

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
现代机械工程系列精品教材



Mechanical Reliability Design and
MATLAB Algorithm

机械可靠性设计与 MATLAB算法

叶南海 戴宏亮 © 编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
现代机械工程系列精品教材

机械可靠性设计与 MATLAB算法

Mechanical Reliability Design and MATLAB Algorithm

叶南海 戴宏亮 编著



机械工业出版社

本书系统地阐述了机械可靠性设计的基本理论及其应用技术,引导读者根据工程实际问题建立可靠性设计模型,并应用软件工具实现数值化求解。本书主要内容包括机械可靠性概述、可靠性数学基础、可靠性原理与计算、机械静强度可靠性设计、机械疲劳强度可靠性设计、机械系统可靠性设计、可靠性试验等。每章均通过大量的例题进行讲解说明,以便于读者理解和应用,每章后面均附有习题。

根据工程实际问题建立可靠性设计的数学模型,利用 MATLAB 语言实现求解,是本书的一个显著特色与创新点。读者在掌握可靠性设计模型的数值求解方法之后,则可以腾出大量时间,去开展相关的可靠性设计模型理论研究,从而得到较为先进的科研成果。书中源代码均是作者首次提出,具有原创性,对此感兴趣的读者,欢迎您通过邮箱 fatiguehnu@126.com 与作者进一步交流与探讨。

本书内容重点突出,叙述言简意赅,思路清晰流畅,是作者多年来担任湖南大学本科与研究生“机械可靠性设计”课程教学与科研成果的积淀,在历年使用的讲义初稿基础上提炼总结而成。本书可作为高等工院校机械类专业高年级本科生与研究生的教材和教学参考书,也可供从事机械与车辆工程专业的技术人员使用、参考。

建议:理论授课 32 学时,实验上机操作 10~16 学时。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械可靠性设计与 MATLAB 算法/叶南海,戴宏亮编著. —北京:机械工业出版社,2018.7

“十三五”国家重点出版物出版规划项目 现代机械工程系系列精品教材
ISBN 978-7-111-60327-6

I. ①机… II. ①叶… ②戴… III. ①机械设计-可靠性设计-高等学校-教材②Matlab 软件-高等学校-教材 IV. ①TH122②TP317

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 138855 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:舒恬 责任编辑:舒恬 张丹丹 刘丽敏

责任校对:刘志文 封面设计:张静

责任印制:张博

北京华创印务有限公司印刷

2018 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·14.5 印张·349 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-60327-6

定价:36.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

进入 21 世纪以来，机械工程行业的产品可靠性设计显得日益重要，直接关系到国计民生。传统的机械设计理论方法已经不能满足国家现代化及市场竞争对产品质量的要求。

现代设计方法主要包括优化设计、有限元分析和可靠性计算三个方面，目前正在全球范围内得到广泛应用与发展。机械可靠性设计是近期发展起来并得到推广应用的一门现代设计方法核心课程，它是以提高产品可靠性为目的，以概率论和数理统计为基础，综合运用数学、物理、工程力学、机械工程、人机工程、系统工程、运筹学等多方面的知识来研究机械工程的最优化设计问题。可靠性设计作为产品质量和技术措施的一个重要指标，早已引起世界各主要工业国家的高度重视，因为任何产品和技术，尤其高科技产品、大型设备及超大型设备的制造、尖端技术的发展，都必须要以可靠性技术为基础，科学技术的发展又要求具有高的可靠性。在现代生产中可靠性技术已经贯穿到产品的前期调研、设计、制造、使用、试验、维修保养等产品生命周期的各个环节，统称为可靠性工程。

本书是作者在湖南大学讲授“机械可靠性设计”课程的基础上，结合多年以来的科学研究成果，经过不断补充、修改、完善而形成的。本书可作为高等院校机械类高年级本科生和研究生的教材与参考书，也可供从事机械与车辆工程专业的技术人员使用和参考。

感谢湖南大学机械工程学院各位同仁的大力支持。韩旭教授对本书提出了理论联系实际、学以致用要求；定稿期间姜潮教授提出了宝贵的修改建议；何韵、邓鑫、孙煜晗等研究生完成了部分程序的编写工作，在此表示深深的谢意！

