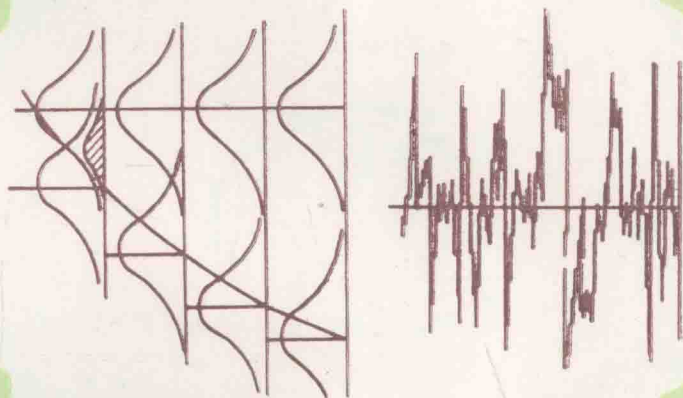


航空发动机

可靠性·维修性·故障诊断

何明鉴 主编



航空工业出版社

航空发动机 可靠性·维修性·故障诊断

何明鉴 主编

航空工业出版社

1998

内 容 提 要

本书是航空发动机可靠性、维修性、故障监测和诊断课程的基础教材。本书收集了航空发动机在使用中的可靠性的最新统计数据,从理论和实例两方面阐述了可靠性理论在疲劳寿命可靠性设计、损伤容限可靠性设计、振动可靠性设计中的应用,马尔柯夫过程理论在计算可修复产品的可靠度中的应用,以及目前我国航空部门使用的故障监测与诊断方面的基本理论和方法。本书内容新颖,资料丰富,实用性强。

本书可供高等学校民用和军用航空发动机专业及一般机械专业的本科生和研究生使用,可供航空发动机设计、生产和使用单位的工程技术人员、管理人员使用和参考,也可用作培训班的学习资料。

图书在版编目(CIP)数据

航空发动机可靠性·维修性·故障诊断/何明鉴主编. —北京:航空工业出版社,1998. 11

ISBN 7-80134-424-3

I. 航… II. 何… III. ①航空发动机-可靠性②航空发动机-可维修性③航空发动机-故障诊断 IV. V263. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 33966 号

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

南京航空航天大学印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

1998 年 11 月第 1 版

1998 年 11 月第 1 次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:13.25

字数:328 千字

印数:1—1 000

定价:13.00 元

前 言

航空发动机,特别是民用航空发动机的工作可靠性,是用户最关注的指标之一。性能指标、可靠性指标、维修性指标三者共同体现发动机的质量。单纯追求性能指标的时代已经过去了。随着对外开放形势的发展,我们清楚地认识到,航空发动机必须要有可靠性指标才能推向国际市场。70年代末以来,民用、军用航空部门和航空工业部门开始在全行业普及可靠性知识,同时从高层向下全面实施《可靠性系统工程》计划,其中包括在高等学校的本科生和研究生中开设这方面的课程。

本书是根据课程设置计划的要求,根据编著者多年从事本科生和研究生的《可靠性设计》课程的教学经验及收集到的最新资料并参考了以前的教科书的内容编写成的。全书共分八章,第一章为可靠性的基本概念;第二章为可靠性数据处理;第三章为系统可靠性计算;第四章为应力—强度干涉和可靠度计算;第五章为维修性及可修复系统的可靠性;第六章为故障分析;第七章为故障检测与诊断;第八章为发动机性能监测与故障诊断。

第一、二、三、四章由南京航空航天大学何明鉴教授编写,第五、六章由南京航空航天大学鲍明教授编写,第七、八章由南京航空航天大学辛季龄教授编写,东方航空公司李清红博士参与了本书的编写,全书由何明鉴教授统稿、修改并定稿。

本书由中国航空工业总公司科技委常委、我国知名航空发动机专家吴大观教授主审,提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示衷心感谢。

编者

1998.5 于南京航空航天大学

目 录

第一章 可靠性的基本概念

第一节 飞机必须工作可靠	(1)
第二节 可靠性的概念	(1)
第三节 数理统计的概念	(3)
第四节 可靠性的数量指标	(5)
第五节 航空发动机可靠性指标	(9)
第六节 可靠性目标值的确定	(15)
习题一	(23)

第二章 可靠性数据处理 (24)

第一节 可靠性数据的收集和数据类型	(24)
第二节 可靠性数据的处理和可靠度计算	(25)
第三节 分布参数的估计	(34)
习题二	(43)

第三章 系统可靠性计算 (45)

第一节 系统可靠性计算	(45)
第二节 常用分布的可靠度计算	(51)
第三节 系统可靠性估算和预测	(58)
第四节 系统可靠性分配	(62)
习题三	(68)

第四章 应力—强度分布干涉和可靠度计算 (69)

