

上海市普通高校
“九五”重点教材

可靠性工程 可靠性工程

上海理工大学 居滋培 编



原子能出版社

可靠 性 工 程

上海市教育委员会 主编

上海理工大学 居滋培 编

原 子 能 出 版 社

内 容 介 绍

本书主要介绍可靠性工程的一些基本理论和工程方法,全书共分八章。第一、二章介绍了可靠性的基本知识、可靠性数学基础和基本的可靠性指标;第三、四章阐述了产品进行可靠性设计的一般程序和提高产品可靠性的设计方法;第五、六章是有关可靠性试验和数据处理的方法;第七章为系统可靠性分析;第八章介绍数字系统和计算机软件可靠性分析。

本书内容比较全面,适合于工科院校电子、信息工程、计算机、电气工程及自动化、仪器仪表等专业本科生和研究生作为教材使用,也可供从事工程设计、质量管理的工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

可靠性工程/屈滋培著. —北京:原子能出版社,2000.3

ISBN 7-5022-2159-X

I. 可… II. 屈… III. 可靠性工程 IV. TB114.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 03462 号

©原子能出版社,2000

原子能出版社出版发行

责任编辑:刘辉

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码:100037

原子能出版社印刷厂印刷 新华书店经销

开本:787×1092mm 1/16 印张 11 字数 280 千字

2000 年 3 月北京第 1 版 2000 年 3 月北京第 1 次印刷

印数:1—1500

定价:25.00 元

前 言

可靠性工程技术作为一门边缘的工程学科受到重视已有三十多年,它首先是在美国的国防、航空、航天、电子等工业部门应用发展起来的。各发达国家相继仿效并大力推广应用到民用工业部门,其发展速度是十分惊人的。可靠性技术不仅能带来巨大的经济效益,还直接关系到生产安全,节约资源能耗,甚至国家的声誉。有人预言:今后只有那些具有高可靠性的产品及其企业,才能在日益激烈的市场竞争中幸存下来。

可靠性是一项全面的工作。在可靠性技术出现之前,人们只凭经验或事后试验,或将产品置于现场使用到用坏为止,来考察产品的可靠性和稳定性,事前对产品本身的固有可靠性能否达到指标要求存在着很大的盲目性。而可靠性技术就是研究通过可靠性设计、试验、控制、预测和综合的一门工程学科。它研究的内容包括电子的和机械的、零件部件组件的和整机系统的、硬件的和软件的可靠性设计、可靠性分析、可靠性试验和可靠性验证。

可靠性工程首先应该从设计做起,可靠性的定量要求必须在产品设计中落实,即要预计和分配产品可靠性指标,论证方案的可靠性,联系产品结构具体实施冗余设计、减额设计、热设计、容差和漂移设计、电磁兼容性设计以及机械零件的概率设计等,还应对设计和制造过程进行全面控制,通过产品可靠性试验,进行失效分析和质量信息反馈,提出可靠性技术措施,及时改进设计,使产品可靠性得到提高。

在计算机应用日益广泛的今天,软件的故障率已占了相当大的比例,因此本书的第八章介绍了一些软件可靠性的分析方法和故障模型。

在可靠性工程的重要性被广泛认识的同时,许多高校特别是工科院校相继开设了这门课程。我们从 1989 年起就在工科专业及研究生中开设了可靠性工程课程,并于 1991 年自编了讲义。本书就是在此基础上,根据近十年来教学中的体会,整理编写而成的。由于新技术的发展,又增加了新的内容和新的章节。本书适合于电子、计算机、通信、仪表、机械等专业本科生和研究生使用。由于水平有限,在编著本书中定会存在不足之处,望广大读者批评指正。在本书编写中,秦永烈、傅志中和黄海滨等同志做了不少前期工作,也得到了刘晶、李磊等同志的帮助和支持,在此表示深切的感谢。本书是上海市普通高校“九五”重点教材,得到了世界银行的资助,为此向有关部门及组织表示感谢!

编 者

2000 年元月于上海理工大学

目 录

前 言

第一章 绪论	(1)
第一节 可靠性的基本概念	(1)
一、可靠性的定义	(1)
二、狭义可靠性和广义可靠性	(2)
三、固有可靠性和使用可靠性	(2)
第二节 可靠性工程的发展历史和在生产中的重要作用	(3)
一、可靠性问题的提出和发展	(3)
二、可靠性是产品质量的一项重要标志	(3)
三、可靠性工程的经济效益	(4)
四、可靠性技术的基本内容和工作阶段	(4)
第二章 可靠性工程中的特征量	(6)
第一节 概率和数理统计	(6)
一、随机事件和概率	(6)
二、数理统计的基本概念	(6)
三、概率分布	(7)
第二节 可靠性工程中的特征量	(10)
一、可靠性特征量	(11)
二、可靠度	(11)
三、累积失效概率	(12)
四、寿命概率密度	(13)
五、失效率	(14)
六、平均寿命	(15)
七、可靠寿命	(17)
第三节 失效率的基本类型和产品的失效规律	(17)
一、早期失效型	(17)
二、恒定失效率型	(18)
三、耗损失效型	(18)
四、产品的失效规律	(18)
第四节 寿命分布	(19)
一、指数分布	(20)
二、威布尔分布	(22)
三、正态分布和对数正态分布	(23)
第五节 可靠性特征量的选取	(25)

一、指数分布	(25)
二、正态分布	(26)
三、其它分布或未知分布	(26)
四、可靠性特征量选取序列	(26)
第三章 可靠性预计和分配	(28)
第一节 可靠性预计在产品各阶段的作用	(28)
一、可靠性预计的重要性	(28)
二、可靠性预计的分类及方法	(28)
三、可靠性预计的局限性	(29)
第二节 可靠性预计的一般程序	(29)
一、绘制产品的功能框图	(29)
二、绘制可靠性方框图	(29)
三、可靠性特征量的确定	(29)
四、建立可靠性数学模型	(30)
五、单元可靠性预计	(30)
六、系统(产品)可靠性预计	(30)
第三节 元器件(零部件)的失效率预计	(30)
第四节 系统可靠度预计	(34)
一、系统可靠性计算中的几种主要数学模型	(35)
二、系统可靠性预计方法	(42)
第五节 可靠性分配	(45)
一、可靠性分配的目的	(45)
二、可靠性分配的方法	(45)
第四章 可靠性设计方法	(49)
第一节 概述	(49)
第二节 元器件的选择与降额设计	(50)
一、元器件的选择	(50)
二、降额设计	(51)
第三节 电路的简化设计	(53)
一、电路简化设计的条件	(53)
二、电路简化设计的主要途径	(54)
第四节 容差与漂移设计	(55)
一、均方根偏差设计法	(55)
二、最坏情况设计法	(57)
三、蒙特卡洛法	(58)
第五节 电磁兼容性设计	(59)
一、电磁干扰模型	(59)
二、屏蔽设计	(60)

三、接地设计	(61)
四、抑制干扰的一些方法	(63)
第六节 热设计	(65)
一、传热的基本方式	(65)
二、热设计的基本原则	(70)
第七节 概率设计工程方法	(70)
一、设计变量的概率分析	(71)
二、实例——拉伸载荷下的拉杆设计	(74)
第五章 可靠性抽样验证试验	(76)
第一节 可靠性试验中的一些基本概念	(76)
一、可靠性试验的目的	(76)
二、可靠性试验的三要素	(76)
三、可靠性试验的程序	(77)
四、可靠性试验的分类	(77)
第二节 标准型可靠性抽样验证试验	(79)
一、接收概率和抽样验证试验	(79)
二、标准型抽样检验方案的制定	(85)
第三节 指数分布抽样验证试验	(90)
一、指数分布的失效率抽样试验	(90)
二、指数分布的平均寿命抽样试验	(95)
三、序贯抽样方案	(98)
第六章 寿命试验的数据处理方法	(103)
第一节 图分析法	(103)
一、威布尔分布情况下的图分析法	(103)
二、正态分布情况下的图分析法	(107)
三、对数正态分布情况下的图分析法	(109)
第二节 寿命分布和参数估计的计算机分析	(110)
一、基本原理	(110)
二、程序设计	(111)
第三节 极大似然估计	(113)
一、指数分布情况下的应用	(114)
二、威布尔分布情况下的应用	(114)
三、正态和对数正态分布情况下的应用	(115)
第四节 参数的区间估计	(117)
一、指数分布下的区间估计问题	(117)
二、完全样本正态分布下的区间估计	(120)
第五节 非参数估计	(122)

第七章 系统可靠性分析	(124)
第一节 失效模式及效应分析	(124)
一、概述	(124)
二、FMEA 和 FMECA 的任务和所需的资料	(124)
三、失效模式分析	(125)
四、危害度分析	(126)
五、分析步骤	(127)
六、FMEA 的矩阵	(128)
第二节 系统故障树分析法	(131)
一、故障树分析的目的	(132)
二、故障树有关基本术语	(132)
三、故障树分析步骤	(133)
四、故障树分析报告	(136)
五、故障树定性分析例题	(136)
第八章 软件可靠性	(140)
第一节 软件可靠性的基本概念	(140)
一、软件可靠性问题的重要性	(140)
二、软件生存期	(141)
三、软件可靠性与硬件可靠性的比较	(142)
四、软件失效机理	(143)
五、软件可靠性因素	(144)
第二节 提高软件可靠性的方法	(145)
一、需求分析阶段	(145)
二、设计阶段	(145)
三、软件实现阶段	(147)
四、软件测试阶段	(147)
五、软件维护阶段	(149)
第三节 软件的容错技术	(149)
一、恢复块(RB)结构	(149)
二、N 重版本程序结构	(150)
三、自校验软件	(151)
四、提高软件的健壮性	(151)
附录 1 习题	(153)
附录 2 附表	(159)
1. χ^2_D 分布下侧分位数 $\chi^2_p(v)$	(159)
2. $\Gamma(1 + \frac{1}{m})$ 数值表	(166)
3. 标准正态累积分布函数	(167)
参考文献	(170)

