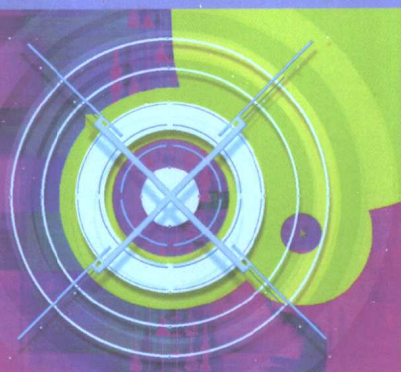


高社生 张玲霞 编著

可靠性 理论与工程应用

KEKAOXING LILUN YU GONGCHENG YINGYONG



国防工业出版社

可靠性理论与工程应用

高社生 张玲霞 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

可靠性理论与工程应用 / 高社生, 张玲霞编著. —北京: 国防工业出版社, 2002.8

ISBN 7-118-02877-0

I. 可... II. ①高...②张... III. ①国防工业-可靠性工程②武器-可靠性工程 IV. TJ

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 039787 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)

涿中印刷厂

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 15½ 351 千字

2002 年 8 月第 1 版 2002 年 8 月北京第 1 次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 22.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

前 言

可靠性理论及应用是以产品的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的许多领域,其推广和应用已给企业和社会带来了巨大的经济效益。

在我国四个现代化建设中,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,在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。广大青年学生由于缺乏系统的可靠性专门知识,走上工作岗位后不能完全适应从事可靠性工作的需要。为此,我们编写了这本《可靠性理论与工程应用》教材,目的是为了让机械、电子、化工、航空、航天与自动化专业的研究生、高年级本科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,提高他们的专业水平与业务素质。

本教材注重内容的新颖性,反映可靠性工程的最新研究状况及发展趋势;注重工程应用性,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,教材内容的叙述尽可能深入浅出,通俗易懂。

本教材是在参阅了国内外可靠性理论与应用方面的大量文献及最新研究成果的基础上,加以系统整理和精心编写而成的。本书初稿曾在西北工业大学研究生、工程硕士生及高年级本科生中讲授过,这为提高教材的质量起到了重要的帮助作用。

本教材第一、四、五、六章由高社生编写,第二、三、七章由张玲霞编写。西北工业大学自动控制系陈明教授主审。在教材的整个编写过程中,陈明教授在编写提纲和组织安排上给予了热情关怀、精心指导和大力支持,详细审阅了书稿并提出了许多宝贵意见。

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。

编 者

内 容 简 介

我国可靠性理论与工程应用方面的发展研究,还远不及国外发达国家。这需要我国这一领域和部门诸多科研工作者的大力研究、实施与推广。《可靠性理论与工程应用》基于当前时代特点和科技发展的态势,密切结合国防现代化和武器装备现代化的需要及时推出,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用。

全书共七章,内容安排合理,层次清晰,系统性强,理论体系完整。该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;注重工程应用性,内容紧密结合国防现代化和武器装备现代化的工程实际;注重文字的简洁性,每部分内容的讲解短小精悍,简明扼要;注重语言的通俗性,内容叙述循序渐进,深入浅出,通俗易懂。