第一节 应力分布和强度分布	(69)
第二节 应力—强度分布干涉和可靠度计算方法	(72)
第三节 可靠度的置信度和置信区间	(81)
第四节 可靠性理论的应用	(86)
习题四	(97)

第五章 维修性及可修复系统的可靠性 (98)

第一节 维修度与有效度	(98)
第二节 维修方式	(102)
第三节 维修周期的确定	(104)
第四节 可修复系统的有效度计算	(109)
习题五	(127)

第六章 故障分析 (129)

第一节 概述	(129)
第二节 失效模式影响与后果分析	(136)

第三节 故障树分析·····	(142)
习题六·····	(155)
第七章 故障检测与诊断·····	(157)
第一节 概述·····	(157)
第二节 过程参数估计的诊断法·····	(160)
第三节 发动机工程结构损伤监测技术·····	(171)
习题七·····	(181)
第八章 发动机性能监测与故障诊断·····	(182)
第一节 概述·····	(182)
第二节 趋势分析·····	(185)
第三节 气路分析方法·····	(188)
习题八·····	(201)
附表1 Γ 函数表·····	(202)
附表2 正态分布数值表·····	(203)
附表3 正态分布分位数表·····	(204)
参考文献·····	(205)

第一章 可靠性的基本概念

第一节 飞机必须工作可靠

飞机的速度快,乘火车在两天两夜才能到达的目的地,乘飞机可能只要两小时。从运输量看,一列火车在两天两夜时间里可以把1 000名旅客送到目的地,而一架飞机在这两天两夜时间里(48小时)可以往返四次(八个单程),扣除旅客上、下飞机和货物的装卸时间(飞机同时进行检查和加油),至少也可以往返三次,以340个座位算,可以把1 000名旅客送到目的地,又可以把另外1 000名旅客从目的地运回来。就是说,一架飞机的运输量为一列火车的两倍。旅客的运输是这样,货物的运输也是这样。所以,经济发达国家,航空运输事业也非常发达。由于经济的不断发展,我国也越来越多的人乘飞机外出,以节省时间,提高工作效率。大力发展航空运输,已成为我国交通运输事业发展的目标。

航空运输的优点已显而易见。但另一方面,人们又担心飞行的安全问题。旅客乘飞机从南京到香港,他可以问:此行在飞行安全方面的风险多大?从事航空事业的科技人员和管理人员都应该能从理论上回答这个问题。

风险的对立面就是可靠性。可靠性的大小可以用可靠度衡量。一般,客机在有效使用期内的飞行安全可靠度应该至少有万分之九千九百九十九,也就是风险小于万分之一。这样好的可靠性,需要在飞机的设计和制造中作出很大的努力,并且有良好的使用(驾驶)技术和对飞机的维护、维修、管理才能达到;此外,还要建立一套把可靠性大小计算出来的理论。这些,都是可靠性研究的任务。

除航空外,许多重要工业产品都有可靠性指标。

工业产品的质量是衡量一个国家工业技术水平的主要标志之一。工业产品的质量通常包括三个指标:性能指标、可靠性指标及维修性指标。产品的性能代表其使用价值,为产品的主要质量指标。但是实践证明,产品在使用过程中,并不经常按人们的预想实现其性能,在实现性能的时候,满足用户要求的程度也不尽相同。如产品在使用中能实现其预定性能,达到预定的性能要求,则认为产品可靠,否则认为不可靠或不太可靠。产品出现故障后,有的容易维修,有的不容易维修,这就出现了产品的可靠性和维修性问题。

产品在使用中达不到预定的性能指标,则可靠性和维修性指标无从谈起。但只有性能指标,没有可靠性和维修性指标,产品的质量指标也不完全。产品的性能能否得到发挥,在很大程度上取决于可靠性及维修性水平。尽管产品的性能先进,但常出现故障,又不便于维修,这也影响产品的使用价值。例如一台电视机的性能很好,色彩和清晰度均不错,但容易出故障,出故障后又不容易修理,这样的电视机质量不能算好。又如,一部汽车速度快、载重量大,但其发动机容易熄火,且不易修复,这样的汽车也不能叫高质量。

有组织地开展可靠性的定量研究,开始于第二次世界大战期间。当时美国生产的飞机,有半数不能使用。轰炸机的电子设备,其寿命只有几十小时;海军用的电子设备,有70%经

常发生故障。电子设备之所以发生故障,是由于 50% 的电子管发生了故障。为了解决这个问题,美国国防部组织人力,对电子管的可靠性进行研究,这标志着可靠性研究的起步。因此,有人说,“电子管的故障成了可靠性研究的起点”,“不可靠的电子管成为可靠性之母”。

