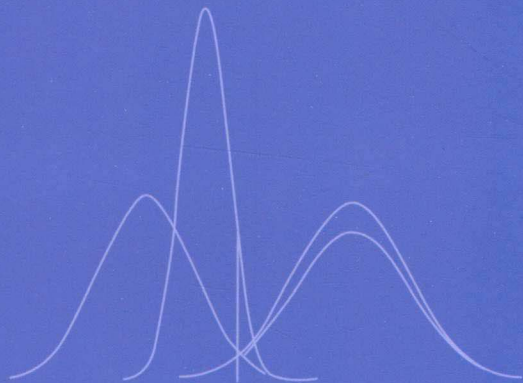




机械可靠性 基本理论与方法

(第二版)

■ 谢里阳 王 正 周金宇 武 滢 著



科学出版社

机械可靠性基本理论与方法

(第二版)

谢里阳 王 正 周金宇 武 滢 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要内容包括机械可靠性基本概念,可靠性数学基础,可靠性分析基本原理,系统可靠性分析、建模方法等。书中集国内外最新研究成果,介绍了可靠性与产品全生命周期成本的关系、失效率-时间关系、载荷-强度干涉模型、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方面的新认识与新发展。在零件可靠性方面,从数学的一般意义上解释载荷-强度干涉概念与模型,大大拓展了传统模型的应用范围;在系统可靠性方面,阐释直接在系统层进行可靠性分析、建模的方法,突破了传统上“从零件到系统”的框架;在系统故障分析方面,介绍了 Petri 网及相应的新方法;此外,还采用通用发生函数方法详细描述多状态零件与系统的可靠性问题。

本书既包括可靠性的基本内容,自成体系,也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,尤其是包含许多新方法与新模型,反映了可靠性研究的最新进展。本书可供从事可靠性研究的科研人员参考,也可作为高等院校机械工程等相关专业的研究生的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

机械可靠性基本理论与方法/谢里阳等著. —2 版—北京:科学出版社,2012
ISBN 978-7-03-035177-7

I. ①机… II. ①谢… III. ①机械设计-可靠性设计 IV. ①TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 166886 号

责任编辑:杨向萍 陈 婕 / 责任校对:刘小梅

责任印制:张 倩 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

骏主印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 1 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2012 年 7 月第 二 版 印张:17 1/4

2012 年 7 月第二次印刷 字数:344 000

定价:65.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第二版前言

鉴于作者近期取得的相关研究成果,也考虑到工程应用的需要,决定再版。此次再版重点改写了“可靠性分析原理与零件可靠度计算”一章,增加了“多元可靠性模型”和“失效率模型”两章。多元可靠性建模理论与方法拓展了传统的应力-强度干涉分析方法,应用这种方法能以逐层扩展的方式建立物理意义明确、数学求解容易、适用于不同失效机理的多参数可靠性模型,建立的模型能全面反映载荷不确定性、载荷作用次数、零部件及系统强度退化等对可靠性的影响;关于失效率建模,剖析了浴盆状失效率-时间曲线的形成原因,介绍了基于应力-强度干涉分析建立失效率模型的方法,展示了失效率随时间增加、减小或基本保持恒定的根本原因——载荷风险效应与强度退化的竞争结果。同时,为了保持适当的篇幅,并做到详略适当,将第一版中的故障模式、效应及危害性分析(FMECA)和故障树分析(FTA)的内容做了精简,合并成一章,将关于多状态系统可靠性的三章简并为一章,并删除了“蒙特卡罗方法在可靠性分析中的应用”这一章。

此外,在各章的开始,都增加了一段导言,提纲挈领地阐述了该章中涉及的理论、方法和模型的背景、应用及需要深刻认识的问题等。

本书的出版得到了国家自然科学基金项目“多元扩展式可靠性建模方法及强度退化统计规律研究”(批准号:51175072)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(优先发展领域)“风电装备多元可靠性建模理论与方法研究”(项目编号:20110042130003)的资助,在此表示感谢。书稿撰写过程中,钱文学副教授和吴宁祥博士参加了本书部分内容撰写,滕云楠博士和博士研究生张晓瑾、马园园、佟安时、张啸尘、白恩军、马洪义等参与了书稿校对等工作,在此也一并表示感谢。

