

现代

芮延年 傅戈雁 编著

可靠性设计

XIANDAI KEKAOXING SHEJI



000

000000

00000



国防工业出版社

National Defense Industry Press

现代可靠性设计

芮延年 傅戈雁 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书以概率可靠性为基础,结合近年迅速发展起来的模糊可靠性和灰色可靠性理论,并将概率可靠性、模糊可靠性和灰色可靠性三者有机地结合在一起,形成《现代可靠性设计》教材。内容主要包括:可靠性概论、产品可靠性常用概率分布、可靠性试验与数据处理、概率可靠性设计、机械零件可靠性设计、系统可靠性设计、模糊可靠性设计、灰色可靠性设计。每章均配备了习题。

本书适合作高等学校机械工程及其自动化、电气工程与自动化、电子与信息、计算机工程等工科专业的教材,也可供从事机电产品设计、制造、试验、使用及管理的工程技术人员参考。同时,也可作为高年级本科生及研究生的教材和参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

现代可靠性设计 / 芮延年, 傅戈雁编著. —北京: 国防工业出版社, 2007.4
ISBN 978-7-118-04927-5

I. 现... II. ①芮... ②傅... III. 工业设计-可靠性 IV. TB47

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 155679 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

北京市李史山胶印厂

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 17¼ 字数 433 千字

2007 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—5000 册 定价 28.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

可靠性理论及应用是以产品寿命特征作为主要研究对象的一门新兴的边缘性学科,它涉及到基础科学、技术科学和管理科学等许多领域,其推广和应用已给企业和社会带来了巨大的经济效益。

“可靠性”作为产品质量和技术措施的一个最重要的指标早已受到世界各工业国家的高度重视,因为任何产品和技术,尤其是高科技产品、大型设备及超大型设备的制造,尖端技术的发展,都要以可靠性技术为基础,科学技术的发展又要求高可靠性。在现代生产中可靠性技术已贯穿到产品的开发、研制、设计、制造、试验、使用、运输、保管及维修保养等各个环节。

可靠性理论综合运用数学、物理、工程力学、机械工程学、人机工程学、系统工程学、运筹学等多方面的知识来研究工程的最佳设计问题。

在市场全球化的今天,市场竞争十分激烈,各行各业对产品可靠性问题的日益重视,极大地推动了可靠性这一新兴学科的迅猛发展,并使其进入了一个崭新的历程。可靠性理论与技术已遍及电子、机械、化工、自动化及航空、航天等领域。然而,由于历史原因,我国可靠性理论与应用和发达国家相比还很落后,其主要原因在于对可靠性理论和工程应用的研究比较薄弱,致使许多从事可靠性工作的工程技术人员与管理人员对系统的可靠性理论及可靠性应用技术掌握甚少。

本书是作者在多年讲授《可靠性理论与应用》课程基础上修改、补充而完成的。目的是为了从事机械、电子、自动化、化工、航空、航天学习的本科生、研究生及广大工程技术人员系统地掌握可靠性的基本理论,了解其工程应用及发展趋势,提高专业水平与业务素质。

传统的可靠性理论是以概率论与数理统计理论为基础的概率可靠性。随着科学技术的进步,新的可靠性理论发展与渗入,逐渐地形成了模糊可靠性和灰色可靠性理论。编写本书的目的是将概率可靠性、模糊可靠性和灰色可靠性这三者有机地结合在一起,构成现代可靠性理论与应用教材。

本书注重内容的新颖性,反映可靠性工程的最新研究状况及发展趋势,始终贯穿概率—模糊—灰色可靠性这条主线;内容紧密结合工程实际;注重文字的简洁性,每部分内容的讲解尽可能短小精练,简明扼要;注重语言的通俗性,内容的叙述尽可能深入浅出,通俗易懂。

全书共分8章,其中第1章、第2章、第6章、第7章、第8章由芮延年教授编写;第3章、第4章、第5章由傅戈雁教授编写;中国科学院闻邦椿院士在百忙之中抽出时间对全书进行审核与指导。本书在编写过程中参阅了国内外同行的教材、参考书、手册和期刊文献,在此谨致谢意。吴冬敏、任芸丹、刘开强、张志伟、沈铭、金晶等研究生为本书的插图、整理做了大量工作,在此表示衷心的感谢!