为了进行可靠性研究,美国在 1934 年成立“电子管开发委员会”(VTD)、1946 年成立“电子管专业小组”(PET)和“航空无线电组”(ARINC)、1947 年成立“空军器材指标部”(AMC)、1950 年成立“空军研究与开发指挥部”(ARDC)。这一时期研究的主要项目,除电气性能外,还有振动和冲击的影响。其中以研究故障的事后对策为重点。几乎同时,德国通过 V-1 和 V-2 导弹的研究,也开始重视可靠性问题。根据统计,1943~1944 年间,德国向伦敦发射的导弹中,只有 30% 命中了目标,因此认识到控制系统可靠性的重要。1956 年,日本开始引进可靠性技术,并组成了电子管寿命研究小组。1958 年,日本科技联盟成立了可靠性研究会。

1950 年美国国防部成立了“电子设备研究组”(ANG),1952 年又成立了“电子设备可靠性咨询组”(AGREE)。该组于 1957 年提出了一系列的成果报告——“AGREE 报告”,其中包括产品在试制及正式生产时,可靠性的测定方法和标准规范等科学建议。这些报告成为以后可靠性研究的基础,基本理论今天仍然适用。从这时起,可靠性作为一门学科已确定了基本方向。1958 年后,美国军方逐步制定了可靠性军工标准,同时将可靠性技术引入民用产品。

英国于 1962 年出版了《可靠性与微电子学》(Reliability And Microelectronics)杂志。同年法国国立通讯研究所成立了“可靠性中心”,并于次年出版了《可靠性》杂志。

前苏联在 50 年代就开始了可靠性理论及应用的研究,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 1977 年已先后召开了四次这样的会议。

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取得很大成功,大大地提高了其产品的可靠度,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,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。

国际电子技术委员会(ICE)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。

我国从 60~70 年代,首先在电子工业和国防部门开始进行可靠性的研究和普及工作,继而在机械工业等其他部门也逐步推广应用,并收到了良好的效果。

如果展望可靠性研究的未来,可以预计,它将得到更大重视,这是因为:

1. 产品复杂程度不断增加

由于要求产品功能增加,使产品的复杂程度不断增加,产品的零件数目不断增加。例如汽车制造企业为满足无公害、节能和安全的社会要求,为满足重量轻、舒适、平稳和方便的用户要求,已使汽车结构日益复杂,其组成的零件数目已由万件向十万件逼近。零件数目加多,会使可靠性降低。又如由 130 万个零件组成的导弹,其每个零件故障概率即使只有百万分之一,导弹也难以完全实现预期功能。因为根据概率论,导弹能运行的概率只有

$$P = (1 - 10^{-6})^{1300000} = 0.27$$

这表明,每发射 100 发导弹中,平均只有 27 发可能成功。可见,随着产品结构的复杂化,零件数目加多,导致不可靠的因素加多,使提高产品可靠性的任务更艰巨。

另外,随着产品结构的复杂化,导致设计、生产、装配和试验中的失误显著增加,管理失误也显著增加,因此应更加重视产品可靠性的提高。

2. 产品的工作环境日益严酷

由于要求产品功能的不断提高,使其承受的应力水平,温度条件,振动条件及腐蚀环境条件等不断苛刻。例如,为了提高涡轮喷气发动机的推重比,通常用增加涡轮进口处气体温度来增加推力,用增加应力水平,降低强度储备的方法来减轻重量,这些因素都使发动机的工作环境变坏,更须重视产品可靠性的提高。

3. 提高产品经济性的需要

为了提高产品的可靠性,需要在产品设计、制造和试验中增加费用,但却可以在使用和维护中减少费用。为了使产品的总成本最小,需要慎重选择其可靠性指标。例如,日本某公司为提高产品的可靠性,对产品作了一次彻底的设计审查和修改。据统计,在规定的可靠性指标下,花在设计审查和修改上的每一美元所得的效益为 23 美元。如不适当的过分提高可靠性指标,也会使总成本增加,这也是不允许的。

4. 国内外竞争形势的需要

为了在市场上建立信誉,提高产品的竞争能力,不但要求产品的性能好,而且还要求其可靠性高,价格便宜。例如,美国海军将可靠性技术引入 F404 发动机的关键件,制定了 F404 可靠性大纲。其目的在于识别早期潜在故障,并确保快速修正。结果使该发动机降低了使用维修费用,延长了寿命,降低了成本,提高了在市场上的竞争能力。

我国的航空产品要进入国际市场,必须要有好的可靠性,否则没有竞争力。

第二节 可靠性的概念

一、可靠性定义

一般说,产品都有使用期限(使用寿命)和使用环境条件的规定。说某产品是可靠的,就是说,使用该产品时,在一定的条件下,一定的时间内,其功能应处于满足使用者要求的状态,即不发生故障,或者故障次数不超过产品规定的风险。显然,产品的可靠性与其使用条件,如应力、振动、温度和腐蚀环境等条件有关、与使用的时间长短有关。因此,可以将可靠性定义为:产品在规定条件下,规定时间内,完成规定功能的能力。所谓产品,可以从一个很小的零件到一个很大的一体化系统。规定条件主要指环境条件和使用条件。规定时间(即产品寿命)是指的广义时间,除产品的运行时间外,还可指车辆行驶的里程数、旋转零件的旋转次数及循环次数等。有了可靠性概念后,人们才能掌握产品在多长时间内可以无故障地工作,在多大程度上发挥其功能。

