



高等学校教材

机电产品可靠性技术

贺建民 黄 英 编著



JIDIAN CHANPIN KEKAOXING JISHU

重庆大学出版社

内 容 提 要

本书主要包括:可靠性概论、可靠性数学基础、系统可靠性设计、机械产品可靠性设计、人机系统可靠性设计、可靠性试验。本书既有理论性知识,又有计算方法和实例,具有理论与实际相结合、操作性强之特点。

本书可作为高等院校机械、电子专业学生和电视大学、职工大学学生的教材,也可作为从事产品设计的工程技术人员和研究人员的参考书。

高等学校教材
机电产品可靠性技术

贺建民 黄 英 编著

责任编辑 曾令维

*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆建筑大学印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 8 字数: 200 千

1998 年 12 月第 1 版 1998 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1—3000

ISBN 7-5624-1890-X/TH·74 定价: 10.00 元

前 言

可靠性是机电产品最重要的指标之一。可靠性工程出现在 40 年代,短短 50 年间得到了迅速发展,成为了一门新兴的应用性比较强的综合性学科。

本书以机电产品为研究对象,从工程应用出发,较全面系统地介绍了可靠性工程的基本概念、基本理论,阐述了开展可靠性设计、试验的基本原理和方法。本书既有理论性知识,又有计算方法和实例,具有理论和实际相结合、操作性强之特点。以硬件为主阐述可靠性的同时,还提出了软件可靠性的基本概念和介绍了人机系统可靠性设计基本知识。

本书可作为高等院校机械、电子专业学生和电视大学、职工大学学生的教材,也可供从事产品设计的工程技术人员和研究人员参考。

本书主要包括:可靠性概论、可靠性数学基础、系统可靠性设计、机械产品可靠性设计、人机系统可靠性设计、可靠性试验等。

本书计划学时数为 36 学时,使用时可根据实际情况进行增减。

本书由贺建民主编,其中第一章部分内容、第二章、第三章部分内容、第六章由黄英编写。

在本书编写过程中,参考和引用了国内外有关文献、书籍、标准和资料,借此机会,向原著作者们致以谢意。

我们期待读者能从本书中得到有益的启示。限于作者的水平,书中不妥和错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1998 年 9 月

目 录

绪论	1
第一章 可靠性概论	3
第一节 可靠性基本概念	3
第二节 度量可靠性的常用指标	5
第三节 可靠性工程研究的基本内容和任务	9
习 题	10
第二章 可靠性数学基础	11
第一节 概率及其运算法则	11
第二节 随机变量的概率分布及其数字特征	15
第三节 可靠性工程中常用的几种概率分布	18
第四节 数理统计基础	23
习 题	27
第三章 系统可靠性设计	28
第一节 可靠性指标的确定	28
第二节 可靠性预测	30
第三节 可靠性分配	44
第四节 系统可靠性分析方法	49
第五节 可靠性的改进	56
第六节 维修性设计	59
习 题	61
第四章 机械产品可靠性设计	63
第一节 应力—强度“干涉”理论及可靠度计算	63
第二节 机械零部件可靠性设计	69
第三节 安全系数与可靠度	82
习 题	86
第五章 人机系统可靠性设计	87
第一节 人机系统的可靠性评价	88
第二节 显示装置可靠性设计	92
第三节 控制装置可靠性设计	96
第四节 操作环境可靠性设计	100
第六章 可靠性试验	103
第一节 概述	103
第二节 (工作)寿命试验的设计及其参数估计	105
第三节 加速寿命试验	109
习 题	117
附录 标准正态分布表	118
参考文献	120

绪 论

可靠性工程(Reliability Engineering)是一门新兴的涉及面十分广泛的综合性工程学科。可靠性工程是伴随着二次世界大战的爆发而出现的。在第二次世界大战中,科学技术得到进一步发展,使用了雷达、飞航式导弹、弹道式导弹等较复杂的新式武器,而这些武器的核心——电子设备屡出故障,严重影响了部队的战斗力,引起了军方和舆论界对武器装备可靠性的重视。但是,由于当时交战各国忙于对付战争,可靠性问题并未得到广泛深入研究,这一工作真正始于二次世界大战后。从50年代起至60年代初,一些工程技术人员和数学家们运用概率论和数理统计知识对产品的可靠性问题进行定量研究,1957年美国国防部电子元器件可靠性顾问团(Advisory Group on Reliability of Electronic)提出了著名的AGREE报告,基本上确定了可靠性工程的研究方向,成为可靠性工程发展的奠基性文件。据此陆续制定了一系列军用规格、标准及可靠性标准体系,这对现代军事、宇航、航空、电子等工业部门的发展起了重要推动作用。

进入60年代后,在工业发达的国家中,由于产品的复杂化和工作环境条件的恶劣,对产品的可靠性要求越来越高。于是,不仅在航空、航天、尖端武器和电子等工业,而且在原子能、机械、冶金、化工、铁道、船舶、电力设备、建筑、食品加工、通讯、医药等工业,可靠性工程技术和管得到逐步推广应用。从最复杂的宇宙飞船,到日用的洗衣机、冰箱、复印机和汽车,到细小的可置于人体内的心脏起搏器,都进行了可靠性设计,有明确的可靠性指标。1969年7月登月成功的Apollo宇宙飞船,共有120所大学、15000个单位的42万人参加研制,使用了720万个零部件,如果一个零件发生故障,就有可能导致整个系统的故障,甚至造成灾难性后果。可靠性问题就成了Apollo宇宙飞船能否登月成功的关键问题。为了预测可靠性,美国通用电子技术公司研制了“用仿真方法预测阿波罗飞船完成任务的概率”的计算机程序。后来,美国航空与航天局(MASA)将可靠性工程技术列为60年代三大技术成就之一。

