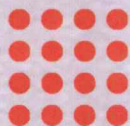




普通高等学校“十一五”国家级规划教材

 TEXTBOOK
FOR HIGHER
DUPLICATION

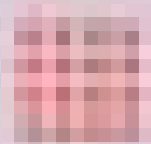


系统可靠性 设计与分析

主 编 宋保维

XITONG KEKAOXING SHEJI YU FENXI

西北工业大学出版社



系统可靠性

设计与分析

作者姓名

出版信息



系统可靠性设计与分析

主编 宋保维
编者 宋保维 毛昭勇
李 正 王 鹏

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书系统地论述了系统可靠性设计与分析的基本原理、方法及数学模型,提供了大量的设计资料和设计实例,充分反映了国内外有关可靠性的最新研究成果,如模糊故障树分析、机械疲劳强度可靠性设计、机械磨损零件可靠性设计、机械腐蚀零件可靠性设计、结构模糊可靠性优化设计基本模型、系统存储可靠性等。全书共 10 章,包括系统可靠性的基本概念、不可修复系统和可修复系统可靠性、可靠性分配与预计、故障树分析、电子产品可靠性设计与分析、机械可靠性设计原理、机械可靠性优化设计、可靠性试验与综合评定、系统储存可靠性等内容。本书内容阐述循序渐进,由浅入深,理论联系实际,具有较强的系统性和逻辑性。

本书可作为船舶与海洋工程、机械电子工程、机械设计制造及其自动化、武器系统与发射工程等专业的本科生和研究生的教材,还可作为航空、航天、船舶、机电工程等领域的工程技术人员的参考书,以及普及可靠性知识教育的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

系统可靠性设计与分析/宋保维主编;宋保维等编. —西安:西北工业大学出版社,2008. 12

ISBN 978 - 7 - 5612 - 2478 - 6

I. 系… II. ①宋…②宋… III. ①系统可靠性—系统设计②系统可靠性—系统评价
IV. N945. 17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 160498 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西向阳印务有限公司

开 本:787 mm×960 mm 1/16

印 张:21.75

字 数:476 千字

版 次:2008 年 12 月第 1 版 2008 年 12 月第 1 次印刷

定 价:34.00 元

前 言

本书是“十一五”国家级规划教材,是以西北工业大学出版社出版的教材《系统可靠性设计与分析》(作者:宋保维,出版时间:2000年8月)为基础编写而成的。原教材于2002年获得教育部优秀教材一等奖,曾在船舶与海洋工程、机械电子工程、机械设计制造及其自动化、武器系统与发射工程等专业的本科生和研究生教学中使用多年,并被中国船舶重工集团公司第705研究所、874厂、884厂、750试验场、海军等单位的科技工作者作为参考书,社会效益显著。本教材补充了模糊故障树分析、电子产品可靠性设计与分析、机械疲劳强度可靠性设计、机械磨损零件可靠性设计、机械腐蚀零件可靠性设计、结构模糊可靠性优化设计基本模型、系统储存可靠性以及水下航行器典型零部件的可靠性优化设计等最新研究成果,较为全面地讲述了系统可靠性设计与分析的基本概念、理论与方法及工程应用技术。

全书共10章。第1章介绍了系统可靠性的基本概念、定义、特征量及常用的概率分布;第2章至第5章讲述了不可修复系统和可修复系统可靠性、系统可靠性分配与预计、故障树分析等基本理论与方法;第6章讲述了电子产品可靠性设计与分析方法;第7章讲述了机械可靠性设计的基本原理;第8章讲述了先进而实用的机械可靠性优化设计原理和具体设计方法,给出了模糊可靠性优化设计模型和水下航行器典型结构的可靠性优化设计实例;第9章讲述可靠性常用的试验与综合评定方法;第10章讲述了储存可靠性基本概念以及评定与预计方法。本书在编写中,坚持“理论联系实际、便于工程应用”的原则,强调物理概念和几何解释,并注重反映国内外近几年在可靠性与优化设计方面的新发展、新成果。为了更好地引导读者掌握本书的主要理论,针对内容中的重点和难点,精心编写了例题和习题,以培养学生解决工程实际问题的能力。

本书由宋保维教授任主编。其中,宋保维教授编写了第1~4,7~9章及附表,毛昭勇博士编写了第5,6章,李正博士编写了第10章,王鹏博士参与编写了第7章。本书由武汉海军工程大学博士生导师王树宗教授主审,并提出了许多宝贵意见,在此表示感谢。

