

机械时变可靠性 理论与方法

王 正 谢里阳 著



科学出版社

机械时变可靠性理论与方法

王 正 谢里阳 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以机械零部件和系统为研究对象,介绍机械产品可靠性的特点,分析机械产品与电子产品在可靠性建模与失效率计算方法等方面的不同。从“应力和强度是决定机械零部件和系统可靠性的基本要素”的认识出发,介绍应力-强度干涉理论及其拓展模型在零部件可靠性分析中的应用、基于系统级应力-强度干涉的系统可靠性模型与系统(等效)强度的概念及其概率分布模型;分别在以时间和载荷作用次数为寿命度量指标的框架下,介绍能够科学体现载荷(或应力)、强度、强度退化、寿命指标、失效相关性、结构特征等参数影响的零部件和系统时变可靠性建模方法与计算模型;结合产品典型的失效率变化曲线,分析影响产品失效率变化的四要素,介绍基于应力-强度干涉理论的失效率计算方法与模型;结合工程实践,对时变可靠性建模理论与方法进行工程应用研究。

本书可供从事可靠性理论研究与工程实践科研人员参考,也可以作为高等院校机械工程、可靠性工程、安全工程等相关专业研究生的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

机械时变可靠性理论与方法/王正,谢里阳著. —北京:科学出版社,2012
ISBN 978-7-03-035777-9

I. ①机… II. ①王… ②谢… III. ①机械振动-时变-研究 IV. ①TH113.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 242546 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:包志虹

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencecp.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 10 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2012 年 10 月第一次印刷 印张: 13 1/2

字数: 262 000

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

可靠性是机械产品质量特性的重要度量指标之一,也是产品重要的设计技术指标。良好的可靠性是产品发挥其功能的基础和保证。在设计和制造机械零部件与系统的过程中,在追求其高性能的同时,也应当注重其可靠性指标的实现。

本书以机械零部件和系统为研究对象,突出可靠性的时变特征,介绍机械零部件和系统的时变可靠性建模理论与方法,分析现有可靠性建模理论与失效率计算方法的特点,阐述机械产品与电子产品在可靠性建模理论与计算方法方面的不同。从“应力和强度是决定机械零部件和系统可靠性基本要素”的认识出发,介绍应力-强度干涉理论及模型,结合零部件可靠度计算,针对不同失效模式以及具有多种失效模式的零部件可靠性分析,对应力-强度干涉模型进行拓展。本书介绍基于系统级应力-强度干涉的系统可靠性模型,建立了串联系统、并联系统和 k/n 系统的(等效)强度概率分布模型,实现了零部件与系统可靠性建模方法与计算模型的统一。在此基础上,分别以载荷作用次数(离散型变量)和时间(连续型变量)为寿命度量指标,建立了能够从本质上科学体现“应力、载荷、强度及其退化规律、寿命指标”等参数影响的零部件和系统时变可靠性模型。本书剖析了影响机械产品失效率变化的四个基本要素,提出基于应力-强度干涉的失效率计算方法与模型。所给出的零部件和系统时变可靠性建模理论与方法及模型能够根据“应力、载荷、强度及其退化规律”等参数计算出可靠度、失效率等可靠性指标随寿命的变化规律,并能够根据给定的可靠性许用值合理划分失效期和科学确定可靠寿命。

本书相关研究成果得到了国家自然科学基金项目“机械系统时变可靠性建模理论与失效率计算方法研究(50905007)”、中国博士后科学基金项目(20080440294、200902042)、柴油机增压技术重点实验室基金项目的资助。中国北方发动机研究所为本书内容研究和出版给予了大力支持。本书在撰写过程中得到了北京航空航天大学康锐教授的宝贵建议。在此表示衷心感谢!

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2012 年 6 月

于中国北方发动机研究所

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 研究背景	1
1.2 相关研究的发展及现状	3
1.2.1 可靠性工程的发展	3
1.2.2 时变可靠性建模理论与失效率计算方法研究现状	6
1.2.3 失效相关问题的研究现状	9
1.3 本书主要内容	11
第 2 章 可靠性的基本概念与数学基础	14
2.1 可靠性的基本概念	14
2.2 可靠性的常用度量指标	15
2.3 可靠性的数学基础	19
2.3.1 随机事件及其概率	19
2.3.2 随机变量及其概率分布的数字特征	22
2.3.3 随机变量函数的分布	27
2.3.4 统计量与统计方法	29
2.4 可靠性分析常用的概率分布	31
2.4.1 二项分布	31
2.4.2 泊松分布	32
2.4.3 指数分布	32
2.4.4 正态分布	34
2.4.5 对数正态分布	37
2.4.6 威布尔分布	38
2.4.7 极值分布	39
2.4.8 Γ 分布	41
2.4.9 Rayleigh 分布	42
2.4.10 χ^2 分布	43