重视提高产品的可靠性,可带来巨大的经济效益和社会声誉。日本的汽车、工程机械、发电设备、彩电、复印机、电冰箱、照相机等产品之所以能够畅销全球,在于日本把产品的可靠性当作“国家兴旺”的大事,产品具有高可靠性,它给日本带来了巨大的利润。美国人预言,今后能竞争留存于世界市场的只有那些能够掌握自己产品可靠性的企业。日本人认为,可靠性就是信誉,今后产品竞争的焦点是它们自身的可靠性。总之,愈来愈多的企业和工程技术人员认识到产品可靠性问题的重要意义,把产品的可靠性看得与产品的性能同样重要。有的部门甚至规定,没有可靠性指标,未进行产品可靠性设计的产品不得投产。

产品的可靠性不仅得到工业部门的重视,而且愈来愈得到广大用户的关注。用户购买产品,关心的已不仅是产品的技术性能和它的价格,而且更加关心在以后的使用中能否经久耐用,少出故障。经久是对时间而言,耐用则指产品对不同环境条件的适应能力,经久耐用就是指产品寿命长。人们总是希望产品能在较长的使用时间内保持其功能,尽可能不出故障或者出了故障也能较快、较容易地进行修复。这些正好是可靠性工程要研究的问题。

近一二十年来,可靠性工程在我国发展十分迅速,各工业部门、厂矿企业愈来愈重视并在

实际中使用,设计院所和高等院校开展了大量研究工作,开出相应课程,培训可靠性管理人才。80 年代,电子工业以“三机”(电视机、录音机、收音机)可靠性为中心,大大促进了电子产品可靠性的提高;航空工业以飞机定寿、延寿为中心,推动了航空领域可靠性的发展;机械工业则采用发布产品可靠性指标、限期考核通过的办法,推动产品可靠性工作的发展。1990 年机械电子工业部印发的《加强机电产品设计工程规定》中明确指出,可靠性、适应性、经济性三性统筹作为机电产品设计的原则;对正在生产的产品,要在试验或现场调查的基础上,对失效信息进行分析处理,改进设计,以提高产品可靠性。它标志着可靠性理论和技术在我国已进入工程实用阶段。

可靠性工程是研究如何评价、分析、提高产品可靠性的工程技术,其研究的主要内容是产品的可靠性设计、试验和管理。可靠性试验是可靠性设计的基础,但是试验不能提高产品的可靠性,只有设计才能决定产品的固有可靠性。国内外的实践经验都表明,产品的可靠性是由设计决定的,并由可靠性管理和制造过程来保证。在产品的整个寿命期内,从设计、研制、制造、装配、调试、使用、维修直至报废,都必须进行可靠性管理,只有这样,才能保证产品有满意的可靠性。本书将重点介绍可靠性设计。

第一章 可靠性概论

第一节 可靠性基本概念

一、可靠性(Reliability)

可靠性是指: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。这个定义包含了五个要素:

(1) 可靠性的研究对象——产品:其范畴是广泛的,既可指日常生活用品,也可指舰船及其动力、通信、导航、作战等系统及组成这些系统的分系统、分机、部件、元器件。这些都是“硬件”产品。“软件”作为一种新兴的产品(即软件产品)也有可靠性问题,故可靠性定义中的产品是包括软件的。在研究可靠性时,应首先明确所研究的对象,是指某个元器件,还是指某个分机、设备或系统。在某些情况下,还把人和机组成的人机系统看作一个产品。带软件的硬件,其可靠性还要同时考虑其所带软件的可靠性。

(2) 规定的条件:包括环境条件、维修条件、使用条件等。规定的条件不同,产品的可靠性也不同。例如,同一机械使用时载荷不同,其可靠性是不同的;在超负荷下使用或连续不断的工作,会使可靠性降低;产品在减额下使用,可靠性则会提高。同一设备在实验室、野外(寒带或热带、干燥地区或潮湿地区)、海上、空中等不同环境条件下的可靠性也是各不相同的。规定的条件是可靠性定义中最重要而又最容易被忽略的条件。

(3) 规定的时间:规定产品完成规定功能的时间。这是产品可靠性定义的核心,将可靠性用时间直接或间接地描述出来。任何产品的可靠性总是随着时间的增长而下降,不同质量的产品下降的速度不同。因此,在提到产品的可靠性高低时,必须明确提出规定的时间是多长的可靠性,否则,就无法用可靠性高低来说明产品的质量。规定时间的长短是随着产品的对象和目的而异。火箭要求几秒或几分钟之内工作可靠,而海底电缆则要求几十年内应不发生故障。

规定时间的单位可以是时间单位如秒、分、小时、月、日、年,也可以是相当于时间的单位,如开关、继电器需保证开关多少次无故障,这时用次数作单位;而汽车往往要求行驶多少公里无故障,这时的公里数相当于“规定的时间”,用“公里”作单位;大炮要求打多少发炮弹无故障,要求打的炮弹数相当于“规定的时间”,用“发”作单位。

