

高等学校“十一五”规划教材



机械设计制造及其自动化系列

**RELIABILITY AND SAFETY DESIGN
OF MECHANICAL AND
ELECTRICAL SYSTEMS**

机电系统可靠性与安全性设计

谢里阳 何雪宏 李佳 编著

哈尔滨工业大学出版社

高等学校“十一五”规划教材



机械设计制造及其自动化系列

**RELIABILITY AND SAFETY DESIGN
OF MECHANICAL AND
ELECTRICAL SYSTEMS**

机电系统可靠性与安全性设计

谢里阳 何雪宏 李佳 编著

哈尔滨工业大学出版社



内容提要

本书以机电系统的可靠性及安全性设计为背景,系统地介绍了可靠性设计、可靠性分析、可靠性计算的概念、方法与模型。在可靠性设计方法的基础内容方面,主要讲述工程中可靠性问题的表述方法和可靠度、失效率、平均无故障工作时间等可靠性度量指标,以及可靠性设计的基本内容和程序;介绍可靠性设计中经常用到的概率分布函数;重点讲解了作为零件可靠性设计基本原理的应力-强度干涉模型及其应用,包括载荷分布参数的计算与强度分布参数的计算等。此外,本书还包括系统可靠性计算、故障树分析等内容,介绍了确定设计安全系统的定量方法。

为了反映可靠性研究的最新进展,并适应研究型大学培养具有创新能力的创新型人才的教学需要,本书在零件可靠性方面,剖析了可靠性发展过程中出现过的、甚至目前仍存在的一些错误观点,介绍了新认识与新观点;在系统可靠性方面,比较详细地介绍了“系统论”思想方法和最新研究成果。

本书既包括可靠性的基本内容,自成体系;又剖析了传统可靠性分析方法与模型中存在的问题及其局限性,反映了可靠性研究的最新进展。因此,本书既可作为工科高年级本科生和研究生教材,也可供从事可靠性研究与应用的工程技术人员使用。

Abstract

With the reliability and safety design of mechanical and electrical system as the scenario, this book systematically presented the concepts, methods, and models concerning reliability design, reliability analysis and reliability calculation. In the introduction chapter (Chapter 1), besides an overview on some modern viewpoints concerning reliability concepts, product (component or system) reliability metrics such as reliability, failure probability, failure rate, mean time to failure, and statistical calculation of these parameters are described in detail, reliability data collection method is presented, and the procedure of product reliability design is outlined.

As a basis of reliability engineering, Chapter 2 and Chapter 3 introduce primary probability theory and typical probability density functions, respectively. Chapter 4 and Chapter 5 present load-strength interference approach and component reliability calculation, as well as component reliability design method including determination of load distribution and component/system strength distribution.

System reliability models and system-level load-strength analysis approach are presented in Chapter 6 and Chapter 7, both independent system and statistically dependent system are involved.

Chapter 8 describes fault tree analysis method including common cause failure treatment. Chapter 9 introduces the method to select product safety factor.

This book can be used as the textbook for both senior undergraduate and graduate levels, as well as a reference book for engineers and researchers in the field of mechanical reliability engineering.

图书在版编目(CIP)数据

机电系统可靠性与安全性设计/谢里阳,何雪宏,李佳编著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2006.9

ISBN 7-5603-2378-2

I.机… II.①谢…②何…③李… III.①机电系统-可靠性-系统设计②机电系统-安全性-系统设计 IV.TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 078383 号

责任编辑 杜燕

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传真 0451-86414749

网址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印刷 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂

开本 787 mm × 1 092 mm 1/16 印张 10.5 字数 222 千字

版次 2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月第 1 次印刷

印数 1~4 000

定价 18.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

高等学校“十一五”规划教材

机械设计制造及其自动化系列

编写委员会名单

(按姓氏笔画排序)

主 任	姚英学					
副主任	尤 波	巩亚东	高殿荣	薛 开	戴文跃	
编 委	王守城	巩云鹏	宋宝玉	张 慧	张庆春	
	郑 午	赵丽杰	郭艳玲	谢伟东	韩晓娟	

编审委员会名单

(按姓氏笔画排序)

主 任	蔡鹤皋					
副主任	邓宗全	宋玉泉	孟庆鑫	闻邦椿		
编 委	孔祥东	卢泽生	李庆芬	李庆领	李志仁	
	李洪仁	李剑峰	李振佳	赵 继	董 申	
	谢里阳					