该书是适合机械、电子、化工、航空、航天及自动化专业的研究生和本科生使用的一本很好的教材,也是广大科技工作者学习与知识更新的一本有价值的参考书。

目 录

第一章 绪论	1
1.1 可靠性的发展概况	1
1.2 可靠性的重要意义	3
1.3 可靠性的基本概念	4
1.4 可靠性的研究内容	5
第二章 可靠性的概率统计知识	7
2.1 可靠性特征量	7
2.1.1 可靠度	7
2.1.2 失效概率密度 $f(t)$ 和累积失效概率 $F(t)$	8
2.1.3 失效率 $\lambda(t)$	8
2.1.4 平均寿命	10
2.1.5 寿命方差和寿命标准差	11
2.1.6 可靠寿命、中位寿命和特征寿命	12
2.2 维修性特征量	15
2.2.1 维修度	15
2.2.2 修复率	15
2.2.3 平均修复时间 MTTR	16
2.3 有效性特征量	16
2.3.1 有效度	17
2.3.2 系统有效性	18
2.4 概率的基本运算	19
2.4.1 随机事件	19
2.4.2 随机事件的概率	19
2.4.3 事件间的关系与运算	20
2.4.4 概率运算的基本公式	22
2.5 随机变量的概率分布及其数字特征	27
2.5.1 随机变量的概念	27
2.5.2 离散型随机变量的概率分布	28
2.5.3 连续型随机变量的概率分布	29
2.5.4 随机变量的数字特征	31
2.6 可靠性中常见的概率分布	33
2.6.1 二项分布	33

2.6.2 泊松(Poisson)分布	35
2.6.3 指数分布	36
2.6.4 正态分布	38
2.6.5 截尾正态分布	40
2.6.6 对数正态分布	42
2.6.7 威布尔(Weibull)分布	43
第三章 系统的可靠性分析	47
3.1 不可修复系统的可靠性分析	47
3.1.1 系统可靠性框图的建立	47
3.1.2 串联系统	48
3.1.3 并联系统	50
3.1.4 $m/n(G)$ 表决系统	51
3.1.5 混联系统	54
3.1.6 旁联系统	56
3.1.7 复杂系统	58
3.2 可修复系统的可靠性分析	63
3.2.1 马尔可夫过程的基本概念	64
3.2.2 串联可修复系统	68
3.2.3 并联可修复系统	70
3.2.4 $m/n(G)$ 可修复系统	73
3.2.5 旁联可修复系统	74
第四章 系统的可靠性设计	78
4.1 概述	78
4.1.1 可靠性设计的重要性	78
4.1.2 可靠性设计的目的、任务和要求	79
4.2 可靠性模型	82
4.2.1 概述	82
4.2.2 基本可靠性模型和任务可靠性模型	83
4.2.3 典型的系统可靠性模型	87
4.3 可靠性指标分配	95
4.3.1 概述	95
4.3.2 可靠性指标的分配方法	96
4.4 可靠性预计	107
4.4.1 概述	107
4.4.2 可靠性预计方法	109
4.5 可靠性设计方法	123
4.5.1 概述	123
4.5.2 可靠性设计准则	124
4.5.3 电磁兼容性设计	126

4.5.4 热设计	131
4.5.5 降额设计	137
4.5.6 冗余(余度)设计	140
4.5.7 概率设计方法	148
4.5.8 潜在通路分析	151
4.6 飞机的可靠性设计	155
4.6.1 飞机设计的可靠性问题	155
4.6.2 飞机设计阶段可靠性的定量评定	157
第五章 故障模式影响及危害性分析和故障树分析	160
5.1 故障和故障率	160
5.1.1 故障分类	160
5.1.2 故障率的确定	161
5.2 故障模式影响及危害性分析	162
5.3 故障树分析	166
5.3.1 故障树图形的标志符号	166
5.3.2 故障树分析的步骤	169
5.3.3 确定故障树最小割集的算法	172
5.3.4 故障树的对偶树及其最小路集	175
5.3.5 顶事件概率的计算	177
5.3.6 顶事件失效的计算	177
5.3.7 故障树分析法的优缺点	179
第六章 软件可靠性	181
6.1 概述	181
6.2 软件可靠性的基本概念	181
6.3 软件可靠性的基本特征量	182
6.4 软件的可靠性设计	184
6.4.1 概述	184
6.4.2 软件在线检查	184
6.4.3 软件容错	185
6.4.4 软件故障树分析(FTA)	186
6.4.5 软件失效模式与效应分析(FMEA)	189
6.4.6 软件复杂性控制	194
6.5 提高软件可靠性的途径	202
第七章 可靠性试验	204
7.1 概述	204
7.1.1 可靠性试验的目的	204
7.1.2 可靠性试验的分类	205
7.1.3 可靠性试验的要素	206
7.2 可靠性工程试验	206