(4) 规定功能:是指在论证、研制时赋予产品的功效和作用,通常用产品的性能指标来表征,如电视机的清晰度、音质、选择性、灵敏度等,它们从各个侧面反映了电视机的质量性能。可靠性可以针对产品全部性能的综合,也可针对某一具体性能。产品如能完成规定功能,则产品可靠;产品丧失规定功能,称产品发生“故障”或失效。这里还要强调两点,一是,这里所指的完成规定功能,是指完成所有规定功能的能力而不是其中的一部分。如高射炮的功能包括射速、射程和命中精度。只有射速和射程达到要求而命中精度达不到要求,就不能说它完成了规定的功能。二是在判断产品是否具有完成规定功能的能力时,必须规定明确的失效判据(Failure

Criterion) 或故障判据。有些产品的失效判据很容易确定,如灯泡在规定条件下,规定的功能就是发光,失效就是不发光。有些产品的失效判据确定就要复杂、困难一些。如电视机、收录机规定的功能应规定一些性能参数。又如机器中的齿轮,对于精密的机器齿轮,点蚀即为失效,通用机械齿轮齿厚磨损到一定比例才失效。所以不同的产品、不同的工况失效的判定标准是不同的,必须根据具体条件给出失效的判据。

(5) 能力:是指产品可靠性在上述三个“规定”上的综合体现,刻画出了产品的可靠性不是产品的性能,而是产品抵抗外部条件的影响而保持完好的能力,表征了可靠性是产品的一种特性和产品质量的重要组成部分。

产品的可靠性可分为固有可靠性(Inherent Reliability)、使用可靠性(Use Reliability) 两种。

所谓固有可靠性,是指产品早在设计阶段确定的,并在生产过程中的各个阶段得以确定的可靠性,它是产品本身具有的属性。影响产品固有可靠性的因素很多,主要有:产品设计方案的选择,零部件的材料、结构和性能、制造工艺等。

所谓使用可靠性,是指产品在使用过程中,因受环境条件、维修方式及人为因素的影响所能达到的可靠性。显然,使用可靠性是低于固有可靠性的,并且随着时间的增长,使用可靠性将逐渐降低。

以下讨论的产品可靠性,主要是指产品的固有可靠性。

产品的可靠性设计目标,主要是为了提高产品的使用效能,减少用户的使用费用。据此,人们将产品的可靠性,特别是军事装备的可靠性,划分为基本可靠性和任务可靠性两种。

基本可靠性定义为:产品在规定条件下,无故障的持续时间或概率。它反映了产品(特别是军品)对维修和后勤保障的特征及要求,也反映了减少用户费用的要求。因此,度量基本可靠性要考虑所有引起维修的故障,而这些故障的发生未必都影响产品执行功能。

任务可靠性定义为:产品在规定的任务剖面(“剖面”的含义是对所发生的事件、过程、状态、功能和所处环境的描述)中完成规定功能的能力。它是产品完成任务的基本功能的能力,反映了提高产品使用效能的要求,它可为武器系统的作战效能分析提供依据。度量任务可靠性仅考虑在任务期间那些影响完成任务的故障(产品功能故障)。

二、产品质量与可靠性

人们习惯将符合技术特性要求的产品,视为质量好的产品,即合格品;将不符合技术特性要求的产品称为次品或不合格品。实践证明,符合技术特性要求的合格品,在使用一段时间后,还会出现这样或那样的质量问题,有时甚至不能再使用。这就是说,对用户来说,不仅要关心产品指标的先进性和产品出厂时是否符合这些指标,而且更要关心产品在今后的使用中能否始终保持良好的状态。具体来说,评价一种机电产品的质量好坏,可以从技术性能、可靠性或有效性等方面来考虑。

机电产品的技术性能,是指产品的功能以及制造、运行状况的一切性能。如电子计算机的周期、字长、容量、指令数、速度等是计算机的主要技术性能;载重汽车的载重量、耗油量、最大速度和噪音等是载重汽车的主要技术性能;金属切削机床的加工范围、加工质量的稳定性和生产率等是金属切削机床的主要技术性能。这些指标是产品的基本指标,如果没有或达不到这些技术性能指标,产品质量也就无从谈起。但是只有这些技术性能指标,没有可靠性指标,产品质

量也是无法保证的。一台机械设备或一部电子设备, 尽管各项技术性能指标都是先进的, 如果不可靠, 那也没有或很少有实际使用价值。例如, 一台技术性能指标即使较先进的起重机, 若可靠性不高, 经常发生故障, 轻则停机修理, 影响生产和增加费用, 重则造成人身事故, 这样的产品只能说是低质量的。由此可见, 产品的功能能否得到充分发挥, 在很大程度上取决于产品的可靠性水平如何, 可靠性水平高才能使产品的功能得到充分发挥, 否则就不能保证产品的规定功能。

失效是指产品丧失规定功能的现象, 它是“可靠”的对立面, 但多数整机或部件, 仅由于元器件失效而导致整体丧失功能的现象可以通过更换或修理元器件予以消除, 这类产品称为可修复产品(Repairable Item)。对可修复产品来讲, 失效可称为故障(Fault)。

也有一些产品, 如电阻、电容、晶体管之类的电子元件或集成电器之类的电子器件, 一旦失效就难以修复, 或修理的费用会超过制造的成本使得经济上是不值得修理的; 还有些产品属于一次性使用的, 如熔断器、导弹上的部件、发射卫星的火箭等。上述两类产品一旦丧失规定功能, 则或者不可能或者不值得或者不要求修复, 这类产品称为不可修复产品(Not Repairable Item)。对不可修复产品而言, 丧失规定功能的现象只能称为失效。

