

● 21世纪高等院校规划教材

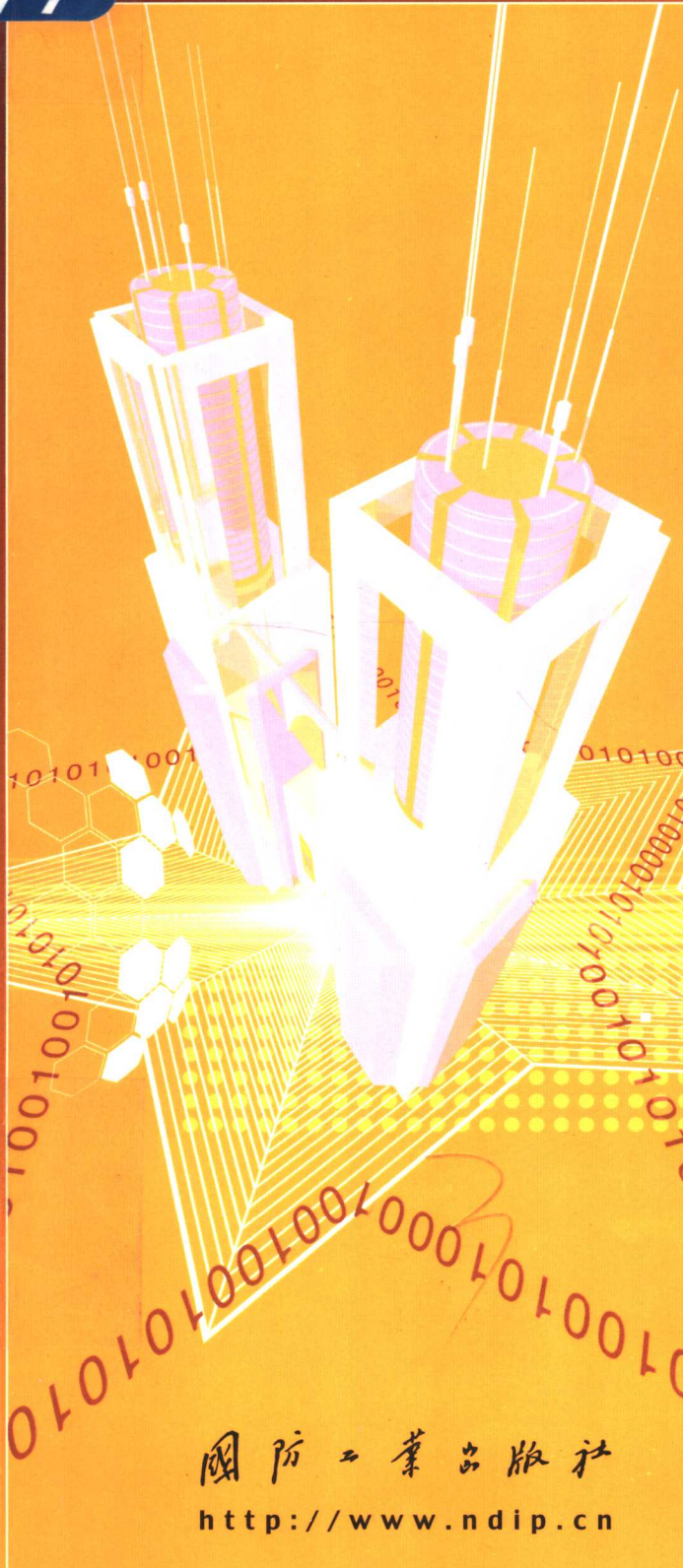
工程可靠性教程

孙新利 陆长捷 编著

国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

GONG CHENG KE KAO XING JIAO CHENG



21 世纪高等院校规划教材

工程可靠性教程

孙新利 陆长捷 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

工程可靠性教程/孙新利,陆长捷编著. —北京:国防工业出版社,2005.1
ISBN 7-118-03714-1

I.工... II.①孙...②陆... III.可靠性工程—教材 IV.TB114.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 123771 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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 10 $\frac{3}{4}$ 187 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—4000 册 定价: 20.00 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