由于作者才疏学浅、水平有限,缺点错误在所难免,敬请广大读者批评指正。

作 者

2006年9月

目 录

第1章 可靠性概论	1
1.1 可靠性的发展及其重要意义	1
1.2 可靠性的基本概念	3
1.2.1 可靠性定义	3
1.2.2 广义可靠性和狭义可靠性	4
1.2.3 固有可靠性和使用可靠性	4
1.3 可靠性的评价尺度	4
1.3.1 可靠度	4
1.3.2 失效率	5
1.3.3 平均寿命	7
1.3.4 可靠寿命、中位寿命和特征寿命	7
1.3.5 可靠性评价尺度之间的关系	7
1.4 现代可靠性设计主要研究的内容	8
1.4.1 概率可靠性	8
1.4.2 模糊可靠性	9
1.4.3 灰色可靠性	10
习题一	10
第2章 产品可靠性常用概率分布	11
2.1 离散型随机变量的几种常见概率分布	11
2.1.1 两点分布	11
2.1.2 二项分布	11
2.1.3 泊松分布	13
2.1.4 几何分布与负二项分布	13
2.1.5 超几何分布	14
2.2 连续型随机变量的几种常见概率分布	15
2.2.1 正态分布	15
2.2.2 截尾正态分布	17
2.2.3 对数正态分布	19
2.2.4 指数分布	21
2.2.5 威布尔分布	23

2.3 抽样分布	25
2.3.1 χ^2 分布	26
2.3.2 t 分布	27
习题二	29
第3章 可靠性试验与数据处理	31
3.1 可靠性试验的分类	31
3.1.1 按试验场所分类	31
3.1.2 按试验截止情况分类	32
3.2 可靠性筛选试验	32
3.2.1 可靠性筛选的目的	32
3.2.2 筛选方法	33
3.2.3 环境应力筛选试验	34
3.3 可靠性增长试验	36
3.3.1 可靠性增长试验的意义	36
3.3.2 可靠性增长模型	37
3.4 可靠性鉴定试验	41
3.4.1 可靠性鉴定试验的要求	41
3.4.2 寿命服从指数分布定时截尾试验方案	42
3.4.3 成功率定数试验方案	44
3.5 可靠性验证试验	45
3.5.1 可靠性验证试验的要求	45
3.5.2 指数分布下的验证试验	46
3.5.3 序贯截尾成功率验证试验	50
3.6 加速寿命试验	52
3.6.1 加速寿命试验的类型	52
3.6.2 恒定应力加速寿命试验的设计	53
3.7 成败型试验的数据分析	54
3.7.1 产品可靠度的点估计	54
3.7.2 产品可靠度的区间估计	55
3.8 指数分布时寿命试验的数据分析	56
3.8.1 指数分布参数的点估计	56
3.8.2 点估计计算	57
3.9 威布尔分布时寿命试验的数据分析	58
3.9.1 威布尔分布时截尾寿命试验的概率纸法数据分析	59
3.9.2 威布尔分布时截尾寿命试验的极大似然法	59
3.9.3 线性估计法	59
3.9.4 威布尔分布参数的 BLUE	61