对于可修复的产品, 除了满足技术性能、可靠性要求之外, 还要求具有良好的维修性(Maintainability)。维修性是表示对可以维修的产品进行维修的难易程度或性质。一个好的产品, 不但要求在单位时间内出现故障的次数要少, 即平均无故障工作时间要长, 而且要求在出现故障后, 能迅速发现故障出现在哪一部位并加以修复, 即平均修复时间要短。

可靠性与维修性相结合构成了产品的有效性(Availability)(也称广义可靠性 Dependability), 它是衡量可修复产品质量的一个重要方面, 如图 1-1 所示。

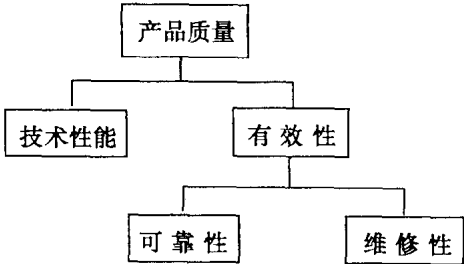


图 1-1 产品质量与可靠性的关系

三、可靠性与安全性

人们经常谈到, 产品要安全可靠, 事实上可靠、安全是两个不同的概念。安全性是在设计时为了使产品失效不致引起人身伤亡及设备损毁等严重事故而采取的预防措施。如防止人员伤亡的防触电措施、避免机械伤害的防护装置等。而可靠性是某个时候产品完成规定功能的能力。如某种飞机的可靠度为 99.8%, 指的是飞机出勤后至少有 99.8% 的概率完成计划飞行, 机械故障不致延误起飞 15min 以上, 并不是说安全程度只有 99.8%。

第二节 度量可靠性的常用指标

不难看出, 上述的可靠性定义只是一般的定性定义, 并没有给出任何数量表示。对于可靠性这样的重要问题, 只有定性的定义或说明是远远不够的, 只有将其定量化, 才能对各种产品的可靠性提出明确而统一的要求, 即产品的各类可靠性指标。根据可靠性指标, 就可以在论证、设计和制造产品时, 利用各种数理统计方法分析, 预测和分配它们的可靠性。在产品研制出来

后,才可按一定的试验方法鉴定它们的可靠性或者比较各种产品的可靠性。在使用中进行可靠性检验,分清责任,向厂方反馈可靠性信息。

度量可靠性的常用指标有可靠度、累计失效概率、失效率、平均寿命、可靠寿命、维修度和有效度等。

维修度、有效度等将在第三章中加以介绍,下面主要介绍其它几种特征量的概念和计算方法。

1. 可靠度(Reliability)

可靠度是指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。可靠度愈大,说明产品完成规定功能的可靠性愈大,即愈可靠。

由于可靠度是时间的函数,所以表示为 $R(t)$,把 $R(t)$ 称为可靠度函数。设产品的规定时间为 t ,产品从开始工作到发生失效的连续工作时间为 T ,则事件 $(T > t)$ 表示产品在规定的使用时间 t 内能完成规定的功能,可靠度 $R(t) = P(T > t)$ 。又因可靠度用概率表示,可知 $0 \leq R(t) \leq 1$ 。

对于不可修复的产品,其可靠度的观测值是指在规定的时间内,能完成规定功能的产品数与开始时刻投入工作的产品数之比,即:

$$R(t) = \frac{N - n(t)}{N} \quad (1-1)$$

式中 N ——开始时刻投入工作的产品数;

$n(t)$ —— N 个产品工作到 t 时刻的失效数。

例 1-1 有 220 台油泵,工作至 500h 时有 20 台失效,求 $t = 500h$ 时该油泵的可靠度。

解:可靠度 $R(500) = \frac{220 - 20}{220} = 90.9\%$

对于可修复产品,其可靠度的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规定时间内无故障工作的总次数之比,即:

$$R(t) = \frac{n}{N} \quad (1-2)$$

式中 N ——为若干个产品在规定时间内,总计无故障的工作次数;

n ——其中无故障工作时间达到或超过规定时间 t 的次数。

2. 累积失效概率(Cumulative Failure Probability)

所谓累积失效概率是指产品在规定条件下和规定时间内失效的概率,简称失效概率,又称为不可靠度。

同样,(累积)失效概率也是时间的函数,记为 $F(t)$,把 $F(t)$ 称为随机变量 t 的概率分布函数,简称分布函数。其数学式子表示为 $F(t) = P(t < T)$, T 为产品规定的寿命。

产品失效与不失效(可靠)是互逆事件,因此 $F(t)$ 与 $R(t)$ 的关系为:

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

$F(t)$ 与 $R(t)$ 之间的关系及其变化曲线可用图 1-2 表示。即:若假设产品在开始使用时都

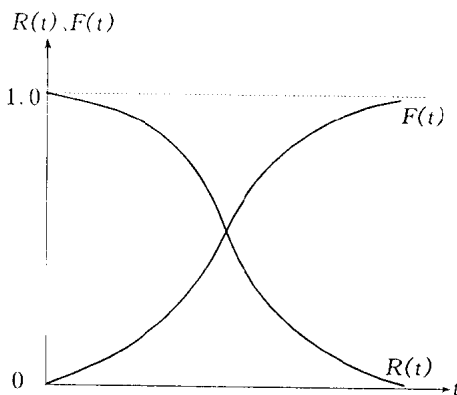


图 1-2 $R(t)$ 与 $F(t)$ 的曲线

是合格的,则有 $t = 0$ 时, $R(0) = 1, F(0) = 0$; 随着时间的推移, 产品的可靠度在下降, 最后所有产品都失效, $F(\infty) = 1, R(\infty) = 0$ 。