总 序

自1999年教育部对普通高校本科专业设置目录调整以来,各高校都对机械设计制造及其自动化专业进行了较大规模的调整和整合,制定了新的培养方案和课程体系。目前,专业合并后的培养方案、教学计划和教材已经执行和使用了几个循环,收到了一定的效果,但也暴露出一些问题。由于合并的专业多,而合并前的各专业又有各自的优势和特色,在课程体系、教学内容安排上存在比较明显的“拼盘”现象;在教学计划、办学特色和课程体系等方面存在一些不太完善的地方;在具体课程的教学大纲和课程内容设置上,还存在比较多的问题,如课程内容衔接不当、部分核心知识点遗漏、不少教学内容或知识点多次重复、知识点的设计难易程度还存在不当之处、学时分配不尽合理、实验安排还有不适当的地方等。这些问题都集中反映在教材上,专业调整后的教材建设尚缺乏全面系统的规划和设计。

针对上述问题,哈尔滨工业大学机电工程学院从“机械设计制造及其自动化”专业学生应具备的基本知识结构、素质和能力等方面入手,在校内反复研讨该专业的培养方案、教学计划、培养大纲、各系列课程应包含的主要知识点和系列教材建设等问题,并在此基础上,组织召开了由哈尔滨工业大学、吉林大学、东北大学等9所学校参加的机械设计制造及其自动化专业系列教材建设工作会议,联合建设专业教材,这是建设高水平专业教材的良好举措。因为通过共同研讨和合作,可以取长补短、发挥各自的优势和特色,促进教学水平的提高。

会议通过研讨该专业的办学定位、培养要求、教学内容的体系设置、关键知识点、知识内容的衔接等问题,进一步明确了设计、制造、自动化三大主线课程教学内容的设置,通过合并一些课程,可避免主要知识点的重复和遗漏,有利于加强课程设置上的系统性、明确自动化在本专业中的地位、深化自动化系列课程内涵,有利于完善学生的知识结构、加强学生的能力培养,为该系列教材的编写奠定了良好的基础。

本着“总结已有、通向未来、打造品牌、力争走向世界”的工作思路,在汇聚多所学校优势和特色、认真总结经验、仔细研讨的基础上形成了这套教材。参加编写的主编、副主编都是这几所学校在本领域的知名教授,他们除了承担本科生教学外,还承担研究生教学和大量的科研工作,有着丰富的教学和科研经历,同时有编写教材的经验;参编人员也都是各学校近年来在教学第一线工作的骨干教师。这是一支高水平的教材编写队伍。

这套教材有机整合了该专业教学内容和知识点的安排,并应用近年来该专业领域的科研成果来改造和更新教学内容、提高教材和教学水平,具有系列化、模块化、现代化的特点,反映了机械工程领域国内外的新发展和新成果,内容新颖、信息量大、系统性强。我深信:这套教材的出版,对于推动机械工程领域的教学改革、提高人才培养质量必将起到重要推动作用。

蔡鹤皋

哈尔滨工业大学教授

中国工程院院士

2006年8月10日

前 言

可靠性理论与方法如同最优化理论与方法一样,是一种在社会、经济、工程各领域都有广泛应用价值、能产生显著经济效益的普适性理论与通用技术方法。因而,对于工程学科的学生、工程领域的学者及研究、开发人员来说,可靠性设计的思想、观点、方法与高等数学、普通物理一样,不仅仅是一种方法、一种技术,同时也是培养基本科学素养所必需的内容之一。

可靠性设计理念与方法的出现是机械设计领域的一次革命性的进步。在设计准则、材料评价、保证安全的策略,以至最终产品的性能、质量等方面,可靠性设计与传统的确定性设计都有明显不同。

在 21 世纪,设计的重要性更加突出,设计对产品的贡献率更为显著。为了更好地满足市场的需求,保证产品质量,避免设备失效事故发生,实现企业效益最大化,科学、先进的可靠性与安全性设计是必不可少的。

本书较为系统地介绍了可靠性设计的理论与方法。内容安排的原则是:先进、适用、完整。为了适应研究型大学培养具有创新能力的创新型人才的教学需要,本书在零件可靠性方面,剖析了可靠性发展过程中出现过的、甚至目前仍存在的一些错误观点;在系统可靠性方面,比较详细地介绍了“系统论”思想方法和最新研究成果,反映了可靠性研究的最新进展。因此,本书不仅可以作为高校本科生教材,也适合研究生和可靠性设计、研究人员使用。

在可靠性设计方法的基础内容方面,本书主要讲述工程中可靠性问题的表述方法和可靠度、失效率、平均无故障工作时间等可靠性度量指标,以及可靠性设计的基本内容和程序;介绍可靠性设计中经常用到的概率分布函数;并重点讲解了作为零件可靠性设计基本原理的应力-强度干涉模型及其应用,包括载荷分布参数的计算与强度分布参数的计算等。此外,本书还包括系统可靠性计算、系统可靠性分配、故障树分析、事件树分析、影响与重要度分析等内容,介绍了确定设计安全系统的定量方法。