对产品的可靠性需要进行量化,这将在后面的章节中论述。

应该指出,某个个体的可靠性,是对这个个体所在的母体进行考察分析得到的。能回答某个航班的飞机在飞行安全方面的可靠度,是因为这种飞机有一大群,而且有较长时间的飞行历史资料可供分析。

二、维修性定义

工业产品一般为可修复和不可修复产品两种,不可修复产品是指失效后不能或不值得修复的产品,如灯泡、电池、火箭等。对于可修复产品,为了保持或恢复其功能所采取的修理措施称为维修。维修性是指可修复产品的维修难易程度,它是指在规定条件下实施维修及在规定时间内完成维修的能力。

维修二字,其本义有维护和修理两种意思。不修复的产品,也有在使用中的维护问题。对产品的维修性进行量化时,主要考虑对产品进行修复的难易程度,这将在后面的章节中论述。

三、广义可靠性

对于可维修产品,维修性和可靠性不能完全分开考虑,于是提出了综合考虑可靠性和维修性的广义可靠性的概念。一般说,不可修复产品的可靠性称为狭义可靠性或简称可靠性,而将可修复产品的可靠性扩展为广义可靠性。在广义可靠性的概念中,除考虑产品的无故障性质、即狭义可靠性外,还考虑发生故障后修复的难易程度、即可维修性。所以,广义可靠性包括狭义可靠性和可维修性。

广义可靠性是指可修复产品在使用中或者不发生故障(通过预防性维修),或者发生故障也易于维修,因而经常处于可用状态的能力。汽车越野比赛是广义可靠性的典型模式。汽车能高速行驶——狭义可靠性;汽车因长途奔驰,难免零件磨损、疲劳而发生故障,因而必须沿途设置维修点,以便快速消除故障,使汽车很快恢复行驶。所以长途赛车的可靠性即为广义可靠性。

四、固有可靠性和使用可靠性

从产品可靠性的形成过程看,可以将可靠性分为固有可靠性和使用可靠性。某种机械产品的统计数据表明,产品故障起因于设计质量的占故障总数的 43%;起因于制造质量的占 20%;起因于使用条件和使用方法的占 30%;起因于其他原因的占 7%。通过设计和制造形成的可靠性称为固有可靠性。产品在使用条件(包括保管、运输、操作和环境等条件)影响下,在使用中所具有的可靠性称为使用可靠性。使用可靠性包含了使用条件对发挥固有可靠性的影响。甲、乙两人同时买了相同的自行车,车的固有可靠性相同,但甲的使用环境很差,半年后车就不能用了;而乙的使用环境很好,两年后车还在用;这是固有可靠性相同而使用可靠性不同的例子。

因此,为保证产品有高的可靠性指标,首先要做到设计质量高、制造质量高,然后尽可能保持正确的使用方法。固有可靠性是通过设计、制造过程所形成的最高可靠性,使用可靠性既受设计、制造的影响,又受使用条件的影响。所以,使用可靠性不会大于固有可靠性。因此,只有通过提高设计和制造质量以提高固有可靠性,通过改善使用条件以提高使用可靠性,才能使产品有好的可靠性。

第三节 数理统计的概念

一、总体与样本

用数理统计研究某个问题时,把研究对象的全体称为总体(或母体),把每一个研究对象称为个体。例如,WJ5 发动机的全体组成一个总体,其中每一台 WJ5 发动机都是一个个体。总体中所含个体的总数称为总体的容量,可以是有限,也可以是无限,从而相应地称其为有限总体或无限总体。所谓以发动机为研究对象,实际上还要具体化为研究它的某个属性,例如寿命。一般说,总体中每台发动机的寿命都不一样,寿命是一个随机变量。因此,在数理统计中对总体的研究,转化为对表示总体性质的随机变量的研究,今后我们说到总体,指的是一个有确定概率分布的随机变量,个体则是随机变量可能取的每一个数值。

为了研究总体的情况,一般只能从总体中抽取一定数量的个体进行观察,称为轴样(或取样、采样)。为了使抽出的一定数量的个体能很好反映总体性质,对抽样方法要有规定。

设总体为 X ,把在不变条件下对随机变量 X 进行的 n 次重复独立观察,称为 n 次随机独立抽样,简称抽样。把 n 次抽样所得的结果依次记为 $x_1, x_2, \dots, x_n$,称为来自总体 X 的简单随机样本,简称为样本或子样,抽样次数称样本容量(或称样本大小)。

抽样的条件相同的随机抽样称为简单随机抽样。为保证抽样的条件相同,对有限总体一般采取有放回抽样,对无限总体则采取无放回抽样。但工程应用中很多实际情况都无法使用有放回抽样,只能用无放回抽样。如果抽取的样本容量 n 与有限总体的容量 N 之比(n/N)小于或等于 0.01,则可近似认为抽样条件相同。简单随机抽样的特点是:

第一,代表性。某 n 次抽样与另外的 n 次抽样所得的同一个 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 一般其值是不同的,因此在重复抽样中, x_i 本身也是一个随机变量,而且都具有总体的特征,具有与总体相同的分布。

第二,独立性。由于 n 次抽样的每一次抽样都是独立进行的,即各次抽样的结果彼此互不影响,所以 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 应该是相互独立的随机变量。

样本 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 在抽样没有抽定之前,是 n 个随机变量,或看作是一个 n 维随机变量 $(X_1, X_2, \dots, X_n)$;当抽定之后,就成为一组具体的数值 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$,称为一个(或一组)样本观察值或样本值,从数学上讲,它是实 n 维空间 R^n 的一个点,因此样本值 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 也称为样本点。样本 $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 可能取的值的全体称为总体 X 的容量为 n 的样本空间,它是空间 R^n 的一个子集。

二、统计量

样本是对总体进行统计推断的依据,具体应用时要把样本中所包含的信息提炼出来,构造样本的某种函数,如果由样本决定的函数是由样本完全确定,不再有未知参数,则被称为统计量,下面所述样本均值和样本标准差都是统计量。

(一) 样本平均值(均值)

若 $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 是取自母体 X 的一个样本,则样本平均值为

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

无论是离散型还是连续型随机变量,它的数学期望就是它的均值。

(二) 样本标准差

若 $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 是取自母体 X 的一个样本,则其标准差为

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2 \right]}$$

三、几种常用的随机变量的分布函数

(一) 正态分布

正态分布是一种常用的重要分布。连续型随机变量 X 的概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}, \quad -\infty < x < +\infty \quad (1-1)$$

则称 X 是服从参数为 μ 和 σ 的正态分布,也称高斯(Gauss)分布,记为

$$X \sim N(\mu, \sigma^2)$$

其中 μ 和 σ 都是常数,并且 μ 是均值, σ 是标准差($\sigma > 0$)。 $f(x)$ 形状见图 1-1。

从坐标变换的道理知,参数 μ 只影响 $f(x)$ 的图形在水平方向的位置,而参数 σ 影响 $f(x)$ 的图形形状(图 1-2)。当 $\mu=0, \sigma=1$ 时称为标准正态分布,此时概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}, \quad \text{记为 } X \sim N(0, 1).$$

X 的分布函数为

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (1-2)$$

作变换

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (1-3)$$

则

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz = \Phi(z) \quad (1-4)$$

显然, Z 服从标准正态分布。

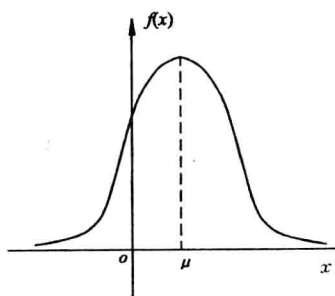


图 1-1 正态分布的概率密度函数

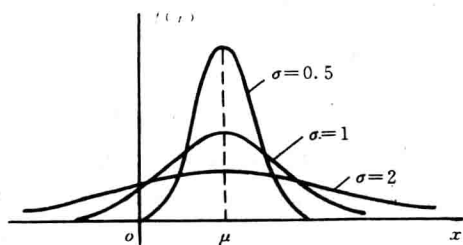


图 1-2 参数 σ 的影响

μ 和 σ 的任何值的正态分布, 都可以经变换(1-3)变成标准正态分布。已制成标准正态分布表, 由 z 值可直接从表查到分布函数 $\Phi(z)$ 的数值。下面列出的对应数值是从标准正态分布表中摘录的。

z	-3	-2	-1	0	1	2	3
$\Phi(z)$	0.001	0.023	0.159	0.5	0.841	0.977	0.999

若随机变量是产品寿命, 并用 t 表示, 则 $f(t)$ 正好是产品的故障概率密度函数, $F(t)$ 是累积故障分布函数, 此时, t 的取值范围为 $[0, +\infty)$, 因此

$$F(t) = \int_0^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}(\frac{t-\mu}{\sigma})^2} dt = \int_{-\frac{\mu}{\sigma}}^{\frac{t}{\sigma}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (1-5)$$

(二) 指数分布

随机变量 X 的概率密度函数为

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x} & , x > 0, \\ 0 & , x \leq 0, \end{cases} \quad (1-6)$$

其中 $\lambda > 0$ 为常数, 则称 X 是服从参数为 λ 的指数分布。它的分布函数为

$$F(x) = \int_0^x \lambda e^{-\lambda x} dx = 1 - e^{-\lambda x} \quad (1-7)$$

$f(x)$ 和 $F(x)$ 的图形见图(1-3)。

若随机变量是产品寿命, 并用 t 表示, 则 λ 正好就是失效率, $f(t)$ 是产品的故障概率密度函数, $F(t)$ 是累积故障分布函数。

前面已论述, 失效率一般是随时间而变化, 即是时间的函数, 用 $\lambda(t)$ 表示, 而可靠度总是可表示为

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

因此指数分布的可靠度为

$$R(t) = e^{-\lambda t}.$$

指数分布的均值为 $\frac{1}{\lambda}$ 。

(三) 威布尔(Weibull)分布

若随机变量 X 的概率密度函数为

$$f(x) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{x - \gamma}{\eta} \right)^{m-1} e^{-\left(\frac{x - \gamma}{\eta} \right)^m}, \gamma \leq x < +\infty \quad (1-8)$$

$m > 0, \eta > 0$, 则称 X 服从威布尔分布。

设 $t_0 = \eta^m$, 则又可表示为

$$f(x) = \frac{m}{t_0} (x - \gamma)^{m-1} e^{-\frac{(x - \gamma)^m}{t_0}} \quad (1-9)$$

X 的分布函数为

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x - \gamma}{\eta} \right)^m} \quad (1-10)$$

若随机变量是产品寿命, 并用 t 表示, 则 $f(t)$ 就是产品的故障概率密度函数, $F(t)$ 就是累积故障分布函数, 有

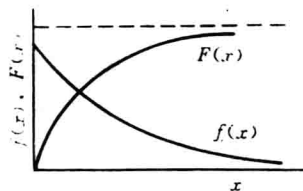


图 1-3 指数分布

$$f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{m-1} e^{-\left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^m} \quad (1-11)$$

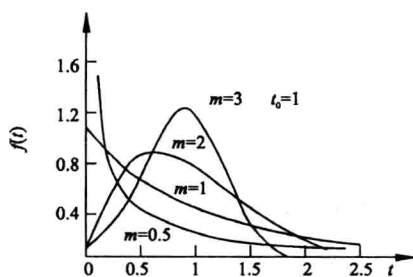
$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^m} \quad (1-12)$$

由 $R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(u) du}$ 和 $\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}$, 推出故障率为

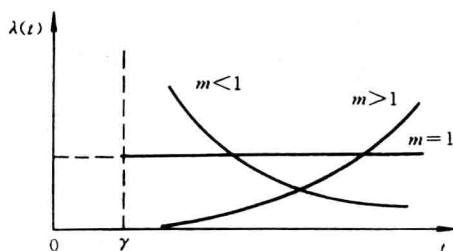
$$\lambda(t) = \frac{m}{\eta^m} (t - \gamma)^{m-1} \quad (1-13)$$

式中, m 为形状参数; γ 为位置参数; t_0 为尺度参数; η 为真尺度参数; 当 $\gamma=0$ 时, η 称为特征寿命。

威布尔分布的故障密度函数和故障率函数如图 1-4(a)和图 1-4(b)所示。



(a)故障密度函数

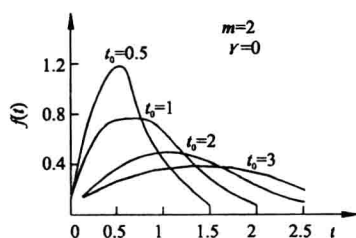


(b)故障率函数

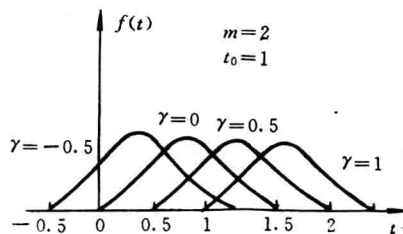
图 1-4 威布尔分布参数变化图

威布尔分布是一种很有用的分布,根据形状参数 m 的数值可以区分产品不同的故障率类型。当 $m>1$ 时,故障率随时间为递增型 IFR (Increasing Failure Rate); $m=1$ 为恒定型 CFR (Constant Failure Rate); $m<1$ 为递减型 DFR (Decreasing Failure Rate)。

尺度参数 t_0 (或 η) 起到放大或缩小坐标尺度的作用,如图 1-5 所示。位置参数 γ 是一个平移参数。 $m=1, \gamma=0$ 时,威布尔分布便成为指数分布。



(a) 尺度参数对图形的影响



(b) 位置参数对图形的影响

图 1-5 威布尔分布参数变化图

威布尔分布的均值为

$$\mu = \gamma + \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (1-14)$$

标准差为

$$\sigma^2 = \eta^2 \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)\right]^2 \right\} \quad (1-15)$$