3. 失效率(Failure Rate)

(1) 失效率的定义及其计算

失效率就是工作到某时刻尚未失效的产品, 在该时刻后单位时间内失效的概率, 记为 $\lambda(t)$ 。其数学表达式为:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{[N - n(t)]\Delta t} = \frac{dn(t)}{[N - n(t)]dt}$$

式中 N ——产品总数;

$n(t)$ —— N 个产品工作到 t 时刻的失效数;

$n(t + \Delta t)$ —— N 个产品工作到 $t + \Delta t$ 时刻时的失效数。

失效率的简化定义为: 产品在时刻 t 的失效率等于产品工作到 t 时刻后, 单位时间内发生失效的概率。即失效率的观测值等于产品在 t 时刻后的一个单位时间内的失效数 $\Delta n(t)/\Delta t$ 在时刻 t 尚在工作的产品数(也称残存产品数) $N - n(t)$ 的比, 即:

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n(t)/\Delta t}{N - n(t)} = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{[N - n(t)]\Delta t} \tag{1-4}$$

失效率愈低, 则可靠度愈高, $\lambda(t)$ 也称为失效率函数。

失效率常用的单位为: %/小时, %/ 10^3 小时, %/距离, %/次数。

对于低失效率(高可靠性)的产品, 常用菲特(Fit) 来表示。1Fit = 1×10^{-9} /h。

失效率是标志产品可靠性常用的数量特征之一, 特别是电子产品常用 $\lambda(t)$ 表示它的可靠性水平, 并按 $\lambda(t)$ 的大小进行可靠性分级。根据国家标准 GB1772 — 79, 我国电子元器件失效率分成七个等级, 见表 1-1。

表 1-1 我国电子元器件失效率等级表

名 称	称 号	最大失效率 /(1/h)
亚五级	Y	3×10^{-5}
五 级	W	1×10^{-5}
六 级	L	1×10^{-6}
七 级	Q	1×10^{-7}
八 级	B	1×10^{-8}
九 级	J	1×10^{-9}
十 级	S	1×10^{-10}

例 1-2 设有 $N = 100$ 个产品, 从 $t = 0$ 开始运行, 在 50h 内无失效, 在 50h 至 51h 内发生一个失效, 在 51h 至 52h 内发生 3 个失效, 求该批产品在 50h 及 51h 的失效率。

解: $N = 100, n(50) = 0, n(50 + 1) = 1, n(51 + 1) = 4, \Delta t = 1$

所以, 由式(1-4) 得:

$$\lambda(51) = \frac{n(51 + 1) - n(51)}{[N - n(51)] \times 1} = \frac{4 - 1}{100 - 1}/h = 3.03\%/h$$

$$\lambda(50) = \frac{n(50 + 1) - n(50)}{[N - n(50)] \times 1} = \frac{1 - 0}{100 - 0} = 1\%/h$$

(2) 失效率曲线及其失效类型

一种产品(特别是电子产品),经过大量的使用和试验结果表明,其失效率与时间的关系曲线的特征是两端高、中间低,它的形状似浴盆,故一般称为“浴盆曲线”(Bathtub Curve),也称为寿命特性曲线,如图 1-3 所示。

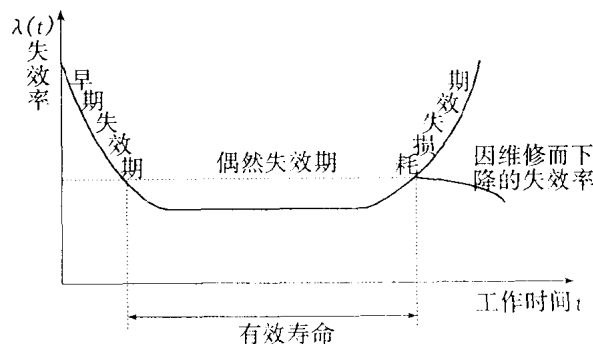


图 1-3 典型失效率曲线

(a) 早期失效 (Early Failure)

即产品由于设计、制造上存在的缺陷

等原因而发生的失效。其特点是失效较快,开始失效率高,但随着工作时间增长,失效率逐渐降低。如新产品研究和试制阶段出现的失效,制造中由于原材料或元件的质量不好,或粗制滥造,检验不严等原因,使一些有缺陷的产品出厂,使用不久就出现失效。为了减少或排出早期失效,工厂常采取筛选、老炼等办法来剔除一些不合格产品。

(b) 偶然失效 (Random Failure) 即产品由于一些超过规定使用条件的偶然因素而引起的,如应力水平超过了预定值就可能出现偶然失效。其特点是失效率较低而稳定,基本保持常数。这是产品的最佳状态期,这个时期的长短称为有效寿命 (Useful Life)。在偶然失效期我们希望失效率尽可能低于要求值,并希望其持续时间 (有效寿命) 尽可能长些。通过对这个时期产品失效的分析,可以找出改进设计、制造工艺等因素的薄弱环节,从而提高产品质量。台架寿命试验、可靠性试验,一般都是针对偶然失效期而言的,即消除了早期失效之后才进行这种试验。

(c) 耗损失效 (Wear-out Failure) 即产品由于老化、磨损、损耗、疲劳等原因引起的失效。特点是失效率迅速上升。这种失效都发生在产品使用寿命的后期。改善耗损失效的方法是不断提高零、部件的工作寿命,对寿命短的零、部件,在整机设计时就要制订一套预防性维修措施,在它们到达耗损失效期前就及时予以检修或更换。这样,就可以把上升的失效率拉下来,即用这种方法可以延长可维修设备和系统的实际寿命。

