

机械结构可靠性

洪其麟 主编

航空工业出版社

机械结构可靠性

洪其麟 徐林跃
何明鉴 孔瑞莲 编
洪其麟 主编

航空工业出版社

1993

(京)新登字161号

内 容 简 介

本书是机械结构可靠性设计课程的基础教材。全书共分六章：第一章为可靠性基本概念及其数量指标，第二章为系统可靠性分析，第三章为可靠性数据收集与处理，第四章为故障模式及其分析，第五章为应力-强度分布干涉理论和可靠度计算，第六章为机械结构可靠性设计，其中包括疲劳强度可靠性设计、损伤容限可靠性设计和振动可靠性设计。书中收集了大量有关航空发动机和一般机械结构方面的事例，内容新颖，图表清晰，实用性强。

本书可供航空发动机及一般机械设计专业的本科生和研究生使用，也可供从事这些工作的科研人员、工程技术人员和管理人员参考。

0202/C7

机 械 结 构 可 靠 性

洪其麟 徐林跃 编
何明鉴 孔瑞莲
洪其麟 主编

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号)

—邮政编码：100029—

全国各地新华书店经售

煤炭工业出版社印刷厂印刷

1993年12月第1版	1993年12月第1次印刷
开本：787×1092 1/16	印张：11.5
印数：1—2 000	字数：283千字

ISBN 7-80046-661-2/G·121

定价：5.70元

前 言

可靠性工程作为一门独立学科受到重视已经有40年了,可靠性工程不只在航空航天和电子技术部门中,而且在机械等民用工业中也逐渐得到应用。可靠性工程的应用离不开教育,早在60年代,美国已有40%的大学设置了有关可靠性的课程,到80年代初,设置四门以上可靠性课程的大学至少有20所。在我国,随着国民经济的迅速发展,需要进一步将可靠性工程推广应用到各个部门,特别是航空航天和机械工业部门。为此,我们在《发动机可靠性工程研究》一书的基础上,吸收近年在可靠性应用方面的成就及教学方面的经验,编成本书。

本书共分六章:第一章为可靠性基本概念及其数量指标;第二章为系统可靠性分析;第三章为可靠性数据收集与分析;第四章为故障模式及其分析;第五章为应力-强度分布干涉理论和可靠度计算;第六章为机械结构可靠性设计,其中包括疲劳强度可靠性设计、损伤容限可靠性设计和振动可靠性设计等三部分。

本书由北京航空航天大学洪其麟教授主编,由西北工业大学徐林跃教授、南京航空航天大学何明鉴副教授以及北京航空航天大学孔瑞莲副教授等编写而成。其中第一章、第五章和第六章的第二节由洪其麟编写,第二章和第六章的第一节由徐林跃编写,第四章和第六章的第三节由何明鉴编写,第三章由孔瑞莲编写。

本书系航空航天工业部所属三所重点院校联合编写的教材。书中收集了大量有关航空发动机和一般机械结构方面的事例,内容新颖,图表清晰,实用性强。可供航空发动机和一般机械设计专业的本科生和研究生使用,也可供从事这些工作的科研人员、工程技术人员和管理人员参考。

在编写过程中,我们得到北京航空航天大学405教研室、西北工业大学702教研室和南京航空航天大学202教研室的大力支持和帮助,谨在此表示衷心感谢。

本书承沈阳航空工业学院盛元生教授主审并提出许多宝贵意见和有益建议,在此也表示衷心感谢。

由于编写时间仓促,编者水平有限,书中难免存在错误和不当之处,请读者指正。

编 者

1993.5 于北京

符 号 说 明

<i>A</i>	有效度
<i>C</i>	置信度
DR	航班正点率
ETOPS	双发客机延长航线使用能力
ETA	事件树分析
<i>F</i>	不可靠度
FMEA	故障模式与影响分析
FMECA	故障模式、影响与后果分析
FTA	故障树分析
<i>M</i>	维修度
MTBF	平均故障间隔时间
MTTF	平均故障前工作时间
MTBM	平均维护间隔时间
MTTR	平均修理时间
MTBFO	平均强制停车间隔时间
MTBSD	平均停车间隔时间
<i>P</i>	存活率或概率
IFSD	空中停车率
<i>R</i>	可靠度
SR	启动成功率
SVR	返修率
UER	提前换发率
λ	故障率或失效率
μ	维修率
σ	标准差

