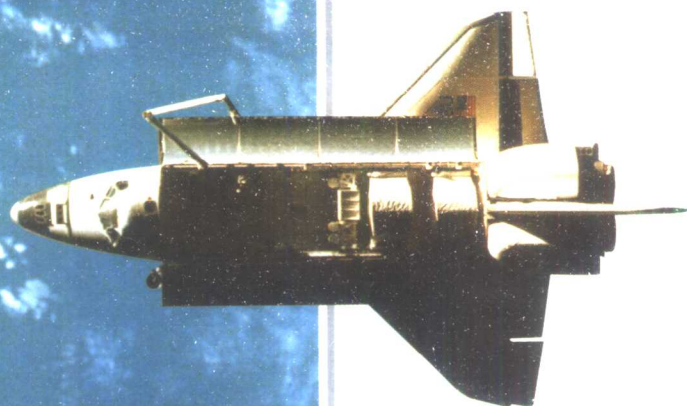


高等学校教材

宋保维 主编



XITONG KEKAOXING SHEJI YU FENXI

系统可靠性

设计与分析

14.3

2

西北工业大学出版社

高等学校教材

系统可靠性设计与分析

宋保维 主编
宋保维 王晓娟 编

西北工业大学出版社
2000年8月 西安

(陕)新登字 009 号

【内容简介】本书系统地讲述了系统可靠性设计与分析的基本概念、理论与方法,反映了国内外有关最新的可靠性研究成果,如结构系统可靠性分析与设计、可靠性优化设计以及模糊可靠性等。全书共九章,包括可靠性概论、不可修复系统与可修复系统的可靠性、可靠性预计与分配、故障树分析、机械可靠性设计原理、机械可靠性优化设计、可靠性试验、验证与评定和模糊可靠性概论等内容。内容讲述循序渐进,由浅入深,理论联系实际。

本书除作为机械电子工程、机械设计制造及其自动化专业的教材外,还可作为航空、航天、船舶、机电工程等领域的工程技术人员参考书,以及普及可靠性工程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,王晓娟编. —西安:西北工业大学出版社, 2000. 8

ISBN 7-5612-1252-6

I. 系... II. ①宋... ②宋... ③王... III. 系统可靠性—高等学校—教材 IV. N94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 29071 号

© 2000 西北工业大学出版社出版发行

(邮编:710072 西安市友谊西路 127 号 电话:8493844)

全国各地新华书店经销

西安市高陵县印刷厂印装

*

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16 印张:12.625 字数:303 千字

2000 年 8 月第 1 版 2000 年 8 月第 1 次印刷

印数:1—3 000 册 定价:16.00 元

购买本社出版的图书,如有缺页、错页的,本社发行部负责调换。

前 言



本书是中国船舶重工集团规划教材,是在原《机械可靠性工程》讲义基础上编写而成的。原讲义曾在机械电子工程专业和机械设计制造及其自动化专业的教学中使用多年,在本次编写中,补充了结构系统可靠性分析与设计、机械可靠性优化设计、可靠性验证与评定、模糊可靠性概论等内容,并在各章后增加了习题。

全书共九章,第一章介绍了可靠性基本概念、定义、特征及常用的概率分布;第二章至第五章讲述了不可修复系统的可靠性与可修复系统的可靠性、系统可靠性预计与分配、故障树分析等基本理论与方法;第六章讲述了机械可靠性设计的基本知识与方法,以及结构系统可靠性的分析与设计方法;第七章讲述了先进而实用的机械可靠性优化设计的工程意义、原理与具体优化设计计算方法;第八章讲述了可靠性常用的试验、验证及评定方法;第九章讲述了模糊可靠性的意义、基本概念、主要指标、机械系统中几种常用的分布的模糊可靠度计算方法,以及系统模糊可靠性的分析与评价方法。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,并注意反映国内外近几年在系统可靠性理论研究与应用方面的新发展、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、习题和思考题,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,并编写第一、二、三、四、六、七、九章及附表,王晓娟副教授编写第五、八章。中国船舶重工集团七〇五研究所胡学章研究员主审本书,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