由于编者水平有限,不足之处在所难免,希望读者批评指正。。

编 者

2007年9月

目 录

第 1 章 可靠性概论	1
1.1 可靠性基本概念	1
1.2 模糊可靠性的基本概念与特征量.....	14
1.3 可靠性中常用的概率分布.....	20
习题 1	41
第 2 章 不可修复系统可靠性	43
2.1 概述.....	43
2.2 串联系统.....	45
2.3 并联系统.....	46
2.4 混联系统.....	49
2.5 表决系统.....	51
2.6 旁联系统.....	53
习题 2	59
第 3 章 可修复系统可靠性	61
3.1 概述.....	61
3.2 马尔柯夫过程.....	64
3.3 典型可修复系统可用度.....	74
3.4 系统预防维修间隔期的确定.....	84
习题 3	87
第 4 章 可靠性分配与预计	89
4.1 概述.....	89
4.2 可靠性分配.....	90

4.3 可靠性预计	103
习题 4	110
第 5 章 故障树分析	112
5.1 概述	112
5.2 建立故障树的方法	115
5.3 故障树的定性分析	120
5.4 故障树的定量分析	128
5.5 模糊故障树分析	133
习题 5	137
第 6 章 电子产品可靠性设计与分析	139
6.1 概述	139
6.2 电子元器件的选用	139
6.3 电磁兼容性设计	148
6.4 热设计	153
6.5 降额设计	157
6.6 冗余(余度)设计	159
6.7 潜在通路分析	167
6.8 容差分析	171
6.9 耐环境设计技术	179
习题 6	185
第 7 章 机械可靠性设计原理	187
7.1 概述	187
7.2 机械零件可靠度计算	191
7.3 机械零件模糊可靠度计算	200
7.4 机械静强度的可靠性设计	204
7.5 机械疲劳强度可靠性设计	214
7.6 机械磨损零件可靠性设计	218
7.7 机械腐蚀零件可靠性设计	224
7.8 机械结构稳健可靠性设计	225
习题 7	228

第 8 章 机械可靠性优化设计	230
8.1 概述	230
8.2 机械可靠性优化设计基本模型	231
8.3 结构模糊可靠性优化设计的基本模型	232
8.4 水下航行器典型零部件的可靠性优化设计	236
习题 8	261
第 9 章 可靠性试验与综合评定	262
9.1 概述	262
9.2 环境应力筛选试验	263
9.3 可靠性增长试验	267
9.4 可靠性统计试验	275
9.5 系统可靠性综合评定	287
习题 9	295
第 10 章 系统储存可靠性	297
10.1 概述.....	297
10.2 储存环境因素.....	299
10.3 系统储存可靠性评定方法.....	302
10.4 系统储存可靠性预计方法.....	317
10.5 系统最佳检测周期.....	321
习题 10	328
附表 标准正态分布表	330
参考文献	334

第 1 章 可靠性概论

1.1 可靠性基本概念

1.1.1 可靠性基本概念

可靠性——作为衡量产品质量的一个重要指标,早已不是一个新的概念。长期以来,重视产品信誉的厂家都在追求其产品具有良好的可靠性,因为只有可靠性好的产品,才能长期发挥其使用性能而受到用户的欢迎。不仅如此,有些产品如汽车、轮船和飞机,如果其关键零部件不可靠,不仅会给用户带来不便,而且会耽误时间,推迟日程,造成经济损失,甚至还可能直接危及使用者的生命安全。像美国“挑战者”号航天飞机、苏联切尔诺贝利核电站等发生的可靠性事故所引起的严重后果,都足以说明因产品的可靠性差会引起一系列严重问题,甚至会危及国家的荣誉和安全。而 1957 年苏联第一颗人造卫星升天,1969 年美国阿波罗 11 号宇宙飞船载人登月等可靠性技术成功的典范,不仅为其国家带来荣耀,而且说明了高科技的发展要以可靠性技术为基础,科学技术的发展要求高的可靠性。