为了提高产品的可靠性,掌握产品的失效规律是非常重要的。只有对产品的失效规律有全面了解,才能采取有效的措施,提高产品的可靠性。

4. 平均寿命 (Mean Life)

寿命,对不可修复的产品是指发生失效前的工作时间,对可修复产品是指相邻两故障间的工作时间,也称无故障工作时间,因此平均寿命对于不可修复的产品和可修复的产品的含义不同。

对于不可修复产品来说,平均寿命是指产品从开始工作到发生失效前的平均工作时间,称为失效前平均工作时间,记为 MTTF (Mean Time to Failure)。

对于可修复产品来说,平均寿命是指一次故障到下一次故障的平均工作时间,称为平均无故障工作时间,记为 MTBF (Mean Time between Failure)。

把 MTTF、MTBF 统称为平均寿命,记为 θ ,其计算公式为:

$$\theta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad (1-5)$$

式中 N ——对不可修复产品为试验品数,对可修复产品为总故障次数;

t_i ——对不可修复产品为第 i 个产品失效前工作时间,对可修复产品为第 i 次故障前的无故障工作时间。

例 1-3 有一批齿轮 15 个,从开始使用到发生失效的时间数据如下:

220,410,500,790,980,1420,1600,2000,2050,2850,2850,3700,4600,4900,5900(时间单位为 h),试求这批齿轮的平均寿命。

$$\begin{aligned}\text{解:MTTF} = \theta &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i = \frac{1}{15} (220 + 410 + 500 + \cdots + 4600 + 4900 + 5900) \text{ h} \\ &= 2318 \text{ h}\end{aligned}$$

此批齿轮失效前的平均工作时间为 2318 h。

5. 可靠寿命(Percentile Life)

使可靠度等于给定值 ρ 时所对应的时间(产品寿命),称为可靠寿命,记为 t_ρ ,其中 ρ 称为可靠性水平。

这时只要利用可靠度函数 $R(t_\rho) = \rho$ 就可反解出 t_ρ :

$$t_\rho = R^{-1}(\rho)$$

R^{-1} 是 R 的反函数, t_ρ 称为可靠度 $R = \rho$ 的可靠寿命。

由上述指标可以看出,可靠性的定量表示有三个显著特点:一是它很难只用一个量来完全代表。可靠度可以作为表示产品可靠性的一个定量指标,但并不是任何场合适宜用可靠度来衡量产品的可靠性。在实际工作中,往往应针对具体情况,使用不同的可靠性指标。例如对零部件来说,人们比较关心它从开始使用到丧失规定功能这段时间的长短,这就可用失效前平均工作时间 MTTF 来表示;对一个可以修复的设备或系统,人们关心的是它在两次故障间的工作时间有多长,这就可用平均无故障工作时间 MTBF 来表示;有时候人们又主要关心产品(如电子产品)在某一个瞬时或在某段时间内发生故障的故障率(失效率)有多大等,关于这一点,将在第三章中详述。二是具有抽样统计特性。产品的可靠性是一种随机现象,故表征可靠性的各种特征是具有随机抽样统计的特性,可以通过大量观测或试验数据的分析计算,确定其概率分布,进而求得相应的可靠性特征量。三是常用时间函数表示。对于一个产品,人们关心它的寿命,由于产品的寿命长短可以通过观测或试验得到,故常用时间(寿命)作为变量来反映产品的可靠性水平。

第三节 可靠性工程研究的基本内容和任务

一、基本内容

可靠性工程所包含的内容是相当广泛的,大致可分为可靠性理论基础、可靠性应用技术和可靠性管理三个方面。

可靠性理论基础包括可靠性数学和可靠性物理等。前者主要是概率论和数理统计等,用于研究失效的规律及产品的可靠性评估;后者主要是研究失效机理,探索失效的原因。

可靠性应用技术包括的范围很多,如可靠性指标的确定、系统可靠性设计、失效分析、系统可靠性试验、现场数据的收集与分析、可靠性评价与验证等。

可靠性管理主要是应用系统工程的方法,将产品在整个寿命周期中的各个阶段的可靠性技术工作有效地组织并管理起来,调动各方面的人员开展可靠性活动。

可靠性工程也可分为管理、设计、分析、理论、数据、试验和评价七个分支。

二、基本任务

可靠性工作贯穿于产品的设计、生产和使用各个阶段。可靠性工程的任务可归纳为以下三个方面。

第一个任务,是根据可靠性定义内容,对产品可靠性提出明确的量化要求。

首先要明确“完成规定功能”的含义,并准确地制订完成规定功能的标准。

例如汽车的规定功能是,“在司机的操纵下完成启动和运行,并在正常维修后能安全行驶100000 km”。

在某些特殊条件下,有些故障并不一定影响完成规定的功能。如没有挡泥板的汽车在晴天对行驶影响不大,车灯坏了并不影响汽车在白天行驶等等。所以,除在制订“完成规定功能”的标准外,还需对产品故障(失效)判据作出说明。

其次要对时间进行研究。如规定的时间(失效前工作时间)为 t ,产品的寿命为 T ,当产品寿命比规定时间长(即 $T > t$)时,可认为产品在规定时间内能够完成规定功能。