第一章 绪 论

“可靠性”这个词的应用已经有很长的历史了,但过去对其含义的理解往往是顾名思义而已。随着科学技术的发展,可靠性已成为一门专门的学科,并不断地得到发展,其含义已有了特定的严格定义,包含的内容也不断丰富。

第一节 可靠性的基本概念

一、可靠性的定义

在日常生活中,我们都希望产品能够尽量完好地为使用者所用。不论是在什么时候,在什么条件下都能完成它的功能。但实际上在时间和条件上都会有一定限制,不可能是无限制的。可靠性的定义是: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。

所谓产品即能够被单独考虑的任何元器件、零部件、组件、设备或系统。它可以由硬件、软件或兼有两者组成。

就电子设备而言,产品可能是整个系统如计算机系统、通信系统等,也可以是一台电子设备,同样也可以是一个组件或元件,可大可小,完全视人们所研究的问题的范围而定。

随着可靠性工程应用范围的扩大,不但研究产品,有时还将和机器设备相联系的人的因素也看作为一个整体加以研究,如计算机系统常将整个人机系统作为研究对象。计算机技术,特别是软件技术的发展,使计算机语言、软件都成了产品,对软件可靠性的研究,实际上已经将软件也包括到产品中去了。

总之,随着可靠性研究领域和应用范围的扩大,研究对象也不断扩大,产品的含义也在不断地扩充。就产品性质来分又可分为不修理产品(如电子元件、一些敏感元件等)和修理产品(如计算机、仪表系统等)。

产品的使用条件和产品的寿命与质量是有直接关系的,这些条件包括环境条件、动力条件、负载条件、使用和维护条件等。

电子设备的环境条件是比较复杂的,实际上它不仅包括了产品正常工作时经受的环境,也包括运输、贮存和安装时经受的环境,实际的环境条件通常是由若干单一环境复合而成的。例如气候环境就可以包括设备工作的温度、湿度、大气压力、气压变化等多种环境;机械环境就可能包括了冲击、振动、自由跌落等。对于电子仪器来说又常会受到电场、磁场的干扰。所以环境条件是比较复杂的综合性条件。国际电工委员会将产品的环境条件分为气候环境、机械环境、电磁环境和生物与化学环境等四类。为了正确反映出产品可靠性,必须规定条件,譬如在什么温度下工作,最高工作温度和最低工作温度是多少,规定湿度、大气压的数值等等。此外也必须规定振动、电磁场、生物和化学环境等各种和设备的正常工作有关系、会影响设备寿命的条件。正是由于设备的环境条件比较复杂,国际电工委员会的标准是

根据实际使用情况选择环境参数及其严酷程度的分级。

可靠性是用时间尺度来描述的质量特性。即一个产品从使用时开始,随着时间的推移,能否稳定保持原有功能和性能。产品的这种特性和时间紧密联系在一起,如果一个产品可靠性高,意味着寿命长、故障少。所以离开了时间就无可靠性可言。可靠性定义中“规定的时间”是可靠性区别于产品其它特性的重要特征。

在可靠性的定义中,还有第三个“规定”,即“规定功能”。所谓功能是为提供给定的服务,产品所必须具备的功能或组合功能。功能不仅是产品应该完成的任务,还包括完成这些任务的性能指标。如对仪表来说,常有精度、线性度、量程、分辨力、灵敏限、响应时间、动态范围等。对于同一类型的仪表,应工作于规定功能之下,否则由于其功能不同,可靠性就可能不同,譬如某温度检测仪表,规定用于测量 0~100 ℃ 的温度,如用来测量 800~1 000 ℃ 的温度其可靠性可能有显著的降低。

二、狭义可靠性和广义可靠性

上述的可靠性我们常称为狭义可靠性,它仅表示产品在某一稳定时间内发生失效的难易程度。但是事实上,除了一部分元件外,大多数的设备整机与系统都是可以维修的。所以要表示其完成功能的能力还必须考虑其维修性,即仪表失效后是否能很快地恢复其功能而继续工作。这样,可靠性的含义对于修理产品来说就应该更广泛一些。前面定义的可靠性再加上维修性的内容称为广义可靠性,并采用产品的“可用性”这一术语来描述,它在整机与系统分析中是常用的。对于不修理产品而言,一般仅在狭义可靠性范围内讨论。