表 1-1 为几种常用的概率分布函数。

表 1-1 常用的几种概率分布及其应用范围

分布类型	应用范围
正态	各种机械,电气,物理和化学特性,零件加工尺寸等
对数正态	寿命现象;事件集中发生在开端时的情况,而且观察值的离散程度很大
威布尔两参数	与对数正态相同;适用于产品寿命的早期,偶尔失效期,耗损失效期
威布尔(三参数)	与两参数威布尔分布相同;此外适用于各种机械、电气、物理和化学特性
指数	系统、部件等的寿命;对于元件,适用于偶然失效与使用时间无关的情况

第四节 可靠性数量指标

可靠性既然表示产品的质量,不能只有定性说明,应该还有数量指标。实践经验证明,产品的可靠性很难只用一种数量指标表示。有时着重用产品完成规定功能的概率;有时用产品从开始使用到丧失功能的时间(寿命)更直观一些;有时需了解瞬时的故障率;或同时用几种指标表示。另外,可靠性指标具有一定的随机性。对一特定产品在某一时刻只能处于故障(失效)或正常两种状态之一,不存在任何中间状态,因此对判断产品是否故障(失效)的标准必须十分明确。由概率论知,在一定条件下,可能发生也可能不发生的事件为随机事件,“一个产品在规定时间不发生故障”也是一个随机事件。随机事件的发生与否带有随机性,因此研究可靠性指标时,必须应用概率统计理论。

一般来说,可靠性数量指标应具有以下特征:

1. 能确切测定,即能数据化;
2. 能判明产品的寿命长短;
3. 能判别产品可靠性的优劣,能进行对比;
4. 能表示产品使用时间与故障发生的关系;
5. 能预测、估计使用中产品的未来工作状态。

总的说来,可靠性数量指标可以分为三类。第一类是用概率计算的指标,包括可靠度(R)、维修度(M)和有效度(A);第二类是用时间计量的指标;第三类是用单位时间比例计算的指标。

一、用概率计算的指标

(一) 可靠度(R)

比照可靠性的定义,可将可靠度定义为:产品在规定条件下,在规定时间内,完成规定功能的概率,常用 R 表示。这个定义指出了对象、功能、使用条件、时间和概率值等五方面因素。这个定义既适合于狭义可靠性,也适合于广义可靠性。在狭义可靠性的情况下,应理解为产品在规定条件下,在规定时间内,不发生故障的概率。

定义已经很明确,但具体应用时,必须对其中的概念有严格的、确切的规定。例如,飞机在飞行中出现下列情况:(1) 旅客感觉振动过大;(2) 四台发动机坏了一台,但飞机安全到

达目的地；(3) 飞机强迫着落成功，有人受伤；(4) 飞机坠落，人员死亡。以上情况，在计算故障概率时，应把哪些计入故障，要严格规定，不应有任何含混不清。

飞机及其他产品的可靠度和时间有关。刚投入使用的飞机和已经飞行了两千小时的飞机，其可靠度不一样，所以可靠度记为 $R(t)$ ，其值在 0~1 之间。

类似的，可以定义不可靠度：在规定条件下，在规定时间内，产品丧失规定功能的概率。它也是时间的函数，记为 $F(t)$ 。可靠度和不可靠度是对立事件，故有：

$$R(t) + F(t) = 1.0 \quad (1-16)$$

设有一批产品共 N_0 个，在规定条件下连续工作到时间 t 。如果 $r(t)$ 为时间 0 到 t 的累积失效数，则随时间不断增加，累积失效数 $r(t)$ 也不断增加。设 $t=t_{N_0}$ 时， $r(t_{N_0})=N_0$ 即产品完全失效。累积失效数 $r(t)$ 随时间 t 的变化曲线，一般可通过实测数据用直方图画出，如图 1-6 所示。

如将累积失效数 $r(t)$ 与产品总数 N_0 的比值定义为累积失效频率，当 N_0 足够大时，该比值可近视看作累积失效概率或不可靠度 $F(t)$ ，即

$$F(t) = r(t)/N_0 \quad (1-17)$$

当 $t=t_{N_0}$ 时，因 $r(t_{N_0})=N_0$ ，故 $F(t)=1.0$ 。累积失效概率（不可靠度）随时间 t 的变化曲线见图 1-7。它是用实测数据，经计算，再用直方图画出。

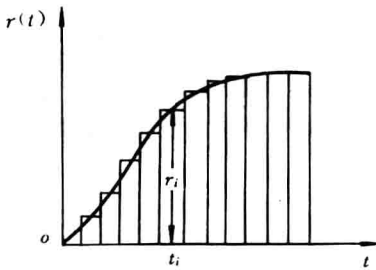


图 1-6 $r(t)$ 随时间 t 的变化曲线

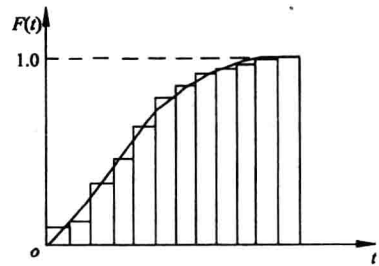


图 1-7 $F(t)$ 随时间 t 的变化曲线

由此，可靠度的表示式为：

$$R(t) = 1 - r(t)/N_0 \quad (1-18)$$

可靠度随工作时间 t 的变化曲线如图 1-8 所示。由图可知，起始时刻 $t=0$ ，产品尚未使用，有 $r(0)=0$ 和 $F(0)=0$ 故 $R(0)=1.0$ 。随着时间 t 增加，产品在使用中 $r(t)$ 不断增加， $F(t)$ 不断增加而 $R(t)$ 不断减少。当 $t=t_{N_0}$ 时， $r(t_{N_0})=N_0$ ，产品全部失效， $F(t_{N_0})=1.0$ ， $R(t_{N_0})=0$ 。如果产品的数量 N_0 很大，则可设置非常多的观察点，则图 1-6 和图 1-7 中的直方块很窄，直方块顶部几乎可连成一根平滑曲线，此时可将累积失效数看成时间 t 的连续函数，式(1-17)可改写为：

$$F(t) = \int_0^t \frac{1}{N_0} \frac{dr(t)}{dt} dt \quad (1-19)$$

$$\text{令} \quad f(t) = \frac{1}{N_0} \frac{dr(t)}{dt} dt \quad (1-20)$$

则式(1-19)可写为

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (1-21)$$

其中, $f(t)$ 称为失效密度函数, 即产品的失效概率密度函数, 它表示在时刻 t 后的单位时间内产品的失效数与产品的原有总数之比, $f(t)$ 也是时间的函数。当 $t=t_{N_0}$ 时

$$F(t_{N_0}) = \int_0^{t_{N_0}} f(t)dt = 1.0$$

这表示, $f(t)$ 曲线与横坐标围成的面积为 1.0, 如图 1-9 所示。图中, 面积 A 为 t 时刻的不可靠度 $F(t)$ 的值, 面积 B 为 t 时刻的可靠度 $R(t)$ 的值。

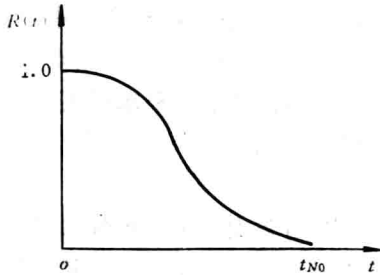


图 1-8 $R(t)$ 随 t 的变化曲线

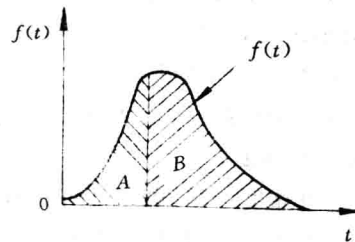


图 1-9 $F(t)$ 随 t 的变化曲线

对于一批产品, 其中每个产品的寿命有长有短, 参差不齐, 具有随机性。对某个产品, 在规定的寿命期内, 可能失效, 也可能不失效, 也有随机性。但它们都遵循一定规律, 使用经验证明, 失效密度函数 $f(t)$ 可以反映这种规律。

(二) 维修度 (M)

维修度是指可修复的故障产品在规定的条件下实施维修时, 在规定时间内完成维修的概率。显然, 维修度是表示维修难易程度的指标。设维修时间 $\tau=0$ 时有一批处于故障状态的产品, 经过维修, 能使产品恢复到规定的功能状态。随着维修时间 τ 的增加, 恢复功能的产品数不断增加, 维修度 $M(\tau)$ 也不断增加, 当 $\tau=0$ 时, $M(0)=0$ 时, 随着 τ 的增加, $M(\tau)$ 也相应增加而最终趋近于 1.0, $M(\tau)$ 随 τ 变化的曲线如图 1-10 所示。从图中可见, 不同的产品, 其 $M(\tau)$ 随 τ 的变化规律不同。在实际工作中, 维修度可以近似理解为一批故障产品, 在某段时间内, 已修复的部分占故障产品总数的百分比。

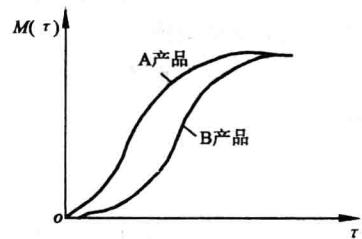


图 1-10 $M(\tau)$ 随 τ 的变化曲线

例如, 用户在使用一批机床中, 有 25 台产生了故障, 其修复的时间分别为: 38, 40, 44, 45, 45, 48, 51, 51, 57, 59, 60, 64, 65, 65, 67, 67, 68, 69, 74, 77, 78, 79, 86, 90, 98min。

首先将上列数据按维修时间长短分类, 如表 1-2 所示。

表 1-2 维修时间分类表

维修时间 (min)	31~40	41~50	51~60	61~70	71~80	81~90	91~100
修复的件数	2	4	5	7	4	2	1