7.2.1 环境应力筛选试验	207
7.2.2 可靠性增长试验	210
7.3 可靠性验证试验	216
7.3.1 可靠性验证试验方案的类型及选择方案的原则	217
7.3.2 成败型一次计数抽样检验方案	218
7.3.3 指数寿命分布定时、定数截尾可靠性鉴定试验方案.....	223
7.3.4 指数寿命分布失效率 and 平均故障间隔时间的抽样检验方案	226
7.3.5 指数寿命分布序贯试验方案(PRST 方案)	229
参考文献.....	236

第一章 绪 论

1.1 可靠性的发展概况

可靠性是一门新兴的工程学科。产品的可靠性已成为衡量产品质量的重要指标之一。近年来,世界各发达国家已把可靠性技术和全面质量管理紧密地结合起来,有力地提高了产品可靠性水平。

可靠性工程的诞生可以追溯到 20 世纪 40 年代,即第二次世界大战期间。当时,由于战争的需要,迫切要求对飞机、火箭及电子设备的可靠性进行研究。最早提出可靠性理论的是德国的科学技术人员,德国在 V—1 火箭的研制中,提出了火箭系统的可靠性等于所有元器件可靠度乘积的理论,即把小样本问题转化为大样本问题进行研究。到了 20 世纪 50 年代初期,美国为了发展军事的需要,投入了大量的人力、物力对可靠性进行研究。美国先后成立了“电子设备可靠性专门委员会”、“电子设备可靠性顾问委员会”(AGREE)等研究可靠性问题的专门机构。1957 年 6 月 4 日,美国的“电子设备可靠性顾问委员会”发布了《军用电子设备可靠性报告》。这就是著名的“AGREE”报告。这一报告提出了可靠性是可建立的、可分配的及可验证的,从而为可靠性学科的发展提出了初步框架。“AGREE”报告是美国可靠性工程学发展的奠基性文件。因此,可以说真正为可靠性奠定基础的是美国。

20 世纪 50 年代,前苏联为了保证人造地球卫星发射与飞行的可靠性,开始了可靠性的研究工作。同时,为了解决作战对导弹可靠性的要求,一些国家也先后开展了对可靠性的研究与应用。也就在这一时期,日本企业家认识到,要在国际市场的竞争中取胜,必须进行可靠性的研究。1958 年日本科学技术联盟成立了“可靠性研究委员会”,专门对可靠性问题进行研究。

1961 年,原苏联发射第一艘有人驾驶的宇宙飞船时,宇航员对宇宙飞船安全飞行和安全返回地面的可靠性提出了 0.999 的概率的要求,可靠性研究人员把宇宙飞船系统的可靠性转化为各元器件的可靠性进行研究,取得了成功,满足了宇航员对宇宙飞船系统提出的可靠性要求。也就在这一时期,原苏联对可靠性问题展开了全面的研究。20 世纪 60 年代是美国航空航天事业迅速发展的时期。美国“国家航空航天管理局”(NASA)和美国国防部接受并发展了 20 世纪 50 年代由“AGREE”发展起来的可靠性设计及实验方案。与此同时,计算机硬件也从晶体管到集成电路,并朝着超大规模集成(VLSI)方向发展,计算机的进步主要源于硬件的进步,那时软件的重要性还不显著。软件可靠性问题获得重视是 20 世纪 60 年代末的事。这时,前苏联、法国、日本、英国等国家也相继开展了可靠性工程的研究。20 世纪 60 年代我国在雷达、通信机、电子计算机等方面也提出了可靠性问题。

20 世纪 70 年代,各种各样的电子设备或系统广泛应用于各科学技术领域、工业生产部门以及人们的日常生活中。电子设备的可靠性直接影响着生产的效率、系统、设备以及人们的安全,对可靠性问题的研究显得日益重要。同时,人们也开始了对非电子设备(如机械设备)可靠性的研究,以解决已有的电子设备可靠性设计及试验技术对非电子设备使用时受到限制和结果不理想的问题。在 20 世纪 70 年代,计算机软件可靠性的理论获得很大发展。一方面提出了数十种软件可靠性模型,另一方面是对软件容错的研究,提出了分别与硬件静态冗余和动态冗余相对应的软件 N 文本方法和恢复方法。

20 世纪 70 年代由于我国国家重点工程的需要(元器件的可靠性问题),以及消费者的强烈要求(电视机的质量问题),对各行各业开展可靠性的研究起到了巨大的推动作用。从 1973 年起,原国防科工委和原四机部为了解决国家重点工程元器件的可靠性问题,多次召开有关提高可靠性的工作会议。1978 年提出《电子产品可靠性“七专”质量控制与反馈科学实验》计划,并组织实施。经过 10 年努力,使军用元器件可靠性提高了两个数量级,保证了运载火箭、通信卫星的连续发射成功和海底通信电缆的长期正常运行。1978 年,国家计划委员会、电子工业部及广播电视总局陆续召开了有关提高电视机质量的工作会议。对电视机等产品明确提出了可靠性、安全性的要求和可靠性指标,组织全国整机及元器件生产厂家开展了大规模的、以可靠性为重点的全面质量管理。在 5 年的时间里,使电视机平均故障间隔时间提高了一个数量级,配套元器件使用可靠性也提高了一至二个数量级。

20 世纪 80 年代,可靠性研究继续朝广度和深度发展,中心内容是实现可靠性保证。1985 年,美国军方提出在 2000 年实现“可靠性加倍,维修时间减半”这一新的目标,并已开始实施。20 世纪 80 年代初,我国掀起了电子行业可靠性工程和管理的第一高潮。组织编写可靠性普及教材,在原电子工业部内普遍开展可靠性教育,形成了一批研究可靠性的骨干队伍。1984 年组建了全国统一的电子产品可靠性信息交换网,并颁布了 GJB299—87《电子设备可靠性预计手册》,有力地推动了我国电子产品可靠性工作。同时还组织制定了一系列有关可靠性的国家标准、国家军用标准和专业标准,使可靠性管理工作纳入标准化轨道。在 20 世纪 80 年代,软件可靠性理论研究停滞不前,没有质的飞跃。但软件可靠性的工程实践经验得到不断积累,不少软件可靠性技术在软件工程实践中得以应用。某些技术达到实用化程序,如软件可靠性建模技术、管理技术等。可以说这一时期,软件可靠性从研究阶段逐渐迈向工程化阶段。

20 世纪 90 年代初,原机械电子工业部提出了“以科技为先导,以质量为主线”,沿着管起来—控制好—上水平的发展模式开展可靠性工作,兴起了我国第二次可靠性工作的高潮,取得了较大的成绩。进入 20 世纪 90 年代后,由于软件可靠性问题的重要性更加突出和软件可靠性工程实践范畴的不断拓展,软件可靠性逐渐成为软件开发中需要考虑的重要因素,软件可靠性工程在软件工程领域逐渐取得相对独立的地位,并成为一个生机勃勃的分支。

1991 年海湾战争的“沙漠风暴”行动和科索沃战争表明,未来战争是高技术的较量。现代化技术装备,由于采用了大量的高技术,极大地提高了系统的复杂性,为了保证战备的完好性、任务的成功性以及减少维修人员和费用,可靠性工程范围将大大扩展,需要更多的可靠性技术做保证,需要更加严密的可靠性管理系统,可靠性研究需要上一个台阶。

综上所述,可靠性工程的诞生、发展是社会的需要,与科学技术的发展,尤其与电子技术的发展是分不开的。虽然可靠性工程起源于军事领域,但从它的推广应用和给企业与社会带来的巨大经济效益的事实中,人们更加认识到提高产品可靠性的重要性。世界各国纷纷投入大量人力、物力进行研究,并在更广泛的领域里推广应用。

我国可靠性工程虽发展快,但应该看到,目前与发达国家相比,还有很大差距。为尽快改变我国可靠性工作落后的局面,各级领导和各类人员应尽快从认识上转变观念,树立当代质量观,“以质量求生存,求发展”。把产品性能和可靠性同等看待,这是推动可靠性发展的关键。与此同时,要有效的推动可靠性工程,应将可靠性理论研究成果和可靠性工程技术应用于可靠性工程实践中,把对产品的可靠性要求纳入产品指标体系,并要有相应的考核要求和办法。

1.2 可靠性的重要意义

对于产品来说,可靠性问题和人身安全、经济效益密切相关。因此,研究产品的可靠性问题,显得十分重要,非常迫切。例如,导弹武器系统是由导弹和地面设备的若干个分系统组成,每个分系统又由数台整机组成,每台整机又由几百或几千个元器件组成。如果一个元件失效,一根导线断掉,一个接头接点接触不良,都可能造成事故,引起严重后果。又如,飞机某一系统或某一元器件如果发生故障,就有可能造成机毁人亡的恶性灾难。1971年,苏联三名宇航员在“礼炮”号飞船中由于1个部件失灵而丧生。由此可见,提高产品可靠性的重要意义。

提高产品的可靠性有以下几方面的重要意义。

(1)提高产品的可靠性,可以防止故障和事故的发生,尤其是避免灾难性的事故发生,从而保证人民生命财产安全。1986年1月28日,美国航天飞机“挑战者”号由于1个密封圈失效,起飞76s后爆炸,其中7名宇航员丧生,造成12亿美元的经济损失;1992年,我国发射“澳星”时,由于一个小小零件的故障,使“澳星”发射失败,造成了巨大的经济损失和政治影响。

(2)提高产品的可靠性,能使产品总的费用降低。要提高产品的可靠性,首先要增加费用,以选用较好的元部件,研制包括部分冗余功能部件的容错结构以及进行可靠性设计、分析、实验,这些都需要经费。然而,产品可靠性的提高使得维修费及停机检查损失费大大减小,使总费用降低。例如美国共和国公司在发展F-105战斗轰炸机的过程中,花了2500万美元,使该机的任务可靠度从0.7263提高到0.8986,这样每年可节省维修费5400万美元。

(3)提高产品的可靠性,可以减少停机时间,提高产品可用率,一台设备可以顶几台设备的工作效率。这样,在投资、成本相近的情况下,可以发挥几倍的效益。美国GE公司经过分析认为,对于发电、冶金、矿山、运输等连续作业的设备,即使可靠性提高1%,成本提高10%也是合算的。

(4)对于企业来讲,提高产品的可靠性,可以改善企业信誉,增强竞争力,扩大产品销路,从而提高经济效益。

(5)提高产品的可靠性,可以减少产品责任赔偿案件的发生,以及其他处理产品事故

费用的支出,避免不必要的经济损失。

为了提高产品的可靠性,必须在生产的各个环节上作出努力,但最重要的是设计阶段。如果设计不合理,想通过事后的修理来达到所期望的可靠性,这几乎是不可能的。因此,从事仪器研制和系统设计的科研人员,应该熟悉和掌握保证可靠性的各种方法与手段。本书的目的在于帮助目前和今后从事这方面工作的科研人员完成这个任务。

1.3 可靠性的基本概念

概率论和数理统计是研究可靠性问题的主要工具。概率论能确定可靠性数量特性之间的相互关系。因此,可靠性理论的许多概念是与概率论中的概念密切相关的。而可靠性的测定则主要用的是数理统计方法。

一般所说的“可靠性”指的是“可信赖的”或“可信任的”。我们说一个人是可靠的,就是说这个人是说得做到做得人,而一个不可靠的人是一个不一定能说得做到做得人。是否能做到要取决于这个人的意志、才能和机会。同样,一台仪器设备,当人们要求它工作时,它就能工作,则说它是可靠的;而当人们要求它工作时,它有时工作,有时不工作(或不一定能按计划进行工作),则称它是不可靠的。因此,在非技术范围内,可靠性指的是确实能完成某项工作,不可靠性是指不一定能完成某项工作。但就其实质来说,可用一句话来定义可靠性:即一台仪器设备,在给定时间内,在预期应用中能正常工作的能力。

根据国家标准规定,产品可靠性的定义是指产品在规定的时期内,在规定条件下,在规定的时间内完成规定功能的能力。这里的产品,是指作为单独研究和分别试验的对象任何元器件、设备和系统。从定义不难看出,产品的可靠性的高低,必须是在规定的时期内,在规定的条件下,按完成规定功能的大小来衡量。如果离开了这三个“规定”,就失去了衡量可靠性高低的前提。

规定的条件是指产品所处的使用环境与维护条件,包括机械条件、气候条件、生物条件、物理条件和使用维护条件等。这是对可靠性附加的第一种约束条件。由于这些条件对产品失效都有影响,条件变化了,产品可靠性也随着变化,因此,只能在指定的条件下谈产品可靠性。

规定的时期是指产品储存期,规定的时间是指产品执行任务的时间,这是对可靠性附加的第二种约束条件,也是最重要的约束条件。由于产品交付使用后,会受到各种环境应力的影响,可靠性随着时间的延长而逐步下降。不同的时期和不同的时间,对产品失效的影响也不相同。产品在规定的储存期内,一般都应是可靠的,但超出储存期使用,问题就比较多。如导弹(产品)在规定的发射准备时间内完成检测,并使系统处于良好的可发射状态,称导弹(产品)有效。否则,在规定的时间内不能完成发射准备,称导弹(产品)无效。因此,只能在规定的时期和规定的时间之内谈可靠性。

规定的功能是指产品设计文件上对产品规定的技术性能,这是对可靠性附加的第三种约束条件。各个产品在系统中承担着不同的任务,有着不同的功能。产品完成了规定的功能要求,就算是可靠的,否则,就说是不可靠的。完成功能的能力,通常表示可靠性的定性要求。完成功能的概率,通常表示可靠性的定量要求,是可靠性大小的度量。

以上对可靠性的定义只是定性的,为了使可靠性的定义有一个确定的定量量度,下面

我们给出便于应用数理统计方法,并能广泛使用的可靠性的定量定义。

可靠性就是一个系统在一定时间 t 内不失效的概率 $P(t)$ 。无故障工作概率的含义是指:在规定的条件及规定的时间内不发生故障的概率。设 t 为需要确定的无故障工作概率的时间, T 为系统从开始工作到首次发生故障的概率,那么,我们有下式

$$P(t) = P(T > t) \quad (1.1)$$

即无故障工作的概率是指系统从开始工作到首次发生故障的时间 T 大于待确定无故障工作概率的时间 t 这一事件发生的概率。

由无故障工作概率的定义,显然, $P(t)$ 具有下面三条性质:

(1) $P(t)$ 为时间的递减函数;

(2) $0 < P(t) < 1$;

(3) $P(0) = 1, P(\infty) = 0$ 。

定量研究可靠性,首先,要认识到可靠性所具有的时间特性。产品的可靠性是一个与时间有密切关系的属性,使用时间越长,就越不可靠。所以,在评价一种产品的可靠性时,必须指明是多长时间内的可靠性,离开了时间谈可靠性是毫无意义的。其次,要认识到可靠性所具有的统计特性,建立概率统计的观点。最后,要认识到可靠性具有综合性的特点。产品的可靠性不是从某一个侧面来衡量产品的优劣的,而是从整体上看产品能否完成预期的功能。因此综合性表现了产品的耐久性、无故障性、维修性、可用性和经济性等。

总而言之,可靠性有其可定量的概率统计特性,在设计中可以预计,在试验中可以测定,在生产中可以保证,在使用中可以保持,在整个寿命周期内可以控制。在研究产品可靠性问题时,必须注意可靠性的三大要素,即条件、时间和功能,建立一个基本的观点,即概率统计的观点,并充分认识可靠性具有的时间性、统计性和综合性的特点。

1.4 可靠性的研究内容

可靠性作为一门工程学科,它有自己的体系、方法和技术。主要包括相互关联的三个

1. 可靠性工程

可靠性工程是指为了保证产品在设计、生产及使用过程中达到预定的可靠性指标,应采取的技术及组织管理措施。它是介于固有技术和管理科学之间的一门边缘学科,具有技术与管理的双重性。可靠性技术在产品全寿命周期的各个阶段的应用目的和任务是:

(1) 可靠性设计:通过设计奠定产品的可靠性基础。研究在设计阶段如何预测和预防各种可能发生的故障和隐患,以及确保产品的维修性。

(2) 可靠性试验:通过试验测定和验证产品的可靠性。研究在有限的样本、时间和使用费用下,如何获得合理的评定结果,找出薄弱环节,提出改进措施,以提高产品的可靠性。

(3) 制造阶段的可靠性:通过制造实现产品的可靠性。研究制造偏差的控制、缺陷的处理和早期故障的排除,保证设计目标的实现。

(4) 使用阶段的可靠性:通过使用维持产品的可靠性。研究产品运行中的可靠性监

视、诊断、预测,以及采用售后服务与维修策略,防止可靠性劣化。

产品全寿命周期中的可靠性管理的目的是:以较少的费用、时间实现产品计划所要求的定量可靠性,其任务是对各个阶段的所有可靠性工程技术活动进行规划、组织、协调、控制与监督。

2. 可靠性分析

通过可靠性试验,发现产品的薄弱环节,研究导致薄弱环节的内因和外因,研究导致薄弱环节的机理,找出规律,提出改进措施,这些工作称为可靠性分析。

3. 可靠性数学

研究产品故障的统计规律,研究产品的可靠性设计、分析、预测、分配、评估、验收和抽样等技术的数理统计学方法,概属于可靠性数学研究的内容。

可靠性技术应用于相关领域,可以解决产品的可靠性问题。通过对故障物理、试验技术的研究,提供有关产品故障的机理分析、检测、诊断和设计预防技术;应用数理统计评定技术和现场使用信息反馈等手段,使设计、试验、制造和使用过程形成一个可靠性保证的循环技术管理体系,通过管理指导技术的合理使用,最终实现可靠性目标。

思 考 题

1. 提高产品的可靠性有哪几方面的重要意义?
2. 产品可靠性的定义是什么?其中规定的条件,规定的时期,规定的功能的意义各是什么?

第二章 可靠性的概率统计知识

概率论和数理统计是可靠性工程重要的数学基础。在可靠性工程中,产品寿命、可靠度、失效率等许多基本概念以及各种寿命试验、可靠性设计等解决可靠性问题的重要方法都与概率统计紧密相关。因此理解和掌握概率统计中最基本的概念、方法是学习和掌握可靠性技术的重要前提。本章首先介绍可靠性特征量、维修性特征量、有效性特征量及其含义,然后讨论可靠性工程中常用的概率论与数理统计基础知识。

2.1 可靠性特征量

如前所述,可靠性的确切含义是“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”。产品的可靠性具有定性和定量两层含义。由于可靠性所研究的产品是相当广泛的,因此用来度量产品可靠性的“能力”也是多种多样的。那么在定量研究产品的可靠性时,就需要各种数量指标,以便说明产品的可靠性程度。我们把表示和衡量产品的可靠性的各种数量指标统称为可靠性特征量。产品的可靠性特征量主要有可靠度、失效概率密度、累积失效概率、失效率、平均寿命以及可靠寿命、中位寿命等,下面我们将分别予以介绍。

2.1.1 可靠度

可靠度是“产品在规定条件下和规定时间内完成规定功能的概率”。显然,规定的时间越短,产品完成规定的功能的可能性越大;规定的时间越长,产品完成规定功能的可能性就越小。可见可靠度是时间 t 的函数,故也称为可靠度函数,记作 $R(t)$ 。通常表示为

$$R(t) = P(T > t) \quad (2-1-1)$$

式中 t 为规定的时间; T 表示产品寿命。根据可靠度的定义可知, $R(t)$ 描述了产品在 $(0, t]$ 时间段内完好的概率,且 $R(0) = 1, R(+\infty) = 0$ 。

假如在 $t = 0$ 时有 N 件产品开始工作,而到 t 时刻有 $n(t)$ 个产品失效,仍有 $N - n(t)$ 个产品继续工作(见图 2.1),则 $R(t)$ 的估计值为

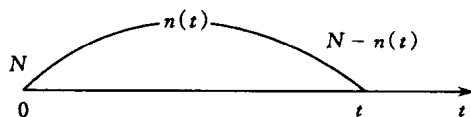


图 2.1 计算 $R(t)$ 的示意图

$$R(t) = \frac{\text{到时刻 } t \text{ 仍在正常工作的产品数}}{\text{试验的产品总数}} = \frac{N - n(t)}{N} \quad (2-1-2)$$

2.1.2 失效概率密度 $f(t)$ 和累积失效概率 $F(t)$

累积失效概率就是寿命的分布函数,也称为不可靠度,记作 $F(t)$ 。它是产品在规定的条件下和规定的时间内失效的概率,通常表示为

$$F(t) = P(T \leq t) \quad (2-1-3)$$

或
$$F(t) = 1 - R(t) \quad (2-1-4)$$

因此 $F(0) = 0, F(+\infty) = 1$ 。

失效概率密度是累积失效概率对时间 t 的导数,记作 $f(t)$ 。它是产品在包含 t 的单位时间内发生失效的概率,可用下式表示

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = F'(t) \quad (2-1-5)$$

或
$$F(t) = \int_0^t f(x) dx \quad (2-1-6)$$

由 $F(t) = 1 - R(t)$, 得 $F(t)$ 的估计值为

$$\hat{F}(t) = \frac{\text{到 } t \text{ 时刻失效的产品数}}{\text{试验的产品总数}} = \frac{n(t)}{N} \quad (2-1-7)$$

由 $f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$, 得 $f(t)$ 的估计值(见图 2.2) 为

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} = \frac{\text{在时间}(t, t + \Delta t) \text{ 内每单位时间失效的产品数}}{\text{试验的产品总数}} = \\ &= \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N\Delta t} = \frac{\Delta n(t)}{N\Delta t} \end{aligned} \quad (2-1-8)$$

其中 $\Delta n(t)$ 表示在 $(t, t + \Delta t)$ 时间间隔内失效的产品数。

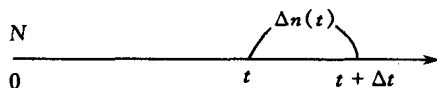


图 2.2 计算 $f(t)$ 的示意图

2.1.3 失效率 $\lambda(t)$

1. 失效率的定义

失效率(瞬时失效率)是:“工作到 t 时刻尚未失效的产品,在该时刻 t 后的单位时间内发生失效的概率”,也称为失效率函数,记为 $\lambda(t)$ 。由失效率的定义可知,在 t 时刻完好的产品,在 $(t, t + \Delta t)$ 时间内失效的概率为 $P(t < T \leq t + \Delta t | T > t)$,在 Δt 时间内的平均失效率为 $\lambda(t, \Delta t) = \frac{P(t < T \leq t + \Delta t | T > t)}{\Delta t}$,当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,就得到在 t 时刻的失效率