国家自然科学基金项目（NSFC：51375154）对于本书出版给予了资助，谨此致谢！

本书的编写参阅了有关文献，在此对这些文献的作者表示感谢！

由于时间紧迫和水平有限，书中的错误和缺点在所难免，敬请各位有识之士不吝赐教，批评指正。

编著者
于岳麓山下

主要符号说明

- R —可靠度
 F —不可靠度
 $R(t)$ —可靠度函数
 $F(t)$ —失效概率函数或不可靠度函数
 $\lambda(t)$ —失效率函数
MTTF—平均寿命
MTBF—平均无故障工作时间
 θ —测试产品的平均寿命
 $D(t)$, $D(X)$ —寿命方差
 $\sigma(t)$, σ_x —寿命均方差 (标准差)
 $f(x)$ —随机变量密度函数
 $F(x)$ —随机变量分布函数
 \bar{x} —算术平均值
 G —几何平均值
 $E(X)$ —数学期望
 R_{HL} —极差 (最大值与最小值的差)
 C_s —应力变差系数
 C_δ —强度变差系数
 μ —均值
 S —广义工作应力
 δ —广义材料强度
 z_R —可靠度联结系数
 n_R —可靠性安全系数
 σ_b —强度极限
 σ_s —屈服强度
 τ_b —抗剪强度
 μ_δ —强度均值
 σ_δ —强度标准差
 μ_s —工作应力均值
 σ_s —工作应力标准差
 μ_r —半径均值
 σ_R —半径标准差
 G —切变模量
 I_p —轴横截面的极惯性矩

- σ_{-1} —对称循环疲劳极限
 $\sigma_{\sigma_{-1}}$ —对称循环疲劳极限的标准差
 r —应力循环的不对称系数（或半径）
 K_{σ} —有效应力集中系数
 α_{σ} —理论应力集中系数
 q —材料对应力集中的敏感系数
 σ_r —光滑试件的疲劳极限
 σ_{rk} —应力集中试件的疲劳极限
 ε —尺寸系数
 β —表面加工系数
 β' —表面强化系数
 N_0 —疲劳循环基数或寿命基数
 m —根据应力的性质与材料而决定的系数
 σ_m —平均应力
 σ_a —应力幅
 d_i —损伤分量或耗损的疲劳寿命分量
 D —总累积损伤量（总功）
 n_i —试样在应力水平为 S_i 的作用下的工作循环次数
 N_i —在该材料的 $S-N$ 曲线上对应于应力水平 S_i 的破坏循环次数
 R_s —系统可靠度
 ω_i —单元的相对失效率
 λ_{id} —单元的容许失效率



CONTENTS

录

前 言

主要符号说明

第 1 章 机械可靠性概述	1
1.1 可靠性概述	1
1.2 机械可靠性的研究现状与发展趋势	4
1.3 可靠性基本概念	4
1.4 本章小结	12
习题	13
第 2 章 可靠性数学基础	14
2.1 事件、概率及其运算	14
2.2 随机变量分布函数及其数值特征	22
2.3 离散型随机变量分布	26
2.4 连续型随机变量分布	34
2.5 可靠性设计数据分布规律的确定	49
2.6 本章小结	50
习题	50
第 3 章 可靠性原理与计算	53
3.1 机械可靠性设计基础	53
3.2 可靠性设计原理	55
3.3 强度分布的确定	64
3.4 可靠度计算	68
3.5 综合可靠度算例	89
3.6 本章小结	91
习题	91

第 4 章 机械静强度可靠性设计	93
4.1 安全系数与可靠度	93
4.2 设计参数数据的统计处理与计算	99
4.3 机械静强度可靠性设计	101
4.4 本章小结	116
习题	116
第 5 章 机械疲劳强度可靠性设计	118
5.1 疲劳强度设计参数数据的统计处理与计算	118
5.2 $S-N$ 及 $P-S-N$ 曲线	130
5.3 机械零件的疲劳极限分布	150
5.4 机械零件的无限寿命可靠性设计	151
5.5 机械零件的有限寿命可靠性设计	154
5.6 本章小结	169
习题	169
第 6 章 机械系统可靠性设计	172
6.1 基本概念	172
6.2 系统可靠性预测	174
6.3 系统可靠性分配	188
6.4 系统可靠性最优化	194
6.5 本章小结	204
习题	204
第 7 章 可靠性试验	206
7.1 概述	206
7.2 寿命试验结果的统计分析	207
7.3 钢板弹簧物理样机疲劳寿命试验	210
7.4 本章小结	212
习题	213
附录 部分习题参考答案	214
参考文献	221