内 容 简 介

本书系统介绍了可靠性在工程应用中的基本理论和方法,其特点是,侧重概念和基础,反映成熟的新成果,理论与工程应用并重,强调教学方法。全书分为10章。第1章、第2章介绍了可靠性的基本概念、定义、基本特征和常用的概率分布;第3章、第4章介绍了不可修系统的可靠性计算方法;第5章介绍了故障树分析法和重要度的概念及其计算方法;第6章扼要分析了三态单元组成的系统的可靠性;第7章、第8章结合实例介绍了典型的可靠性预计和分配方法,以及可靠性增长和加速寿命试验数据的处理方法;第9章讲述了可修系统可靠性指标的计算方法,着重讨论了简便实用的可用度串并联算法;第10章介绍了复杂系统可靠性的数值分析与计算方法,并结合故障树仿真实例进行了讲述。

本书可作为相关专业的学生教材或参考书,也可供工程人员、教师阅读参考。

前 言

可靠性工程是以产品寿命特征作为研究对象的一门新兴的边缘性学科。随着科学技术的日益进步,各种产品的功能越来越先进,结构越来越复杂,同时,产品的高可靠性又日益成为产品的基本要求,基于此,可靠性理论在许多领域中都得到了广泛的发展和应用,并成为产品设计、生产和管理的质量指南,可靠性也日渐成为工科本科生、研究生的学习内容。

面向研究生的可靠性教学有如下特点:一是研究生在本科期间基本没有接触过可靠性知识,基础空白,需要从基本概念讲起;二是研究生教育的层次决定了对课程内容的系统性、深度和前沿性要求较高;三是对课程的工程应用性要求高,特别是面向工程应用专业的学生对理论在工程实践中的应用十分关注。

本书在编写过程中,注意到了上述三个方面的协调和统一,注重基本概念清楚、理论体系相对完整、计算方法先进成熟,强调教学方法和学习方法。

全书分为10章。第1章、第2章介绍了可靠性的基本概念、定义、基本特征和常用的概率分布;第3章介绍了典型不可修系统的可靠性计算方法;第4章结合实例详细介绍了多种处理复杂不可修系统的常用方法和它们各自的特点;第5章系统介绍了故障树法和重要度的概念及其计算方法;第6章对三态单元组成系统的可靠性分析和计算方法进行了讨论;第7章讲述了产品设计生产中经常用到的可靠性预计和分配问题,结合实例介绍了若干种应用广泛的可靠性预计和分配方法;第8章介绍了可靠性增长和加速寿命试验的基本概念、典型计算模型和方法;第9章讲述了可修系统可靠性指标的计算方法,着重讨论了简便实用的稳态可用度的串并联计算方法;第10章介绍了复杂系统可靠性的数值分析与计算方法,数值算法是求解复杂系统可靠性指标的有效的方法之一,本章介绍了两种典型的数值方法:一是复杂网络的最小路和可用度的数值分析方法,二是可靠性仿真算法,并结合故障树仿真实例进行了详细叙述。

本书分为可修系统和不可修系统两大部分。学习不可修系统需要概率论基础和最基本的数理统计基础,学习可修系统还需具备随机过程的基础知识,如果作为本科生教学可只讲授不可修系统。全书例题丰富,叙述详细易懂,有助于读者加深对概念和理论的理解。

在编写过程中,参阅了大量文献并引用了部分文献的研究成果,特此向相关作

者致谢。本书例题和习题等由陆长捷副教授编写,书中插图由罗庆学完成,其余内容由孙新利教授完成。

本书的主要对象是研究生和本科生,也可供工程、科研人员和教师参考。限于水平,错误在所难免,热诚希望广大读者批评指正。

作 者

2004 年 10 月于西安

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 可靠性发展概况	1
1.2 可靠性内容	3
第 2 章 可靠性特征量	4
2.1 可靠度	5
2.1.1 定义	5
2.1.2 可靠度性质	6
2.2 失效特征量	7
2.2.1 寿命分布函数	7
2.2.2 失效密度函数	8
2.2.3 失效率	9
2.2.4 可靠性特征量之间的关系	9
2.3 可靠性寿命特征	11
2.3.1 平均寿命	11
2.3.2 可靠寿命、中位寿命与特征寿命	13
2.4 失效率曲线	14
2.4.1 典型失效率曲线	14
2.4.2 典型失效率曲线的数学模型	16
2.5 常用概率分布	19
2.5.1 指数分布	19
2.5.2 正态分布	20
2.5.3 对数正态分布	21
2.5.4 威布尔分布	21
2.5.5 二项分布	24
2.5.6 泊松分布	24
习题	25
第 3 章 简单不可修系统可靠性分析	26
3.1 概述	26

3.1.1 系统和状态	26
3.1.2 可靠性框图	26
3.2 串联系统	27
3.3 并联系统	29
3.4 贮备系统	33
3.4.1 冷贮备	33
3.4.2 热贮备	37
3.5 表决系统	38
习题	41
第4章 复杂不可修系统可靠性分析	43
4.1 结构函数	43
4.1.1 定义	43
4.1.2 结构函数与可靠度	45
4.2 单元状态枚举法	45
4.3 全概率分解法	47
4.4 最小路法	48
4.4.1 网络及其路集	49
4.4.2 系统最小路集的求法	50
4.4.3 由最小路集计算系统可靠度	52
4.4.4 重复单元系统的可靠性计算	56
4.5 最小割法	58
4.5.1 基本概念	58
4.5.2 最小割集的方法	59
4.5.3 由最小割集计算系统失效概率	59
习题	59
第5章 故障树分析法	61
5.1 概述	61
5.1.1 故障树分析法	61
5.1.2 FTA的步骤和注意事项	62
5.1.3 FTA的名词术语和符号	64
5.1.4 故障树的规范化和简化	65
5.2 故障树的定性分析	67
5.2.1 故障树结构函数	67
5.2.2 下行法	68

5.2.3 上行法.....	69
5.3 故障树的定量分析.....	70
5.3.1 顶事件发生概率的精确计算.....	70
5.3.2 顶事件发生概率的近似计算式.....	71
5.4 重要度分析.....	71
5.4.1 基本概念.....	72
5.4.2 单元的概率重要度.....	72
5.4.3 单元的结构重要度.....	73
5.4.4 单元的关键重要度.....	75
习题	75
第6章 三态系统可靠性分析	77
6.1 串并联系统.....	77
6.1.1 串联系统.....	77
6.1.2 并联系统.....	78
6.1.3 串-并联系统.....	79
6.1.4 并-串联系统.....	79
6.2 最佳冗余度的计算.....	80
6.2.1 并联系统.....	80
6.2.2 串联系统.....	82
6.3 共因失效模式.....	82
习题	84
第7章 可靠性预计与分配	85
7.1 可靠性预计.....	85
7.1.1 定义与目的.....	85
7.1.2 元件记数法.....	86
7.1.3 元器件应力分析法.....	86
7.1.4 上下限法.....	87
7.2 可靠性分配.....	89
7.2.1 定义与目的.....	89
7.2.2 无约束条件的可靠性分配方法.....	90
7.2.3 有约束条件的系统可靠性分配方法.....	92
习题	98
第8章 寿命试验及其数据分析	99
8.1 引言.....	99

8.2 可靠性增长试验及模型	100
8.2.1 可靠性增长试验	100
8.2.2 数据处理方法	101
8.3 可靠性加速寿命试验	106
8.3.1 不同应力下可靠性特征量之间的基本关系	107
8.3.2 统计加速模型	108
第9章 马尔可夫型可修系统的可靠性	112
9.1 可修系统及其特征量	112
9.1.1 可修系统	112
9.1.2 可修系统可靠性特征量	112
9.1.3 马尔可夫型可维修系统	115
9.2 马尔可夫过程概述	116
9.2.1 随机过程	116
9.2.2 马尔可夫过程	117
9.2.3 可靠度和首次故障前平均时间	120
9.2.4 单部件可修系统	122
9.2.5 稳态特征量之间的关系	123
9.3 串联可修系统	124
9.3.1 N 个相同单元组成的串联可修系统	124
9.3.2 N 个不同单元组成的串联可修系统	125
9.4 并联可修系统	128
9.4.1 N 个相同单元和一个修理工的并联可修系统	128
9.4.2 两个不同单元和一个修理工的并联可修系统	129
9.4.3 故障率变化的并联可修系统	130
9.5 表决可修系统与贮备可修系统	132
9.5.1 表决可修系统	132
9.5.2 贮备可修系统	133
9.6 可修系统的稳态可用度的串并联算法	135
9.6.1 引言	135
9.6.2 串联系统	135
9.6.3 并联系统	140
9.6.4 进一步分析与讨论	144
第10章 可靠性数值分析与仿真	146
10.1 节点遍历法	146

10.1.1	基本原理	146
10.1.2	算法框图	148
10.1.3	直接不变化方法	150
10.2	可靠性仿真	152
10.2.1	基本原理	152
10.2.2	故障树可靠性仿真	154
10.2.3	“维修如新”可修系统的仿真	155
10.2.4	“维修如旧”可修系统的仿真	157
参考文献		161

第 1 章 绪 论

1.1 可靠性发展概况

可靠性是一门新兴的工程学科,是研究产品全寿命过程中故障的发生原因、发展规律,达到预防故障、降低故障率、提高产品质量之目的工程技术。

可靠性概念的诞生可以追溯到 1939 年。当时美国航空委员会提出了飞机事故率的概念,这可能是最早的可靠性指标。在第二次世界大战期间,战争迫切需要对飞机、火箭及电子设备的可靠性进行研究。1944 年德国在 VI 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,这是最早的系统可靠性理论。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,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”报告是可靠性工程学发展的奠基性文件。

20 世纪 50 年代,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。同一时期,日本企业家也认识到,产品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,苏联发射第一艘有人驾驶的宇宙飞船时,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,满足了对宇宙飞船系统提出的可靠性要求。从此,苏联对可靠性问题展开了全面深入的研究。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。

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效率和设备寿命以及人员的生命安全,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和计算模型应用到非电子设备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也有了深入研究。

我国的可靠性工作起步并不晚,20 世纪 50 年代就建立了温热带环境暴露试验机构,1972 年在此基础上建立了我国的电子产品可靠性与环境试验研究所。20 世纪 70 年代,由于我国重点工程的需要,以及消费者对提高家用电器等产品质量的强烈需求,对各行各业的可靠性研究工作起到了巨大的推动作用。从 1973 年起,原国防科工委和原电子工业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。经过十余年努力,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、原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指标和安全性要求,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”的新目标,并付诸实施。同期,我国在电子行业积极开展可靠性质量管理的普及工作。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。

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”的思路,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。

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。现代化技术装备中采用了大量的高新技术,极大地提高了系统的复杂性,为了保证装备的完好性、任务的成功性以及减少维修人员和费用,可靠性研究范围将大大扩展,也需要更加严密的可靠性管理体系。

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。虽然工程可靠性起源于军事领域,但从它的推广应用到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。

1.2 可靠性内容

在可靠性理论发展过程中,逐渐形成了三个主要分支:

① 可靠性工程或工程可靠性。它包括系统可靠性分析、设计、评价和使用,贯穿于从产品设计直到产品退役的整个寿命周期。其主要内容是,运用系统的观点和方法论从设计、生产和使用等角度来研究产品的可靠性,并对产品可靠性进行控制,是一门综合性的工程学科。

② 可靠性物理学或故障物理学。它是新发展起来的元器件失效分析技术,着重于从微观角度出发,研究元器件的失效发展过程和失效机理,以采取纠正措施,提高可靠性。

③ 可靠性数学。可靠性数学是可靠性研究的重要基础理论之一,主要研究解决可靠性问题的数学方法和数学模型以及可靠性的定量规律。它属于应用数学的范畴,涉及概率论、随机过程、运筹学、拓扑学等数学分支。

可靠性活动存在于产品的整个寿命期内,大体分为以下几个阶段。

① 可靠性设计阶段。其主要工作是根据用户需要,定出对产品的可靠性要求。制定可靠性要求时要考虑到现有产品的可靠性状态、现有技术水平、产品费用、功能、使用环境等各种因素。

可靠性设计的主要内容应包括:实现可靠性指标的方法、途径与组织措施。要制定出实施计划、质量控制计划、可靠性验证试验规划、人员培训计划及可靠性数据管理计划等,并要有检查计划实施情况的手段。

② 工程开发阶段。主要任务是在基础研究和探索新技术应用的基础上形成各种可供选择的方案。提出有效措施,设计和建造样机并对样机进行严格的试验与鉴定。估计出生产和使用的费用,为生产和使用提供所需的全部资料。

③ 批生产阶段。在生产过程中进行可靠性控制,以保证产品的可靠性和维修性达到设计要求。

④ 使用阶段。产品的使用阶段应包括产品的贮存、运输、定期检查、使用前的准备工作、按规定用途使用和维修等所有活动。此阶段的基本任务就是保持产品的可靠性,提高产品的维修性和有效性。

应该指出的是,产品的可靠性是设计出来、生产出来、管理出来的。在产品整个寿命期内可靠性工程的活动有两个并行的过程:一是工程技术过程,主要是在设计、制造时,使产品具有规定的固有可靠性;二是可靠性管理。在产品的使用周期内,设法维持产品的固有可靠性,提高产品的维修性和有效性。

总之,可靠性活动贯穿于产品的全寿命过程中,设计、生产、管理三者不可偏废。

第2章 可靠性特征量

为了对产品可靠性做出定量描述和分析,本章将阐述表征可靠性数量特征的各种可靠性特征量。

所谓可靠性特征量,是用来描述产品总体可靠性高低的各种可靠性数量指标的总称,其理论值,即期望值是惟一的。在针对具体对象进行具体估算时,其观测值与产品数据和数据的处理方法等有关。

这些特征量具有如下特点:

- ① 能用数值简单而明确地表达和判定产品的可靠性、维修性和有效性。
- ② 能用数学方法表达特征量之间的关系,方便地获取所需要的结果。
- ③ 能够揭示影响产品可靠性的各种因素和描述它们的影响程度。
- ④ 能充分利用产品的各种数据。

不同特征量的用途各有所不同,在不同的情况下,产品的可靠性可以用不同的特征量来表示。

在讨论可靠性特征量以前先讨论几个经常用到的术语——可修系统、不可修系统、产品失效和产品寿命。

系统可分为可修系统与不可修系统两大类。所谓不可修系统,是指系统或其组成单元一旦发生失效,不再修复,系统处于报废状态,这样的系统称为不可修系统。不可修是指技术上不能够修复,经济上不值得修复,或者一次性使用,没有必要进行修复。可修系统是指系统的组成单元发生故障后,经过维修能够使系统恢复到正常工作状态。维修的含义是广泛的,可以是更换,也可以是修理等等。

产品丧失规定的功能,对不可修复产品一般称为失效。对可修产品一般称为故障。在英语中故障和失效都用一个词“Failure”表示,习惯上,对二者没有严格的区分,一些文献在讨论不可修产品可靠性时,也常常使用故障、故障率等概念。

产品在规定条件下,规定时间内不能完成规定的功能,则称为该产品失效。根据该定义,一个产品是否处于失效状态,与其各项规定功能有关,例如一个产品在某一个标准下是处于失效状态,在另一个较低的标准下很可能就处于正常工作状态。

产品在工作中常常由于偶然因素而发生失效,对一件产品而言,在哪一时刻失效,是无法事先预知的,因此失效是一个随机事件。但是大量随机事件中包含着一定的规律,偶然事件中包含着必然性。虽不能确知某一个产品发生失效的时刻,但

是可以估计产品在某一时刻发生失效的概率。

对于一个产品而言,只能是处于工作状态或处于失效状态,二者必居其一,两者为互逆事件。如果用 A 表示产品处于工作状态,用 $\bar{A}$ 表示产品处于失效状态,则该产品的两种状态关系可以表示为

$$\begin{cases} A \cdot \bar{A} = 0 \\ A + \bar{A} = 1 \end{cases} \quad (2.1)$$

第一个关系式描述了产品不可能同时既是工作状态又是失效状态的逻辑关系;第二个关系式则表示了产品处于工作状态或处于失效状态,二者必居其一的逻辑关系。

假设产品发生失效的概率为 $P(A)$,则不发生失效的概率为 $1 - P(A)$,即

$$P(A) = 1 - P(\bar{A}) \quad (2.2)$$

在前面讨论中我们知道,产品有两类,一类是不可修产品,一类是可修产品,对两类不同的产品,寿命有不同的定义:对不可修产品是指发生失效前的工作时间;对可修产品是指相邻两次故障之间的工作时间,这时也称故障间隔工作时间。