人们早期对“可靠性”这一概念仅仅从定性方面去理解,而没有数值量度。为了更好地表述可靠性的准确含义,不能只从定性方面来评价它,而应有定量的尺度来衡量它。在第二次世界大战后期,德国火箭专家 R. Lusser 首先提出用概率乘积法则,将系统的可靠度看成是其各子系统的可靠度乘积,从而算得 V-E 型火箭诱导装置的可靠度为 75%,首次定量地表达了产品的可靠性。从 20 世纪 50 年代初期开始,在可靠性的测定中更多地引进了统计方法和概率概念以后,定量的可靠性才得到广泛应用,可靠性问题才作为一门新的学科被系统地加以研究。

美国对可靠性的研究始于第二次世界大战时期,当时雷达系统已得到发展而电子元件却屡出故障。因此,早期的可靠性研究,重点放在故障占大半的电子管方面,不仅重视其电气性能,而且重视其耐振、耐冲击等可靠性方面的研究。

美国对于机械可靠性的研究,始于20世纪60年代初期,其发展与航天计划有关。当时在航天方面由于机械故障引起的事故多,损失大,于是美国宇航局(NASA)从1965年起开始进行机械可靠性研究。例如,用超载负荷进行机械产品的可靠性试验验证;在随机动载荷下研究机械结构和零件的可靠性;将预先给定的可靠度目标值直接落实到应力分布和强度分布都随时间变化的机械零件的设计中去;等等。

日本在1956年从美国引进可靠性技术,并将可靠性技术推广应用到民用工业部门,取得了很大成功,大大地提高了其产品的可靠度,使其高可靠性产品,例如汽车、电视、照相机、收录机、电冰箱等畅销全球,带来了巨大的经济效益。日本人曾预见到今后产品竞争的焦点在于可靠性。

英国于1962年出版了《可靠性与微电子学》(Reliability and Microelectronics)杂志。法国国立通信研究所也在这一年成立了“可靠性中心”,进行数据的收集与分析,并于1963年出版了《可靠性》杂志。苏联在20世纪50年代就开始了可靠性理论及应用的研究,1964年,当时的苏联及东欧各国在匈牙利召开了第一届可靠性学术会议。

国际电子技术委员会(IEC)于1965年设立了可靠性技术委员会,1977年又改名为可靠性与可维修性技术委员会。它在可靠性方面的定义、用语、书写方法、可靠性管理、数据收集等方面进行了国际间的协调工作。

20世纪60年代以来,空间科学和宇航技术的发展提高了可靠性的研究水平,扩展了其研究范围。对可靠性的研究,已经由电子、航空、宇航、核能等尖端工业部门扩展到电机与电力系统、机械、动力、土木等一般产业部门,扩展到工业产品的各个领域。当今,提高产品的可靠性已经成为提高产品质量的关键。今后只有那些高可靠性的产品及追求高可靠性产品的企业,才能在日益激烈的竞争环境中生存下来。不仅如此,国外还把对产品可靠性的研究工作提高到节约资源和能源的高度上来认识。这不仅是因为高可靠性产品的使用期长,而且通过可靠性设计,可以有效地利用材料,减少加工工时,获得体积小、重量轻的产品。

在我国,最早是由电子工业部门开始开展可靠性工作的,在20世纪60年代初进行了有关可靠性评估的开拓性工作。20世纪70年代初,航天部门首先提出了电子元器件必须经过严格筛选。20世纪70年代中期,由于中日海底电缆工程的需要,提出高可靠性元器件验证试验的研究,促进了我国可靠性数学的发展。从1984年开始,在国防科工委的统一领导下,结合中国国情并积极汲取国外的先进技术,组织制定了一系列关于可靠性的基础规定和标准。1985年10月国防科工委颁发的《航空技术装备寿命与可靠性工作暂行规定》,是我国航空工业的可靠性工程全面进入工程实践和系统发展阶段的一个标志。1987年5月,国务院、中央军委颁发《军工产品质量管理条例》,明确了在产品研制中要运用可靠性技术;1987年12月和1988年3月先后颁发的国家军用标准GJB 368—87《装备维修性通用规范》和GJB 450—88《装备研制与生产的可靠性通用大纲》,可以说是目前我国军工产品可靠性技术具有代表性的基础标准。