第一版前言

可靠性理论与方法有广泛的工程应用价值。机械可靠性设计理念与方法的出现是机械工程领域中的一次革命性的进步。在设计准则、材料评价、质量控制和工程安全等方面,可靠性设计、评价与传统的确定性设计、评价都有显著不同。

本书较为系统地介绍了机械可靠性基本理论与方法,在内容安排上采用先进、适用、完整的原则,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值得商榷的概念与观点,着重阐述机械可靠性问题的特殊性与复杂性、传统可靠性模型的适用性与局限性、解决机械零件与机械系统可靠性问题的思想方法;在零部件可靠性方面,拓展了传统“干涉分析”的概念;在系统可靠性方面,比较详细地介绍了“系统工程”思想方法的应用和最新研究成果,并提出了新方法与新模型,反映了可靠性研究的最新进展。

在本书中,计算零件可靠度的基本公式(对应于传统的应力-强度干涉模型)是根据计算“随机变量的函数的平均值”的标准形式直接给出的。由此,展示了这样一个事实:计算可靠度并不一定需要“干涉”的概念。同时,还突破了“干涉分析”的限制,把计算可靠度的基本公式广义化、普适化,使之适用于更广泛的物理背景与应用场合,包括疲劳可靠度的直接计算(不需要像传统方法那样先推导出给定寿命下的疲劳强度分布)和系统可靠度的直接建模(不是像传统方法那样在零件独立失效的假设条件下根据零件可靠度计算系统可靠度)。此外,本书中应用 Petri 网建立了系统故障关系的逻辑模型,提出了应用关联矩阵确定割集的新方法,并讲述了多状态零件与多状态系统的可靠性理论、方法与模型。

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问题。国家中长期科学和技术发展规划纲要、“十一五”科学技术发展规划、“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。愿本书的出版能为我国机械可靠性理论与方法的发展贡献绵薄之力。

限于作者水平,书中不妥之处在所难免,敬请读者指正。

作者

2008 年 10 月于沈阳

目 录

第二版前言

第一版前言

第 1 章 机械可靠性概述	1
1.1 可靠性研究发展与现状	1
1.1.1 可靠性方法概述	1
1.1.2 机械可靠性研究现状	4
1.2 机械可靠性基本概念与基本问题	9
1.2.1 可靠性	9
1.2.2 失效率及失效率-时间关系	10
1.2.3 寿命分布与失效率之间的关系	12
1.2.4 可靠性干涉分析方法、模型及其应用	15
1.2.5 损伤等效与失效概率等效的一致性问题	16
1.2.6 系统可靠性与零件可靠性之间的关系	17
1.2.7 零件或系统状态的多态性	18
1.2.8 成本-可靠性关系	18
1.3 可靠性指标	19
1.3.1 可靠度与失效概率	19
1.3.2 失效率	20
1.3.3 平均寿命	21
1.3.4 维修率与有效性	22
第 2 章 可靠性数学基础	23
2.1 随机事件及其概率	23
2.1.1 随机试验与随机事件	23
2.1.2 事件之间的关系与运算	23
2.1.3 概率定义	24
2.1.4 概率基本运算法则	25
2.2 随机变量及其分布的数字特征	27
2.2.1 随机变量	27
2.2.2 随机变量分布的数字特征	28