相对于给定的规定功能,产品的一种可能故障状态称为故障模式。

引起失效的物理、化学或其他过程称为失效机理。

三、固有可靠性和使用可靠性

产品的可靠性又有固有可靠性和使用可靠性之分。固有可靠性是产品早在设计阶段就确定了的可靠性指标,并在各生产阶段得以确定。这种性质是产品本身所具有的。它是由生产方在一定的工作条件下检测得到,而由可靠性设计、可靠性管理保证的。

但是,即便是一个可靠性很好的产品,如果由于包装、运输、安装、使用、维修等环节中受到各种不良因素的影响也会降低其可靠性。譬如运输中的冲击,使用中环境的变化,操作的失误,都会使产品失效或寿命下降。因此可靠性不仅和生产而且和产品所涉及的各个环节都有关,我们将非设计、制造环节中所存在的可靠性称为使用可靠性。而产品的实际可靠性应该是固有可靠性和使用可靠性之和。表 1-1 列举了产品不可靠的原因及比例。

表 1-1 产品不可靠的原因及比例

可 靠 性	固 有 可 靠 性	零部件材料	30 %	技 术	电 气	30 %
		设计技术	40 %		机 械	10 %
		制造技术	10 %	制 造	20 %	
	使 用 可 靠 性	使用(运输、环境、操作、安装、维 修、技术)	20 %	现场使用	30 %	
				其 它	10 %	

第二节 可靠性工程的发展历史 和在生产中的重要作用

一、可靠性问题的提出和发展

可靠性概念的产生,可以追溯到1939年。当时美国航空委员会提出飞机事故率的概念和要求,这可能是最早的可靠性指标。1944年纳粹德国试制V-2火箭袭击伦敦,有80枚火箭还没有起飞就在起飞台上爆炸。经过研究,人们提出了火箭可靠度是所有元器件可靠度乘积的结论,这是最早的系统可靠性概念。

到了50年代可靠性工程才作为一门学科开始兴起。在第二次世界大战中,美国的军用电子设备及航空设备由于巨大的失效和故障面临着越来越严重的局面。在整个战争中美国由于飞行事故损失飞机为21 000架,比被击落的飞机还要多1.5倍。在1949年美国海军电子设备有70%失效,每一个使用中的电子管要有9个新电子管作为备件,空军轰炸用电子装置很少能20小时无故障工作。1955年国防开支的30%用于维修和使用,以后又增加到了70%。这样巨大的失效,成为不堪忍受的负担。在这种严重的形势下,1950年美国成立了国防部电子设备可靠性调查委员会。1950~1952年这个委员会十分活跃,海军委托维托公司、贝尔研究所研究电子零件的故障分析,陆军与康奈尔(Conell)大学签订了电子管故障分析长期合同,此外空军请朗特(RAND)公司对军用电子装置的可靠性问题进行全面调查。在此基础上于1952年提出了一份报告,并于同年把该委员会升级为电子装置可靠性咨询委员会(AGREE),提出17项建议,并相继成立了元器件的可靠性咨询委员会,如电子咨询委员会(AGET),电子零部件咨询委员会(AGEP)。1956年又设置了9个专业分会,并于1957年6月发布了有名的“电子装置可靠性咨询委员会报告”(即“AGREE报告”),后来此报告成为可靠性工程的奠基文献。从此以后以可靠性为标志的军用规范和MIL-MIL-STD标准相继出现,成为今日可靠性体系的基础。回顾这个历史,美国共用了十多年时间形成和发展了可靠性工程和技术。

我国可靠性工作起步并不太晚,50年代就建立了温热带环境暴露试验机构。1972年在此基础上组建了我国唯一的电子产品可靠性与环境试验研究所,着手可靠性与环境试验、失效分析、数据处理等研究工作。

60至70年代,电子、机械、仪表、航天、航空、电力及三军系统陆续开展了可靠性工作。尤以航空、航天、电子为较早。从调查研究、可靠性教育入手,接着建立可靠性管理研究、试验、数据、情报等工作机构,制订可靠性标准,对产品提出指令性可靠性指标,进行可靠性考核与可靠性试验,对失效进行失效模式和机理分析研究,并取得了很大的成效。

二、可靠性是产品质量的一项重要标志

提高产品的质量,必须首先弄清什么是产品质量。过去我们看质量,往往以传统的技术性能指标(不包括可靠性)来衡量,以出厂合格为标志。譬如功能强、性能好就总认为它的质量好,而不考虑售后的使用开机率及可靠性。但是随着现代科学技术的发展和市场竞争的日趋激烈,人们对质量概念的认识也开始深化了,不仅要求产品的技术指标高,符合一定的

技术标准和技术要求,而且要根据使用者的需要,使产品对于使用者来说能长期可靠使用,也就是产品的可靠性成为使用者关心的一种质量指标,特别是对技术水平比较高、规模比较大的复杂产品及系统尤为重要。此外还有产品产生故障后的易修理性及日常的易维护性。产品自身的可靠性和维修性的高低决定了产品或系统的正常运行,直接影响着生产成本、维修费用、经济效益等等和使用者直接相关的问题。任何一个使用者都希望买价廉而又有高可靠性的产品。都希望使用的产品寿命长,故障少,效率高。由此可见,可靠性是一个以时间尺度来描述的质量问题。可靠性问题的提出使过去只求出厂合格率的质量概念得到了扩展和发展。

三、可靠性工程的经济效益

提高产品的可靠性必须从设计、制造等方面开始,因此会使产品的设计费用、元件成本、制造成本增加,但是因产品减少了维修,提高了使用寿命,就总的经济效益来说将得到大幅度提高,下面的例子就充分说明了这样一个事实:

上海某公司生产的黑白电视机,1978年平均失效间隔工作时间为500小时,开箱不良率为23.6%,一个月的早期返修率为20.8%,一年平均返修率为86.92%,安全性很差,事故屡有发生,经济效益也非常低,每台成本351.35元,每台平均亏损34.92元,年产量26.8万台,总亏损达936万元。国外电视机大量涌入国内市场,国内电视机声誉很坏,用户批评上告,商业部门索赔退货。在抓可靠性以后的5年内,从设计、制造、试验、认定、管理各方面采取了很多措施,终于使电视机的可靠性提高了一个数量级以上,平均失效间隔工作时间达到5000小时以上,开箱不良率降低到2%以下,早期返修率降低到2%以下,一年平均返修率下降为13.28%,接近IEC 65标准,并获得国家银质奖,经济效率大幅度提高,成本下降为247.56元,每台盈利52.86元,全年产量上升到126.37万台,全年盈利6680万元。原平均每台维修费高于8元,现在降为2元,以500万台计算,每五年可减少社会维修费1.5亿元。该电视机由于质量好,价格比国内一般电视机售价高30元以上,每年产140万台,仅此一项增加利润4200万元以上。由此可见提高可靠性不论对国家、对社会、对企业带来的经济效益都是巨大的。

由于改善产品可靠性而引起的制造成本、设计成本上升、维修成本下降和总成本之间的关系可以从图1-1中看出。

从图中可以看出三个分量的总成本有一个最小值。对通常使用的仪表,其可靠性大小的要求应该在这个最小值附近,但对可靠性有特殊要求或使用条件特殊的另当别论。

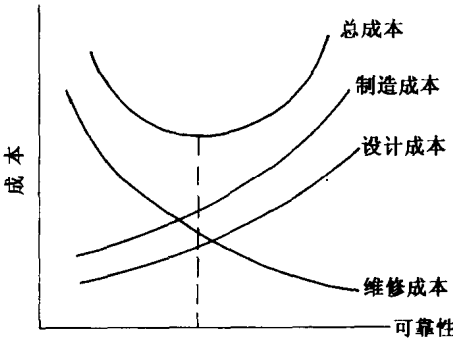


图 1-1 成本 - 可靠性曲线

四、可靠性技术的基本内容和工作阶段

可靠性技术是为适应产品的高可靠性要求而发展起来的新兴学科,它研究产品或系统的故障发生原因、消除和预防故障的措施。其主要任务是保证产品的可靠性和可用性,延长使用寿命,降低维修费用,提高产品的使用效益。

可靠性技术研究的基本内容可分为可靠性基础理论和可靠性专业技术两部分。可靠性基础理论包括:可靠性数学、可靠性物理、可靠性管理。可靠性专业技术包括:可靠性设计、可靠性试验、维修性设计、系统可靠性、软件可靠性等。

1. 可靠性基础理论

(1)可靠性数学 这是可靠性的数学理论基础。可靠性工程是以范围广泛的数学为基础的,在数学领域已形成了一个独立的学科分支。

(2)可靠性物理 可靠性物理是60年代发展起来的。60年代前后,半导体器件发展很快,未知的失效原因很多,并且和物理学关系甚为密切,于是就产生了“失效物理学”。由于失效机理分析要涉及到材料学、物理学、化学等专业,并要广泛地应用理化分析仪器,因此,现阶段分析技术专家的知识面已大大扩展,可靠性物理已成为一门新兴的学科。随着可靠性技术已发展到可靠性保证阶段,可靠性物理研究也将失效物理研究成果具体应用到包括系统在内的设计及其可靠性与质量保证体系中去。