对寿命型产品的可靠性研究,实际是对时间 t 和寿命 T 的统计分析,首先以单个元件研究开始,然后再根据由元件组成的系统和结构与功能来确定系统的可靠度。如系统是复杂系统的分系统,还需根据分系统的结构与功能确定整个系统的可靠度。

第三是考虑“规定的条件”。任何产品总是在某些特定条件下,以一定方式工作的。如前所述,这些条件包括生产、运输、贮存和使用中的环境条件和工作条件。例如,产品在海上工作,就要考虑海水、盐雾的影响;导弹和飞船需要考虑宇宙粒子、各种辐射及振动加速度的影响等等。产品的环境条件和工作条件,一般是通过可靠性试验并对试验结果进行统计分析而确定的。

可靠性工程的第二个任务是寻找提高可靠性的途径。大体可以分为两种途径,一种是通过筛选排除不合格的元器件和工艺、材料等缺陷;另一种是通过改进设计而达到功能的增长。

可靠性工程的第三个任务,在满足规定可靠性的前提下,尽量降低产品的重量、体积和费用。这一点对导弹、卫星、飞机等航空航天产品尤为重要。

产品的可靠性的提高,必然会导致产品的重量、体积、研制周期和经费的增加。产品可靠性究竟要多高,这实质是一个价值判断问题,需要对诸如功能目的、时间、重量、空间、维修性、人员安全等设计因素,成本、售价等经济问题,以及产品责任及法律问题等进行综合平衡分析,这实际上涉及价值工程和系统工程的内容。

习 题

1-1 有200台设备,工作到1000h时有20台发生故障,工作到2000h时,共有44台发生故障,求此设备分别在1000h和2000h时的可靠度与不可靠度。

1-2 设有300个某种器件,工作五年失效10件,工作六年失效16件,求工作五年时的失效率(时间单位取年——其符号为 a)。

1-3 在某批产品 N 个中,已有88个正常工作到2400小时,再继续工作800小时,这时还有66个正常工作,问在这800小时里的可靠度是多少?

第二章 可靠性数学基础

从可靠性的基本概念及衡量指标可知,决定产品可靠性的主要因素往往与一些随机现象有关,故障本身是一个随机事件,故障前的实际工作时间是一个随机变量,导致产品故障的老化过程也是一个随机过程。因此,评价产品可靠性的指标都具有概率性质。为了描述这些随机现象并进行定量估计,必须应用概率论和数理统计的知识。为此,本章将可靠性工程涉及的概率论及数理统计知识作一简要的介绍,但不作详细数学推导。

第一节 概率及其运算法则

概率论是研究随机现象(偶然现象)的规律性的科学。

一、概率的基本概念

1. 随机事件

在生产实践和科学研究中,为了揭示某种偶然现象的内在规律,人们往往要进行科学试验。如果试验具有以下特性:①可以在相同的条件下重复地进行;②每个试验的可能结果不止一个,并且能事先预测试验的所有可能结果;③进行一次试验之前不能确定哪一个结果会出现。那么,我们将这种试验称为随机试验,简称试验。在随机试验中,对一次试验中可能发生也可能不发生,而在大量重复试验中却具有某种规律性的现象,称为随机事件,简称事件。机械零件的疲劳及磨损失效就是典型的随机事件。

2. 事件的关系与运算

在可靠性工程中,往往要研究好几个事件,这些事件之间都有一定的联系,下面是事件间的几种主要关系及其运算。

(1) 事件和 若事件 C 发生等于 A 与 B 中至少之一发生,则称该事件 C 为事件 A 与 B 之和事件,记为 $C = A \cup B$ 或 $C = A + B$ 。一般地说,事件 $A_1, A_2, \dots, A_n$ 中至少有一个发生的事件,称为事件 $A_1, A_2, \dots, A_n$ 的和,记为 $C = A_1 + A_2 + \dots + A_n$ 。如汽车不能行驶的事件为 C ,设 A 为发动机故障, B 为传动装置故障,则 $C = A + B$ 。

(2) 事件积 若事件 A 与 B 同时发生,事件 C 才发生,则称事件 C 为事件 A 与 B 之积,记为 $C = A \cap B$ 或 $C = A \cdot B$ 。一般地说,事件 $A_1, A_2, \dots, A_n$ 同时发生,事件 C 才发生,则称事件 C 为事件 $A_1, A_2, \dots, A_n$ 之积,记为 $C = A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n$ 。如自行车制动失灵的事件为 C ,设前闸故障为 A ,后闸故障为 B ,则 $C = A \cdot B$ 。

(3) 互不相容事件(互斥事件) 如果事件 A 的发生必然导致事件 B 不发生(即事件 A 和事件 B 不能同时发生),就称 A 和 B 是互不相容事件,也称为互斥事件。

(4) 对立事件 如果事件 A 与 B 不能同时发生,但是事件 A 与事件 B 又必定发生其中之一,则称事件 B 为事件 A 的对立事件,记为 $A = \bar{B}$ 或 $B = \bar{A}$ 。

(5) 独立事件 若事件 A 的出现与否与事件 B 的出现与否无关,则称事件 A 对事件 B 是

独立事件。如 10 个产品中有一个次品,作不放回抽样试验,每次抽一个,共抽两次。若第一次抽到次品的事件记为 A ,第二次抽到次品的事件记为 B ,显然, A 发生与 B 无关,而 B 的发生与否与 A 的发生与否有关,这时称 A 对 B 独立,而 B 对 A 是不独立事件。