2.2.3	寿命分布特征参数统计	30
2.2.4	矩发生函数	31
2.2.5	随机变量的条件分布、全概率公式与贝叶斯定理	31
2.2.6	二维随机变量及其分布	32
2.3	随机变量函数的分布	32
2.3.1	一维随机变量函数的分布	32
2.3.2	二维随机变量函数的分布	34
2.3.3	随机变量的可加性	36
2.4	统计量与统计方法	36
2.4.1	母体与样本	36
2.4.2	统计量与样本分布	37
2.4.3	次序统计量	38
2.5	泊松随机过程	38
2.6	发生函数方法	39
2.6.1	发生函数的定义	39
2.6.2	发生函数法的计算复杂度	43
2.6.3	基于发生函数法的系统可靠度计算	44
2.6.4	发生函数复合算子的特性	45
第3章	可靠性常用分布函数	47
3.1	二项分布	47
3.2	泊松分布	48
3.3	指数分布	48
3.4	正态分布	50
3.4.1	标准正态分布	50
3.4.2	截尾正态分布	51
3.4.3	正态分布的可加性	52
3.5	对数正态分布	52
3.6	Weibull 分布	53
3.6.1	Weibull 分布的形状参数	54
3.6.2	Weibull 分布的均值和方差	54
3.7	次序统计量及其分布	54
3.8	极值分布	56
3.8.1	I 型极大值分布概率密度函数	57
3.8.2	I 型极小值分布	58

第4章 可靠性分析原理与零件可靠度计算	59
4.1 可靠性参数的随机性	59
4.1.1 载荷及其统计特征	59
4.1.2 结构尺寸	60
4.1.3 材料与结构性能	61
4.2 分布参数计算——矩法	62
4.2.1 一维随机变量的分布参数	62
4.2.2 多维随机变量的分布参数	62
4.3 应力-强度干涉模型与可靠度基本表达式	63
4.3.1 基本概念	63
4.3.2 可靠度基本表达式	64
4.3.3 干涉模型的统计平均解释	69
4.3.4 可靠度发生函数模型	70
4.4 载荷多次作用下的静强度可靠性模型	71
4.4.1 载荷顺序统计量	71
4.4.2 载荷多次作用情况下的静强度可靠性等效载荷	72
4.4.3 载荷多次作用下的零件静强度可靠性模型	73
4.5 疲劳强度可靠性设计计算方法	75
4.5.1 疲劳设计准则	75
4.5.2 平均应力修正	76
4.5.3 疲劳强度可靠性设计计算	76
4.6 随机疲劳可靠度预测的状态分析方法	80
4.6.1 非恒幅载荷下的剩余疲劳寿命分布	80
4.6.2 随机载荷下疲劳可靠性计算	85
4.7 疲劳可靠度的统计平均算法	86
4.7.1 概述	86
4.7.2 疲劳可靠度计算的载荷统计加权平均模型	87
4.7.3 疲劳寿命分布与循环应力水平之间的关系	90
4.7.4 统计平均算法与传统的应力-强度干涉模型的一致性	91
第5章 机械系统可靠性	93
5.1 系统可靠性经典模型	93
5.1.1 串联系统可靠性模型	94
5.1.2 并联系统可靠性模型	95
5.1.3 串-并联系统可靠度模型	96

5.1.4	并-串联系统可靠度模型	97
5.1.5	表决系统可靠度模型	97
5.1.6	储备系统可靠性模型	98
5.1.7	复杂系统可靠性分析方法	99
5.2	系统层可靠性分析与建模方法	101
5.2.1	失效相关现象与机理	102
5.2.2	系统层载荷-强度干涉模型	103
5.3	系统可靠性的次序统计量模型	106
5.3.1	基于次序统计量的系统可靠性模型	106
5.3.2	模型分析与比较	107
5.4	可靠性干涉模型的扩展	110
5.4.1	各零件承受不同载荷的系统可靠性模型	110
5.4.2	由不同零件构成的系统的可靠度模型	112
5.5	参数化形式的系统可靠性模型	113
5.5.1	系统可靠性模型离散化	113
5.5.2	模型验证与分析	115
5.6	载荷多次作用下的系统可靠性模型	116
5.7	系统可靠性的有界性	117
第6章	多元可靠性模型	120
6.1	可靠性建模概述	120
6.2	多层统计分析建模的方法	121
6.3	载荷不确定性分解与分层表达	124
6.4	强度退化规律	125
6.5	四元可靠性模型	126
6.5.1	零部件可靠性模型	126
6.5.2	系统可靠性模型	127
6.5.3	四元可靠性模型的退化形式及其与传统模型的一致性	128
6.6	四元可靠性模型的离散化形式	129
第7章	失效率模型	134
7.1	失效率曲线的形式	134
7.2	离散失效率的概念及定义	137
7.3	失效率建模方法	138
7.3.1	失效率的含义及控制变量	138
7.3.2	失效率基本方程	140

7.3.3 失效率与载荷及强度分布参数之间的关系	141
7.4 零件失效率方程	142
7.5 系统失效率模型	145
7.6 波浪形失效率曲线形成机制	147
第8章 失效传递逻辑分析方法	148
8.1 故障模式、效应与危害性分析方法	148
8.1.1 基本概念	148
8.1.2 FMECA 的层次与分析过程	149
8.1.3 FMECA 实施步骤	150
8.2 危害性分析	152
8.2.1 定性分析	153
8.2.2 定量分析	155
8.3 故障树分析法	156
8.3.1 故障树基本概念	157
8.3.2 故障树基本符号	159
8.3.3 故障树的割集与路集	160
8.4 故障树建树与分析方法	161
8.4.1 建立故障树的方法与步骤	161
8.4.2 故障树定性分析	163
8.4.3 故障树定量分析	166
第9章 系统故障分析的 Petri 网模型	171
9.1 Petri 网及其在可靠性分析中的应用	171
9.2 Petri 网模型	172
9.3 基于 Petri 网的故障分析方法	173
9.3.1 故障树的 Petri 网模型表示	173
9.3.2 Petri 网用于可靠性定性分析	174
9.3.3 Petri 网模型用于故障诊断	182
9.4 计算机辅助分析软件设计	185
9.4.1 程序工程的建立	186
9.4.2 程序的编制	186
9.5 内燃机可靠性分析	187
9.5.1 内燃机故障事件	187
9.5.2 故障树分析	189
9.5.3 Petri 网模型分析	190

第 10 章 多状态系统可靠性分析	193
10.1 多状态系统基础理论	193
10.1.1 多状态系统的基本模型	193
10.1.2 多状态系统可靠性及其参数	197
10.2 多状态系统可靠性理论与基本方法	200
10.2.1 路/割集分析法	200
10.2.2 多值结构函数分析法	201
10.2.3 多状态模块分析法	206
10.2.4 多值逻辑树分析法	207
10.3 随机过程方法	211
10.4 多状态系统可靠性发生函数法	214
10.4.1 串联子系统的发生函数法	214
10.4.2 并联子系统的发生函数法	216
10.4.3 串并联系统的发生函数法	218
10.4.4 邻接系统的发生函数法	221
10.4.5 桥路系统的发生函数法	224
10.5 含共因失效的多状态系统可靠性分析模型	227
10.5.1 由二态单元组成的多状态系统共因失效与可靠性分析	228
10.5.2 由多态单元组成的多状态系统共因失效与可靠性分析	235
参考文献	241
附录	248
附表 1 标准正态分布表	248
附表 2 χ^2 分布表	250
附表 3 t 分布表	251
附表 4 F 分布表	253
附表 5 Γ 函数表	259

第 1 章 机械可靠性概述

可靠性是应用领域十分广泛的学科,包括可靠性数学、可靠性物理和可靠性工程三个方面。机械可靠性设计曾被看做机械设计领域的革命性变化、安全设计思想和设计准则的重大改变。然而,可靠性理论方法体系目前尚不能完全满足工程应用需求,还处于发展过程之中。许多发达国家都把可靠性列为 21 世纪有重要影响的战略高技术。在机械工程领域,随着产品本身功能复杂性的增加、市场对产品质量要求的提高、人们对安全与环境问题的日益关注以及社会可持续发展的需要,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、模型以及相关技术都在逐渐完善,其重要性与应用价值也得到越来越多的体现。

1.1 可靠性研究发展与现状

1.1.1 可靠性方法概述

概率论是应用最广泛的一个数学分支,以概率论、数理统计、随机过程为基础的可靠性理论与方法也在诸多科学与工程领域中都有所应用。在机械工程领域,Weibull 于 20 世纪 30 年代研究了材料疲劳寿命的概率特征,提出了具有广泛应用价值的 Weibull 分布。Freudenthal 于 1947 年提出应力-强度干涉模型^[1],该模型成为了机械零部件以及电子元器件可靠性设计的基本公式。可靠性学者对该模型耳熟能详,以至于在可靠性研究中遇到各种失效概率问题时,大都自然而然地用“干涉”的概念和分析方法去思考、研究、表达。迄今为止,应力-强度干涉模型仍是机械零部件可靠性设计、计算的基本模型,在电子、控制元器件可靠性问题中也常有应用。关于串联系统的可靠性,人们很早就认识到失效并不总是发生于最薄弱环节,系统可靠性应该是其零部件可靠性的某种平均值。随后,数学家建立了一个串联系统可靠性模型——系统可靠度等于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标题为“军用电子设备可靠性”的电子产品可靠性理论和方法的奠基性文献,标志着可靠性已经发展成为独立的工程学科,由此也决定了传统可靠性理论与方法的基本特点——主要涉及具有恒定失效率的二态元件以及各元件独立失效的二态系统。在系统可靠性方面,机械系统与电器系统的传统可靠性分析方法与模型基本相同,所使用的分析、建模方法都是根据零部件的可靠度计算系统可靠度。

在可靠性计算中进行随机变量“干涉分析”的基本思想是,将应力和强度作为

两个随机变量来比较其相对大小。在同一坐标系中画出这两个随机变量的概率密度函数曲线时,一般都会有一部分重叠区域,称为存在“干涉”现象,这表明有应力大于强度(发生失效)的可能性。分别用 $h(y)$ 和 $f(x)$ 表示应力和强度的概率密度函数,可以得出如下形式的零件可靠度 R 的计算公式(强度随机变量大于应力随机变量的概率),即应力-强度干涉模型:

$$R = \int_0^{\infty} h(y) \left[\int_y^{\infty} f(x) dx \right] dy \quad (1.1)$$

这里,应力和强度都是广义的概念。可以认为,“应力”(或“载荷”)是能导致零部件失效的任何因素,如机械载荷、温度、腐蚀和辐射等;而“强度”是零部件抵抗相应“应力”(或“载荷”)的性能指标。

关于应力-强度干涉模型,需要明确的是,它计算的是零部件在随机载荷一次作用下不失效的概率。

对于承受随机载荷多次作用的情形,有研究者根据一个载荷历程样本统计得到的载荷分布,提出了如下模型^[2]:

$$R(m) = \int_0^{\infty} f(x) \left[\int_0^x g(y) dy \right]^m dx \quad (1.2)$$

式中, $g(y)$ 为多次作用的应力幅值的概率密度函数; m 为载荷作用次数。准确地讲,该模型表达的是在指定的一个载荷历程样本下的条件可靠度,而不是随机载荷环境下的可靠度。

大多数机械装备,尤其是车辆、船舶、飞机、工程机械、风电装备等,都在随机载荷环境下服役,失效模式复杂、可靠性影响因素众多。用 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 表示各影响因素 $x_1, x_2, \dots, x_n$ (或称可靠性控制变量,简记为 X) 的联合概率密度函数,用 $\Delta(X)$ 表示可靠性状态函数,可靠性计算公式可以表达为

$$R = \int_{\Delta(X) \geq 0} \dots \int f(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n \quad (1.3)$$

然而,由于联合概率密度函数 $f(X)$ 难以得到、状态函数 $\Delta(X)$ 复杂等原因,式(1.3)的应用价值很小。

当涉及多个随机变量时,还有如下的条件可靠度模型^[3]:

$$R = \int_X R(X) f_X(X) dX \quad (1.4)$$

式中, $R(X)$ 表示指定基本随机变量 X 下的条件可靠度; X 表示可靠性问题所涉及的全部随机变量; $f_X(X)$ 表示各随机变量的联合概率密度函数。

根据传统的观点及零件独立失效假设,系统可靠度可以根据零件可靠度直接计算。例如,传统的串联系统可靠性模型为

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \quad (1.5)$$

式中, R_s 为系统可靠度; R_i 为系统中第 i 个零件可靠度; n 为构成系统的零件数。

显然, 上述系统可靠性模型中隐含着一个假设: 系统中各零件的失效是相互独立的随机事件。

从 20 世纪 60 年代开始, 应力-强度干涉模型也开始应用于疲劳强度的可靠性设计中。Haugen 和 Kececioglu 等提出了一套基于干涉模型的疲劳强度可靠性设计方法, 并在工程中得到了应用。

零部件或结构在循环载荷的长期作用下, 强度性能逐渐衰减。因此, 疲劳载荷-疲劳强度干涉模型是一个动态概率模型。对应于一个指定的服役时间, 可以认为疲劳强度(剩余强度)分布是一定的, 这样就可以近似地将动态概率模型转变成静态概率模型。即便如此, 也还存在实际应用的困难——给定寿命下的疲劳强度分布难以确定。一方面, 疲劳寿命存在明显的不确定性是导致困难的客观原因; 另一方面, 在方法论方面, 导致这个困难的主观原因是在疲劳可靠性设计计算中沿用了“干涉”分析方法和类似于计算静强度可靠度的应力-强度干涉模型。

为了获得材料疲劳强度的概率分布, 以便应用应力-强度干涉模型进行疲劳可靠性分析, Weibull^[4] 阐述了确定疲劳强度概率分布的两种途径, 认为“疲劳强度分布可以根据试验所得数据间接获得, 也可以由疲劳寿命分布转换得到”。

由于疲劳强度、疲劳寿命对材料微观组织结构、零部件表面状态、服役环境工况等都十分敏感, 疲劳试验数据的分散性很大。事实上, 无法事先确定一个应力水平使得一个试件恰好在达到预定寿命 N 时发生破坏。正如美国国家标准^[5]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, 实验上只能采取一些间接测量的方法, 只能得到近似的参数。

对于复杂载荷下的疲劳可靠性问题, 传统上大多是以累积损伤法则为基础进行分析、计算的。针对程序载荷下的疲劳可靠性问题提出的“寿命等效-条件可靠度模型”^[6] 也直接或间接地应用于各种复杂载荷下的疲劳可靠性问题。事实上, “寿命等效-条件可靠度模型”只是一个简单的近似方法, 只适用于简单的疲劳可靠性问题^[7]。

不同领域的可靠性问题有各自不同的特点。人的可靠性问题与设备可靠性问题不同, 软件可靠性问题与硬件可靠性问题不同, 机械系统可靠性问题与电子系统可靠性问题也有明显的不同。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, 或隐含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。

总体上讲, 可靠性还是一个相对年轻的学科, 还处于发展时期。目前常用的一阶矩方法、二阶矩方法、响应曲面法等可靠性分析、计算方法能在一定的精度范围内解决一些问题, 但在许多复杂的工程实际场合还远不能满足应用需求^[8]。在系

统可靠性方面,根据传统模型对于大规模串联系统的可靠性分配,常会出现极不合理、极不现实的结果。再者,可靠性理论与方法主要是在电器工程领域发展起来的,至今还带有电器工程的烙印。例如,假设系统中各零件只有“正常”与“失效”两种状态,零部件之间、不同失效模式之间失效是相互独立的,寿命服从指数分布,失效率为常数等。由于机械系统及其零部件与电子系统及其元器件在失效机理、载荷特点等方面都有明显的不同,在机械可靠性方面需要研究、发展、完善的内容更多。

国际著名可靠性专家 O'Connor^[9]曾指出:“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产生误导(misleading)和无效的(un-effective)。”这一论断虽然会让很多人感到意外,但确实一定程度上反映了目前可靠性工程方面的理论成熟度与应用现状。

Thompson^[10]在论及可靠性研究者与应用者的任务时,也指出当代的研究者应当以批评的观点去审视 20 世纪八九十年代可靠性研究的发展趋势,尤其要明确什么是理论模型与实际系统之间的差异,怎样去消除它,当代工程系统所面临的挑战是什么;同时强调了在可靠性问题中深入研究载荷环境、失效机理、时间相关等问题的必要性、重要性与复杂性。

1.1.2 机械可靠性研究现状

可靠性学科经过近百年的发展,逐渐形成了可靠性数学、可靠性物理、可靠性工程等学科领域。就可靠性工程而言,从定性分析到定量计算,从简单的概率设计到复杂的可靠性优化,从基于概率统计理论的可靠性分析到计算机统计模拟技术的广泛应用,已经初步形成了一个比较完整的理论方法体系。

机械系统及其零部件的服役载荷环境复杂,失效机理、失效模式多种多样,一个系统中各零部件之间以及同一零部件的各失效模式之间大多存在明显的失效相关性。复杂系统、多失效模式下的可靠性问题,涉及不同失效机理之间的竞争机制、不同失效模式之间的相关性、失效过程中结构零部件中的载荷转移、零部件之间的失效相关性,以及多失效状态问题,这些都是目前可靠性研究的前沿。

1. 零部件可靠性

传统可靠性研究多是以静强度失效问题为背景的。应力-强度干涉模型可以方便地计算静强度失效概率与可靠度,但严格地讲,涉及的是一次性载荷引起失效的情形,计算的是一个静态概率指标,没有直接反映出可靠度随时间的变化。有研究者^[11,12]借助泊松(Poisson)随机过程表达载荷多次作用对可靠性的影响,建立了能反映载荷作用次数对零件及系统可靠性影响的模型。但涉及强度退化时,强度退化过程与载荷历程相关,变幅载荷历程下的强度退化规律复杂,还需要更完善的

模型。

机械零部件常见的失效是复杂载荷环境下的疲劳、腐蚀、磨损等。这类与时间相关的失效与静载失效(或称静强度失效,强度性能不随时间变化,因而强度性能与时间无关)有许多不同之处,需要不同的分析方法与模型。由于涉及损伤累积和时间因素,尤其是损伤速率、剩余强度、损伤临界值等与载荷历程直接相关,在疲劳等失效问题中,不像静载失效问题那样可以认为强度(对应于指定寿命的“疲劳强度”或载荷作用一定次数后的“剩余强度”)与载荷相互独立,这也使得疲劳可靠性问题比静强度可靠性问题更复杂。

事实上,若要用应力-强度干涉模型计算疲劳可靠度,即使只考虑具有不确定性的恒幅循环应力条件下(不涉及复杂载荷历程及相应的疲劳损伤累积问题)的疲劳可靠性问题,也需要知道指定寿命下的疲劳强度分布(用以代替传统干涉模型中的静强度分布)。然而,严格地讲,给定寿命下的疲劳强度分布无法通过实验准确地确定。通过数学推导出给定寿命下的强度分布也有很多障碍。此外,还涉及剩余强度与载荷历史的相关性问题。

由于给定应力水平下的疲劳寿命分布可以由实验得出,人们很早就试图从给定应力水平下的疲劳寿命分布推导出指定寿命下疲劳强度分布。Weibull早在1961年就提出,在 $S-N$ 曲线上的任一点 (S, N) 的疲劳强度破坏概率与疲劳寿命破坏概率相等的猜测。后来, Tanak进一步阐明了这种等同性的观点,并在疲劳强度服从正态分布的前提下,给出了疲劳寿命分布与疲劳强度分布之间的关系。1986年,傅惠民等^[13]论证了 $P-S-N$ 曲线上任一点的疲劳寿命破坏概率与疲劳强度破坏概率在数值上相等,就Weibull分布的情形推导出了疲劳寿命概率分布与疲劳强度概率分布之间的关系式。然而,这种方法的应用常常受到数学困难的限制。近期,有学者针对疲劳可靠性问题,拓展了干涉分析的概念,提出了直接根据应力分布和寿命分布计算可靠度的“分析模型”^[14]和“统计平均算法”^[15,16]。

对于恒幅循环载荷下的疲劳寿命分布规律,已有很多实验研究表明疲劳寿命的分散性与循环应力水平有明显的关系,即随着循环应力水平的降低,疲劳寿命的分散性增大。复杂载荷历程下的疲劳寿命分布规律更加复杂,相关研究工作也较少。关于疲劳寿命概率分布遵循的形式,有研究表明对数正态分布优于两参数Weibull分布。然而,与对数正态分布对应的失效率函数却是一条单峰曲线,似乎暗示对数正态分布并不是描述疲劳寿命的理想分布形式。

关于复杂载荷历程下的疲劳可靠度计算, Kececioglu等^[6]提出过一种称之为“寿命等效-条件可靠度模型”的递推计算方法;谢里阳等提出了一种以剩余寿命分布为根据的损伤等效递推方法^[17]。但总的来说,这类方法都是简单的近似方法,是对“载荷循环数-疲劳寿命”干涉模型的扩展应用,只能应用于一些简单情形。

工程实际中的载荷大多是复杂的随机载荷-时间历程。在复杂载荷历程下的

疲劳可靠性方面,疲劳可靠性分析、计算方法可以划分为以功率谱为基础的方法和以循环计数为基础的方法两大类。

传统上,大多数基于谱密度的方法都假设载荷是一个稳态高斯过程。在这类方法中,不规则载荷历程被表达为一个稳态随机过程,用谱密度来描述。这种方法使用精确或近似分析公式把疲劳损伤与载荷随机过程的谱密度联系起来^[18]。最近有研究者提出了评价稳态宽带非高斯过程载荷下循环分布和疲劳损伤的方法,反映了这个方面的最新发展^[19]。显然,以功率谱为基础的方法难以反映载荷作用顺序对疲劳损伤的影响,对于描述疲劳可靠性问题有明显的局限性。

以载荷历程循环计数为基础的疲劳可靠性分析方法可分为当量载荷法和累积损伤法^[20]。当量载荷法是将复杂载荷历程“等效”转换为恒幅循环载荷,但真正的等效难以做到;通过“损伤程度-损伤临界值”干涉分析计算疲劳可靠度,在概念上没有问题,但损伤临界值与应力水平有关,临界损伤分布难以确定。

有关复杂载荷下的疲劳可靠性分析方法方面的研究还在不断发展。熊峻江和高镇同^[21]、周迅等^[22]、He 等^[23]都研究了用于随机载荷作用下构件疲劳寿命可靠性分析的二维应力-强度干涉模型。胡俏等^[24]提出了复杂随机载荷的“纵向分布”与“横向分布”等概念以及以相对 Mine 法则为基础的疲劳可靠度计算方法。林文强和谢里阳^[25]根据两级载荷下的疲劳剩余寿命的分布规律试验,展示了在非恒幅载荷作用下,不管载荷循环次数多小,即无论是否已有疲劳失效出现,其剩余寿命分布参数的均值和标准差都将发生明显变化;并根据两级循环载荷作用下剩余疲劳寿命分布规律的实验结果,以描述剩余寿命分布变化的数学模型为基础,提出了一个根据复杂载荷历程作用下结构/零件状态变化预测随机载荷下疲劳可靠度的方法,应用这个方法可以根据已知的材料或零件的原始 $P-S-N$ 曲线,借助剩余寿命分布模型和载荷循环数-疲劳寿命干涉分析计算随机载荷作用下的疲劳可靠度,但不能精确反映载荷历程的不确定性。

也有文献从损伤干涉分析的角度计算疲劳可靠度。Karadeniz^[26]在一般意义上阐释了海洋平台结构谱载荷疲劳损伤可靠性计算的不确定性建模问题,详细分析了源于结构的不确定性和源于载荷及环境的不确定性,将损伤的固有不确定性划分为由应力统计特性引起的部分和疲劳现象的损伤模型自身部分。在具体计算疲劳可靠度时,应用的是损伤干涉模型,但并没有提出容许损伤(临界损伤)的概率分布模型,只是提到“容许损伤分散性很大,应该作为一个独立的随机变量处理”。

还有研究者建立了基于剩余强度退化规律的可靠性模型^[27~31]。Petryna 等^[31]针对具有老化失效机制的混凝土结构的疲劳可靠性问题提出了循环载荷条件下的疲劳损伤模型,同时指出疲劳环境下的结构可靠性问题是一个非常复杂的问题,其中涉及诸如损伤与连续介质力学、非线性结构分析与概率可靠性理论等不同学科领域的内容,而目前大多数的研究还都限于相对简单的情形——只考虑一