(3)可靠性管理 可靠性管理是对可靠性工作的各个环节以及产品的全寿命周期的各项技术活动进行组织、协调和控制,以实现既定的可靠性指标的一种方法。它在整个可靠性工作中处于领导和保证地位,离开了可靠性管理,各项可靠性技术活动将无法进行。总的来说,它包括宏观管理和微观管理两个方面,其中又以自上而下的可靠性宏观管理起决定性作用。可靠性宏观管理包括政策、法规、条例、标准、规划、体制等的制定,各个部门的基础研究、计量、检查监督、质量跟踪,情报部门的数据和情报交换、产品可靠性的认证、生产许可、创优评优、安全认可、技术交流和教育培训等方面的工作。还有企业的微观管理,它包括如方针目标、规章制度、企业标准、组织机构、计划、指标制定和考核、设计评审、工序控制、质量检查和监督、质量跟踪和反馈、维修和售后服务、费用分析和核算、岗位培训等多方面的工作。

2. 可靠性专业技术

(1)可靠性设计 这项工作包括:建立可靠性模型,对产品进行可靠性预计和分配,进行故障或失效机理分析,在此基础上进行可靠性设计。可靠性设计是产品可靠性的保证。一个高可靠性的产品必须从可靠性设计做起,它包括的内容很多,涉及面也极广。

(2)可靠性试验 可靠性试验的目的是了解产品,验证产品的可靠性水平,试验一改进一再试验,反复提高产品可靠性水平。根据试验的目的,有各种不同的可靠性试验方法。

(3)维修性设计 大多数的产品均为可修理产品。维修性设计的目的是为了缩短平均停机时间。维修性设计是从可测性、可达性、可更换性等方面来保障维修的准确、迅速、安全、可靠。

(4)系统可靠性 由许多单元及子系统组成的大系统的可靠性,有其自身的特点,因此有独自的理论、方法,近年来已形成了独立的分支。

(5)软件可靠性 软件的可靠性使可靠性的内容得到了发展,由于软件的特殊性,其可靠性研究有不同的内容。

限于篇幅,本书仅对以上的部分内容逐一进行阐述,并着重于可靠性技术在工程中的应用,即可靠性工程。

第二章 可靠性工程中的特征量

可靠性工程是建立在众多的数学基础上的。其中,概率论和数理统计是可靠性工程最重要的数学基础。可靠性工程中的许多基本理论和基本概念如可靠性工程中最基本的特征量如可靠度、失效率、平均寿命等都是在概率论和数理统计的基础上建立起来的。在可靠性中的许多工作,如可靠性试验、可靠性预计和评定、可靠性设计等都是把数理统计作为解决问题的主要工具,因此掌握概率统计最基本的知识是掌握可靠性工程必不可少的。

第一节 概率和数理统计

一、随机事件和概率

任何现象和事物,都是相互联系、相互制约而又相互影响的。每种现象和事物都受其内在的必然规律支配。但人们往往习惯于探索和应用有关自然现象的确定的规律。例如,按照欧姆定律 $V = IR$ 的规律可以确定直流电流(I)、电压(V)和电阻(R)的变化,但是事物的发展并不全是那么理想地严格遵守其特定的规律。譬如,你要知道一种晶体管的寿命,就不能非常简单地予以回答,因为不同的型号,不同的生产厂,不同的批号,甚至于同批号的两个晶体管都可能有不同的寿命,由此可见,各种现象就其结果和规律来讲可分为两大类,确定性现象和随机现象。凡是事先不能确定结果的现象称为随机现象,我们将一定条件下可能发生也可能不发生的事件统称为随机事件,以下简称为“事件”。在使用了很长很长时间以后产品必然会失效或出现故障,这是一种必然的事件,反之在使用了很长很长时间后产品不出现失效或故障,这显然是不可能的,称为不可能事件。

既然随机事件即随机现象的结果是无法确定的,那么如何去研究它呢?概率论为我们提供了理论基础。随机事件就其单独一次的试验结果是无法确定的,但只要同样的试验在同一条件下重复多次,各种结果出现的次数占总次数的比例将会趋近于一个稳定的数值,这是平稳随机过程及随机现象的一个重要特征。这个稳定的数值就是随机事件发生的概率。

二、数理统计的基本概念

无论是确定性现象也好,或者是随机现象也好,都应该有其内在的联系和内在的必然规律。概率论为我们提供了研究这类随机现象内在规律的理论基础,而帮助解决和揭示内在规律的分析方法是数理统计。数理统计就是研究如何从大量的偶然的现象中,找出其中内在的必然的规律,从而作出科学的推断,以针对不同的问题,给予不同的解决办法。可靠性要研究的是产品的内在质量问题,在研究中我们不可能也没有必要对每个产品都进行试验分析,只能从有限的产品中得到一定的可靠性信息,然后利用数理统计的分析方法来找出整体产品的内在的质量规律。所以数理统计是研究可靠性的重要工具。这里仅介绍一些基本