2.4.11 t 分布	44
2.4.12 F 分布	45
第 3 章 基于应力-强度干涉的零部件可靠性模型	47
3.1 应力-强度干涉模型及其拓展	47
3.1.1 应力-强度干涉模型	47
3.1.2 应力-强度干涉模型的拓展	48
3.2 基于应力-强度干涉的零部件可靠性模型	49
3.2.1 确定性恒幅循环载荷作用下的零部件疲劳可靠度	50
3.2.2 不确定性恒幅循环载荷作用下的零部件疲劳可靠度	51
3.2.3 具有多种失效模式的零部件可靠性模型	53
3.2.4 旋转对称结构零部件可靠性模型	57
3.3 实例	60
3.3.1 转轴的疲劳可靠度计算	60
3.3.2 齿轮的可靠度计算	62
第 4 章 基于系统级应力-强度干涉的系统可靠性模型	66
4.1 传统的独立失效系统可靠性模型	66
4.2 基于系统级应力-强度干涉的系统可靠性模型	69
4.3 系统(等效)强度及其概率分布	73
第 5 章 以载荷作用次数为寿命度量指标的零部件时变可靠性	77
5.1 “静态”应力-强度干涉模型的不足	77
5.2 随机载荷多次作用时的载荷(或应力)等效	78
5.2.1 顺序统计量	79
5.2.2 载荷(或应力)等效及其概率分布	79
5.3 以载荷作用次数为寿命度量指标的零部件时变可靠性模型	81
5.3.1 强度不退化时以载荷作用次数为寿命指标的零部件时变可靠性模型	81
5.3.2 强度退化时以载荷作用次数为寿命指标的零部件时变可靠性模型	84
5.3.3 零部件可靠度与失效率随载荷作用次数的变化规律研究	85
5.3.4 旋转对称结构零部件时变可靠性模型	89
5.4 以载荷作用次数为寿命指标的零部件时变可靠性模型试验验证	91
5.4.1 单一失效模式零部件时变可靠性模型试验验证	91
5.4.2 多种失效模式零部件时变可靠性模型试验验证	93

5.5 实例	94
5.5.1 以载荷作用次数为寿命指标的齿轮可靠性	94
5.5.2 以载荷作用次数为寿命指标的螺栓静强度可靠性	95
第6章 以载荷作用次数为寿命度量指标的系统时变可靠性	98
6.1 以载荷作用次数为寿命指标的系统时变可靠性模型	98
6.1.1 强度不退化时的系统时变可靠性模型	98
6.1.2 强度退化时的系统时变可靠性模型	100
6.2 系统可靠度与失效率随载荷作用次数的变化研究	103
6.3 以载荷作用次数为寿命指标的系统时变可靠性模型试验验证	108
第7章 以时间为寿命度量指标的零部件时变可靠性	110
7.1 以时间为寿命度量指标时载荷历程的不确定性描述	110
7.1.1 泊松随机过程	110
7.1.2 载荷历程的二维描述法	111
7.2 以时间为寿命度量指标的零部件时变可靠性模型	113
7.2.1 强度不退化时的零部件时变可靠性模型	113
7.2.2 强度退化时的零部件时变可靠性模型	114
7.2.3 零部件可靠度与失效率变化规律研究	116
7.2.4 具有多种失效模式的零部件时变可靠性模型	121
7.3 以时间为寿命指标的零部件时变可靠性模型试验验证	124
第8章 以时间为寿命度量指标的系统时变可靠性	127
8.1 以时间为寿命度量指标的系统时变可靠性模型	127
8.1.1 强度不退化时的系统时变可靠性模型	127
8.1.2 强度退化时的系统时变可靠性模型	130
8.2 系统可靠度与失效率随时间的变化研究	133
8.2.1 不同强度退化规律时系统可靠度与失效率变化研究	134
8.2.2 不同概率分布类型时系统可靠度与失效率变化研究	138
8.3 以时间为寿命指标的系统时变可靠性模型试验验证	144
第9章 基于应力-强度干涉理论的失效率计算方法	146
9.1 影响机械产品失效率的四要素	146
9.2 基于应力-强度干涉的失效率计算模型	147
9.2.1 以载荷作用次数为寿命度量指标的失效率模型	148

9.2.2 以时间为寿命度量指标的失效率模型	152
9.3 失效率变化影响因素研究	154
9.3.1 强度不退化时失效率的变化规律研究	154
9.3.2 强度退化时失效率的变化规律研究	156
第 10 章 时变可靠性理论与方法的应用	158
10.1 时变可靠性建模理论与失效率计算方法应用研究	158
10.1.1 以载荷作用次数为寿命指标时产品失效期划分与可靠寿命确定	158
10.1.2 以时间为寿命指标时产品失效期划分与可靠寿命确定	160
10.2 增压器涡轮超速破坏失效模式可靠性评价	161
10.2.1 增压器涡轮的超速破坏失效模式	161
10.2.2 基于传统安全系数法的涡轮超速破坏评价	162
10.2.3 涡轮超速破坏失效模式的时变可靠性模型	163
10.2.4 涡轮超速破坏可靠性研究与可靠寿命确定	164
10.3 增压器涡轮轮毂疲劳寿命预测与可靠性分析	165
10.3.1 涡轮的工作状态参数分析	166
10.3.2 涡轮轮毂部位的疲劳应力分析	167
10.3.3 涡轮轮毂部位的疲劳强度确定	169
10.3.4 涡轮轮毂疲劳可靠性建模与寿命预测	170
10.4 增压器涡轮叶片的振动分析及其可靠性评价	172
10.4.1 增压器涡轮叶片振动特性分析	173
10.4.2 涡轮叶片振动失效判据建立	175
10.4.3 涡轮叶片振动失效模式可靠性建模	176
10.4.4 涡轮叶片振动可靠性研究与可靠寿命确定	178
参考文献	180
附录	192
附表 1 标准正态分布表	192
附表 2 χ^2 分布表	194
附表 3 t 分布上侧分位数表	196
附表 4 F 分布表	198
附表 5 Γ 函数表	204

第 1 章 概 述

可靠性是产品有效发挥其功能的基础和保证。随着科学技术的不断发展与进步,机械设备以及大型工业系统的结构日趋复杂,性能指标越来越高,对可靠性的要求也在不断提高。在机械设备和大型工业系统研制过程中,如何针对可靠性指标要求开展相应的可靠性设计与分析,已成为产品研制过程中的一项重要工作内容。发展和建立科学合理的可靠性理论与方法,对更好地指导机械零部件与系统可靠性设计、提高产品质量和档次具有重要意义。

1.1 研究背景

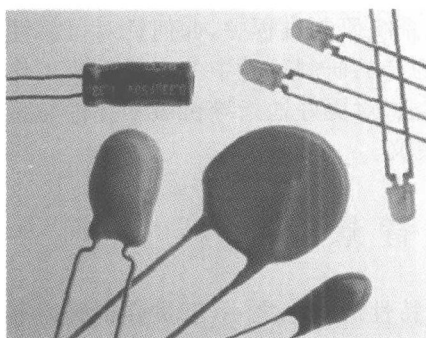
可靠性作为可以动态衡量机械产品质量特性的指标之一,已贯穿到机械零部件与系统、复杂工业装备、大型基础设施的论证、设计、制造、试验、使用、运输、存储、维修保障等环节中。对于大型机械装备和复杂工业系统,准确评估其可靠性对整个装备和系统的安全运行、合理制定维修计划、降低全寿命周期费用等都具有十分重要的意义。随着科学技术的迅猛发展,机械产品的性能参数日益提高、结构更趋复杂、使用场所更加广泛、载荷环境更为严酷,可靠性在机械产品整个质量特性中的地位更加突出。

可靠性工程的诞生与发展过程主要是以电子产品可靠性技术为先导。随着电子产品可靠性的提高以及机械装备的大型化和复杂化,机械产品的可靠性问题日益凸现。机械可靠性的研究也受到各国政府、企业界和学者的普遍重视。由于机械产品在结构组成、功能实现、试验测试等方面具有其自身的特点,机械产品可靠性研究与电子产品具有明显的不同。

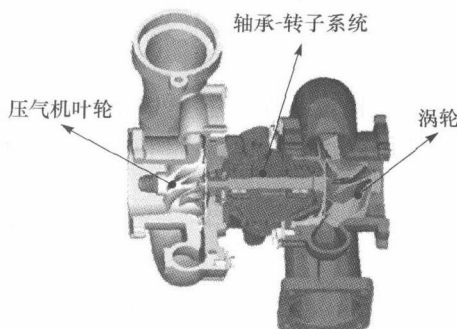
机械可靠性尽管经过几十年的发展取得了很大的进步,却仍然面临着许多重要的科学问题亟待解决^[1]。机械产品可靠性是在电子产品可靠性的基础上发展起来的,沿袭和借用了许多电子产品可靠性的理论与方法。然而,由于机械产品自身的结构与功能特点,适用于电子产品的可靠性理论与方法并不完全适用于机械产品。表现之一为:电子产品由于其组成元器件标准化程度较高、试验成本相对较低等,可以通过进行大批量的试验,获得足够的试验数据,然后运用统计的方法得到其寿命分布函数,在此基础上进行相关的可靠性分析与计算。然而,对于机械产品,由于其试验成本较高、试验周期较长,很难甚至无法通过大量的试验获得足够的失效数据。因此,仅仅依靠对产品使用和试验信息进行统计分析的方法,对机械

产品的可靠性进行分析与评价显然是不够的,特别是对于小批量的机械产品以及没有相似产品可类比的新研制机械产品。

例如,对于涡轮增压器、发动机等典型机械产品,在研制过程中很难像电子产品那样容易通过大量的试验获得足够多的失效数据(见图 1.1),基于对大量试验和使用数据进行统计分析的可靠性建模方法虽然在理论上适用,但是由于受开发成本、研制周期等的制约,这种方法在工程实践中并不可行。



(a) 电子元器件容易通过试验获得足够多的失效数据



(b) 涡轮增压器很难通过试验获得足够多的失效数据

图 1.1 基于对失效数据统计的可靠性分析方法难以适用于机械产品

正因如此,现有的机械产品可靠性分析更多地采用基于应力-强度干涉理论的建模方法与计算模型。例如,应力-强度干涉模型(或载荷-强度干涉模型)、极限状态方程、功能函数、安全余量方程等^[2~15],这些方法与模型尽管在表述形式上有所不同,但可统称为“应力-强度干涉模型”或“载荷-强度干涉模型”。

在实际应用中,传统的可靠性模型大多在(广义)应力与(广义)强度概率分布参数已知的条件下,直接采用应力-强度干涉模型进行零部件或系统的可靠度计算。然而,传统应力-强度干涉模型反映的仅是随机载荷在某一次或某一时刻作用时,应力随机变量与强度随机变量之间相对大小关系的概率特征,并没有体现载荷作用次数和载荷作用过程对零部件或系统可靠性的影响^[2],无法科学地反映零部件或系统可靠度随寿命指标的变化,同时也掩盖了载荷多次作用及其不确定性对失效率特别是早期失效率的影响^[15]。通常,运用这些可靠性模型计算得到的零部件或系统可靠度,实际上是随机载荷作用一次时或在某特定寿命指标内的可靠度(取决于载荷和应力的统计方法以及载荷和应力概率分布函数所表达的具体含义)^[16~18]。即便是将传统的应力-强度干涉模型直接应用于机械结构的静强度可靠性分析与计算,也存在着一定的不足,即只能适用于在概率意义下的载荷最大值在整个寿命周期内只作用一次的特殊情况^[16]。

尽管现有的疲劳可靠性模型能够计算对应不同载荷作用次数时的可靠度,但是这类疲劳可靠性模型仅反映了由载荷循环作用所引起的强度退化对零部件或系统可靠性的影响,没有体现载荷多次作用过程中由载荷不确定性所引起的应力不确定性的累积效应对可靠性的影响^[2]。

事实上,机械零部件和系统在服役期间所受载荷的作用往往是随机和反复多次的,零部件或系统的可靠性应当随着寿命指标(即时间、载荷作用次数、行驶里程等)的变化而改变。显然,在可靠性分析过程中,忽略载荷作用次数或时间等寿命指标的影响将无法体现可靠性的时变特征,有时会使得零部件和系统可靠性分析结果与真实值之间存在较大误差。

此外,传统零部件和系统失效率(或故障率)计算模型大多基于寿命分布函数^[19~21],即通过对零部件和系统在试验和使用中产生的失效或故障数据进行统计分析获得相应的寿命分布函数,进而得到失效率的表达式。显然,这种失效率计算方法需要以产品的大量失效或故障数据为前提,不能在新产品设计阶段(特别是没有相类似产品参照时)对产品的失效率或故障率进行分析与计算,难以及时有效地指导产品的设计。同时,由于科学技术的不断发展与进步,产品的制造工艺和材料性能在不断提高,产品的可靠性也越来越高、寿命越来越长;加之,机械零部件或系统的试验成本高且试验周期较长。在相对短的研制周期内,通常很难甚至无法获得足够的产品失效或故障数据。因此,难以利用传统的可靠性理论与方法对机械产品失效率(或故障率)进行准确的分析与计算,特别是对于高可靠性、长寿命的机械产品。