3.9.5 威布尔分布参数的 GLUE	62
3.10 正态分布和对数正态分布时寿命试验的数据分析	63
3.10.1 图估计法	63
3.10.2 最小二乘法	65
3.11 分布类型的假设检验	66
3.11.1 χ^2 检验法	66
3.11.2 K-S 检验法	67
习题三	69
第4章 概率可靠性设计	70
4.1 可靠性设计概述	70
4.1.1 可靠性设计的基本特点	70
4.1.2 可靠性设计的主要内容	71
4.1.3 可靠性设计的方法与步骤	71
4.2 应力—强度分布干涉模型法原理	73
4.2.1 应力—强度分布干涉模型	73
4.2.2 累积失效概率和可靠度的确定方法	74
4.3 几种常用分布的可靠度计算	76
4.3.1 应力和强度均为正态分布的可靠度计算	76
4.3.2 应力和强度均为对数正态分布的可靠度计算	78
4.3.3 应力和强度均为指数分布的可靠度计算	79
4.3.4 应力为指数(或正态)而强度为正态(或指数)分布的可靠度计算	80
4.3.5 应力为正态分布而强度为威布尔分布的可靠性计算	81
4.4 确定应力分布的方法	83
4.4.1 应力分布概述	83
4.4.2 影响应力分布的物理参数及几何参数的统计数据	85
4.4.3 用代数法综合应力分布	87
4.4.4 用矩法综合应力分布	90
4.4.5 用蒙特卡洛模拟法确定应力分布	92
4.5 确定强度分布的方法	94
4.5.1 强度分布概述	94
4.5.2 确定强度分布的步骤	94
4.5.3 用代数法综合强度分布	95
4.5.4 用矩法综合强度分布	97
4.5.5 用蒙特卡洛模拟法确定强度分布	98
4.6 安全系数与可靠度	99
4.6.1 经典意义下的安全系数	99
4.6.2 可靠性设计概念下的安全系数	100

4.6.3 随机变量的安全系数	102
习题四	103
第5章 机械零件的可靠性设计	105
5.1 概述	105
5.2 应力分布类型和分布参数的确定	105
5.2.1 试验测定分析法	105
5.2.2 蒙特卡洛随机模拟法	105
5.2.3 解析综合法	105
5.3 强度分布类型和分布参数的确定	106
5.3.1 确定强度分布和分布参数的方法及程序	107
5.3.2 机械零件材料强度分布和分布参数	107
5.3.3 材料疲劳强度的统计分析	109
5.3.4 材料的弹性模量	113
5.4 螺栓联接的可靠性设计	114
5.4.1 受轴向静拉伸载荷螺栓联接的可靠性设计	114
5.4.2 受横向载荷的普通紧螺栓联接的可靠性设计	120
5.5 轴类零件的可靠性设计	123
5.5.1 心轴的可靠性设计	123
5.5.2 传动轴的可靠性设计	124
5.5.3 转轴的可靠性设计	125
5.6 圆柱螺旋弹簧的可靠性设计	127
5.7 齿轮传动的可靠性设计	132
5.7.1 齿面接触疲劳强度的可靠性设计	133
5.7.2 齿轮抗弯疲劳强度的可靠性设计	138
习题五	143
第6章 系统可靠性设计	144
6.1 系统可靠性设计的基本概念	144
6.1.1 系统可靠性概念	144
6.1.2 系统可靠性框图	144
6.2 系统可靠性的模型	145
6.2.1 串联系统	145
6.2.2 并联系统	146
6.2.3 混联系统	147
6.2.4 k/n 表决系统	149
6.2.5 贮备系统	150
6.3 可靠性预测	152

6.3.1	单元可靠性预测	153
6.3.2	系统可靠性预测	153
6.4	可靠性分配	156
6.4.1	可靠性分配概述	156
6.4.2	等分配法	157
6.4.3	再分配法	158
6.4.4	相对失效率法与相对失效概率法	159
6.4.5	AGREE 分配法	162
6.5	故障树分析法	163
6.5.1	故障树分析法概述	163
6.5.2	故障树	163
6.5.3	故障树应用实例	166
6.6	故障树的定性分析	166
6.6.1	最小割集与最小路集	167
6.6.2	求最小割集的方法	167
6.6.3	求最小路集的方法	169
6.6.4	结构重要度	170
6.6.5	定性分析应用	171
6.7	故障树的定量分析	174
	习题六	177
第7章	模糊可靠性设计	178
7.1	概述	178
7.2	经典集合、映射和模糊集合	180
7.2.1	经典集合和模糊集合的概念	180
7.2.2	经典集合与模糊集合的表示法	181
7.3	经典集合和模糊集合的运算	183
7.3.1	经典集合运算的概念	183
7.3.2	经典集合交、并运算的真值表	184
7.3.3	经典集合特征函数的运算性质	185
7.3.4	模糊集合运算的概念	185
7.3.5	经典集合及模糊集合运算的法则	186
7.3.6	常用隶属函数与选择	187
7.4	模糊集合与经典集合的联系	191
7.4.1	截集和阈值	191
7.4.2	分解定理和扩张原理	191
7.4.3	模糊性的度量	192
7.4.4	最大隶属原则与择近原则	194