的术语和基本的概念。有关它在可靠性工程的具体应用将在本书其他有关章节中讨论。

数理统计中的“母体”,用简单的话来讲,就是所要研究的对象的全体。而每一个产品就是一个个体。一般来说个体是可以对它进行一系列观测的一个具体的或一般的物体,而母体指的是产品的全体。因为实际上我们不可能研究全部产品的全部性质和全部指标,而仅仅只能研究其中的一部分产品的一种性质或几种性质。这时候我们指的母体就是我们要研究的产品的参数的全体,而个体就是为研究此性质抽出来的一个个具体物体。

母体是由每个个体组成的,因此,母体又有大小之分。母体中个体的数量很大,那么可以看作无限大母体,这种母体称为无穷母体,如果个体数量较少,这样的母体就称有限母体。不同数量的母体,数理统计中处理的方法有所不同,对于无穷母体,处理方法比较方便,而且误差也比较小。

为了获取数据而实际观测的一组产品称为样本或称为一个子样。从母体中取得样本的方法称为抽样法。应用最广泛的抽样法是随机抽样法。所谓随机抽样法,就是要求保证母体中的每个个体都有同等被抽取到的机会。具体方法见本书其他有关章节。

上述讨论的子样都是简单子样,也就是说从母体中抽取 n 个个体,进行几次观测,得到 n 个数据。这是最简单也最容易得到、最容易处理的一种。在可靠性工程中,为了试验的方便,往往从 n 个子样中仅得到一部分的观测值,不等到试验全部失效就终止了试验,这类试验只能从 n 个个体中获得 r 个个体的失效时间。这就不同于简单子样了,这种子样称为截尾子样,有关截尾子样在后面再作具体讨论。

三、概率分布

如前所述,随机变量在大量的重复试验后,其取值的频率将是稳定的。这说明每一个随机变量都具有它自己的分布规律。为了研究这种分布规律,有必要引入一些以随机变量为自变量的函数,函数的值是我们所要知道的概率,或与概率有关的数。这些函数统称为随机变量的概率分布,这种概率分布对研究产品的可靠性是非常重要的。譬如产品的寿命,就每一个产品来说是一个随机变量,但对大量的产品来说,其寿命就可能符合某一个概率分布,这种概率分布就称为寿命分布。除此以外,在研究抽样试验和数据处理时都要用到各种概率分布。本节中首先讨论抽样试验和数据处理常用的概率分布,而有关寿命分布内容随后讨论。

就概率分布的性质来分,可以分为离散型概率分布和连续型概率分布两种。

1. 二点分布

二点分布又称(0,1)分布。

在可靠性工程中常碰到这样的情况,比如认为抽检的产品要么合格,要么不合格,只有两种情况。描述这种随机变量的概率分布称为二点分布,随机变量只有两个取值,即 0 或 1。通常假设 0 为不合格产品,1 为合格产品。

服从二点分布的随机变量 X 的概率分布为

$$\begin{array}{ccc} X & 1 & 0 \\ P & p & 1-p \end{array} \quad 0 \leq p \leq 1$$

$P = P(X = x_k)$, 表示 X 取值的概率。

$$X \text{ 的期望 } E(x) = p \quad (2-1)$$

$$X \text{ 的方差 } D(x) = p(1-p) \quad (2-2)$$

2. 均匀分布

均匀分布是一个连续型的分布,它的特点是随机变量的概率密度函数 $f(x)$ 在一个有限的区间 $[a, b]$ 上等于一个常数。

$$f(x) = \begin{cases} 1/(b-a) & a \leq x \leq b \\ 0 & x < a \text{ 或 } x > b \end{cases} \quad (2-3)$$

$$X \text{ 的期望 } E(x) = (a+b)/2 \quad (2-4)$$

$$X \text{ 的方差 } D(x) = (b-a)^2/12 \quad (2-5)$$

3. 超几何分布

在抽样检验中,如果从母体总数 N 中抽出 n 个做试验,母体 N 个中有 d 个不合格,那么在样本 n 中不合格数 x 就服从于超几何分布,它分布的概率为

$$P(X=x) = \frac{\binom{d}{x} \binom{N-d}{n-x}}{\binom{N}{n}} \quad x=0,1,\dots \quad (2-6)$$

式中 $N, n, d, x, N-d, n-x$ 都不是负数。其中 $x \leq d, N-d \geq n-x$ 。

$\binom{d}{x}$ 表示 d 中取 x 的组合, $\binom{d}{x} = \frac{d!}{x!(d-x)!}$ 。

$\binom{N-d}{n-x}$ 表示 $(N-d)$ 个中取 $(n-x)$ 的组合。

$\binom{N}{n}$ 表示 N 个中取 n 个的组合。

超几何分布的均值

$$E(x) = nd/N \quad (2-7)$$

超几何分布的方差

$$D(x) = (nd/N)[(N-d)/N](N-n)/(N-1) \quad (2-8)$$

4. 二项分布

二项分布是描述如下情况时的概率分布:产品在相同的条件下,相互独立地重复试验 n 次,每次试验的结果要么是合格要么是不合格。在每次试验中不合格品的概率是 p ,随机变量 X 是试验中不合格的次数,那么这个随机变量 X 就符合二项分布。它的概率分布为

$$P(X=x) = \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x} \quad x=0,1,2,\dots,n \quad (2-9)$$