1999年10月

目 录



第一章 可靠性概论	1
1.1 可靠性的基本概念	1
1.2 可靠性的定义	4
1.3 可靠性的特征量	6
1.4 维修性的特征量.....	12
1.5 有效性的特征量.....	13
1.6 可靠性中常用的概率分布.....	15
习题一	33
第二章 不可修复系统的可靠性	35
2.1 系统的组成及功能逻辑框图.....	35
2.2 串联系统.....	37
2.3 并联系统.....	38
2.4 混联系统.....	40
2.5 表决系统.....	42
2.6 旁联系统.....	44
2.7 桥式系统.....	49
习题二	50
第三章 可修复系统的可靠性	52
3.1 马尔柯夫过程.....	52
3.2 单部件可修复系统.....	60
3.3 串联可修复系统.....	62
3.4 并联可修复系统.....	63
3.5 表决可修复系统.....	65
3.6 旁联可修复系统.....	66
3.7 系统预防维修间隔期的确定.....	69
习题三	72

第四章 可靠性的预计与分配	74
4.1 可靠性预计.....	74
4.2 可靠性分配.....	79
习题四	90
第五章 故障树分析	92
5.1 概述.....	92
5.2 建立故障树的方法.....	94
5.3 故障树的定性分析.....	99
5.4 故障树的定量分析	105
习题五.....	110
第六章 机械可靠性设计原理	111
6.1 应力-强度分布干涉理论与可靠度的一般表达式.....	111
6.2 已知应力与强度分布时可靠度的计算	114
6.3 机械静强度的可靠性设计	122
6.4 结构系统可靠性分析	131
6.5 结构系统可靠性设计	141
习题六.....	142
第七章 机械可靠性优化设计	143
7.1 概述	143
7.2 以可靠度最大为目标的机械强度可靠性优化设计	144
7.3 以可靠度指标为约束条件的机械强度可靠性优化设计	144
7.4 典型零部件的可靠性优化设计	145
习题七.....	154
第八章 可靠性试验、验证及评定	155
8.1 可靠性试验分类及方法	155
8.2 可靠性数量指标验证	159
8.3 FUZZY 假设检验方法	164
8.4 可靠性评定	167
习题八.....	174
第九章 模糊可靠性概论	175
9.1 模糊可靠性的意义	175
9.2 模糊可靠性的基本概念	178
9.3 模糊可靠性的主要指标	180

9.4 机械零件的模糊可靠度计算	183
9.5 系统模糊可靠性的分析与评价	186
习题九	189
附表 标准正态分布表	190
参考文献	193

第一章 可靠性概论

1.1 可靠性的基本概念

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,一切讲究产品信誉的厂家,为了争取顾客都在追求其产品具有好的可靠性。因为只有那些可靠性好的产品,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、前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年前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,科学技术的发展又要求高的可靠性。

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。为了更好地表达可靠性的准确含义,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-I 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。只是从 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。当时雷达系统已发展很快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,而且重视其耐震、耐冲击等可靠性方面。

美国对于机械可靠性的研究,开始于 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。

日本是在 1956 年由美国引进可靠性技术。日本将可靠性技术推广应用到民用工业部门取得很大成功,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、彩电、照相机、收录机、电冰箱等,畅销到全世界,带来巨大的经济效益。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。法国国立通讯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。前苏联在50年代就开始了对于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。它对可靠性方面的定义、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。

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其企业,才能在竞争日益激烈的世界上生存下来。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60年代初进行了有关可靠性评估的开拓性工作。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。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GJB368-87《装备维修性通用规范》和GJB450-88《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。全国军用电子设备可靠性数据交换网已经成立;全国性和专业系统性的各级可靠性学会相继成立,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开始研制、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,因为还有产品的制造成本问题,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。所以,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产品的可靠性,也能估计出该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的最重要的基础理论之一。它主要是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。它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。它是从本质上、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;指导用户对产品的正确使用、提供优良的维修保养和社会服务来维持产品的可靠性。即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,建立有各种数据库。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。