可靠性与风险分析工程是 21 世纪具有战略意义的重要科学与工程之一。国家中长期科技发展纲要、“十一五”科技发展规划、“十一五”高技术发展计划等都把重大装备与重大工程的可靠性问题放到了非常重要的位置。作者愿借本书的出版,尽其绵薄之力,为我国机械制造领域可靠性理论、方法的普及与推广应用做出贡献。

编 者

2006 年 6 月

目 录

// 第 1 章 可靠性与安全性工程概述

1.1 产品的可靠性与安全性	1
1.2 可靠性工程发展历史	3
1.3 系统及零件失效状态与特点	5
1.4 可靠性设计中的成本概念	6
1.5 产品可靠性指标	7
1.6 可靠性参数采集	15
1.7 可靠性设计的一般程序	18

// 第 2 章 可靠性设计的数学基础

2.1 随机事件及其概率	20
2.2 随机变量及其数字特征	28
2.3 数理统计的基本概念	32
2.4 次序统计量	33

// 第 3 章 可靠性中常用的概率分布

3.1 分布特征	35
3.2 二项分布	37
3.3 泊松分布	38
3.4 指数分布	38
3.5 正态分布	40
3.6 对数正态分布	43
3.7 韦布尔分布	45
3.8 极值分布(Gumbel 分布)	47

// 第 4 章 可靠性设计原理与可靠度计算

4.1 产品设计中的可靠性问题	48
4.2 机械产品可靠性的特点	50
4.3 应力和强度的随机分布特性	51
4.4 随机变量函数的均值和标准差计算方法	54
4.5 应力 - 强度干涉模型与可靠度计算	55
4.6 典型应力 - 强度分布的可靠度计算	59

// 第 5 章 零件可靠性设计

5.1 静强度可靠性设计	62
--------------------	----

5.2 疲劳可靠性设计	65
5.3 断裂可靠性分析设计	72
5.4 磨损和腐蚀的可靠度计算	74
5.5 机构功能可靠性	77

// 第6章 独立失效系统可靠性模型

6.1 概述	84
6.2 串联系统	84
6.3 并联系统	86
6.4 混联系统	87
6.5 表决系统	88
6.6 储备系统	89
6.7 软件可靠度	91

// 第7章 相关失效系统可靠性模型

7.1 相关失效现象与机理	96
7.2 传统共因失效模型	97
7.3 系统层的载荷-强度干涉模型	101
7.4 次序统计量模型	106
7.5 可靠性干涉模型的扩展	109
7.6 参数化形式的系统可靠性模型	111

// 第8章 故障树分析

8.1 故障树分析方法概述	114
8.2 故障树名词术语和符号	115
8.3 建立故障树的原则	117
8.4 故障树结构函数	118
8.5 故障树分析	120
8.6 共因失效分析	128

// 第9章 安全评估方法

9.1 安全评估方法概述	135
9.2 概率安全评价方法	136
9.3 失效模式、效应及危害度分析(FMECA)	138
9.4 事件树分析(ETA)	143
9.5 安全系数方法	145

// 附录

附表1 标准正态分布表	149
附表2 Γ 函数表	151
参考文献	154

第1章

可靠性与安全性工程概述

1.1 产品的可靠性与安全性

工程中处处都有可靠性与安全性问题。美国“挑战者”号和“哥伦比亚”号航天飞机、前苏联切尔诺贝利核电站等事故所引起的严重后果,都足以说明产品的可靠性问题会引起严重的安全事故。人造卫星、载人宇宙飞船等可靠性技术成功的典范,不仅为国家带来荣耀,更说明了高科技的发展要以可靠性技术为基础。在现代生产中,可靠性与安全性技术已贯穿于产品的研制、设计、制造、试验、使用、运输、保管及维修保养等各个环节中。

可靠性是表征产品(零件或系统)使用安全性的质量指标,表示产品能安全可靠地实现规定功能的能力。可靠性有时也用在一般的意义上,泛指可靠性、可用性、耐久性和安全性等。可用性与可靠性及维修性有关,是可修复系统可工作时间占总时间(工作时间 + 维修时间)的比例。维修性与恢复故障系统的功能所需的时间有关。耐久性多用于诸如磨损、疲劳等与时间相关的失效场合。可靠性、维修性、可用性、耐久性这四个指标是相互关联的,其中任一个指标的改变都意味着其他指标也发生了相应的变化。