二项分布中, n 和 p 是决定其分布形状的参数,图 2-1 画出了不同参数时的不同分布形状。在二项分布中,随机变量的取值都为正整数。这类分布属离散分布。

二项分布在质量检查和可靠性抽样中用途广泛。如果一批产品的不合格率为 p ,从中抽取 n 件,样本中的不合格品数 X 就服从二项分布。

$$\text{二项分布的均值 } E(X) = np \quad (2-10)$$

$$\text{二项分布的方差 } D(X) = np(1-p) \quad (2-11)$$

5. 泊松分布

电子产品故障除了其内在的质量原因外,有时在正常工作中会因受到环境应力的冲击、负载的冲击而发生故障,造成原因一般是由于这些冲击超出了设备所能承受的程度。假定

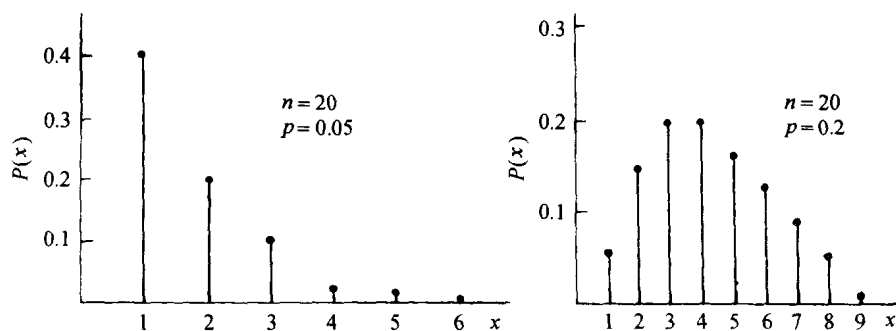


图 2-1 二项分布图解

这些冲击对设备的损伤是可以积累的,也就是说,在一定次数的冲击后才使设备发生故障。同时我们假定这些冲击满足三个条件:

- (1)在任一充分小的时间间隔里两次或更多次冲击同时发生的机会小到可以忽略;
- (2)在任一时间间隔内受到冲击的次数,和另外的不重叠的时间间隔内发生的冲击次数是独立无关的;
- (3)在单位时间内发生的冲击的平均次数 $\lambda (\lambda > 0)$ 是一个常数,并不随时间的变化而改变。

这些假设条件不仅仅限于时间,也可以是空间或距离等。

满足上述三个条件,在 $[0, t]$ 时间内发生冲击的次数 X 服从泊松分布,其分布概率为:

$$P(X = x) = \frac{(\lambda t)^x}{x!} \cdot e^{-\lambda t} \quad x = 0, 1, 2, \dots; t > 0 \quad (2-12)$$

泊松分布的均值和方差都等于 λt 。

可以证明泊松分布是二项分布当抽样的样本数无限大即 $n \rightarrow \infty$ 时的一个极限。如果抽取的样本数 n 无限大,而产品的不合格率 p 无限缩小,那么就可以认为样本中的不合格品的平均数 np 将趋于一个常数,这时样品中不合格品数 X 的概率分布趋于泊松分布。

$$\lim_{n \rightarrow \infty, np \rightarrow \text{const}} \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x} = \frac{(np)^x}{x!} e^{-np}$$

泊松分布的计算比较复杂,但已有数学用表供查表计算。

6. χ^2 分布

χ^2 分布在可靠性工程数据处理、区间估计、抽样检验等内容中都要用到。 χ^2 分布是连续分布。它的概率密度函数形式比较复杂,读者不易记住,但在用到 χ^2 分布时,我们一般都查表计算,不直接用函数计算,因此对读者来说学会查表是很重要的。

χ^2 分布的密度函数

$$f_{\chi^2}(\chi^2, \gamma) = \frac{1}{2 \cdot \Gamma(\gamma/2)} \left(\frac{\chi^2}{2} \right)^{(\gamma/2)-1} \exp\left(-\frac{\chi^2}{2}\right) \quad (2-13)$$

式中的 γ 称为 χ^2 分布的“自由度”。有时将具有 χ^2 分布的随机变量记作 $\chi^2(\gamma)$ 或 χ^2_{γ} 。 $\Gamma(\cdot)$, 读为“伽马函数”。

$$\chi^2 \text{ 分布的期望值 } E(\chi^2(\gamma)) = \gamma \quad \gamma = 1, 2, \dots \quad (2-14)$$

$$\chi^2 \text{ 分布的方差 } D(\chi^2(\gamma)) = 2\gamma \quad \gamma = 1, 2, \dots \quad (2-15)$$