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件、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或贮备法。冗余法或贮备法是在系统中配置作贮备用的零件或设备,当原用零件或设备出现故障时,贮备件立即替换上去。并联冗余即并行工作贮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。在系统设计中采用贮备法,可成倍地提高系统的可靠度。对系统贮备的分配,也广泛地采用最优化方法。

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,内容也会有差异,但都是以系统的方法、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,对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,没有考虑数据的分散性。二是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系数,例如载荷系数、尺寸系数等,最后还要考虑安全系数。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。同时表明由于对这此随机变化情况无法进行精确计算,只好将机械的尺寸、重量等作经验的但又不精确的放大。即使如此,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,首先是它采用了可靠度或其他可靠性指标,来确保结构的可靠性,而传统机械设计是用安全系数来保证结构的可靠性。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。其次,机械可靠性设计除引入可靠度或其他可靠性指标外,还对结构的安全系数作了统计分析,这样得出的安全系数比传统机械设计中的安全系数更符合实际,因为它已经是与可靠度相联系的安全系数了。从对结构安全性的评价来看,传统机械设计只有安全系数这样一个指标;而机械可靠性设计则有可靠度和安全系数(指在一定可靠度下)两个指标。

1.2 可靠性的定义

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”。它为各国的标准所引证,我国的 GB3187-82 给出的可靠性定义也与此相同。但在实际应用中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。于是美国于 1980 年颁发的 MIL-STD-785B 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(平均无故障间隔时间),MCCBF(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可靠性概念,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 年颁布的军标 GJB450-88 就引用这两种可靠性定义。

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的判断与操作等因素在内。需要以人一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,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、次数等等会更恰当些。

(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。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)。它包含了产品的制造和使用两方面因素,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,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(故障)的定义、研究失效(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。

失效(Failure),对于可修复的产品,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。

1.3 可靠性的特征量

1.3.1 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,它又叫可靠度分布函数,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)的概率以 $P(E)$ 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

$$R(t) = P(E) = P(T \geq t) \quad 0 \leq t \leq \infty \quad (1-2)$$

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,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,都是好的,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。

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。

1.3.2 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(故障)的产品,在 t 时刻以后的下一个单位时间内发生失效(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时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)改写为下式就更适宜些,即

$$m^*(t) = \frac{1}{t - r} \int_r^t \lambda(t) dt \quad (1-13)$$

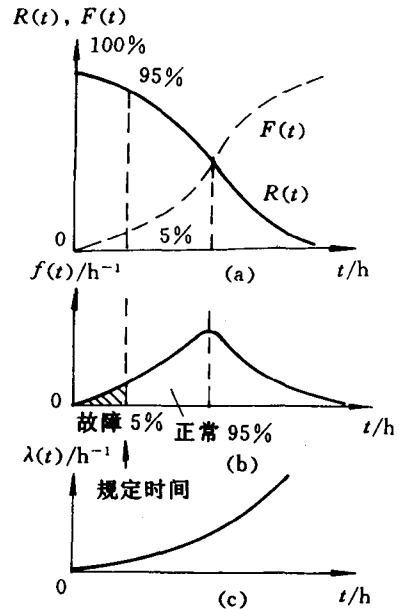


图 1-1 可靠度函数、失效密度函数与失效率(当失效率递增时)

累积失效率可定义为

$$M(t) = t m(t) = \int_0^t \lambda(t) dt \quad (1-14)$$

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 $10^{-5}/h$ 表示。对于可靠度高、失效率低的产品,则采用 Fit(Failure Unit) = $10^{-9}/h = 10^{-6}/10^3h$ 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 年,工作满 5 年时共有 3 个失效,工作满 6 年时共有 6 个失效。试计算这批零件工作满 5 年时的失效率。

解 按式(1-10),时间以年(a)为单位,则 $\Delta t = 1 a$

$$\bar{\lambda}(5) = \frac{\Delta n(t)}{[n - n(t)]\Delta t} = \frac{6 - 3}{(100 - 3) \times 1} = 0.0309/a = (3.09\%)/a$$

如果时间为 $10^3 h$ 为单位,则 $\Delta t = 1 a = 8.76 \times 10^3 h$,因此

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

如果对这批零件测得多年的失效数据并按上法求出 $\bar{\lambda}(1), \bar{\lambda}(2), \bar{\lambda}(3), \dots$,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。

失效率函数有三种类型,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。

当 $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$ 时,式(1-17)变为

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1-18)$$

对应于上述三种失效率函数的形态,失效率曲线一般可分为递减型失效率 DFR(Decreasing Failure Rate) 曲线,恒定型失效率 CFR(Constant Failure Rate) 曲线,递增型失效率 IFR(Increasing Failure Rate) 曲线。

由许多零件构成的机器、设备或系统,在不进行预防性维修时,或者对于不可修复的产品,其失效率曲线的典型形态如图 1-2 所示。由于它的形状与浴盆的剖面相似,所以又称为浴盆曲线(Bath-Tub Curve)。它是由上述三种形态的失效率曲线组成,反映了产品在其全部工作过程

中的三个不同阶段或时期。

(1) 早期失效期(DFR型):早期失效期出现在产品投入使用的初期,其特点是开始时失效率较高,但随着使用时间的增加失效率将较快地下降,呈递减型,如图 1-2 中的(A)所示。这个时期的失效或故障是由于设计上的疏忽、材料有缺陷、工艺质量问题、检验差错而混进了不合格品、不适应外部环境等缺点及设备中寿命短的部件等因素引起的。这个时期的长短随设备或系统的规模和上述情况的不同而异。为了缩短这一阶段的时间,产品应在投入运行前进行试运转,以便及早发现、修正和排除缺陷;或通过试验进行筛选,剔除不合格品;或进行规定的跑合和调整,以便改善其技术状况。

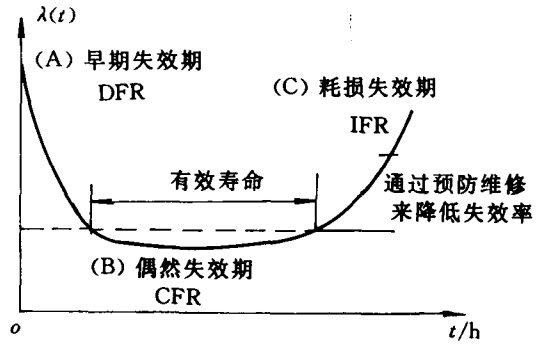


图 1-2 不进行维修的机器、设备或系统的典型失效率曲线

(2) 偶然失效期(CFR型):在早期失效期之后,早期失效的产品暴露无遗,失效率就会大体趋于稳定状态并降至最低,且在相当一段时间内大致维持不变,呈恒定型,如图 1-2 的(B)所示。这时期故障的发生是偶然的或随机的,故称为偶然失效期。偶然失效期是设备或系统等产品的最佳状态时期,在规定的失效率下其持续时间称为使用寿命或有效寿命。人们总是希望延长这一时期,即希望在容许的费用内延长使用寿命。台架寿命试验、可靠性试验,一般都是在消除了早期故障之后针对偶然失效期而进行的。

(3) 耗损失效期(IFR型):耗损失效期出现在设备、系统等产品投入使用的后期,其特点是失效率随工作时间的增加而上升,呈递增型,如图 1-2 中的(C)所示。这是因为构成设备、系统的某些零件已过度磨损、疲劳、老化、寿命衰竭所致。若能预计到耗损失效期到来的时间,并在这个时间稍前一点将要损坏的零件更换下来,就可以把本来将会上升的失效率拉下来,延长可维护的设备或系统的使用寿命。当然,是否值得采用这种措施需要权衡,因为有时把它报废反而更为合算。