产品的可靠性指产品在规定的条件下,在规定的时间内完成规定功能的能力。规定的条件不同,产品的可靠性也将不同。例如,同一台设备在室内、野外(寒带或热带、干旱地区或潮湿地区)、海上、空中等不同的环境条件下工作,其可靠性也是不同的。

“规定的时间”是可靠性区别于产品其他质量属性的重要特征,产品的可靠性水平会随着使用或储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是时间的函数。这里的时间概念不限于一般的时间概念,也可以是产品的操作次数、载荷作用次数、运行距离等。

“规定功能”是要明确具体产品的功能是什么,以及怎样才算是完成规定功能。产品丧失规定功能称为失效,对可修复产品通常也称为故障。

机械产品一般是可维修的,要使一台设备发挥更好的作用,不仅要求在单位时间内出现的故障次数少,故障间隔时间长,而且要求维修时间短。将产品的能工作时间与总时间之比称为产品的有效性,产品的有效性是指可修产品维持其功能的能力。

可靠性是许多工程领域(如机械工程、电子工程、通信网络、交通运输、航空航天等)共同关心的问题,其理论基础是依据可靠性数学。然而,不同领域的可靠性问题有各自不同的特点。例如,人的可靠性问题与设备的可靠性问题不同,软件系统的可靠性问题与硬件系统的可靠性问题不同,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不同。还需要认识到的是,可靠性分析与预测本身不能解决产品可靠性低或可用性差的问题,分析与预测的作用是为进一步改进或决策提供基础信息,以便决定是更改或替换零

件、重新设计系统或提高系统的冗余度等等。

可靠性是产品质量属性中的专门特性之一。质量包括产品(零件或系统)的性能指标、专门特性、经济性、适应性等多方面。产品的性能指标是指描述其基本功能的参数,如结构的强度、发动机的输出功率等;专门特性是指描述其保持规定性能指标的能力,包括产品的可靠性、维修性、可用性、安全性、检测性等,如结构强度在规定时间内不发生退化、发动机能连续工作若干小时并保证在此期间输出功率不低于规定的值;经济性是指在整个寿命期内的总费用,即全寿命周期费用。

随着现代系统的复杂化,专门特性显得更加重要。这是由于:

(1) 工程系统日益庞大和复杂,使系统的可靠性和安全性问题表现日益突出,导致风险增加。如航天飞机,作为一个由数十万个零件组成的系统,可靠性是至关重要的问题。

(2) 应用环境更加复杂和恶劣。从深海到太空,严酷的环境对系统高可靠性、高安全性等综合特性的实现提出了新的挑战。

(3) 系统要求的持续无故障任务时间加长。如太空探测器的长时间无故障飞行要求、通信网络的关键任务不停机要求等,迫使工程系统必须具有良好的可靠性、安全性等专门特性。

(4) 系统的专门特性与使用者的生命安全直接相关。如核能、载人航空航天器、高速列车等系统的可靠与安全是生命安全的基本保证。

(5) 市场竞争的影响。“性能优良、功能齐全”并不是用户选择产品时考虑的唯一因素。产品是否可靠、是否好修,维护保养费的多少,寿命多长等都对用户的选择产生重要的影响。

可靠性是一门由可靠性数学、可靠性物理和可靠性工程三部分内容构成的学科。其中,可靠性数学是指研究解决各种可靠性问题的数学模型和数学方法,属于应用数学的范畴,主要内容有概率论与数理统计、随机过程、运筹学等。可靠性物理是指研究失效现象、失效机理与检测方法等。可靠性工程是指包括对产品的失效及其发生的概率进行统计、分析,对产品进行可靠性设计、可靠性预测、可靠性试验、可靠性评估、可靠性检验、可靠性控制、可靠性维修及失效分析等,它立足于系统工程方法,运用概率论与数理统计等数学工具,研究产品故障,找出薄弱环节,确定提高产品可靠性的途径,并综合地权衡经济、功能等方面的得失,使产品的可靠性达到预期指标。可靠性工程包括了对零件、部件和系统等产品的可靠性数据的收集与分析、可靠性设计、预测、试验、管理、控制和评价等。

可靠性工程主要有以下四个方面的工作:

(1) 可靠性管理。可靠性管理是指制定可靠性计划和其他可靠性文件(如可靠性指标等),对生产过程的可靠性进行监督,计划评审,建立失效报告,分析和改进系统,收集可靠性数据和进行可靠性教育等。

(2) 可靠性设计。可靠性设计是指建立可靠性模型,进行可靠性预计、可靠性分配,以及选择和控制部件指标,确定可靠性关键部件等。产品可靠性设计是指在产品的开发设计阶段,将载荷、强度等有关设计量及其影响因素作为随机变量对待,应用可靠性数学理论与方法,使所设计的产品满足预期的可靠性要求。产品开发设计阶段的主要内容还包括预测设计对象的可靠度、找出并消除薄弱环节、不同设计方案之间的可靠性指标比较等。可

可靠性设计包括定量分析与定性分析两个方面。

(3) 可靠性试验。可靠性试验是指进行环境应力筛选试验、可靠性增长试验、可靠性鉴定试验、可靠性验收试验等。

(4) 可靠性评价。可靠性评价是指对零件及系统的失效模式、影响及危害性分析、故障树分析、概率风险等进行评价。

1.2 可靠性工程发展历史

可靠性学科是第二次世界大战后从电子产品领域中发展起来的。在机械工程领域中, A. M. Freudenthal 于 1947 年提出了著名的应力 - 强度干涉模型, 至今为止, 应力 - 强度干涉模型仍是机械可靠性设计中使用的最基本的模型。干涉分析的基本思想是: 在可靠性设计中, 将应力和强度均作为随机变量, 这两个随机变量一般有“干涉”区存在, 我们分别用 $h(s)$ 和 $f(S)$ 表示它们的概率密度函数, 借助于应力 - 强度干涉分析, 可以得出零件的可靠度 R 的计算公式, 即

$$R = \int_0^{\infty} h(s) \left[\int_s^{\infty} f(S) dS \right] ds \quad (1.1)$$

这里, 应力和强度都是广义的概念, 可以认为“应力”是施加于零件上的任何种类的可能导致失效的物理量, 如应力、温度、腐蚀、辐射等, 而“强度”是零件能够抵抗相应“应力”的能力。

1957 年, 美国电子设备可靠性咨询委员会发表了题为“军用电子设备的可靠性”的电子产品可靠性理论和方法的文献, 标志着可靠性工程已经发展成为一门独立的工程学科, 由此, 也表明了传统可靠性理论与方法的基本特点, 即主要涉及的是具有恒定失效率的二态元件及具有元件独立失效特征的二态系统。根据传统的观点, 系统的可靠度可以由零件的可靠度确定。例如, 根据系统的功能结构, 传统的串联系统可靠性模型为

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \quad (1.2)$$

传统的并联系统可靠性模型为

$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (1.3)$$

式中, R_s 为系统可靠度, R_i 为零件可靠度, n 为系统包含的零件数。

显然, 以上系统可靠性模型都隐含着这样一个假定条件: 系统中各零件的失效是相互独立的。

从 20 世纪 60 年代开始, 应力 - 强度干涉模型也被应用于疲劳强度的可靠性设计中。在 20 世纪 70 年代前后, D. Kececioglu 和 E. B. Haugen 等人提出了一整套基于干涉模型的疲劳强度可靠性设计方法, 并在工程上得到了应用。

材料在循环载荷的长期作用下, 强度逐渐衰减, 因此, 疲劳载荷 - 疲劳强度干涉模型本质上应该是一个动态概率模型, 但当寿命给定时, 疲劳强度的分布是一定的, 这样, 就将

动态概率模型转变成了静态概率模型。但存在的困难是给定寿命下的疲劳强度分布难以确定。

除了需要对载荷进行统计分析、统计描述外,应用应力-强度干涉模型进行疲劳可靠性分析的一个重要内容是确定材料的疲劳强度的概率分布。W. Weibull 曾指出:疲劳强度分布可以从试验所得到的数据中间接获得,也可以从直接的疲劳寿命分布中转换而来。也就是说,寻求疲劳强度概率分布可以从实验研究或理论推导两方面入手。

因为疲劳性能对表面缺陷、显微结构、环境工况等都十分敏感,疲劳试验数据的分散性一般都很大,因此,无法事先确定一个应力水平使得一个试件在预定寿命 N 处恰好破坏。正如美国国家标准指出:“不能通过试验的方法直接测得 N 次循环下的疲劳强度概率分布”。对于疲劳强度概率分布的实验研究只能采取一些间接测量的方法。

可靠性的研究与应用经历了初期发展阶段、可靠性工程技术发展形成阶段和可靠性广泛应用阶段,实现了从理论研究到工程应用、从电子产品到机械产品、从定性分析到定量计算的发展。对于机械行业来说,可靠性研究集中在可靠性工程方面,从理论到工程应用的研究都方兴未艾,在工程实际应用方面,还有大量问题有待解决。目前,可靠性工程的研究主要集中在以下几个方面:

1. 可靠性基本理论

(1) 有关应力、强度与寿命的分布理论。对于机械产品中广义的应力和强度的分布,目前都沿用电子产品中的各项分布理论,常用的包括二项分布、泊松分布、正态分布、对数正态分布、指数分布和威布尔分布等。目前对于强度的正态分布和寿命的威布尔分布的研究比较多,包括对合适的分布形式的选择和参数的估计方面。

(2) 机械系统的可靠性理论。可靠性预测和可靠性分配(可靠性优化设计)问题始终是系统可靠性分析与可靠性设计最为关心的问题。由于机械产品与电子产品特点的明显不同,目前常用的可靠性预测和可靠性分配方法在工程实际中的应用还存在着大量的问题。这方面的研究集中于对零件间的失效相关性、产品性能的多状态性等方面。

2. 结构可靠性

在零部件强度与可靠性分析方面已提出了各种各样的方法,但对涉及复杂承载结构、涉及载荷分担的情形,采用的还都是比较简单、近似的方法,计算精度不是很高。

对机械结构和机械系统的可靠性问题,目前大多是在各元件独立失效的假设条件下进行分析与设计,与真实情况相差较大。多年来的实践已使人们认识到,要想较为精确地预测结构的可靠性,必须使用系统工程学理论把结构作为一个系统来看待,使用系统分析的方法进行可靠性分析。由于在方法与模型上还没有做到这一点,因此目前部件、结构及系统可靠性指标的确定主要还是得依靠实验。

3. 机构可靠性

实现预期运动和承受或传递动力是机构的两大基本功能,而可靠性正是针对产品功能而言的。因此,根据机构的两大基本功能,可将机构可靠性问题划分为与承载能力相关的可靠性问题和与运动功能相关的可靠性问题,前者一般可归结为机械结构零部件的可靠性问题,目前已有较成熟的方法,后者属于机构功能可靠性问题,这仍是目前研究的热点。

4. 与时间相关的失效及可靠性

在机械可靠性领域,对承受各种动载荷的结构及零部件的疲劳特性研究至今仍是复杂的问题之一,原因是疲劳特性对材料性能、构件的几何形状、表面质量、载荷历程及服役环境等极为敏感。同时,对构件以规定的功能在给定时间内无故障工作的要求日益突出,因此,疲劳可靠性研究得到了广泛重视。疲劳可靠性设计要综合考虑失效机理、载荷、强度、尺寸、环境等设计因素的随机性,可应用概率论、数理统计及疲劳设计理论,通过建立数学模型,进行可靠度计算,将构件在给定时间内发生疲劳失效的概率限制在某一给定的数值下,使设计更加安全可靠、经济合理。

1.3 系统及零件失效状态与特点

传统的系统可靠性理论涉及的主要问题是零件及系统完全失效的概率,以及系统失效与零部件(完全)失效之间的逻辑关系。例如,在串联系统中,关心的是“系统中一个零件发生失效”这样的事件,因为任一个零件的失效都导致整个系统功能的丧失,在表决系统中,关心的是“系统的 n 个零件中有 k 个以上零件失效”这样的事件,或一个、多个零件失效后系统的可靠性降低;而在并联系统中,关心的是“系统中所有零件都发生失效”这个事件,因为只有当全部零件都失效时系统才失效。这里,“失效”的含意多是完全失效,很少关注零部件的部分失效对系统功能及可靠性的影响。在结构系统可靠性研究中,对结构系统中部分结构断裂后结构系统中载荷转移和重新分配及相应的可靠性问题进行过较多的研究,但对结构局部的非完全失效(表现形式为出现一定尺寸的裂纹或其他形式的性能指标退化等)本身的概率特性及其对系统可靠性的影响的考虑则较少。目前,已有越来越多的研究工作涉及结构、零件或系统的老化问题和模糊性问题、多状态问题,因此发展了多状态系统可靠性理论。

在工程实际问题中,绝大部分结构或零部件的失效都有一个过程,都表现出明显的渐变特征,而系统失效表现为多个零件性能变化的集合效应。突变型失效是较少见的,而且大部分所谓的突变失效也都是许多局部失效累积(反映为渐变过程)的结果。对于一个系统而言,突变型失效也可以发生在所涉及的元件并未完全失效的情形,因为决定一个系统的状态及其变化的因素往往是多个,而不是一个。在系统状态变化过程中可能有多个因素同时在起作用,这多个起作用的因素变化到了一定的程度,系统就会发生突变。

在传统的可靠性研究中,一般是把研究对象看做只有两种状态,即对一个零件或系统来说,或者失效,或者不失效(处于完好状态),这是由于对研究对象的特性过分简化的结果。究其原因,一方面是由于可靠性理论是以古典概率论为基础的,而古典概率论最基本的特征就是二态性和等可能性;另一方面是由于可靠性研究是从电子产品开始的,人们所关心的主要是电路的“通”或“断”等问题,自然对问题的性质进行了简化和抽象。除此之外,还有一个潜在的原因是,“长期以来,自然科学工作者,尤其是物理学家和数学家,由于受欧几里德几何学及纯数学方法的影响,习惯于对复杂的研究对象进行简化和抽象,建立起各种理想模型(绝大多数是线性模型),把问题纳入可以解决的范畴”。

1.4 可靠性设计中的成本概念

在某种意义上,系统优化设计的核心是系统效能与寿命周期费用两者之间的权衡。系统效能是系统在规定的条件下满足给定特征和服务要求的能力。系统的寿命周期费用(LCC),是系统在整个寿命周期内,为获取并维持运行(包括处置)的总费用,它包括硬件、软件的研制费、生产费、后勤保障费,以及在研制、采办、使用、技术保障和处置过程中所需的各种费用。不同的系统,其寿命周期费用构成不完全相同,各构成成分间的比例关系也不完全一样。

在讨论产品的可靠性时,应该注意产品的可靠性、成本和利润三者之间的关系。产品的可靠性与产品的设计、制造成本及使用维护费用之间关系如图 1.1(a) 所示,其为传统观点,该图显示了提高产品的设计可靠性,会导致生产成本的增加,但使用、维护费用随着可靠性的提高而降低,图中总费用是各项成本及费用之和。

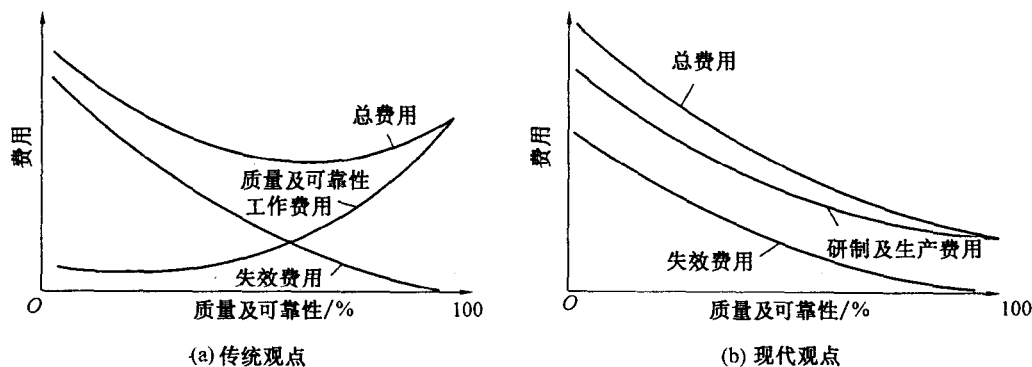


图 1.1 全寿命周期费用与可靠性的关系

图 1.1(a) 是与可靠性相关的理论“成本 - 效益”关系的传统表述。尽管它看起来很直观并在有关质量和可靠性的教科书中频繁出现,但却不总能真实地反映总费用与可靠性之间的客观规律。

所有的失效都有其原因,所以应该询问“与无所作为的代价相比,预防和纠正这些原因的投入产出比是多少?”当对每个潜在的或实际的原因以这种方式进行分析时,几乎总是清楚地表明,随着可靠性的提高,总费用会继续下降。换句话说,用在有效的可靠性工作方面的所有工作都是一种投资,通常也都会在短期内就有较大的回报。因此,更为实际的状况如图 1.1(b) 所示。

关于这一点,唯一的难题是不大容易量化所规定的可靠性工作的各项活动(例如一定量的试验等)对达到的可靠度所起的作用。

要获得可靠的设计和可靠的产品,需要一种综合的处理方法,包括设计、试验、生产,也包括可靠性工作的各项活动,这种综合的工程处理方法对项目经理及团队成员的判断能力和对工程知识的掌握提出了很高的要求,作为团队成员,可靠性专家们必须起到应起的作用。

在制造质量方面,质量管理大师戴明(Deming)解释了为什么不存在进一步提高质量会导致更高的费用的分界点,因此当考虑整个产品寿命周期时这一观点就更为真实。与在生产质量方面的改进相比较,保证设计内在可靠性的努力,通过先进的设计和有效的研制试验,能产生更高的利润(图 1.2),图 1.2(b) 中 σ 表示质量指标的标准差。

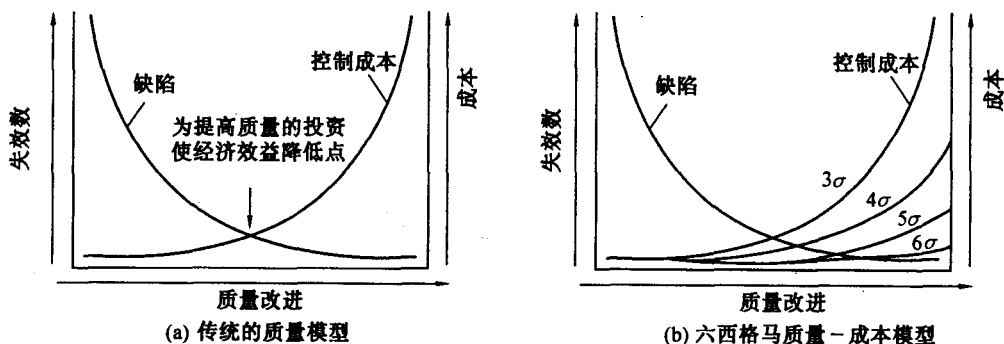


图 1.2 成本 - 质量模型

1.5 产品可靠性指标

1. 可靠度

可靠度是指产品在规定条件下和规定时间内,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。若产品寿命 t 的概率密度函数为 $f(t)$,可靠度函数可用公式表示为

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (t \geq 0) \quad (1.4)$$

显然,可靠度是时间的单调递减函数,随着时间 t 的增加,可靠度函数 $R(t)$ 单调下降,且有 $0 \leq R(t) \leq 1$ 。与之相对应,产品失效概率 $F(t)$ 的定义为

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (1.5)$$

显然, $R(t) + F(t) = 1$ 。

可靠度、失效概率的统计意义可表述如下:设有 n 个同一型号的产品(概率意义上相当于属于同一母体),工作到时刻 t 时有 $n(t)$ 个失效,则

$$\hat{R}(t) \approx \frac{n - n(t)}{n} \quad (1.6)$$

$$\hat{F}(t) \approx \frac{n(t)}{n} \quad (1.7)$$

将失效函数 $F(t)$ 对时间 t 微分,即得到失效密度函数 $f(t)$ (也叫故障密度函数),即

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = - \frac{dR(t)}{dt} \quad (1.8)$$

$f(t)$ 的统计意义可表达为

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{n \Delta t} \quad (1.9)$$

到某一时刻仍具有工作能力的产品所占的比例可以用可靠频度直方图来表示(图 1.3)。将图各柱状图形中点用线段连接起来,可表示经验可靠度。

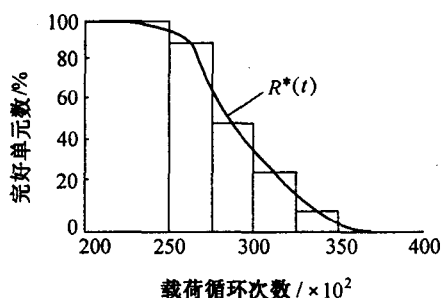


图 1.3 可靠频度直方图及经验可靠度

2. 失效率

失效率也称故障率,定义为工作到时刻 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概率。失效率一般记为 λ ,它也是时间 t 的函数,因此也记为 $\lambda(t)$,称为失效率函数,有时也称为故障率函数或风险函数。

根据定义,失效率是在时刻 t 尚未失效的产品在 $t + \Delta t$ 的单位时间内发生失效的条件概率,即

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P(t < T \leq t + \Delta t) \quad (1.10)$$

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,即

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{[n - n(t)] \Delta t} \quad (1.11a)$$

在失效率为常数 λ 的简单情况下,有

$$\lambda = \text{失效数} / \text{总运行时间} \quad (1.11b)$$

例如,100 个产品工作到 80 h 时尚有 50 个仍未失效,在 80 ~ 82 h 内又失效 4 个,则 $\Delta n_f(t) = 4, n_s(t) = 50, \Delta t = 2$,故

$$\hat{\lambda}(80) = \frac{4}{50 \times 2} = 0.04$$

平均失效率是指在某一规定时期内失效率的平均值。如图 1.4 所示,在 (t_1, t_2) 内失效率的平均值为

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt \quad (1.12)$$

平均失效率的观测值,对于不可修复的产品是指在一个规定的时期内失效数与累积工作时间之比;对于可修复的产品是指它在使用寿命期内的某个观测期间一个或多个产品的故障

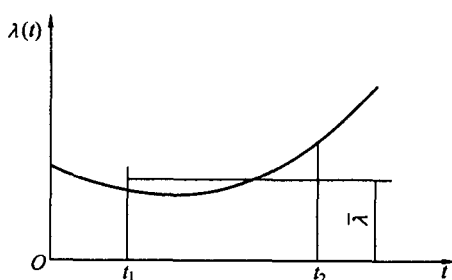


图 1.4 失效率及其在有效寿命期间的均值