与此同时,各有关工业部门、军兵种越来越重视可靠性管理,加强可靠性信息数据和学术

交流活动。全国军用电子设备可靠性数据交换网的成立,以及全国性和专业系统性的各级可靠性学会的相继成立,进一步促进了我国可靠性理论与工程研究的深入展开。

在现代生产中,可靠性技术已贯穿于产品的初期研制、设计、制造、试验、使用、运输、保管及维修保养等各个环节。

从纯经济的观点来讲,为了减少维修费用,提高产品的利用率,高可靠性是非常必要的。但也不是可靠性最好时总的消耗费用一定最低,还有产品的制造成本问题,因此需要综合考虑,优化选择,以找出使总费用最低的最佳可靠度。

利用概率论的方法可把产品发生故障的规律作为随机现象来研究。因此,通常所说的可靠度,一般不是指某一特定具体产品的可靠程度,而是针对该种型号产品总体的可靠程度而言。当然,就一些单个的产品而言,如果能在其长期运行的条件下,观测其故障规律,则不仅能够估计出这些单个产品的可靠性,也能估计出该品种产品总体的可靠性。

可靠性理论在其发展过程中形成了3个主要领域,或称3个独立学科。

(1) 可靠性数学:可靠性数学是可靠性研究中最重要基础理论之一,主要研究与解决各种可靠性问题的数学方法和数学模型,研究可靠性的定量规律。它属于应用数学范畴,涉及概率论、数理统计、随机过程、运筹学及拓扑学等数学分支,主要应用于可靠性的数据收集、数据分析、系统设计及寿命试验等方面。

(2) 可靠性物理:可靠性物理又称失效物理,是研究失效的物理原因与数学物理模型、检测方法与纠正措施的一门可靠性理论。它使可靠性工程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。它从本质上、从机理方面探究产品的不可靠因素,从而为研究、生产高可靠性产品提供科学的依据。

(3) 可靠性工程:可靠性工程是对产品(零部件,元器件,设备或系统)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、可靠性预计、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的一门包含了许多工程技术的边缘性工程学科。它是立足于系统工程方法,运用概率论与数理统计等数学工具(属可靠性数学),对产品的可靠性问题进行定量的分析;采用失效分析方法(可靠性物理)和逻辑推理对产品故障进行研究,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,将产品的可靠性提高到满意程度的一门学科。它包括了对产品可靠性进行工作的全过程,即从对零部件和系统等产品的可靠性方面的数据进行收集与分析做起,对失效机理进行研究,在这一基础上对产品进行可靠性设计;采用能确保可靠性的制造工艺进行制造;完善质量管理与质量检验以保证产品的可靠性;进行可靠性试验来证实和评价产品的可靠性;以合理的包装和运输方式来保持产品的可靠性;指导用户正确使用产品、提供优良的维修保养和社会服务来维持产品的可靠性。总之,可靠性工程包括了对零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。

在可靠性工程中,很重视对现场使用的数据和试验数据的收集与交换。许多国家都有全

国性的数据收集与交换组织,建有各种数据库。因为数据是可靠性设计和可靠性研究的基础。在整个可靠性工程中,都是通过可靠性数据和信息反馈来改进产品的可靠性的。

可靠性设计是可靠性工程的一个重要分支,因为产品的可靠性在很大程度上取决于设计的正确性。在可靠性设计中要规定可靠性和维修性的指标,并使其达到最优。

可靠性预计是可靠性设计的重要内容之一,它是一种预报方法,在设计阶段即从所得到的失效率数据预报零部件和系统实际可能达到的可靠度,预计这些零部件和系统在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的概率。在设备设计的初期,及时完成可靠性预计工作,可以了解该设备中各零部件之间可靠度的相互关系,找出提高整个设备可靠度的有效途径。

可靠性设计的另一重要内容是可靠性的分配。它是将系统规定的容许失效概率合理地分配给该系统的零部件。在可靠性设计中采用最优化方法进行系统的可靠性分配,是当前可靠性研究的重要方向之一。

在可靠性设计中有时采用冗余设计法。冗余设计法是在系统中配置做储备用的零件或设备,当原用零件或设备出现故障时,立即替换储备件。**并联冗余即并行工作储备法**,是使完成同一职能的一批零部件或设备同时(并行)工作,且当其中某个或部分失效时,其余的仍能保证系统的正常工作。在系统设计中采用冗余设计法,可成倍提高系统的可靠度。对系统储备的分配,也广泛采用最优化方法。

由于在不同领域中可靠性工程所处理的具体问题有所不同,因此其内容也会有所差异,但都是以系统、综合的方法,以长远的眼光来研究问题,不仅重视技术,也重视管理,其目的是为取得系统的最大经济效益和保证运行的安全可靠。