3. 随机变量

如果某一个量在一定条件下取某一个值或某一范围内的值是一个随机事件,则这样的量称为随机变量。常用大写字母 X, Y 等表示,其取值用小写字母 x, y 等表示。如 n 个产品中的失效数为 $X(0, 1, \dots, n)$,失效数 X 是一个随机变量;产品的寿命 T 也是随机变量。

随机变量可分为离散型和连续型两种。例如,一个开关可以是能工作或不能工作的,或者一个压力容器可以通过试验或试验失效。这种情况都可以用离散型随机变量来描述。连续型随机变量描述用连续变量说明的状态。如产品寿命 T 可以在一个时间范围内连续地取值,所以寿命 T 是一个连续的随机变量。

二、事件的概率及其计算

事件的概率:随机事件 A 发生的可能性大小,称为事件 A 的概率,记为 $P(A)$ 。事件的概率介于 0 和 1 之间。

概率的计算有两种方法:

1. 直接计算法

如果对事件 A 进行实验,各个实验结果发生的可能性相等,则此事件 A 的概率,等于事件 A 可能发生的实验结果数 m 和实验结果总数 n 的比。即:

$$P(A) = \frac{m}{n} \quad (2-1)$$

例如 100 件产品有 15 个合格品,从中任抽一台为不合格品的机会是相等的,故任抽一台为不合格品的概率为 $15/100 = 0.15$ 。

2. 统计法

当各个实验的结果不具有等可能的结果时,若实验次数足够多时,可以用事件的频率 P^* 作为事件的概率,这就是概率计算的统计法。表示为:

$$P(A) = P^*(A) = \frac{m}{n} \quad (\text{当 } n \text{ 足够大时}) \quad (2-2)$$

例如,射手用手枪在 25 m 处对运动靶射击,发射 10 组子弹,每组 10 发,结果统计如表 2-1 所示,求中靶的概率。

表 2-1

组 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
命 中	9	10	8	7	10	9	8	10	9	8

解:设事件 A 表示中靶,共发射 10×10 发子弹,命中数为 $(9 + 10 + 8 + 7 + 10 + 9 + 8 + 10 + 9 + 8)$,则事件 A 的频率为

$$P^*(A) = \frac{9 + 10 + 8 + 7 + 10 + 9 + 8 + 10 + 9 + 8}{10 \times 10} = 0.88$$

因为这个统计数字值是从许多次实验中得出的,所以一般能够反映射手的实际水平,可以

把它近似作为事件 A 的概率,即 $P(A) = P^*(A) = 0.88$ 。

三、概率运算的基本法则

1. 事件积的概率

事件 A 与事件 B 同时出现的概率,用 $P(A \cdot B)$ 表示。

(1) 若事件 A, B 为独立事件,则有

$$P(A \cdot B) = P(A) \cdot P(B) \quad (2-3)$$

也称为乘法定律,即两个独立事件同时发生的概率等于两个事件分别发生概率的乘积。

(2) 若事件 A 与事件 B 不相互独立时,则有

$$P(A \cdot B) = P(A) \cdot P(B|A) = P(B) \cdot P(A|B) \quad (2-4)$$

即事件 A 与事件 B 同时发生的概率等于事件 A 发生的概率乘事件 A 发生条件下事件 B 发生的概率,反之亦然。

2. 条件概率

事件 B 发生的条件下,事件 A 发生的概率,记为 $P(A|B)$ 。同样可以理解 $P(B|A)$ 的含义。

(1) 若事件 A, B 相互独立时,有

$$\left. \begin{aligned} P(A \cdot B) &= P(A|\bar{B}) = P(A) \\ P(B \cdot A) &= P(B|\bar{A}) = P(B) \end{aligned} \right\} \quad (2-5)$$

即两事件相互独立时,各事件发生概率与另外的事件是否发生无关。

(2) 若事件 A, B 不相互独立时

$$\text{由式(2-4) 得: } P(B|A) = \frac{P(A \cdot B)}{P(A)} \quad (2-6)$$

$$\text{或由式(2-4) 可得: } P(A|B) = \frac{P(A) \cdot P(B|A)}{P(B)} \quad (2-7a)$$

这就是贝叶斯(Bayes)定理的一种简单形式。一般通式为:

$$P(A_i|B) = \frac{P(A_i) \cdot P(B|A_i)}{\sum_{i=1}^n P(A_i) \cdot P(B|A_i)} \quad (2-7b)$$

式中 A_i 为 n 个互不相容事件中的第 i 个事件。

3. 事件和的概率

事件 A 或事件 B 中任一事件发生的概率,表示为 $P(A + B)$,有:

$$P(A + B) = P(A) + P(B) - P(A \cdot B) \quad (2-8)$$

(1) 若事件 A, B 相互独立,则有

$$P(A + B) = P(A) + P(B) - P(A) \cdot P(B) \quad (2-9)$$

(2) 若事件 A 与事件 B 互斥(即事件 A 与事件 B 不能同时发生, $P(A \cdot B) = 0$)

$$P(A + B) = P(A) + P(B) \quad (2-10)$$

$$\text{推论: 对立事件的概率} \quad P(\bar{A}) = 1 - P(A) \quad (2-11)$$

4. 全概率公式

设事件 A 只有在互不相容的事件 $B_1, B_2, \dots, B_n$ 中任一事件发生时才能发生,已知事件 B_i 概率为 $P(B_i)$ 及事件 A 在事件 B_i 已发生的条件下的条件概率为 $P(A|B_i)$,则事件 A 的发生概率为全概率,表示为: