	140
11.3.2 加速寿命试验 .....	147
11.3.3 加速退化试验 .....	152
习题 .....	163



附录 1 标准正态分布表 .....	165
附录 2 $\chi^2$ 分布表 .....	167
附录 3 $t$ 分布表 .....	169
附录 4 $F$ 分布表 .....	170
附录 5 $\Gamma$ 函数表 .....	175
参考文献 .....	179

# 第 1 章 概 论

可靠性是产品的重要质量指标,表示产品正常服役的能力。产品可靠性设计理论与方法的提出及应用曾被认为是机械设计领域的重大变革。与传统的安全系数设计准则相比,可靠性设计准则能够更有效地保证产品服役安全。随着产品功能及复杂性的增加、使用条件日益苛刻以及可持续发展的需要,市场对产品质量及服役安全性要求不断提高,因此,可靠性设计、可靠性制造、以可靠性为中心的维护维修等概念、理论、方法、模型及相关技术在不断发展,并得到了越来越多的应用。

## 1.1 可靠性发展历史与现状简述

可靠性科学与技术主要是从 20 世纪四五十年代开始发展起来的。1947 年,A. M. Freudenthal 提出了应力—强度干涉模型,标志着机械可靠性设计方法的诞生。该模型也成为了机械零部件以及电子元器件可靠性设计、计算的基本公式。

关于系统可靠性问题,研究者最初试图应用链条强度原理(一条链子的强度取决于其最弱环节)去阐释。然而,据此得出的可靠性分析结果并不能真实反映实际情况。在意识到失效并不总是发生于确定性意义下的“最弱环节”之后,有学者认为整体(系统)的可靠度可能是各环节可靠度的某种平均值。传统上,通常把串联系统的可靠度表达为各零件可靠度的乘积。

1957 年,美国电子设备可靠性咨询委员会发表了关于电子产品可靠性理论和方法的奠基性文献,标志着可靠性理论发展成为了独立的工程科学。在可靠性理论与方法的发展过程中,电气元件及电子设备曾是其主要研究与应用对象,因此可靠性理论方法在许多方面至今还带有电气工程的烙印。例如,假设系统中各零件只有“正常”与“失效”两种状态,各零部件(元器件)失效是相互独立的,寿命服从指数分布,失效率为常数,等等。这样的假设对有些电气元件、电子系统可能是合理的,但总体上不适用于机械零部件与机械系统。一般而言,对于大规模系统的可靠性评估,传统的系统可靠性模型无论用于电气系统还是机械系统,都可能会导致极不合理的结果。

不同领域、不同对象的可靠性问题不尽相同。人的可靠性问题与设备的可靠性问题不同,软件的可靠性问题与硬件的可靠性问题不同,机械系统的可靠性

问题与电子系统的可靠性问题也有明显的差异。随着可靠性理论应用范围的扩大,一些问题随之而来。可靠性理论是研究零件与系统失效概率特性的工程学科,不同系统、不同失效机理需要不同的模型,甚至不同的概念、不同的定义。如果不加区别地直接应用传统的方法与模型,或隐晦地做出不合理的假设,都会导致可靠性设计、分析、评价失去应用价值,甚至导致错误的结论。

国际著名可靠性问题专家 Partick D. T. O'Connor 曾于 2000 年指出:“目前存在的、并且由可靠性和质量专家使用的大多数方法都是容易误导的(misleading)和无效的(un-effective)”。这在一定程度上反映了目前可靠性工程理论的成熟度与应用现状。

传统的零部件可靠性涉及的主要是简单载荷、简单失效机理下的可靠性设计计算,传统的系统可靠性理论基本上是以系统失效与相互独立的零部件失效之间的逻辑关系为基础的。概括地讲,传统的可靠性研究常把研究对象进行了过分地简化。

## 1.2 可靠性设计概要

可靠性设计被认为是安全设计理念的飞跃。可靠性设计过程中把载荷、强度等设计参数作为随机变量对待,因而能更客观、更科学地描述载荷属性、材料性能等。同时,可靠性设计的目标是保证强度大于载荷的概率,能够定量表述设计的安全程度。

系统可靠性设计的主要内容是可靠性分配,即根据期望的系统可靠性指标确定其各零部件必须达到的可靠性水平;零部件的可靠性设计主要是根据可靠性指标、材料性能、载荷特征等确定其形状与尺寸。与安全系数设计相比,可靠性设计不仅仅是使用了更科学、合理的安全性指标,还体现了系统整体安全程度与其局部(零部件)安全程度之间的关系。

在零部件层次上,安全系数设计只反映了载荷与强度在平均值方面的裕度,而可靠性设计同时还反映了载荷和强度不确定性对设计安全性的影响;在系统层次上,安全系数设计意味着最薄弱零部件的安全系数就是串联系统的安全系数,而可靠性设计则明确表明串联系统的可靠度通常会明显低于最薄弱零部件的可靠度。

## 1.3 可靠性表征

### 1.3.1 寿命分布及其特征参数

产品寿命一般是指其从投入使用到发生失效的广义时间,可靠度是寿命大

于某一指定值的概率。寿命可以用时间物理量度量,可以用产品使用(操作)次数、载荷作用次数度量,也可以用行驶里程等来度量。产品寿命一般是一个随机变量,可能是连续型随机变量,也可能是离散型随机变量。在不至于误导的前提下,可以统一用概率密度函数  $f(t)$  表示寿命分布。本书基本上都是以连续分布的寿命随机变量为例来分析、讨论、阐述可靠性问题。

在一定程度上,产品寿命分布的概率特征可以用表示其平均趋势的参数(均值、中值等)和表示其分散程度的参数(方差或标准差等)描述。

### 1. 均值

寿命均值(平均寿命或平均无故障工作时间,用  $\theta$  表示)是一批产品(系统或零部件)寿命的算术平均值,由各产品的寿命(或称“失效时间”)  $t_1, t_2, \dots, t_n$  按下式计算

$$\theta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (1-1)$$

平均寿命是最简单,也是工程中最常用的可靠性指标。就统计学参数而言,均值对与其偏离较大的极端样本值很敏感。也就是说,一个极短的或极长的个体寿命会显著地影响一批产品的均值估计量的大小,尤其是当样本量不很大时。

若产品的寿命概率密度函数为  $f(t)$ , 则其平均寿命可由下式计算

$$\theta = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (1-2)$$

可靠性术语中,对于不可修复的产品,平均寿命是指产品从开始使用到失效这段有效工作时间的平均值,记为  $MTTF$  (mean time to failure)。对于可修复的产品,平均寿命指的是平均无故障工作时间,记为  $MTBF$  (mean time between failures)。图 1.1 为平均寿命的统计计算原理图。图中每条带有箭头的线段代表一个产品从开始投入使用或失效产品修复后再次投入使用到再次发生故障时的正常工作时间。

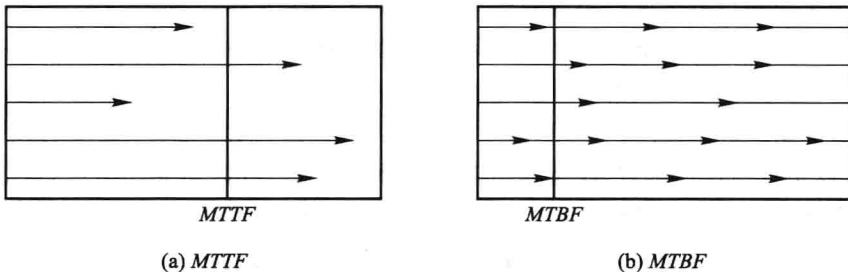


图 1.1 平均寿命参数统计原理图

## 2. 方差

寿命方差  $\sigma^2$  表征个体寿命与母体寿命均值的平均偏离程度, 或一批产品寿命的分散程度, 由下式计算

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \theta)^2 \quad (1-3)$$

## 3. 标准差

标准差  $\sigma$  是方差的算术平方根:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (1-4)$$

寿命标准差的量纲与寿命量纲相同。

## 4. 可靠寿命

可靠寿命是产品满足指定可靠性要求的寿命。例如, 中值寿命是对应于 50% 可靠度(不失效概率)的寿命, 轴承常用对应于 90% 可靠度的寿命作为其寿命指标。而通常所说的寿命是平均寿命, 严格地讲并不存在与可靠度的对应关系。

### 1.3.2 可靠度与失效概率

可靠性是产品(系统或零部件)具有时间属性的质量指标, 定义为产品在规定条件下, 规定时间内, 完成规定功能的能力。可靠度定义为产品在规定条件下, 规定时间内, 完成规定功能的概率, 记为  $R(t)$ 。可靠度是时间的函数, 故  $R(t)$  也称为可靠度函数。产品的可靠性是由设计、制造、使用、维护等多方面因素共同决定的。同一个产品, 在不同的时间内, 或在不同的使用条件下, 可靠性是不同的。

“规定条件”指产品的正常服役载荷环境。产品服役过程中承受的载荷一般是一个随机变量或随机过程, 服从一定的概率分布。实验室或试验场进行可靠性考核、评价试验时, 大多是在确定性载荷条件下进行的。确定载荷下产品的不失效概率与随机载荷下的不失效概率之间, 也有所差别。

“规定时间”是可靠性区别于其他质量属性的重要特征。一般来说, 产品的可靠性水平会随着使用或贮存时间的增加而降低。因此, 以数学形式表示的可靠性特征量一般都是时间的单调减函数。这里的时间概念不限于一般的日历时间, 可以是载荷作用次数、设备启动次数、运行时间、行驶距离等。

产品丧失规定功能称为失效, 对可修复产品通常称为故障。“规定功能”是要明确具体产品的功能是什么, 何为完成规定功能、何为失效。

若产品寿命  $t$  的概率密度函数为  $f(t)$ , 则可靠度(产品寿命大于  $t$  的概率)为

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (t \geq 0, 0 \leq R(t) \leq 1) \quad (1-5)$$

与之对应,产品的失效概率  $F(t)$  定义为

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (t \geq 0, 0 \leq F(t) \leq 1) \quad (1-6)$$

显然,  $R(t) + F(t) = 1$ 。

将寿命累积分布函数  $F(t)$  对时间  $t$  微分,即为寿命概率密度函数  $f(t)$ ,即

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (1-7)$$

平均寿命与可靠度有如下关系

$$\theta = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (1-8)$$

可靠度、失效概率的统计意义可表述如下:设有  $n$  个产品样本(概率意义上相当于属于同一母体的  $n$  个子样),工作到时刻  $t$  时有  $n(t)$  个失效,则

$$R(t) = \frac{n - n(t)}{n} \quad (1-9)$$

$$F(t) = \frac{n(t)}{n} \quad (1-10)$$

$f(t)$  的统计计算式为

$$f(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{n \Delta t} \quad (1-11)$$

### 1.3.3 失效率

失效率也是常用的可靠性指标之一,表示工作到时刻  $t$  时尚未失效的产品,在时刻  $t$  以后的单位时间内发生失效的可能性。失效率也是时间  $t$  的函数,记为  $\lambda(t)$ ,称为失效率函数,也称为故障率函数或风险函数。

根据定义,时刻  $t$  的失效率为

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P(t < T \leq t + \Delta t \mid T > t) \quad (1-12)$$

其观测值为,在时刻  $t$  以后的单位时间内发生失效的产品数与工作到该时刻尚未失效的产品数之比

$$\lambda(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{[n - n(t)] \Delta t} \quad (1-13)$$

例如,一批产品同时投入工作,到 200 h(小时)时尚有 1 000 个仍未失效。这 1 000 个产品在随后 2 h 内有 4 个失效,即  $\Delta t = 202 - 200 = 2$ ,  $\Delta n(t) = n(202) - n(200) = 4$ ,故有

$$\lambda(200) = \frac{4}{1\,000 \times 2} = 0.002 \text{ h}^{-1}$$

失效率一般随服役时间的增加而不断变化。在工程实际中,常用的指标是平均失效率。平均失效率是某一时间段内失效率的平均值。在 $(t_1, t_2)$ 内失效率的平均值为

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt \quad (1-14)$$

失效率常用单位时间内发生的失效百分数表示,例如, $\%/(10^3 \text{ h})$ ,可记为 $10^{-5}/\text{h}$ 。对于高可靠性场合,常以 $10^{-9}/\text{h}$ 为单位。失效率的单位也可以根据实际物理意义取为 $1/\text{km}$ 、 $1/\text{次}$ 等。例如,失效率 $\lambda = 0.0025/(10^3 \text{ h}) = 0.25 \times 10^{-5}/\text{h}$ ,表示仍在正常使用的10万个产品中,平均每4h会有1个产品失效。

通常认为,无预防性维修的零件或系统,失效率曲线的典型形态如图1.2所示。传统上,根据曲线的形状将其称为“浴盆曲线”。典型的失效率曲线明显地由三个阶段构成,即早期失效率下降阶段、失效率基本恒定的偶然失效阶段和失效率不断上升的耗损失效阶段。

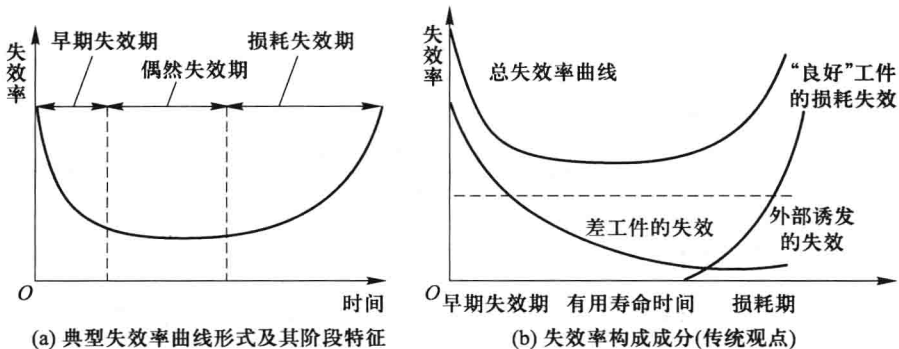


图 1.2 典型失效率曲线及其构成

### (1) 早期失效

在产品投入使用的初期,产品的故障率较高,一般表现出迅速下降的趋势。传统的解释是,这一阶段失效的产品是存在材料缺陷、加工损伤、安装调整不当等问题,性能指标偏低的产品。这类失效可以通过加强质量管理有效减少,或采用筛选试验方法将质量不合格的产品淘汰。

事实上,产品的寿命是一个随机变量,一批产品中各样本寿命的长短是相对的。同样,一批产品中,质量好与质量差也是相对的,产品性能是连续分布的。“早期失效期”的特征与“偶然失效期”(或“使用寿命期”)的特征都是载荷—强度关系的反映。

载荷与强度都是随机变量,都服从统计规律。根据“载荷—强度”干涉原理,

在不考虑强度退化效应的条件下,产品一旦经受了某一水平的载荷作用而没有发生失效,就意味着该产品只有在更高的载荷水平上才可能失效。随着载荷总作用次数的增加,出现某一水平的大载荷样本的概率也不断增加。因此,一般来讲,无论一个产品已经历了多长时间的工作考验,即使没有强度退化现象发生,在未来的工作时间内发生失效的可能性总还是存在的。另一方面,任何在平稳载荷环境下工作的产品,随着运行时间的增加,在其后的单位时间内再出现未曾经历过的更大载荷的概率越来越小,这是失效率函数在“早期失效期”和“偶然失效期”(或“有用寿命期”)的共同特征。只是由于随着已经历的载荷作用次数的增加,出现更大载荷的概率与载荷作用次数的关系是非线性的,使得在“早期失效期”内失效率下降得很快,而在随后的“偶然失效期”(或“有用寿命期”)内失效率下降得越来越慢,直至趋近于一个稳定的极限<sup>[4]</sup>。

### (2) 偶然故障

在产品投入使用一段时间后,产品的故障率会降到一个较低的、基本平稳的水平。对这一阶段的传统解释是,产品的故障主要是由操作或维护缺陷等随机因素引起的。偶然故障阶段称为产品的“有效工作期”。

根据前文的载荷-强度关系分析可以知道,偶然失效期的失效率也是由于载荷-强度干涉关系决定的。操作或维护等都是广义的“载荷”因素,在“早期”、“中期”、“晚期”都同样存在,并不是“偶然失效期”所特有的。之所以存在一个失效基本平稳的阶段,是由于载荷风险的统计效应和产品性能(例如强度)退化的非线性效应所致。

在传统的“失效率构成”成分(见图 1.2b)中,“外部诱发的失效”同样是在产品的全寿命周期中始终存在的,在产品的寿命初期也不例外。“外部诱发因素”只能通过与“产品性能”相互作用才能导致失效,正所谓哲学上所讲的“外因是条件,内因是根据”。

### (3) 耗损失效

产品运行一段时间后会进入耗损失效期,表现为产品性能急剧下降,故障率迅速上升。这一阶段产品的故障主要是由老化、疲劳、磨损、腐蚀等耗损性因素引起的。采取定时维护、更换等预防性维修措施,可以降低产品的耗损故障率。

还需要明确的是,不同产品的失效率曲线的特征有明显的不同,也并非所有产品的故障率曲线都可以分出明显的三个阶段(图 1.3 所示为两种典型情形)。高质量等级的电子元器件的故障率曲线在其有效寿命期内基本是一条水平直线,而质量低劣的产品可能存在大量的早期故障或很快进入耗损故障阶段。软件产品由于不存在老化等耗损型失效机理,其失效率一般是逐渐降低的。

与之相关的一个问题是,指数分布这个在传统可靠性分析中广泛应用的寿命分布形式的适用范围实际上是很有限的,只适用于失效率为常数的情形,而这



种情形对实际产品来说是少而又少的。

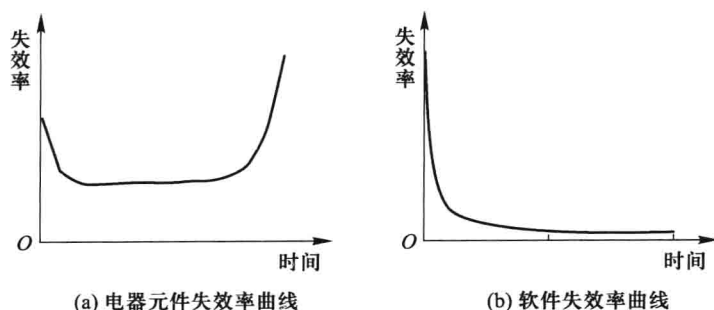


图 1.3 不同产品的失效率曲线形式

事实上,失效率函数曲线的形状是由载荷-强度关系(包括强度退化规律)决定的,根据应力-强度干涉关系,完全能够解释“浴盆曲线”的特征。如果强度不退化,就不存在失效率随时间增加而增大的耗损失效阶段。“浴盆曲线”前两个阶段的变化规律与应力-强度干涉关系直接相关。大概规律是:载荷的不确定性越大,则失效率的最大值越大,产品的失效率曲线“稳定”得越慢,“早期失效期”越长。对于服役过程中强度逐渐退化的产品,失效率曲线呈典型的三阶段“浴盆曲线”形状。

对于失效率的变化规律以及失效率的成分构成,应该根据失效机理及载荷-强度关系予解释,而不能孤立地用产品质量、载荷或失效机理去说明。可以认为,恒定失效率成分是由于偶然出现的、非正常环境载荷工况引起的。这种载荷工况对所有的产品都是致命的,无论其初始质量如何,一旦遭遇这种致命载荷都会失效。由于疲劳、磨损、腐蚀等失效机理都有一个相当长的孕育期,在服役相当长时间之后才可能发生,运行初期的失效是由于某种静强度失效机理引起的。但任何失效都是载荷作用的结果,产品服役初期失效率由高到低的下降过程是由载荷的统计特性主导的。随着产品服役时间的增加,出现“前所未遇”的更大的载荷的可能性逐渐减小,因此这种失效发生的可能性也越来越小。耗损期的失效显然是由疲劳、磨损、腐蚀等与时间相关的失效机理产生的,耗损期失效率不断升高是由失效机理或强度退化模式主导的。

严格地讲,“老化”试验筛选掉的不一定是某一类个体,例如有质量缺陷的产品,因为质量是相对的,质量指标(强度等)是连续分布的随机变量,一批产品中并没有绝对的好坏或强弱之分。通过“老化”试验可以剔除以某些机理(各种与性能退化过程无关的静强度失效机理)失效的产品,这类失效隐患如果存在是很容易在服役状态下发现的。

产生偶然失效的原因有人为原因(不正当操作等)、维护原因(不合理润滑