机械可靠性设计又称**机械概率设计**,是可靠性工程学的主要内容之一,是可靠性工程学在机械设计中的应用。

由于对机械破坏机理认识的日益深化和机械故障概率资料的逐步累积,以及概率与统计在机械零件的应力与强度分析方面的应用,等等,都为机械可靠性设计提供了理论基础和实践经验,使可靠性理论的应用扩展到结构设计、强度分析、疲劳研究等方面。

在采用传统的机械设计方法进行设计时,不能预测零部件在运行中被破坏的概率,一是因为在设计中所采用的载荷、材料性能等数据,是它们的平均值,而没有考虑数据的分散性;二是因为为了保证机械的可靠性,往往对计算载荷、选用的强度等分别乘以各种因数,例如载荷因数、尺寸因数等,最后还要考虑安全因数。这种传统方法是人们对这些因素的随机变化所做的经验估计。同时表明由于对这些随机变化情况无法进行精确计算,只好将机械的尺寸、重量等作为经验,但又不能精确地放大。即使如此,将传统的机械设计方法,用于某些高可靠性要求的产品设计上,仍不能令人放心。相比之下,采用机械可靠性设计方法,所得结构则更接近于实际情况。

在机械可靠性设计中,将载荷、材料性能与强度及零部件的尺寸,都视为属于某种概率分布的统计量,应用概率与数理统计理论及强度理论,求出在给定设计条件下零部件不产生破坏的概率公式,应用这些公式,就可以在给定可靠度下求出零部件的尺寸,或给定其尺寸确定其

安全寿命。

机械可靠性设计的特点:采用了可靠度或其他可靠性指标,来确保结构可靠性,而传统机械设计则是用安全因数来保证结构可靠性的。因此,机械可靠性设计方法对失效可能性的认识和估计都比较合理。机械可靠性设计除引入可靠度或其他可靠性指标外,还对结构的安全因数作了统计分析,这样得出的安全因数比传统机械设计中的安全因数更符合实际,因为它已经是与可靠度相联系的安全因数了。从对结构安全性的评价来看,传统机械设计只有安全因数这样一个指标,而机械可靠性设计则有可靠度和安全因数(指在一定可靠度下)两个指标。

最早的可靠性定义是由美国 AGREE 在 1957 年的报告中提出的。1966 年美国的 MIL—STD—721B 又较正规地给出了传统的或经典的可靠性定义,即“产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力”。它为世界各国的标准所引证,我国的 GB 3187—82 给出的可靠性定义也与此相同。但在实际应用中人们已经感到了上述定义的局限性,因为它只反映了任务成功的能力。于是美国在 1980 年颁发的 MIL—STD—785B 中将可靠性定义分为任务可靠性和基本可靠性两部分。**任务可靠性**的定义为:“产品在规定的任务剖面内完成规定功能的能力”,它反映了产品在执行任务时成功的概率,它只统计危及任务成功的致命故障。**基本可靠性**的定义为:“产品在规定条件下,无故障的持续时间或概率”,它包括了全寿命单位的全部故障,它能反映产品维修人力和后勤保障等要求。例如 MTBF(平均无故障工作时间),MCBF(平均故障间隔的使用次数)。把可靠性概念分为两种不同用途的概念,是对可靠性工作实践经验的总结和对这一问题认识的深化。这无疑是一个新的重要发展。我国 1988 年颁布的军用标准 GJB 450—88 就引用了这两种可靠性定义。

产品的可靠性可用其可靠度(Reliability)来衡量。在上述可靠性的定义中,含有以下因素:

(1) 对象:可靠性问题的研究对象是产品,它是泛指,可以是元件、组件、零件、部件、机器、设备,甚至整个系统。研究可靠性问题时首先要明确对象。不仅要确定具体的产品,而且还应明确它的内容和性质。如果研究对象是一个系统,则不仅包括硬件,而且也包括软件和人判断与操作等因素在内。需要以人-机系统的观点去观察和分析问题。

(2) 使用条件:研究对象的使用条件包括运输条件、储存条件、使用时的环境条件(如温度、压力、湿度、载荷、振动、腐蚀、磨损等等)、使用方法、维修水平、操作水平以及运输、储存与运行条件,这些使用条件对其可靠性都会有很大影响。

(3) 规定时间:与可靠性关系非常密切的是关于使用期限的规定。因为可靠度是一个有时间性的定义。对时间的要求一定要明确。时间可以是区间 $(0, t)$,也可以是区间 (t_1, t_2) 。有时对某些产品给出相当于时间的一些其他指标可能会更明确、更恰当些,例如对汽车的可靠性可规定行驶里程(距离);有些产品的可靠性则规定周期、次数;等等。

(4) 规定功能:研究可靠性要明确产品的规定功能的内容。一般来说,所谓“完成规定功能”,是指在规定的使用条件下能维持所规定的正常工作而不失效(不发生故障),即研究对象

(产品)能在规定的功能参数下正常运行。应注意,“失效”不一定仅仅指产品不能工作,因为有些产品虽然还能工作,但由于其功能参数已漂移到规定界限之外了,即不能按规定正常工作,也视为失效。要弄清该产品的功能是什么,其失效或故障(丧失规定功能)又是怎样定义的。

还要注意产品的功能有主次之分,故障也有主次之分。有时次要的故障不影响主要功能,因而也不影响完成主要功能的可靠性。

(5) 概率:“可靠度”是可靠性的概率表示,把概念性的可靠性用具体的数学形式——概率——表示,这就是可靠性技术发展的出发点。这是因为用概率来定义可靠度后,对元件、组件、零件、部件、机器、设备、系统等产品的可靠程度的测定、比较、评价、选择等等才有了共同的基础,对产品可靠性方面的质量管理才有了保证。

如上所述,讨论产品的可靠性问题时,必须明确对象、使用条件、使用期限、规定的功能等因素,而用概率来度量产品的可靠性时就是产品的可靠度。可靠性定量表示的另一特点是其随机性。因此,广泛采用概率论和数理统计方法来对产品的可靠性进行定量计算。

产品运行时的可靠性,称为**工作可靠性**(Operational Reliability)。它包含了产品制造和使用两方面的因素,且分别用固有可靠性和使用可靠性来反映。

固有可靠性(Inherent Reliability),即在生产过程中已经确立了的可靠性。它是产品内在的可靠性,是生产厂在模拟实际工作条件的标准环境下,对产品进行检测并给以保证的可靠性。它与产品的材料、设计与制造工艺及检验精度等有关。

使用可靠性(Use Reliability),与产品的使用条件密切相关,受到使用环境、操作水平、保养与维修等因素的影响。使用者的素质对使用可靠性影响很大。

对于实行维修制度的产品,一旦发生故障或失效,总是修复后再使用。因此,对于这类产品不发生故障或可靠性好固然很重要,发生故障或失效后能迅速修复以维持良好而完善的状态也很重要。产品的这种易于维修的性能,通常称为产品的维修性。

维修性和维修度的提出,使得可靠性与可靠度又有广义与狭义之分。

广义可靠性(Generalized Reliability),是指产品在其整个寿命期限内完成规定功能的能力。它包括可靠性(即狭义可靠性)与维修性。由此可见,广义可靠性对于可能维修的产品和不可能维修的产品有不同的意义。对于可能维修的产品来说,除了要考虑提高其可靠性外,还应考虑提高其维修性;而对于不可能维修的产品来说,由于不存在维修的问题,因此只须考虑提高其可靠性即可。

与广义可靠性相对应,不发生故障的可靠度(即狭义可靠度)与排除故障(或失效)的维修度合称为**广义可靠度**。

如上所述,可靠性与维修性都是相对失效(或故障)而言。不言而喻,明确失效(或故障)的定义,研究失效(或故障)的类型和原因,对研究可靠性和维修性及广义可靠性等都很重要。

对于可修复的产品,失效(Failure)通常称为故障,其定义为产品丧失规定的功能。这不仅指规定功能的完全丧失,亦包括规定功能的降低等。

1.1.2 可靠性特征量

一、可靠度与不可靠度

可靠度(Reliability)的定义为产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的概率,通常以 R 表示。考虑到它是时间的函数,又可表示为 $R = R(t)$,称为**可靠度函数**。就概率分布而言,又称之为**可靠度分布函数**,且是累积分布函数。它表示在规定的使用条件下和规定的时间内,无故障地发挥规定功能而工作的产品占全部工作产品(累积起来)的百分率。因此,可靠度 R 或 $R(t)$ 的取值范围是

$$0 \leq R(t) \leq 1 \quad (1.1)$$

若“产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能”的这一事件 E 的概率用 $P(E)$ 表示,则可靠度作为描述产品正常工作时间(寿命)这一随机变量 T 的概率分布可写成

$$R(t) = P(E) = P(T \geq t) \quad , \quad 0 \leq t < \infty \quad (1.2)$$

与可靠度相对应的有**不可靠度**,表示产品在规定的条件下和规定的时间内不能完成规定功能的概率,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 $F(t)$ 。它也是累积分布函数,故又称为累积失效概率。显然,它与可靠度呈互补关系,即

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (1.3)$$

$$F(t) = 1 - R(t) = P(T < t) \quad (1.4)$$

由定义可知,可靠度与不可靠度都是对一定时间而言的,若所指时间不同,则同一产品的可靠度值也就不同。

设有 N 个同一型号的产品,开始工作($t = 0$)后到任意时刻 t 时,有 $n(t)$ 个失效,则

$$R(t) \approx \frac{N - n(t)}{N} \quad (1.5)$$

$$F(t) \approx \frac{n(t)}{N} \quad (1.6)$$

产品开始工作($t = 0$)时,都是无故障的,故有 $n(t) = n(0) = 0$, $R(t) = R(0) = 1$, $F(t) = F(0) = 0$ 。随着工作时间的增加,产品的失效数不断增多,可靠度就相应地降低。当产品的工作时间 t 趋向于无穷大时,所有产品不管其寿命有多长,最后总要失效的。因此, $n(t) = n(\infty) = N$,故 $R(t) = R(\infty) = 0$, $F(t) = F(\infty) = 1$ 。即可靠度函数 $R(t)$ 在 $[0, +\infty)$ 时间区间内为递减函数,而 $F(t)$ 为递增函数,如图1.1(a)所示, $F(t)$ 与 $R(t)$ 的形状正好相反。

对不可靠度函数 $F(t)$ 求导,则得**失效密度函数** $f(t)$,即

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (1.7)$$

失效密度函数又称为**故障密度函数**。在可靠度函数与不可靠度函数为如图1.1(a)所示的情况下,失效密度函数 $f(t)$ 如图1.1(b)所示。

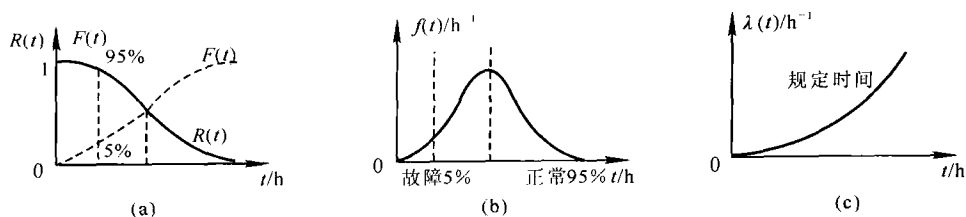


图 1.1 可靠度函数、失效密度函数与失效率(当失效率递增时) 随时间变化关系图

由式(1.7) 可得

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (1.8)$$

将式(1.8) 代入式(1.3), 得

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (1.9)$$

图 1.1 给出了上述表达式的几何描述。由图可见, 不可靠度函数 $F(t)$ 为累积失效密度函数。

二、失效率

失效率(Failure Rate) 又称为**故障率**, 其定义为工作到某时刻 t 时尚未失效(或故障) 的产品, 在 t 时刻以后的下一个单位时间内发生失效(或故障) 的概率。失效率的观测值即为在某时刻 t 以后的下一个单位时间内失效的产品数与工作到该时刻尚未失效的产品数之比。

设有 N 个产品, 从 $t = 0$ 开始工作, 到时刻 t 时产品的失效数为 $n(t)$, 而到时刻 $t + \Delta t$ 时产品的失效数为 $n(t + \Delta t)$, 即在 $[t, t + \Delta t]$ 时间区间内有 $\Delta n(t) = n(t + \Delta t) - n(t)$ 个产品失效, 则定义该产品在 $[t, t + \Delta t]$ 时间区间内的平均失效率为

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{[N - n(t)]\Delta t} = \frac{\Delta n(t)}{[N - n(t)]\Delta t} \quad (1.10)$$

而当产品数 $N \rightarrow \infty$, 时间区间 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 有**瞬时失效率**或简称**失效率(故障率)** 的表达式为

$$\lambda(t) = \lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ \Delta t \rightarrow 0}} \bar{\lambda}(t) = \lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ \Delta t \rightarrow 0}} \frac{\Delta n(t)}{[N - n(t)]\Delta t} \quad (1.11)$$

因为失效率 $\lambda(t)$ 是时间 t 的函数, 故又称 $\lambda(t)$ 为**失效率函数**, 也称为**风险函数**(记作 $h(t)$)。

平均失效率的积分式表示为

$$m(t) = \frac{1}{t} \int_0^t \lambda(t) dt \quad (1.12)$$

对于一般寿命问题, 若寿命分布的定义范围为 $t \geq r$, 而 $r \neq 0$, 则将式(1.12) 改写为式

(1.13) 就更适宜些。

$$m^*(t) = \frac{1}{t-r} \int_0^t \lambda(t) dt \quad (1.13)$$

积累失效率可定义为

$$M(t) = t m(t) = \int_0^t \lambda(t) dt \quad (1.14)$$

失效率是产品可靠性常用的数量特征之一,失效率愈高,则可靠性愈低。

失效率的单位多用时间的倒数表示,如用每小时 h^{-1} 或每千小时的百分数 $\%/ (1\ 000\ \text{h})$ 表示。对于可靠度高、失效率低的产品,则采用 $\text{Fit}(\text{Failure Unit}) = 10^{-9}\ \text{h}^{-1} = 10^{-6}/1\ 000\ \text{h}$ 为单位。有时不用时间的倒数而用与其相当的“动作次数”“转数”“距离”等的倒数更适宜些。

例 1.1 今有某种零件 100 个,已工作了 6 a,工作满 5 a 时共有 3 个失效,工作满 6 a 时共有 6 个失效。试计算这批零件工作满 5 a 时的失效率。

解 按式(1.10),时间以年(a)为单位,则 $\Delta t = 1\ \text{a}$,有

$$\bar{\lambda}(5) = \frac{\Delta n(t)}{[N - n(t)]\Delta t} = \frac{6 - 3}{(100 - 3) \times 1} = 0.030\ 9 = (3.09\%) / \text{a}$$

如果时间以小时为单位,则 $\Delta t = 1\ \text{a} = 365 \times 24\ \text{h} = 8.76 \times 10^3\ \text{h}$,因此

$$\bar{\lambda}(5) = \frac{6 - 3}{(100 - 3) \times 8.76 \times 10^3} = (0.35\%) / (10^3\ \text{h}) = 3.5 \times 10^3\ \text{Fit}$$

如果对这批零件测得多年的失效数据并按上述方法求出 $\bar{\lambda}(1), \bar{\lambda}(2), \bar{\lambda}(3), \dots$,则可绘出 $\bar{\lambda}(t)$ 随时间 t 的变化曲线,称为该批零件的失效率曲线。

失效率 $\lambda(t)$ 是系统、机器、设备等产品一直到某一时刻 t 为止尚未发生故障的可靠度 $R(t)$ 在下一单位时间内可能发生故障的条件概率。换句话说, $\lambda(t)$ 表示在某段时间 t 内圆满地工作的百分率 $R(t)$ 在下一个瞬间将以何种比率发生失效或故障。因此,失效率的表达式为

$$\lambda(t) = \frac{dF(t)/dt}{R(t)} = \frac{-dR(t)/dt}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1.15)$$

或

$$\lambda(t) = \frac{-d \ln R(t)}{dt} \quad (1.16)$$

由式(1.15)可知, $\lambda(t)$ 是瞬时失效率(或瞬时故障率、风险函数),亦可称为 $R(t)$ 条件下的 $f(t)$ 。

若可靠度函数 $R(t)$ 或不可靠度函数 $F(t) = 1 - R(t)$ 已求出,则可按式(1.15)求出 $\lambda(t)$ 。反之,如果失效率函数 $\lambda(t)$ 已知,由式(1.16)亦可求得 $R(t)$,即

$$R(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right] \quad (1.17)$$

即可靠度函数 $R(t)$ 是把 $\lambda(t)$ 由 0 至 t 进行积分之后作为指数的指数型函数。

失效率函数有 3 种类型,即随时间的增长而增长的、随时间的增长而下降的和与时间无关而保持一定值的。