任何产品,即使是同类产品也都有各自不同的寿命,它们寿命的长短只有经过一定的试验或者使用以后方可知道,所以寿命是一个随机变量,一般用时间 T 来表示。

2.1 可 靠 度

2.1.1 定义

按照国家标准规定,对于不可修系统,可靠性的基本定义是:产品在在规定的条件下和规定时间内,完成规定功能的能力。

“产品”是指作为单独研究和实验的对象,它可以是某一个系统、设备、元件等等。在选定“产品”时应该明确其含义,划清“产品”与外界其它设备的界线等。

“规定条件”是指产品的工作条件、环境条件等。如发动机工作时的振动应力条件、电子设备工作时的电应力条件等;产品外部的气候条件、力学条件等就是环境条件。产品的工作条件、环境条件不同,其可靠性也不相同。

“规定时间”是指产品执行任务的时间。任务时间长短随产品对象不同和使用任务不同而各异,例如火箭的飞行要求在几分钟到几十分钟内可靠,而卫星则要求在几年到十几年内可靠。一般来说,产品工作时间越长,其可靠性越低。

“规定功能”是指产品的用途,也就是产品规定的、必须具备的功能及其技术指标。产品规定功能的多少和技术指标的高低,直接影响到产品可靠性指标的高低。同一产品如果规定的功能不同或技术指标不同,其可靠性指标会有很大区别。因此,

在分析评价产品的可靠性时,必须要明确产品的功能和技术指标,并进而制定出判断产品失效的量化指标,即失效判据,这种判据既包括结构失效,也包括性能失效。

“能力”的强弱是指产品完成其规定功能的可能性大小,但是衡量可能性大小仅靠定性描述是不够的,还必须有定量描述,通常用“概率”来度量这种可能性,因此产品可靠性基本定义也可表述为:产品在规定条件下和规定时间内,完成规定任务的概率。例如,怎样理解“某产品可靠性为 90%?”可以这样理解,对大量的该产品,经过多次抽检,平均而言“抽检 100 件产品,有 90 件合格品”。

以上是对可靠性的定性描述,为了使可靠性的定义有一个明确的定量量度,需要给出其定量描述。

产品在规定的条件下和规定的时间区间内,完成规定功能的概率称为可靠度,记为 $R(t)$,根据可靠度和寿命的定义,有下式

$$R(t) = P(T > t) \quad (2.3)$$

其中 T 是产品的寿命,它是一个随机变量。上式表示了产品的寿命大于某一规定工作时间 t 的概率。

2.1.2 可靠度性质

由可靠度的定义, $R(t)$ 具有下面三条性质:

(1) $R(t)$ 为时间的递减函数。

(2) $0 \leq R(t) \leq 1$ 。

(3) $R(0) = 1, R(\infty) = 0$ 。

在实际使用中,有时需要确定某一使用时期的可靠度,在这一使用期间之前,产品已工作了一段时间。例如,设一产品已经工作了时间 t_0 ,考察其在继续工作中 t 时刻的可靠度。根据条件概率公式得

$$\begin{aligned} R(t+t_0|t_0) &= P\{T > t+t_0 | T > t_0\} = \\ &= \frac{P\{T > t+t_0, T > t_0\}}{P\{T > t_0\}} = \\ &= \frac{R(t+t_0)}{R(t_0)} \end{aligned}$$

即

$$R(t+t_0|t_0) = \frac{R(t+t_0)}{R(t_0)} \quad (2.4)$$

式(2.4)的含义是,产品已正常工作了时间 t_0 以后再继续工作 t 时间的可靠度等于产品在 $t+t_0$ 时刻的可靠度与产品在 t_0 时刻的可靠度之比。

定量研究可靠性,要充分认识到可靠性具有的时间性、统计性和综合性的特点。首先,要认识到可靠性所具有的时间特性。产品的可靠性与时间有密切关系,