可靠性研究虽涉及上述三种失效类型或三种失效期,但着重研究的是随机失效,因为它发生在设备的正常使用期间。

这里须特别指出,浴盆曲线的观点反映的是不可修复且较为复杂的设备或系统在投入使用后失效率的变化情况。一般情况下,凡是由于单一的失效机理而引起失效的零件、部件,应归于 DFR 型;而固有寿命集中的多属于 IFR 型。只有在稍复杂的设备或系统中,由于零件繁多且对它们的设计、使用材料、制造工艺、工作(应力)条件、使用方法等不同,失效因素各异,才形成包含有上述三种失效类型的浴盆曲线。

1.3.3 平均寿命

平均寿命这个词对于不可修复(指失效后无法修复或不修复,仅进行更换)的产品和可修复(指发生故障后经修理或更换零件即恢复功能)的产品,含义是有区别的。

对于不可修复的产品,其寿命是指它失效前的工作时间。因此,平均寿命就是指该产品从开始使用到失效前工作时间(或工作次数)的平均值,或称为失效前平均时间,记为

MTTF (Mean Time to Failure)。

$$\text{MTTF} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad (1-19)$$

式中 N —— 测试的产品总数；

t_i —— 第 i 个产品失效前的工作时间，单位为 h。

对于可修复的产品，其寿命是指相邻两次故障间的工作时间。因此，它的平均寿命即为平均无故障工作时间或称平均故障间隔，记为 MTBF (Mean Time Between Failures)。

$$\text{MTBF} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N n_i} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} t_{ij} \quad (1-20)$$

式中 N —— 测试的产品总数；

n_i —— 第 i 个测试产品的故障数；

t_{ij} —— 第 i 个产品的第 $j-1$ 次故障到第 j 次故障的工作时间，单位为 h。

MTTF 与 MTBF 的理论意义和数学表达式的实际内容都是一样的，故通称为平均寿命。这样，如果从一批产品中任取 N 个产品进行寿命试验，得到第 i 个产品的寿命数据为 t_i ，则该产品的平均寿命 θ 为

$$\theta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad (1-21)$$

或表达为

$$\theta = \frac{\text{所有产品总的工作时间}}{\text{总的故障数}} \quad (1-22)$$

若进行寿命试验的产品数 N 较大，寿命数据较多，用上列各式计算较繁琐，则可将全部寿命数据按一定时间间隔分组，并取每组寿命数据的中值 t_i 作为该组各寿命数据的近似值，那末总的工作时间就可近似地用各组寿命数据的中值 t_i 与相应频数 (该组的数据数) Δn_i 的乘积之和 $\sum_{i=1}^N (t_i \Delta n_i)$ 来表示，这样平均寿命 θ 又可表达为

$$\theta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (t_i \Delta n_i) \quad (1-23)$$

式中 N —— 总的寿命数据数；

n —— 分组数；

t_i —— 第 i 组寿命数据的中值，单位为 h；

Δn_i —— 第 i 组寿命数据的个数 (失效频数)。

若产品总体的失效密度函数 $f(t)$ 已知，则根据概率论与数理统计关于均值 (数学期望) $E(X)$ 的定义 $[E(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx]$ ，考虑到时间的积分范围应为 $0 \leq t < +\infty$ ，故有

$$\theta = E(T) = \int_0^{+\infty} t f(t) dt \quad (1-24)$$

将式 (1-7) 代入上式，得

$$\begin{aligned} \theta &= \int_0^{+\infty} t \left(-\frac{dR(t)}{dt} \right) dt = \\ &= - \int_0^{+\infty} t dR(t) = - \int_0^{+\infty} d[t R(t)] + \int_0^{+\infty} R(t) dt = \end{aligned}$$