7.5	设计中模糊因素的决策	195
7.5.1	模糊关系与模糊矩阵	195
7.5.2	模糊变换	196
7.5.3	合成运算的选择	197
7.5.4	评判指标的处理	198
7.6	模糊综合评判	199
7.6.1	一级模糊综合评判	199
7.6.2	多级模糊综合评判	202
7.7	模糊概率可靠性设计	205
7.7.1	模糊可靠度与模糊失效概率	205
7.7.2	模糊失效率与模糊平均寿命	207
7.7.3	系统的模糊可靠度	207
7.8	模糊可靠性设计在机械设计中的应用	208
7.8.1	机械零件刚度模糊可靠性设计	208
7.8.2	螺栓联接的模糊可靠性设计	211
7.8.3	滚动轴承的模糊可靠性寿命	213
7.9	模糊优化设计	215
7.9.1	模糊优化设计的数学模型	215
7.9.2	模糊优化设计应用实例	219
	习题七	221
第8章	灰色可靠性设计	223
8.1	灰色系统的基础理论	223
8.1.1	灰色系统理论的产生	223
8.1.2	灰色系统、灰概念与灰性	223
8.1.3	灰色系统理论的基本观点	224
8.1.4	灰数、灰元、灰关系	225
8.1.5	灰色系统的基本原理	225
8.2	灰理论与概率论、模糊理论的对比	228
8.3	灰色关联分析	230
8.3.1	灰色关联分析概述	230
8.3.2	灰色关联分析评估法	230
8.3.3	灰色关联分析拓广	232
8.3.4	灰色聚类评估法	235
8.4	GM 模型	237
8.4.1	GM 模型概述	237
8.4.2	GM 模型建模机理	238
8.4.3	GM(1,N)模型形式与建模要点	238

8.4.4 加权 PGM(1,1) 模型	239
8.4.5 时序残差 GM(1,1) 模型	240
8.5 灰色概率可靠性	243
8.5.1 灰色概率	243
8.5.2 灰色概率密度与可靠度模型	246
8.5.3 应力—强度分布干涉模型与灰色可靠度计算公式	246
8.6 灰色可靠性理论应用实例	247
习题八	249
附录	251
附表 1 二项分布表	251
附表 2 泊松 (Poisson) 分布表	252
附表 3 负指数分布表	253
附表 4 标准正态分布数值表	254
附表 5 χ^2 分布的分位数表	255
附表 6 Γ 函数表	256
附表 7 t 分布的分位数表	257
附表 8 正态分布表容许限 k_p 表	258
附表 9 相关系数检验表	259
附表 10 秩置信限表	260
附表 11 应力呈正态分布和强度呈威布尔分布时的失效概率表	261
附表 12 F 分布的分位数表	262
参考文献	263

第 1 章 可靠性概论

1.1 可靠性的发展及其重要意义

在日常生活和生产活动中,经常会涉及到产品质量可靠性问题。比如,人们在购买重要商品时往往喜爱购买名牌产品,其主要原因就是购买其“可靠性”。长期以来,一切讲究产品信誉的厂家,为了争取市场与顾客都十分重视其产品质量的可靠性。因为只有那些可靠性好的产品,才能长期受到用户的欢迎。不仅如此,有些产品如飞机、汽车、轮船等,如果其关键零部件不可靠,不仅会给用户带来不便,耽误时间、推迟日程,造成经济损失,甚至还可能直接危及到使用者的生命安全。

1962 年 6 月,美国宇航局发往金星的第一个宇宙探测器——水手 1 号,由于其计算机系统的一个故障,在发射后不久就坠毁了,不但数亿美元顷刻间化为乌有,同时也造成了严重的政治影响。