1.2 相关研究的发展及现状

1.2.1 可靠性工程的发展

可靠性工程作为一门学科,其诞生可以追溯到20世纪40年代的第二次世界大战期间。由于航空、航天、电子等工业的迅速发展,大量武器装备失效事故的经验教训以及不可靠产品造成的巨大经济损失等因素,促进了可靠性工程的萌芽和发展。美国被认为是世界上最早开展可靠性技术研究与应用的国家之一。1952年美国军事部门、工业部门和有关学术部门共同成立了著名的电子设备可靠性咨询委员会(Advisory Group on Reliability of Equipment, AGREE),这是全世界第一个正式的可靠性研究咨询机构。AGREE的成立在可靠性研究发展史上具有里程碑意义。该委员会对电子产品的设计、制造、试验、储存、运输、使用等可靠性问题做了较为全面的调查研究,并于1957年6月发表了“军用电子设备的可靠性”报告^[22]。该报告比较完整地论述了可靠性的理论基础及研究方法,被公认为是可靠

性研究领域的奠基性文件。

1965 年国际电子技术委员会(IEC)设立了可靠性技术委员会,负责对可靠性定义与用语、可靠性管理以及数据收集等进行国际间的协调,它的成立使可靠性工程成为一门国际化的技术。60 年代末,美国率先将可靠性技术引入汽车、发电设备、拖拉机、发动机等机械产品。70 年代,电子设备及系统开始广泛应用于工业生产及人们的日常生活中,电子设备的可靠性直接影响着生产效率、设备寿命以及人员的安全,可靠性问题显得日益重要。与此同时,人们也开始了对非电子设备(如机械设备)可靠性的研究。80 年代以来,可靠性研究继续向深度和广度发展,可靠性技术被广泛应用于各领域,成为工程设计、经营决策、产品运行、维修等活动不可缺少的工具。英国、美国等发达国家开始致力于发展人工智能专家系统、综合诊断技术和集成故障测试方法等以提高测试精度和系统的可靠性。

我国的可靠性研究起步于 20 世纪 50 年代。20 世纪 50 年代建立了温热带环境暴露试验机构,1972 年建立了电子产品可靠性与环境试验研究所。70 年代以后,重点工程的需要和消费者对提高家电产品质量的强烈需求,对国内可靠性研究起到了巨大的推动作用。例如,我国于 1978 年提出了《电子产品可靠性“七专”质量控制与反馈科学实验》计划,并组织实施。经过努力使我国军用电子元器件可靠性提高了两个数量级,为运载火箭、通信卫星的发射和海底通信电缆的长期正常运行提供了保证。1984 年组建了全国统一的电子产品可靠性信息交换网,颁布了《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。之后有关可靠性的国家标准、国家军用标准和专业标准相继出台,我国的可靠性管理工作开始纳入标准化轨道。20 世纪 90 年代初,机械工业部提出了“以科技为先导,以质量为主线”的思路,兴起了我国第二次可靠性研究的高潮,并取得较大成绩。

21 世纪以来,随着我国“自主创新”重大科技战略的实施,可靠性的研究与应用受到了很大重视。我国在《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020 年)》中将“重大产品和重大设施寿命预测技术”作为先进制造领域的一项前沿技术^[23]。在“十一五”国家高技术发展规划(863 计划)中,将“寿命和可靠性设计与分析技术”列为一个重大专项进行研究。在 2011 年公布的《国家“十二五”科学与技术发展规划》中,提出要将数控机床主机可靠性提高 60% 以上;在中国工程机械行业“十二五”规划中,提出“加强产品可靠性共性技术研究”;在内燃机工业“十二五”发展规划中,我国采用国外先进做法,对发动机、增压器等产品提出了定量化可靠性指标要求。例如,针对发动机与增压器产品可靠性,提出了要配合整车可靠性指标要求实行 B10 可靠寿命。

可靠性的研究起源于军事领域,但随着社会的进步与科学技术的发展,可靠性

的研究也得到了全面发展,已推广应用到国民经济的各个部门和领域,给企业和社会带来了巨大的经济效益和社会效益。因此,各国纷纷投入大量的人力和物力进行可靠性的相关技术研究,并在更广泛的领域里进行推广应用。与此同时,可靠性工程也得到了进一步的发展,可靠性在社会生产、人民生活等各个领域的重要性得到了更加广泛的重视。

可靠性的研究与应用经历了初期发展阶段、可靠性工程技术形成阶段和可靠性技术广泛应用阶段,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。可靠性已成为许多工程领域(如机械工程、电子工程、通讯网络、交通运输、航空航天等)所关心的重要问题之一。然而,不同工程领域的可靠性问题又有着各自不同的特点。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,机械产品的可靠性问题与电子产品的可靠性问题也有着明显不同。

由于机械产品结构复杂、使用环境多变、失效模式多样,其可靠性从基础理论到工程应用的研究都方兴未艾,特别是在工程实际应用方面,仍然有大量的问题有待解决^[24]。目前,机械可靠性的研究主要集中在以下几个方面。

1) 可靠性基本理论

有关强度、载荷(或应力)与寿命的分布理论。对于机械产品中广义应力(或载荷)和广义强度的概率分布,目前仍沿用电子产品中的各项分布理论,常用的概率分布模型包括指数分布、泊松分布、正态分布、对数正态分布、威布尔分布等。当前对于强度的正态分布和寿命的威布尔分布研究比较多,包括对合适分布形式的选择与参数的估计^[25~28]。

机械系统的可靠性理论。机械系统的可靠性预计和可靠性指标分配(包括可靠性优化设计)问题始终是系统可靠性分析与可靠性设计中最为关心的问题。由于机械产品与电子产品特点的不同,目前常用的可靠性预计和可靠性分配方法在工程实际中应用时还存在着大量的问题。这方面的研究集中在零部件之间的失效相关性、产品性能的多状态性等方面^[29~33]。

2) 结构可靠性

在零部件结构可靠性分析方面已经提出各种各样的方法,但对于涉及复杂承载结构、载荷分担的情形,采用的还是比较简单、近似的方法,计算精度不是很高^[34~38]。目前,机械结构系统可靠性设计与分析大多是在各零部件相互独立失效假设的条件下进行的^[39~43],与真实情况存在较大的误差。多年的实践已经使人们认识到,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视为一个系统来看待,使用系统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,目前机械零部件、结构以及系统的可靠性主要还是依靠大量的试验进行定性或定量的分析与评价。

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个基本功能,而可靠性正是针对产品功能而言。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强度的可靠性问题,在这方面的研究已取得了一定的进展;后者属于结构功能的可靠性问题,这也是目前研究的热点^[44~46]。

4) 与时间相关的失效及可靠性

在机械可靠性领域中,由于受载荷变化、强度性能退化等因素的影响,机械零部件和系统的可靠性显然会随着寿命指标在不断变化。例如,机械结构的疲劳可靠性问题,对承受动载荷的结构与零部件的疲劳特性研究至今仍是最为复杂的问题之一,原因在于结构的疲劳特性对材料性能、工艺过程、表面质量、载荷历程、服役环境等因素都极为敏感^[47~54]。随着现代装备的大型化和复杂化,对零部件和系统在给定时间内无故障地完成规定功能的要求日益突出,与时间相关的可靠性研究也受到了广泛的重视。可靠性设计要综合考虑失效机理、载荷历程、材料性能、强度退化、结构尺寸、工艺过程、使用环境等因素的不确定性,运用概率论、数理统计以及设计理论,通过建立相应的数学模型并进行可靠性指标计算,将结构在给定时间内发生失效的概率限制在某一允许值内,使结构设计更加安全可靠、经济合理。

1.2.2 时变可靠性建模理论与失效率计算方法研究现状

时变性(或动态性)是现代复杂系统的典型特征,也是产品可靠性的重要属性。由于零部件或系统的运行工况、载荷、应力、强度等参数随时间或载荷作用次数等寿命指标在不断变化,机械产品的可靠性是一个典型的时变过程。传统的可靠性分析理论与方法大多不能较好地体现零部件或系统的动态特性,难以准确地反映零部件与系统可靠性随寿命指标的变化规律。

实际中,由于强度和应力(或载荷)的不确定性、强度退化、载荷历程变化以及在载荷多次作用过程中由载荷不确定性所产生的累积效应等,应力(或载荷)和强度的相对大小关系在不断地发生变化,机械零部件和系统的可靠性应当随着载荷作用次数或时间等寿命指标在不断地变化。图 1.2 所示为即使在应力概率分布不发生改变的情况下,由于强度的退化,应力与强度之间的干涉情况也会随时间发生变化,图中 $\delta(t)$ 和 $s(t)$ 分别表示强度和应力的概率分布。

时变可靠性作为可适时反映零部件与系统质量特性变化的重要指标之一,受到了学术界和工程界越来越广泛的重视。国内外学者较早地对建筑结构和复杂系统的时变可靠性进行了研究^[55~59],对机械零部件与系统时变可靠性的研究则相对较少^[60]。近年来,国内外学者从不同的角度对时变可靠性建模理论、方法及其应

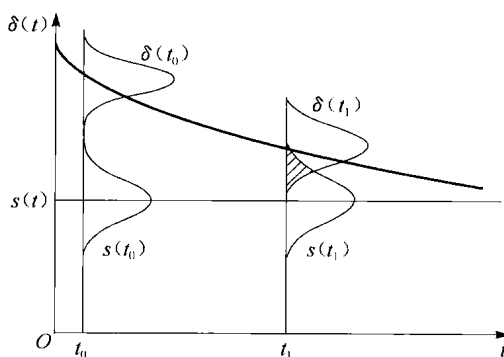


图 1.2 强度与载荷(或应力)在不同时刻的干涉情况

用进行了研究^[61~75]。Chen 等^[61]研究了风载荷激励下天线反射镜精度的时变可靠性,假设结构对风载荷的响应服从相互独立的正态随机过程,边界响应交叉点服从泊松随机过程,分析了天线反射镜精度的时变可靠性。Artur 和 Andrzej^[63]研究了腐蚀条件下基于时变可靠性的钢架桥评价模型。Marco 和 Sonia^[64]提出考虑性能劣化的结构可靠性分析方法,假定结构性能参数随时间线性退化。Beckera 等^[65]基于马尔可夫方法提出了考虑离散状态转换点不确定性的时变可靠性理论。Cazuguel 等^[66]分析了非线性结构行为的时变可靠性,研究了随机载荷作用下带孔平板的可靠性。Streicher 和 Rackwitz^[67]提出了在标准化空间下运用一阶矩进行失效独立串联结构的时变可靠性优化方法。Tian 和 Noore^[68]研究了软件时变可靠性预测的支持向量机建模方法。Wang 等^[69]提出了两种形式不同的时变可靠性模型,一种是以微分方程的形式(DE 模型),另一种以代数的形式(AE 模型)。Kopustinskas 等^[70]提出了一种基于随机微分方程的时变可靠性模型。李艺和闫运起^[71]指出“对于现役结构,其载荷效应和结构抗力都是随时间变化的随机过程,现役结构的可靠度是一个动态变化过程”,给出了反映结构动态可靠性指标的功能函数全随机过程,即

$$Z(t) = g(R(t), S(t)) = R(t) - S(t) \quad (1.1)$$

式中, $R(t)$ 为结构抗力; $S(t)$ 为载荷效应的随机过程。

姚卫星^[72]提出了考虑时间因素的动态应力-强度干涉模型,并给出了结构元件的安全余量方程(或状态方程)为

$$M(t) = R(t) - S(t) \quad (1.2)$$

式中, $R(t)$ 为结构抗力; $S(t)$ 为载荷效应的随机过程。

左勇志等^[73]也提出了与式(1.1)和式(1.2)相类似的结构时变可靠性的全随机过程模型。黄飞腾等^[74]基于系统的马尔可夫性假设,对系统状态进行适当的离

散化处理,利用状态转移方法进行了系统的动态可靠性分析。苏春等^[75]利用 Petri 网对动态系统的描述能力,将 Petri 网应用于机械系统可靠性分析领域,研究了基于 Petri 网理论的复杂动态系统可靠性建模方法。

O'Connor^[76]考虑施加多个载荷作用对可靠性的影响,给出了施加多个载荷下的可靠度计算模型为

$$R^{(n)} = \int_0^{+\infty} f_{\delta}(\delta) \left[\int_{-\infty}^{\delta} f_s(s) ds \right]^n d\delta \quad (1.3)$$

式中, $f_{\delta}(\delta)$ 为强度变量的概率密度函数; $f_s(s)$ 为载荷变量的概率密度函数; n 为施加的载荷数。特殊地,施加 n 次统计独立载荷时的可靠性模型为

$$R^{(n)} = (1 - p)^n \quad (1.4)$$

式中, p 为对应于每次施加载荷的失效概率。

以式(1.1)和式(1.2)为代表的这类时变可靠性模型,直接用 t 时刻的强度与 t 时刻的应力(或载荷)进行干涉来计算零部件或系统的可靠度。事实上,这类模型仅反映了 t 时刻的强度与 t 时刻出现的应力(或载荷)之间相对大小关系的概率特征,其计算结果实际为零部件或系统在 $[0, t - \Delta t]$ (Δt 为时间的微小增量)时间段内不发生失效的前提下在 t 时刻的可靠度。也就是说,用这些模型计算得到的 t 时刻可靠度其潜在假设为:零部件或系统在 $[0, t - \Delta t]$ 时间段内的可靠度为 1,没有反映 $[0, t - \Delta t]$ 时间段内的失效情况、载荷历程、强度退化规律等对 t 时刻可靠度的影响,仅适用于定期检修或带有自诊断设备等可获知在 t 时刻前工作状态参数的零部件或系统。因此,文献[66]将这类可靠性模型计算得到的可靠度视为“时不变可靠度”,如图 1.3 所示。式(1.3)虽然考虑了载荷作用次数的影响,但仅适用于强度不发生退化时的可靠度计算。