机械可靠性概述

1.1 可靠性概述

1.1.1 现代设计方法

现代设计方法^[1-3]是随着当代科学技术的飞速发展和计算机技术的广泛应用而在设计领域发展起来的一门新兴的多元交叉学科,以满足市场产品的质量、性能、时间、成本、价格综合效益最优为目的,以计算机辅助设计技术为主体,以知识为依托,以多种科学方法及技术为手段,研究、改进、创造产品和工艺等活动过程所用到的技术和知识群体的总称。

现代设计方法一般包括优化设计、有限元工程分析、可靠性设计三个部分。

1. 优化设计 (Optimization Design)

优化设计是从多种方案中选择最佳方案的设计方法。它以数学中的最优化理论为基础,以计算机为手段,根据设计所追求的性能目标,建立目标函数,在满足给定的各种约束条件下,寻求最优的设计方案^[4-6]。第二次世界大战期间,美国在军事上首先应用了优化技术;1967年,美国的R. L. 福克斯等发表了第一篇机构最优化论文;1970年,C. S. 贝特勒等用几何规划解决了液体动压轴承的优化设计问题后,优化设计在机械设计中得到应用和发展。随着数学理论和计算机技术的进一步发展,优化设计已逐步形成为一门新兴的独立的工程学科,并在生产实践中得到了广泛的应用。通常设计方案可以用一组参数来表示,需要在设计中优选,称为设计变量。如何找到一组最合适的设计变量?在允许的范围内,使得所设计的产品结构合理、性能最好、质量最高、成本最低(即技术经济指标最佳),有市场竞争能力,这就是优化设计所要解决的问题。

2. 有限元工程分析 (Finite Element Analysis, FEA)

有限元工程分析也称有限元分析,是利用数学近似的方法对真实物理系统(几何和载荷工况)进行模拟,用有限数量的未知量去逼近无限未知量的真实系统^[7,8]。它将求解域看成是由许多有限元的小的互连子域组成,对每一单元假定一个合适的(较简单的)近似解,然后推导求解这个域的满足条件(如结构的平衡条件),从而得到问题的解。由于大多数实际问题难以得到准确解,而有限元不仅计算精度高,而且能适应各种复杂形状,因而成为行

之有效的工程分析手段。随着计算机技术的快速发展和普及,有限元方法迅速从结构工程强度分析计算扩展到几乎所有的科学技术领域,成为一种丰富多彩、应用广泛并且实用高效的数值分析方法。

3. 可靠性设计 (Reliability Design)

可靠性设计是保证机械及其零部件满足给定的可靠性指标的一种机械设计方法^[9-12],包括对产品的可靠性进行预计、分配、技术设计、评定等工作。所谓可靠性,则是指产品在给定的时间内和给定的条件下,完成给定功能的能力。它不但直接反映产品各组成部件的质量,而且还影响到整个产品质量性能的优劣。无数实践表明,如果在产品的设计过程中,仅凭经验办事,不注意产品的性能要求,或者没有对产品的设计方案进行严格的、科学的论证,产品的可靠性将无法保证。在产品的全生命周期中,只有在设计阶段采取措施,提高产品的可靠性,才会使企业在激烈的市场竞争中取胜,提高企业的经济效益。

1.1.2 可靠性设计概述

可靠性设计是一门新兴的工程学科,涉及机械、数学、工程力学、计算机软件等学科,需要掌握机械设计、概率论与数理统计、应力-强度理论、损伤模型与疲劳寿命、计算机应用软件等专业的基础知识。进入 21 世纪以来,可靠性设计的重要性不断提高,为了适应市场经济的发展需求,越来越多的企业为了争取顾客而积极提高其产品的可靠性。因为高可靠性的产品在使用过程中不仅能够保证其性能的实现,而且发生故障的次数少,安全性高,给产品赋予了极强的市场竞争力。因此,诸多专家断言:今后产品竞争的焦点就是可靠性。

可靠性是产品的主要质量指标,是今后世界市场产品竞争的焦点,也是今后质量管理的主要发展方向。我国政府明文提出:将发展可靠性技术和提高机电产品可靠性作为振兴机械工业的主要奋斗目标,并把可靠性列入四大共性技术(设计、制造、测试、可靠性)。

那么,可靠性设计与常规设计究竟有何区别?概括地讲:可靠性既是目的(产品质量指标),又是方法或手段,它是以可靠性设计的手段达到可靠性质量指标的目的,这是它区别于其他一切设计方法的主要特点。另外,可靠性设计具有明确的可靠性指标值,常用的产品可靠性指标值有:产品无故障性、耐久性、维修性、可用性和经济性。

常规设计法只按定值变量设计,用安全系数来弥补设计参数的不确定性,这里就有很大的主观性和盲目性,往往使设计的产品尺寸大、材料和能源消耗大、成本高。而可靠性设计则考虑了设计变量诸如材料、载荷、几何尺寸等的分散性和随机性,其实质是如实地把设计变量当作随机变量来处理,使设计结果更加符合客观实际,更准确地评判机械零件强度储备或失效概率。

同时,可靠性设计也是一门多学科交叉的新兴边缘学科,它以概率论和数理统计为基础,是综合运用系统工程学、安全工程学、人机工程学、价值工程学、运筹学、环境工程学、电子工程学、机械工程学、质量管理、计算机技术等综合知识来研究和提高产品的可靠性,从而使产品设计的功能参数更加符合客观实际。

1.1.3 可靠性基本理论

可靠性理论以产品的生命特征作为主要研究对象,具有较强的综合性。它涉及基础科学、技术科学和管理科学等许多领域。著名科学家钱学森曾说过,产品的可靠性是设计出来

的,生产出来的,管理出来的。可靠性理论在其发展的过程中形成了三个主要的领域,包括可靠性数学、可靠性物理和可靠性工程^[9]。

1. 可靠性数学

可靠性数学是进行可靠性研究的重要基础理论,主要是研究解决各种可靠性问题的数学模型和数学方法,属于应用数学的研究范畴。它涉及的范围非常广,包括概率论与数理统计、随机过程、运筹学、拓扑学等数学分支等。随着可靠性理论研究的不断深入,可靠性数学不再是应用现有的数学知识那么简单了,而是发展成了一门相对独立的数学学科。

2. 可靠性物理

可靠性物理又称为失效物理,是用于研究失效的物理原因与数学物理模型及检测方法与纠正措施的可靠性理论。它使可靠性工程的研究方法从数理统计方法发展到以理化分析为基础的失效分析方法,从本质与机理层面来探索产品的不可靠因素,从而为研制、生产高可靠性产品提供科学的依据。美国的 Rome 航空发展中心(RADC)于20世纪60年代初首先进行失效物理的研究,发展失效分析方法和技术,研究各种元器件的失效机制及失效模式,建立各种器件及材料失效的数学及物理模型。

3. 可靠性工程

可靠性工程是对产品的失效及其发生的概率进行统计、分析和对产品进行可靠性设计、预测、试验、评估、检验、控制、维修与失效分析的一门包含工程技术的边缘性工程学科。它的发展与概率论和数理统计、运筹学、系统工程、环境工程、价值工程、人机工程、计算机技术、失效物理学、机械学、电子学等学科有着密切的联系。可靠性工程不仅重视技术,也非常重视管理。可靠性管理包括设计、生产和使用过程的管理,即全过程、全生命周期的管理。具体的可靠性管理包括制定可靠性计划、组织可靠性设计评审、进行可靠性认证、制定可靠性标准、确定可靠性指标等。

可靠性工程的研究对象包括电子和电气、机械和结构、零件和系统、及硬件和软件的可靠性设计、试验和验证等。广义的可靠性还包括维修性和有效性。

可靠性设计是可靠性工程的一个重要分支,为保证产品的可靠性,在可靠性设计的过程中要给定可靠性和维修性的指标,并使其达到最优。

可靠性预测是可靠性设计的重要内容之一,它是预报方法,在设计阶段即从已知失效率数据对零部件和系统的可靠度进行预测与预报。

可靠性优化设计是可靠性设计的另一重要内容,也是当前可靠性研究的重要方向之一,它将组成系统的零部件的可靠度进行合理与优化分配。

机械可靠性设计又称为机械概率设计,是可靠性工程的主要内容之一,是可靠性方法在机械设计中的应用。

1.1.4 机械可靠性设计基本方法

机械可靠性设计主要用来解决工程实际问题。根据可靠性设计原理,建立相应的可靠性设计数学模型,然后进行数值化求解。根据可靠性设计原理求解工程实际问题的一般流程如图1-1所示。

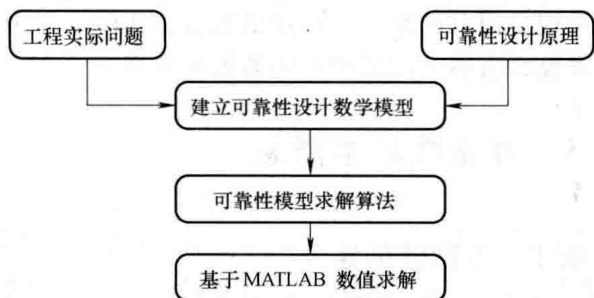


图 1-1 机械可靠性设计工程求解一般流程

1.2 机械可靠性的研究现状与发展趋势

可靠性研究起源于第二次世界大战, 1944 年纳粹德国用 V-2 火箭袭击英国伦敦, 有多枚火箭在起飞时爆炸, 还有一些掉进了英吉利海峡。由此德国提出并运用了串联模型得出火箭系统的可靠度, 这成为第一个运用系统可靠性理论指导的生产活动。当时美国海军统计, 运往远东的航空无线电设备有 60% 不能工作, 在此期间, 因可靠性问题损失飞机达 2.1 万架, 是被击落飞机的 1.5 倍。由此, 引起了人们对可靠性问题的重视, 通过大量的现场调查和故障分析, 研究人员制订了相应的对策, 诞生了可靠性这门学科。

1950 年, 美国军事部门开始系统地进行可靠性研究, 美国国防部 (Department of Defense, DOD) 建立可靠性研究组, 1952 年, 美国国防部、工业部门和有关学术部门联合成立了 AGREE (电子设备可靠性顾问组, Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment) 小组; 1955 年, IEEE (美国电气和电子工程师协会) 建立可靠性与质量控制分会; 1962 年美国举办第一届可靠性与维修性国际年会。在 20 世纪 60 年代后期, 美国约 40% 的大学设置了可靠性工程课程。目前美国等发达国家的可靠性研究工作比较成熟, 标志性成果是阿波罗登月计划成功。除美国外, 苏联、日本、英国、法国、意大利等一些国家, 也相继从 20 世纪 50 年代末或 60 年代初开始了可靠性的研究工作。

从美国 AGREE 发表《军用电子设备可靠性》的“AGREE”报告以来, 可靠性工程的发展已经经历了 60 多年, 在这期间, 航天、核能、计算机、电子系统及大型复杂机械装备等方面的重大技术进展, 都与可靠性工程有密切关系。为提高产品质量, 降低产品成本, 许多国家在可靠性上的投资日益增加, 其中以日本、美国最为显著。

日本的可靠性设计是从美国引进的, 以民用产品为主, 强调实用化, 日本科技联盟是其全国可靠性技术的推广机构。对于机械可靠性设计, 主要依靠固有技术, 通过可靠性试验及使用信息反馈, 不断改进, 达到可靠性增长。可靠性理论的应用主要针对出现问题的部分。

英国国家可靠性分析中心成立了机械可靠性研究小组, 从失效模式、使用环境、故障性质、筛选效果、维修方式、数据积累等七个方面阐明机械可靠性应用的重点, 提出了几种机械系统可靠性的评估方法, 并强调重视数据积累。由欧盟支持的欧洲可靠性数据库协会成立于 1979 年, 其可靠性数据库交换、协作网遍布欧洲各国, 收集了大量机械设备和零部件的可靠性数据, 为进行重大工程规划和设备的研发、风险评估提供了依据。

我国的可靠性工作起步较晚。20 世纪 60 年代初才出现有关可靠性工作的报道, 80 年代初期发展加快, 大量的可靠性工作专著相继出版, 国家也制定了一批可靠性工作的标准, 之后陷入低谷。但近年来, 可靠性工作有些升温, 这次升温的动力主要来源于企业对产品质量的重视。但总的来看, 理论研究多, 实际应用少, 与西方国家相比差距不小, 有些成果尚不能完整、成熟地应用到不同的机械系统中^[13,14]。

1.3 可靠性基本概念

1.3.1 可靠性的定义

狭义的可靠性是指产品在给定的条件下和在给定的时间区间内能完成要求的功能的

能力。

理解这一定义需要注意以下几个要点：

1) “产品”指作为单独研究和分别试验对象的任何元件、零件、部件、设备、机组等，甚至还可以把人的因素也包括在内。在具体使用“产品”这一词时，必须明确其确切含义。

2) “给定条件”一般指的是使用条件、维护条件、环境条件、操作条件，如载荷、温度、压力、湿度、噪声、磨损、腐蚀等。这些条件必须在使用说明书中加以规定，这是判断发生故障时有关责任方的关键。

3) “给定的时间区间”。可靠度是指用于度量产品可靠性的概率，可靠度随着时间的延长而降低，产品只能在一定的时间区间内才能达到目标可靠度。因此，对时间的给定一定要明确。需要指出的是这里所说的时间，不仅仅指的是日历时间，根据产品的不同，还可能是与时间成比例的次数、距离等，如应力循环次数、汽车的行驶里程等。

4) “要求的功能”，首先要明确具体产品的功能是什么，怎样才算是完成要求的功能。产品丧失要求的功能称为失效，对可修复产品也称为故障。怎样才算是失效或故障？有时是很容易判定的，但更多的情况是难以判定的。例如，对于某个齿轮，当齿面发生了某种程度的磨损时，对某些精密或重要的机械来说该齿轮就失效了，而对于某些机械来说，并不影响正常运转，因此就不能算失效。对一些大型设备来说更是如此。因此，必须明确地给定产品的功能。

5) “能力”，只做定性的分析是不够的，应该加以定量的描述。产品的失效或故障具有偶然性，一个确定的产品在某段时间的工作情况并不能很好地反映该种产品可靠性的 高低，应该观察大量该种产品的运转情况并进行合理的处理后才能正确反映该种产品的可靠性。因此，这里所说的能力具有统计学的意义，需要用概率论和数理统计的方法来处理。

如上所述，在讨论产品的可靠性问题时，必须明确对象、使用条件、给定时间、要求的 功能和能力这五个因素。

广义可靠性是指产品在整个生命周期内完成要求的功能的能力，包括狭义可靠性与维 修性。其中维修性是指工作中出现故障或缺陷，但能在给定的条件下，使用所述的程序和资源 实施维修时，产品在给定的使用条件下保持或恢复能完成要求的功能的 状态的能力。由此可见，对于可能维修的产品，除了要 考虑提高其可靠性外，还要考虑提高其维修性；而对于不 可能维修的产品，只考虑提高产品的狭义可靠性即可。

与广义可靠性相对应，广义可靠度是指不发生故障的可靠度（即狭义可靠度）与排除 故障（失效）的维修度。

1.3.2 失效

失效对于可修复的产品通常称为故障，其定义是产品丧失要求的功能，不仅是指要求功 能的完全丧失，也包括要求功能的降低等。失效可按不同的方法进行 分类，具体如下：

1. 按失效原因

(1) 误用失效：未按给定的使用条件使用产品而引起的失效。

(2) 本质失效：由于产品本身固有的弱点而引起的失效，与是否按给定条件使用无关。

(3) 早期失效：由于产品在设计、制造或检验方面的缺陷等原因而引起的产品失效。 一般早期失效可以通过强化试验找出失效原因并加以排除。

(4) 偶然失效：也称为随机失效。产品因为偶然的因素而发生的失效，通常它使产品完全丧失要求的功能。这种失效既不能通过强化试验加以排除，也不能通过采取良好维护措施加以避免，失效在什么时候发生也无法判断。

(5) 耗损失效：产品由于磨损、疲劳、老化、损耗等原因而引起的失效。它往往使产品的输出特性变坏，但仍有一定的工作能力。

2. 按失效程度

(1) 完全失效：安全丧失要求功能的失效。

(2) 部分失效：产品的性能偏离某种给定界限，但尚未完全丧失要求功能的失效。

3. 按失效的时间特性

(1) 突变失效：通过事前的测试或监控不能预测到的失效。

(2) 渐变失效：通过事前的测试或监控就可以预测到的失效，这时，产品的要求功能逐渐减退的，但开始这一过程的时间并不明显。

4. 按失效后果的严重性

(1) 致命失效：导致重大损失的失效。

(2) 严重失效：指能导致复杂产品完成要求功能的能力降低的产品组成给定单元的失效。

(3) 轻度失效：指不致引起复杂产品完成要求功能的能力降低的产品组成给定单元的失效。

5. 按失效的独立性

(1) 独立失效：不是因为其他产品的失效而引起的本产品的失效。

(2) 从属失效：因为其他产品的失效而引起的本产品的失效。

6. 按失效的关联性

(1) 关联失效：在解释试验结果或计算可靠性特征数值时必须计入的失效。

(2) 非关联失效：在解释试验结果或计算可靠性特征数值时不应计入的失效。

为了提高产品的可靠性，只有先全面了解产品的失效原因及其失效的规律，才能采取有效的措施，提高其可靠性。

1.3.3 可靠性的特征量

可靠性的特征量是指表示产品总体可靠性水平高低的各种可靠性指标的总称。它的真值是理论上的数值，实际中是不可知的。根据样本预测值，经过一定的统计分析可以得到特征量的真值估计值。该估计值既可以是点估计，也可以是区间估计。按一定的标准给出具体定义而计算出来的特征量的估计值就称为特征量的预测值（又称为观测值）。

常用的特征量有可靠度、不可靠度（失效概率）、失效率、平均寿命、可靠寿命、中位寿命和特征寿命等。

1. 可靠度与不可靠度

产品在给定的条件下和给定的时间内完成要求的功能的概率称为可靠度，记为 R 。可靠度是时间的函数，故也称为可靠度函数，用 $R(t)$ 表示。产品在给定条件下和给定时间内完成要求的功能，这一事件 E 的概率，记为 $P(E)$ 。

如果用随机变量 t 表示产品从开始工作到发生失效或故障的时间，随机概率密度为

$f(t)$, 则该产品在使用一定时间 t 时的可靠度为

$$R(t) = P(E) = P(T \geq t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (1-1)$$

对于不可修复的产品, 可靠度的预测值 $\hat{R}(t)$ 是指直到给定的时间区间终了为止, 能完成要求功能的产品数 $N_{Ps}(t)$ 与在该区间开始时投入工作的产品数 N_p 之比, 即

$$\hat{R}(t) = \frac{N_{Ps}(t)}{N_p} = 1 - \frac{N_f(t)}{N_p} \quad (1-2)$$

式中 $N_f(t)$ ——使用一定时间 t 时未完成要求功能的产品数。

对于可修复产品而言, 可靠度预测值 $\hat{R}(t)$ 是指一个或多个产品的无故障工作时间达到或超过给定时间的次数与观测时间内无故障工作的总次数之比, 即

$$\hat{R}(t) = \frac{N_{Ts}(t)}{N_T} \quad (1-3)$$

式中 N_T ——观测时间内无故障工作的总次数, 产品的最后一次无故障工作时间若未超过给定时间则不计入;

$N_{Ts}(t)$ ——无故障工作时间达到或超过给定时间的次数。

上述可靠度公式中的时间是从零算起的, 实际使用中常需知道工作过程中某一段执行任务的可靠度, 即需要知道已经工作了 t 时间后再继续工作 Δt 时间的可靠度。

从时间 t 工作到 $t+\Delta t$ 的条件可靠度称为任务可靠度, 记为 $R(t+\Delta t|t)$ 。由条件概率可知

$$R(t+\Delta t|t) = P(T \geq t+\Delta t | T \geq t) = \frac{R(t+\Delta t)}{R(t)} \quad (1-4)$$

根据样本的预测值, 任务可靠度的预测值为

$$\hat{R}(t+\Delta t|t) = \frac{N_s(t+\Delta t)}{N_s(t)} \quad (1-5)$$

式中 N_s 为 N_{Ps} 与 N_{Ts} 的统称。

由可靠度的定义可知, $\hat{R}(t)$ 具有如下性质:

- 1) $\hat{R}(t)$ 为时间的递减函数。
- 2) $0 \leq \hat{R}(t) \leq 1$ 。
- 3) $\hat{R}(0) = 1; \hat{R}(+\infty) = 0$ 。

与可靠度相对应的不可靠度, 表示产品在给定条件下和给定时间内, 不能完成要求功能的能力(概率), 因此又称为失效概率, 记为 F 。失效概率 F 也是时间 t 的函数, 故又称为失效概率函数或不可靠度函数, 并记为 $F(t)$ 。显然, 它与可靠度呈互补关系, 故

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (1-6)$$

$$F(t) = 1 - R(t) = P(T < t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt \quad (1-7)$$

失效概率预测值可按概率互补定理得到, 即

$$\hat{F}(t) = 1 - \hat{R}(t) \quad (1-8)$$

由不可靠度的定义, $\hat{F}(t)$ 具有以下性质:

- 1) $\hat{F}(t)$ 为时间的递增函数。

$$2) 0 \leq \widehat{F}(t) \leq 1。$$

$$3) \widehat{F}(0) = 0; \widehat{F}(+\infty) = 1。$$

例题 1-1 设有 N_p 个产品, 工作一段时间 t 时, 有 $n(t)$ 个产品失效, 则其可靠度和失效概率为多少?

解 根据公式 (1-2) 和 (1-8), 有

$$\begin{cases} \widehat{R}(t) = \frac{N_p - n(t)}{N_p} \\ \widehat{F}(t) = 1 - \frac{N_p - n(t)}{N_p} = \frac{n(t)}{N_p} \end{cases}$$

设 $\widehat{R}(t) = pR$, $\widehat{F}(t) = pF$, 则有 $pR + pF = 1$, 且有 $0 \leq \widehat{R}(t) \leq 1$, $0 \leq \widehat{F}(t) \leq 1$, 并且不难发现

$$\begin{cases} \widehat{R}(t) = \widehat{R}(0) = 1 \\ \widehat{F}(t) = \widehat{F}(0) = 0 \\ \widehat{R}(t) = \widehat{R}(+\infty) = 0 \\ \widehat{F}(t) = \widehat{F}(+\infty) = 1 \end{cases}$$

图 1-2 是广义的可靠度与失效概率 ($R(t), F(t)$) 之间的关系曲线。

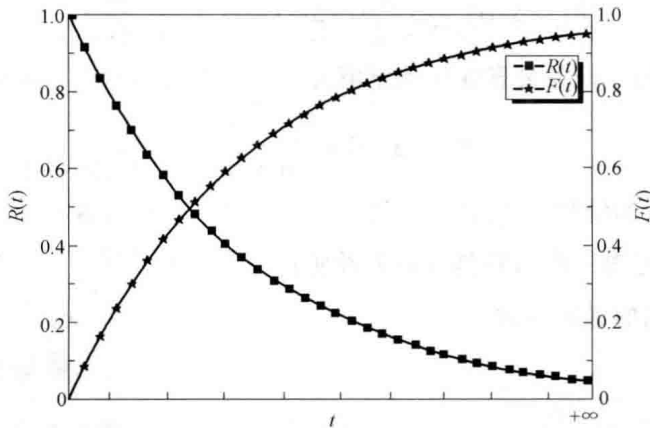


图 1-2 可靠度与失效概率的关系曲线

2. 失效率

失效率又称为故障率, 是工作某一段时间 t 时尚未失效的产品, 在之后的下一个单位时间内发生失效的概率, 一般用 λ 表示, 它也是时间 t 的函数, 故记为 $\lambda(t)$, 称为失效率函数。失效率的预测值 $\widehat{\lambda}(t)$ 是在 t 以后的下一个单位时间内发生失效的产品数目与工作到该时刻尚未失效的产品数目之比, 即

$$\widehat{\lambda}(t) = \frac{\Delta N_{Pf}(t)}{N_{Ps}(t) \Delta t} \quad (1-9)$$

设有 N_p 个产品, 从 $t=0$ 开始工作, 到 t 时的产品失效数为 $n(t)$, 而所经过 Δt 到 $t+\Delta t$