1979 年,新西兰航空公司的一架客机,因为计算机控制的飞行系统出错而撞在 Erebus 山上,机上 257 名乘客遇难身亡。

在英阿马岛战争中,英国一艘驱逐舰因为舰上计算机控制的防御系统出故障,将飞来的导弹误认为是友军武器,没有将它击落,结果该舰被击沉。

1981 年 7 月 4 日,在日本兵库县的川崎重工公司发生了一起机器人杀人的事件。受害者叫酒田宽二。这一天,该厂汽车传动车间的机器发生了故障,修理工酒田宽二前去修理,当他修好机器,接通电源准备试车时,由于电脑发生故障,机器人也随之动作起来,它从酒田宽二的背后过来,用两只手紧紧抓住酒田宽二,把他放在机器上活活地压死了。

这些事件都说明产品质量的可靠性误差会引起一系列严重问题,甚至会危及到人的生命安全和国家的荣誉。然而,1957 年苏联第一颗人造卫星升天,1969 年美国阿波罗 II 号宇宙飞船载人登月成功等都是可靠性技术成功的典范,不仅为其国家带来了荣耀,而且也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。

可靠性是一门涉及面很广的交叉学科,世界各发达国家均给予高度地重视。日本人把可靠性当作“国家兴亡”的大事对待,其产品因高可靠性而赢得了国际市场的认同,为此,日本成为了经济强国。美国国防部从 1957 年开始起对可靠性就给予了极大的重视。1965 年国际电工技术委员会可靠性专业委员会成立,表明可靠性工程已成为一门国际性技术。在我国,据 1978 年测试,国产电视机平均无故障工作时间(MTBF)还不到 500h,年返修率高达 95% 以上,国产计算机的 MTBF 到 1980 年仅 50h。20 世纪 80 年代后期,我国狠抓了产品质量可靠性问题,颁布了一系列可靠性技术标准和管理规定,在现代化武器装备等大型工程研制中,全面推行可靠性工程技术,使我国的可靠性工程得到了迅速发展。目前,国产名牌彩电的 MTBF 均达到了 3 万 h 以上,计算机的 MTBF 也得到了很大提高。

可靠性学科起源于军事领域,是在第二次世界大战期间为适应武器装备的需要而产生的,经过半个多世纪的迅速发展,现在已成为一门涉及面十分广泛的综合性应用学科——可靠性工程。

早在 20 世纪 40 年代,德国在 V - II 火箭的研制中,建立了关于可靠性的一些基本概念,美国对飞机及雷达上使用的真空管故障作了深入的研究,最先提出了对产品可靠性的定量要求。

20 世纪 50 年代是可靠性工程崛起的时期,1952 年美国国防部成立了电子设备可靠性顾问团(简称 AGREE),该团对电子产品的设计、试制、生产、试验、储存、运输、使用等各个方面的可靠性问题,作了全面的调查研究,并于 1957 年 6 月发表了著名的《军用电子设备的可靠性》报告。该文除了论述产品在上述各个环节中的可靠性问题外,还比较完整地论述了可靠性理论基础及研究方法。

1954 年美国召开了第一届可靠性与质量管理学术会议。1962 年又召开了第一届可靠性与可维修性学术会议及第一届电子设备故障物理学术会议。将对可靠性的研究,扩展到对可维修性的研究和产品故障机理方面。美国对于机械可靠性的研究,开始于 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工作,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和设备中去等。

日本是在 1956 年由美国引进可靠性技术的。1958 年日本科学技术联盟设立了可靠性研究委员会。1960 年在日本成立了可靠性及质量控制专门小组。1971 年日本召开了第一届可靠性学术讨论会。日本将可靠性技术推广应用到民用工业部门中,并取得了很大成功。可靠性技术的研究与应用,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,给日本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。

在 20 世纪 50 年代,苏联为了保证人造地球卫星发射和飞行的安全,也开展了可靠性的研究工作,1961 年在发射第一艘载人宇宙飞船时,提出了可靠度达到 0.999 的定量要求。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,至 2000 年已先后召开了十五次这样的会议。

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。

我国的可靠性工作起始于 20 世纪 50 年代末期,起步并不迟。1959 年建成了亚热带环境研究所,但是只有三四年的时间就夭折了。由于众所周知的原因,在 60 年代可靠性工程在我国还是一片空白。70 年代我国的可靠性工作是从引进国外标准资料开始的,1976 年颁发了第一个可靠性的标准 SJ1044—76《可靠性名词术语》,1979 年颁发了第一个可靠性国家标准 GB1977 - 79《电子元器件失效率试验方法》,可靠性工程应用在电子、航天、电力、机械、仪表等部门取得不同程度的进展。80 年代,我国的各种可靠性机构、学术团体像雨后春笋,迅速发展。在可靠性数学和可靠性理论上已达到一定水平,然而,可靠性技术在工业和企业中的应用还不广泛,与先进国家相比还存在着较大差距。

随着中国的改革开放和经济的高速发展,在 20 世纪 70 年代后期,从解决国家重点工程元器件的可靠性问题开始,在军工和民用产品方面的可靠性研究有了飞速的提高。当时明确提出了国防军工重点产品的可靠度在 10 年内要提高 2 个数量级。像电视机这类产品也明确提出了可

可靠性、安全性的定量指标。到 80 年代,可靠性研究就更为深入,开始形成了一批可靠性研究和管理队伍,制订了 GJB 299—87《电子设备可靠性设计手册》等一系列标准,有力地推动了可靠性规范化工作。使许多机械、电子产品,如电视机、影碟机、洗衣机等民用产品的质量以及许多军工产品的质量产生了质的飞跃。

特别是在我国加入 WTO 之后,经济要与国际接轨,企业产品参与国际市场的竞争,进入国际经济的大循环圈,这是经济发展的必然趋势。用户不仅要求产品性能好,更重要的是要求产品的可靠性水平高,这是产品占领市场的关键。美国人曾预言:今后只有那些具有高可靠性指标的产品及其企业,才能在日益激烈的国际贸易竞争中生存下来。

综上所述,可靠性工程从它诞生的时候开始,一直到近年来的迅速发展,都离不开社会的需求和科学技术的发展。虽然它起源于军事领域,但从它的推广应用和给国民经济及企业所带来巨大效益的事实中,人们已经清醒地认识到提高产品可靠性的重要性。近年来世界各国都投入了大量人力、物力进行研究,并在更广泛的范围推广应用。我国在这一领域的发展虽然十分迅速,但与国际先进水平相比,差距还很大。为尽快改变这种局面,还应对产品质量树立全面的现代化质量观,真正将可靠性指标作为现代质量管理的一项指标,对其进行严格的可靠性质量考核,同时还应继续加强对可靠性理论和应用的研究,从而使我国的可靠性工程研究和管理的水平进一步提高,更好地推动我国国民经济的迅速发展。

1.2 可靠性的基本概念

1.2.1 可靠性定义

可靠性的定义是:产品在规定的条件下和规定的时间区间内,完成规定功能的能力。理解这一定义应注意下列几个要点:

(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)“规定的条件”一般指的是使用条件、维护条件、环境条件、操作技术,如载荷、温度、压力、湿度、振动、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)“规定的时间区间”,通常可靠度是随时间而降低,产品只能在一定的时间区间内才能达到目标可靠度,因此,对时间的规定一定要明确。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)“规定的功能”,首先要明确具体产品的功能是什么,怎样才算是完成规定的功能。产品丧失规定的功能称为失效,对可修复产品称为故障。怎样才算是失效或故障,有时是很容易判定的,但更多的情况是很难判定的,例如,对于某个齿轮,轮齿的折断显然就是失效,但当齿面发生了某种程度的磨损,对某些精密的机械来说该齿轮就是失效,而对某些机械并不影响其正常运转,因此,就不能算失效。又如一台 6 缸发动机,当有一个汽缸火花塞不良,而其他 5 个汽缸正常工作,汽车仍能在规定时间内完成运输任务,这时就不一定算功能失效,如果 6 个汽缸火花塞都有毛病,出现很大爆破声,直到完全熄火,这时就应称为功能失效。一般地,功能失效是一个模糊的界限,不容易分清,对一些大型设备来说更是如此。因此,必须明确地规定产品的功能。

1.2.2 广义可靠性和狭义可靠性

系统、机器、零部件等一般是随着使用时间的增长会产生损坏或故障。对于发生故障一般有两种处置方式,即废弃或修复故障。针对废弃的不可修复零部件而言,它们的可靠性称为狭义可靠性,而后一种可修复系统、机器的可靠性称为广义可靠性。广义可靠性除考虑狭义可靠性外,还要考虑发生故障后修理的难易程度即维修性。狭义可靠性、维修性和广义可靠性三者之间存在下述关系,即

$$\text{狭义可靠性} + \text{维修性} = \text{广义可靠性}$$

1.2.3 固有可靠性和使用可靠性

通过设计、制造成形的系统、零部件等可靠性称为固有可靠性,而系统等在广义使用条件的作用下,保证固有可靠性的发挥程度称为使用可靠性,一般地,以下式表示:

$$\text{固有可靠性} \geq \text{使用可靠性}$$

在使用中,固有可靠性与使用可靠性的综合,则形成了系统可靠性。

1.3 可靠性的评价尺度

为了评价零部件、机器、系统等可靠性,必须对可靠性制定一些行之有效的指标,并加以数量化作为衡量可靠性的尺度,表示产品总体可靠性水平高低的各种可靠性指标称为可靠性评价尺度(也称为特征量)。可靠性评价尺度的真值是理论上的数值,实际上是不知道的。根据样本观测值,经一定的统计分析可得到评价尺度的真值的估计值。估计值可以是点估计,也可以是区间估计。衡量可靠性的尺度主要有可靠度、失效率、平均寿命度、有效度、重要度等。

从以上衡量指标可知,可靠性尺度具有以下特点:

(1) 可靠性尺度具有多指标性。在不同的场合和不同的情况下,可用不同的指标来表示系统等可靠性。

(2) 可靠性尺度具有随机性。对象在规定的时间内保持正常功能的可靠性是随机的,一般可用概率方法进行定量衡量。

(3) 可靠性具有定量表示的时间性,即定量指标多是时间的函数。

1.3.1 可靠度

可靠度(Reliability)可定义为“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”,通常用“ R ”表示。考虑到它是时间的函数,所以又可表示为 $R = R(t)$,称为可靠度函数。就概率分布而言,它被称为可靠度分布函数,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

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

与可靠度相对应的是不可靠度,它表示“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,也可称为累积失效概率。显然,

它与可靠度呈互补关系,即

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (1-2)$$

$$F(t) = 1 - R(t) = P(T < t) \quad (1-3)$$

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,同一可靠度值就不同。

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,概率密度为 $f(t)$,则该产品在某一指定时刻 t 的可靠度

$$R(t) = P(T > t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (1-4)$$

对于不可修复产品,可靠度的观测值是指直到规定的时间区间终了为止,能完成规定功能的产品数 $N_s(t)$ 与在该区间开始时投入工作的产品数 N 之比,即

$$\hat{R}(t) = \frac{N_s(t)}{N} = 1 - \frac{N_f(t)}{N} \quad (1-5)$$

式中: $N_f(t)$ 为到 t 时刻未完成规定功能的产品数。

对可修复产品,可靠度观测值是指一个或多个产品的无故障工作时间达到或超过规定时间的次数,与观测时间内无故障工作的总次数之比,即

$$\hat{R}(t) = \frac{N_s(t)}{N} \quad (1-6)$$

式中: N 为观测时间内无故障工作的总次数,每个产品的最后一次无故障工作时间若未超过规定时间则不予计入; $N_s(t)$ 为无故障工作时间达到或超过规定时间的次数。

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时间的可靠度,即需要知道已经工作 t_1 、后再继续工作 t_2 的可靠度。

从时间 t_1 工作到 $t_1 + t_2$ 的条件可靠度称为任务可靠度,记为 $R(t_1 + t_2 | t_1)$ 。由条件概率可知

$$R(t_1 + t_2 | t_1) = P(T > t_1 + t_2 | T > t_1) = \frac{R(t_1 + t_2)}{R(t_1)} \quad (1-7)$$

根据样本的观测值,任务可靠度的观测值为

$$R(t_1 + t_2 | t_1) = \frac{N_s(t_1 + t_2)}{N_s(t_1)} \quad (1-8)$$

例 1-1 有 1000 个某种零件,在工作了 5 年后,有 80 个发生了故障(或失效),其余的 $1000 - 80 = 920$ 个零件仍能继续工作,那么其可靠度为

$$R(5) = \frac{920}{1000} = 0.92 = 92\% \quad (1-9)$$

1.3.2 失效率

失效率是指工作到某时刻尚未失效的产品,在该时刻后单位时间内发生失效的概率,一般记为 λ ,它也是时间 t 的函数,故也记为 $\lambda(t)$,称为失效率函数。失效率定义为

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} P(t \leq T \leq t + \Delta t | T > t) \quad (1-10)$$

它反映了 t 时刻产品失效的速率,也称为瞬时失效率。

失效率的观测值是指在某时刻后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,即

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\Delta N_f(t)}{N_s(t) \Delta t} = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{[N - n(t)] \cdot \Delta t} \quad (1-11)$$

平均失效率是指在某一规定时间内失效率的平均值。例如 (t_1, t_2) 内失效率的平均值为

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt \quad (1-12)$$

例 1-2 今有 100 个某种零件,已工作了 6 年,工作满 5 年时共有 3 个失效,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(1-11),时间以年为单位,则 $\Delta t = 1$ 年。

$$\hat{\lambda}(5) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{[N - n(t)] \cdot \Delta t} = \frac{6 - 3}{(100 - 3) \times 1} = 0.0309/\text{年} = 3.09\% \text{ 年}^{-1}$$

如果对该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。

失效率曲线反映了产品总体整个寿命期失效率的情况。图 1-1 为失效率曲线的典型情况,有时形象地称为浴盆曲线。失效率随时间的变化可分为以下三部分:

1. 早期失效期

早期失效期的失效率曲线为递减型。产品投入使用的早期,失效率较高而下降很快。主要由于设计、制造、存储、运输等形成的缺陷,以及调试、磨合、启动不当等人为因素所造成的。由于上述原因,一些产品跨越其早期失效期后,失效率趋于稳定。到 t_0 时失效率曲线已开始变平, t_0 以前称为早期失效期。针对早期失效期的失效原因,应该尽量设法避免,争取失效率低且 t_0 。

2. 偶然失效期

偶然失效期的失效率曲线为恒定型,即 t_0 到 t_1 间的失效率近似为常数。失效主要是由非预期的过载、误操作、意外的天灾及一些尚不清楚的偶然因素所造成。由于失效原因多属偶然,故称为偶然失效期。偶然失效期是能有效工作的时间,这段时间称为有效寿命。

3. 耗损失效期

耗损失效期是递增型。在 t_1 以后失效率上升很快,这是由于产品已经老化、疲劳、磨损、乳化和腐蚀等所谓耗损原因所引起的,故称为耗损失效期。针对耗损失效的原因,应该注意检查、监控、预测耗损开始的时间,提前维修,如图 1-1 中虚线所示,以延长有效寿命。当然,若维修需花费很大的费用,而延长寿命不多,则不如报废更经济。

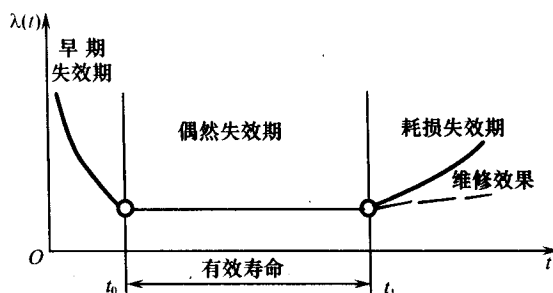


图 1-1 失效率曲线