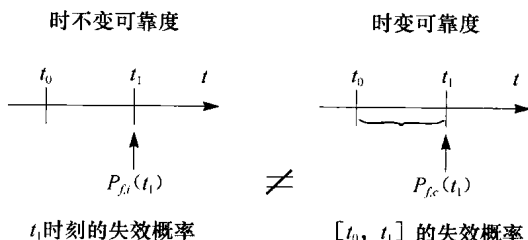


图 1.3 失效时刻与累积失效概率

同时,从现有的文献资料来看,对时变可靠性建模方法的研究与应用大多针对较为复杂的系统,运用的可靠性建模理论与方法主要有:马尔可夫法^[58,77]、GO 法^[78,79]、动态故障树^[80,81]、随机 Petri 网^[75,82]、蒙特卡罗(Monte Carlo)法^[83,84]等。然而,这些方法大多针对可维修的复杂系统,很难适用于零部件和不可修系统在工

作期间任意时刻的可靠性分析与可靠性指标计算。此外,在用这些方法对复杂系统进行可靠性建模的过程中,常常将零部件或单元的失效率(或故障率)视为一个确定的已知量,很难反映真实情况^[85~87]。

失效率(或故障率)作为机械零部件和系统可靠性的重要度量指标之一,常用于机械产品的可靠性分析、维修管理、效能评价等。多年来,国内外学者从不同的角度对失效率进行了研究^[88~97]。Hjorth^[88]提出了描述具有浴盆形状曲线的失效率函数三参数分布模型。Xie等^[89]研究了适用于具有浴盆形状失效率寿命数据的概率分布模型,该模型仅包括三个参数且可以与指数分布和威布尔分布相联系。Zhang和Pham^[90]研究了运用软件可靠性增长模型分析系统测试数据和使用数据的现场失效率预测方法。Xue和Fei^[91]针对步进应力加速寿命试验提出了常应力下威布尔分布损伤失效率模型的参数估计方法。Rosario和Patrick^[92]针对产品运行环境的变化提出了能够实时预测系统可靠性的动态失效率模型。Zafiropoulos和Dialynas^[93]考虑失效率的不确定性,给出基于可靠度和费用的电子设备优化计算方法。Avinadav和Raz^[94]针对与人因相关的风险事件,提出了新的浴盆型故障函数。王学敏等^[95]针对评估和统计数据的不确定性问题,利用概率生成函数,给出了根据权值来获得系统共因失效率的计算方法。

这些失效率计算方法大多基于对失效数据的统计分析,即通过对零部件或系统的试验数据和使用数据进行统计分析获得相应的寿命分布函数,进而得到失效率的表达式。这种失效率计算方法由于需要依赖大量的失效或故障数据,难以在机械产品的设计阶段对其可靠性进行有效的评价。

综上所述,传统的可靠性建模理论与失效率计算方法,不能真实地反映机械零部件和系统可靠度与失效率随载荷作用次数、时间等寿命指标的变化规律,没有全面客观地体现“强度、应力、载荷、寿命指标、强度退化规律”等参数对零部件和系统可靠度、失效率等可靠性指标的影响,难以有效地指导机械零部件和系统的可靠性设计与分析。

1.2.3 失效相关问题的研究现状

失效相关与“失效独立”相对应,是零部件和系统可靠性分析过程中需要妥善处理的重要问题之一。失效相关性广泛地存在于各类工业系统中,特别是核电站、航空、航天等高可靠性系统。在工程实际中,绝大多数机械系统中的零部件都不是失效相互独立,而是失效相关的,只是相关的程度有所不同。失效相关不仅普遍存在于各类系统中,而且也存在于具有多种失效模式的零部件中^[98]。失效相关性的存在不仅会严重地影响冗余系统所发挥的安全作用,同时会使零部件和系统的可靠性分析与建模变得更加复杂。

对于机械零部件和系统,“相关”是其失效的普遍特征。忽略零部件各失效模