目 录

第一章 可靠性基本概念及其数量指标	(1)
第一节 什么是可靠性.....	(1)
第二节 可靠性的发展及其重要性.....	(3)
第三节 可靠性数量指标.....	(4)
第四节 可靠性目标值的确定.....	(13)
第五节 航空发动机可靠性指标.....	(15)
第二章 系统可靠性分析	(20)
第一节 系统可靠性模型及其可靠度.....	(20)
第二节 系统可靠性预测与分配.....	(32)
第三章 可靠性数据收集与处理	(49)
第一节 可靠性数据的收集.....	(49)
第二节 可靠性寿命数据的类型.....	(49)
第三节 可靠性数据的处理分析.....	(50)
第四节 可靠性指标评估.....	(54)
第五节 分布参数的估计.....	(60)
第四章 故障模式及其分析	(74)
第一节 故障模式.....	(74)
第二节 故障模式、影响及后果分析.....	(79)
第三节 故障树分析法.....	(87)
第五章 应力-强度分布干涉理论和可靠度计算	(103)
第一节 应力分布和强度分布.....	(103)
第二节 应力-强度分布干涉理论和可靠度计算方法	(108)
第三节 可靠度与传统安全系数的关系.....	(118)
第四节 可靠度的置信度和置信区间.....	(120)
第六章 机械结构可靠性设计	(126)
第一节 疲劳强度可靠性设计.....	(126)
第二节 损伤容限可靠性设计.....	(145)
第三节 振动可靠性设计.....	(158)
附 表	(171)
参考文献	(177)

第一章 可靠性基本概念及其数量指标

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。

第一节 什么是可靠性

一、可靠性定义

通常说某产品是可靠的，这就意味着，使用该产品时，在一定的条件下，一定的时间内，其功能能处于满足使用者要求的状态，即不发生故障。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，与使用者的要求有关。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。

二、维修性定义

工业产品一般分为可维修和不可维修产品两种，不可维修产品是指失效后不能或不值得维修的产品，如灯泡、电池、火箭等。对于可维修产品，为了保持或恢复其功能所采取的技术管理措施称为维修。显然，对维修的影响，除了条件和时间外，还与维修方式有关。因此，将维修性定义为在规定条件下实施维修时，在规定时间内，完成维修的能力。维修性是指可维修产品的维修难易程度。

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，不可维修产品的可靠性称为狭义可靠性或可靠性，而将可维修产品的可靠性称为广义可靠性。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，还应考虑发生故障后维修的难易程度、即可维修性。所以，广义可靠性包括狭义可靠性和可维修性。

广义可靠性是指可维修产品在使用中不发生故障（通过预防性维修），如发生故障也易于维修，因而经常处于可用状态的能力。例如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，难免因零件磨损、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，使汽车很快恢复正常行驶。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，固有可靠性所考虑的中心问题是狭义可靠性。产品在使用条件（包括保管、运输、操作和环境等条件）影响下，保证固有可靠性发挥的程度称为使用可靠性，使用可靠性考虑的中心问题是包括维修性在内的广义可靠性。

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，然后尽量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，使用可靠性指标不会大于固有可靠性指标。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，才能最终提高产品的可靠性。

五、可靠性特征

与产品的其他质量指标相比，可靠性具有如下特征：

（一）可靠性与专业技术关系密切。由于可靠性是从研究故障开始的，所以可靠性与专业技术关系密切。要想提高可靠性，需要综合运用专业技术与管理技术知识。

（二）产品可靠性水平受各种使用条件和环境条件影响。即使可靠性水平相同，由于市场诸因素不同，其功能特性、故障模式及其严重程度也不尽相同。所以，提高可靠性应注意外部条件。

（三）对可靠性缺陷常采用预防手段。可靠性方面的缺陷，往往在出厂后的使用过程中，以故障形式表现出来。为了提高可靠性，往往通过故障分析与预测，采取事前对策，设计出可靠性高的产品。

（四）可靠性受人机工程因素影响。

（五）对可靠性问题要定性与定量分析并重。重点应在于防止故障出现和防止故障重复出现。

第二节 可靠性的发展及其重要性

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,开始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“空军器材指挥部”(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,其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。

进入60年代,英、法、联邦德国及苏联等国家也开始进行可靠性技术的普及工作。从1961年美国将可靠性技术应用到“阿波罗”号飞船的研制起,到1969年“阿波罗”号飞船在月球上着陆成功,都显示了可靠性技术的巨大效果。之后,可靠性技术从航天领域迅速扩展到其他领域。从人造卫星、电子通信设备到计算机,从机床、汽车、飞机到家用电器等研究、开发和设计制造,都将可靠性技术作为重要工具来加以应用。因此,可以说60年代是可靠性的普及时期。进入70年代,许多工业国家已将可靠性技术用于更广泛的民用机械产品。

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:

(一) 产品复杂程度不断增加

由于要求产品功能加多,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。例如由130万个零件组成的导弹,其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。因为导弹能正常运行的概率只有

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

这表明,每发射100发导弹中,平均只有27发可能成功。由此可见,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,更应提高产品的可靠性。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。

(二) 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。

(三) 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 and 维修中减少费用。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,日本某公司为了提高产品的可靠性,对产品作了一次彻底地设计审查和修改。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。

(四) 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。

第三节 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个数量指标表示。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;有时需了解某瞬时的故障率;或同时用几个指标表示。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:

- (一) 能确切测定,即能数据化;
- (二) 能判明产品的寿命长短;
- (三) 能判别产品可靠性的优劣,能进行对比;
- (四) 能表示产品使用时间与故障发生的关系;
- (五) 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。第一类是用概率计量的指标,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,包括平均故障前工作

时间 (MTTF)、平均故障间隔时间 (MTBF) 和平均维修时间 (MTTR)。第三类是用单位时间比率计量的指标, 包括故障 (失效) 率 (λ) 和维修率 (μ) 等。

一、用概率计量的指标

(一) 可靠度 (R)

可靠度的定义是, 产品在规定条件下和规定时间内, 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。狭义可靠度是以是否发生故障作为判断界限, 也可理解为, 在规定条件下, 在预期时间内, 产品不发生故障的概率。更通俗一点说, 可靠度就是用户在使用时, 产品能按使用者的期望发挥功能的概率。例如人们买电视机的目的在于收看电视节目, 如果在10000h内接收1000次, 在1000次收看中有1次发生故障, 则该电视机的可靠度为99.9%。把抽象的可靠性用概率值定义后, 产品的可靠性在测量、比较、选择和控制等方面, 就有了统一的基础, 并且可与其它质量指标相对应。

按上述的可靠性定义, 可以知道可靠度为时间的函数, 且其值在0和1之间, 即 $R = R(t)$ 。与定义可靠度相似, 也可以定义不可靠度 F , 即在规定条件下, 规定时间内, 产品丧失规定功能的概率。显然不可靠度也是时间的函数, 因此可用 $F(t)$ 表示。由于可靠和不可靠是两个对立事件, 故

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

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 r 为时间从0到 t 的累积失效数, 显然 $r = r(t)$ 。随着产品工作时间的增加, 累积失效数 $r(t)$ 也不断增加, 设 $t = t_{N_0}$ 时, $r(t_{N_0}) = N_0$, 则产品完全失效 (故障)。累积失效数 $r(t)$ 随时间 t 的变化曲线一般可通过实测用直方图画出, 如图1-1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, 在 N_0 足够大时, 该值可近似看作累积失效概率或不可靠度 $F(t)$ 。

$$F(t) = r(t) / N_0 \quad (1-2)$$

当 $t = t_{N_0}$ 时, 因 $r(t) = N_0$, 故 $F(t_{N_0}) = 1.0$ 。累积失效概率随时间 t 的变化曲线见图1-2, 该图也可以通过实测、计算并用直方图画出。

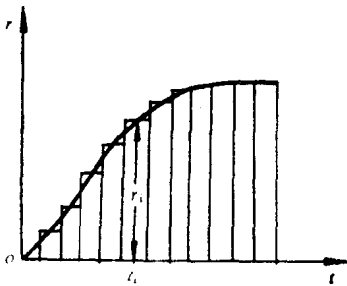


图 1-1 r 随 t 的变化曲线

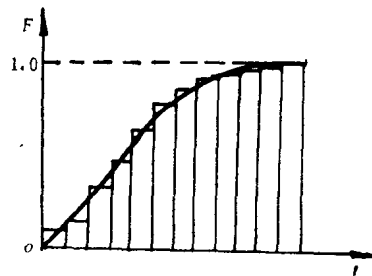


图 1-2 F 随 t 的变化曲线

将式 (1-2) 代入式 (1-1), 可得可靠度 $R(t)$ 的一般表达式

$$R(t) = 1 - r(t) / N_0 \quad (1-3)$$

可靠度 $R(t)$ 随工作时间 t 的变化曲线如图1-3所示。从曲线中可以看出, $t=0$ 时,产品尚未使用, $r(0)=0$, $F(0)=0$,故 $R(0)=1.0$ 。随着 t 的增加,产品在使用中 $r(t)$ 不断增加, $F(t)$ 也不断增加,故 $R(t)$ 不断减少。直到 $t=t_{N_0}$ 时, $r(t_{N_0})=N_0$,产品全部失效,此时 $F(t_{N_0})=1.0$, $R(t_{N_0})=0$ 。

如对产品失效的观测点非常多,可将累积失效数看成时间 t 的连续函数,则可将式(1-2)改写为

$$F(t) = \int_0^t \frac{1}{N_0} \frac{dr(t)}{dt} dt \quad (1-4)$$

令

$$f(t) = \frac{1}{N_0} \frac{dr(t)}{dt} \quad (1-5)$$

则式(1-4)可改写为

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (1-6)$$

式中的 $f(t)$ 称为失效密度函数,它表示在时间 t 后的单位时间内,产品的失效数与产品的总数之比,它同样是时间 t 的函数。当 $t=t_{N_0}$ 时,

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

这表示在失效密度函数 $f(t)$ 随时间 t 的变化曲线图中, $f(t)$ 曲线与横坐标围成的面积为1.0,如图1-4所示。图中表示的面积 A 为不可靠度 $F(t)$ 值,面积 B 则为可靠度 $R(t)$ 值。失效密度函数曲线有时简称为分布曲线,它表示产品失效概率随使用时间而变化的规律。如已知该曲线,则可以得到不同使用时间下的可靠度和不可靠度值。

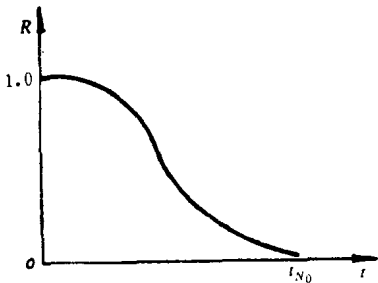


图 1-3 $R(t)$ 随 t 的变化曲线

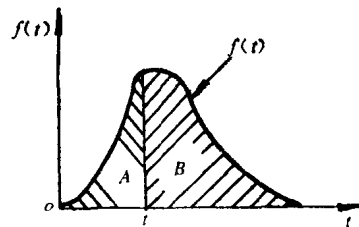


图 1-4 $f(t)$ 随 t 的变化曲线

对于一批产品,其中每个产品失效前的工作时间有长有短,参差不齐,具有随机性。对某个产品,在规定时间内,它可能失效,也可能不失效,也具有随机性,但它们都遵循着一定规律。使用经验证明,失效密度函数曲线可以反映这种规律。表1-1中给出了常用的几种概率分布及其应用范围。

(二) 维修度 (M)

维修度(M)是指可维修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的指标,是维修时间 τ 的函数。设 $\tau=0$ 时有一批处于故障状态的产品,经过维修后,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, $M(0)=0$,随着 τ 的增

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
对数正态	寿命现象；事件集中发生在开端时的情况，且观测值的离散程度很大
威 布 尔 (两参数)	同于对数正态；也适用于产品寿命的早期，偶然和耗损失效期
威 布 尔 (三参数)	同于两参数韦布尔分布；此外还适用于各种机械、电气、物理和化学特性
指 数	系统、部件等的寿命；对于元件，适用于偶然失效且与使用时间无关的情况

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1-5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，已修复的部分数占故障产品总数的百分比。

例如，用户在使用一批机床中，有25台产生了故障，对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及98min。

首先将上列数据按维修时间长短分类，如表1-2所示。

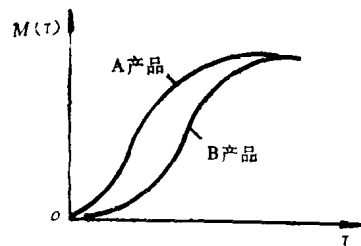


图 1-5 $M(\tau)$ 随 τ 的变化曲线

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
件 数	2	4	5	7	4	2	1

其次，根据维修度定义，计算不同时间的维修度。由于 $M(\tau) = \tau$ 时间内的修复件数/总修复件数，可以算得，到40min为止的维修度为 $M(40) = 2/25 = 8\%$ ；到60min为止的维修度为 $M(60) = 11/25 = 44\%$ ；到80min为止的维修度为 $M(80) = 22/25 = 88\%$ ；到100min为止的维修度为 $M(100) = 25/25 = 100\%$ ，即此时已全部修复。

(三) 有效度 (A)

有效度为广义可靠性的指标。可以将有效度定义为，产品在某时刻具有或维持其规定功能的概率。这个指标为不发生故障的可靠度和排除故障的维修度的综合量度，即在可靠度和维修度的综合作用下，产品保持可用状态的概率。

有效度A和可靠度R是有区别的，有效度比可靠度要求要低。例如， $A(480) = 0.98$ ，表示在100台产品中，当工作时间达480h的瞬间，平均有98台产品处于正常运行状态。这里不管产品是否出现过故障，什么时候出现过故障，中间是否经过维修。而对可靠度为0.98的产品却要求得更严。例如 $R(480) = 0.98$ ，则要求100台产品中平均有98台能无故障地运行

480h, 这显然比 $A(480)=0.98$ 的要求高得多。

有效度与可靠度一样, 也是时间的函数。在某段时间内, 有效度的平均值称为平均有效度。如用 t 表示产品能工作的时间, τ 表示不能工作 (即维修) 的时间, 则有效度为

$$A = t / (t + \tau) \quad (1-7)$$

(四) 有效度和可靠度、维修度间的关系

假设产品只允许修复一次, 且修复后对工作没有影响, 则有效度、可靠度和维修度间的关系可用下式表示。

$$A(t, \tau) = R(t) + [1 - R(t)]M(\tau) \quad (1-8)$$

式 (1-8) 右端第一项 $R(t)$ 表示时间从 0 到 t 中, 产品的无故障部分; 第二项中的 $[1 - R(t)]$ 则表示产品使用到 t 时发生了故障的部分; $[1 - R(t)] \cdot M(\tau)$ 表示在 τ 时间内产品经过维修恢复正常功能的部分。如 $R(t) = 0$, 即产品总在故障中, 但已修复的部分尚能使用, 所以算在 $A(t, \tau)$ 内, 故 $A(t, \tau) = M(\tau)$ 。如 $M(\tau) = 0$, 即为不可维修产品, $A(t, \tau) = R(t)$, 在此

条件下, 产品的可靠性指标只考虑可靠度就行了。设 $A(t, \tau) = \text{常数}$, 则

$$A = R + (1 - R)M = \text{常数}$$

在此条件下, A 和 R 、 M 间的关系曲线如图 1-6 所示。从图中可以看出, 对可靠度小的产品, 只有提高维修度才能保持其有效度为一定值。

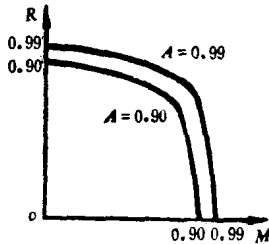


图 1-6 A 和 R 、 M 间的关系曲线

二、用时间计量的指标

(一) 平均故障前工作时间 (MTTF)

平均故障前工作时间又称平均寿命, 其定义为, 产品产生故障前的工作时间的平均值。

设有 N_0 个不可维修产品, 在同样条件下进行试验, 测得其寿命数据分别为 $t_1, t_2, \dots, t_{N_0}$, 则其平均寿命 θ 为

$$\theta = \text{MTTF} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} t_i \quad (1-9)$$

如产品总数 N_0 很大, 也可将数据分为 m 组, 设每组的寿命中值为 t_i , 每组的频数为 Δr_i , 则

$$\theta = \text{MTTF} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^m t_i \Delta r_i \quad (1-10)$$

式中

$$\sum_{i=1}^m \Delta r_i = N_0 \quad (1-11)$$

例如, 对总数为 110 台的某产品进行试验, 将测得的寿命数据列于表 1-3 中。按照式 (1-10), 可以算出平均寿命即平均故障前工作时间为

$$\theta = \text{MTTF} = 120550 / 110 = 1096 \text{h}$$

当数据组数 m 很大时, 可将 $\Delta r_i / N_0$ 用 $\frac{1}{N_0} \frac{dr(t)}{dt} dt$ 代替。通过式 (1-5) 将式 (1-10) 改写为

$$\theta = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (1-12)$$

表 1-3 寿命数据表

组 号	起 止 时 数	中 值 t_i	频 数 Δr_i	$t_i \Delta r_i$
1	5~405	205	6	1230
2	405~805	605	28	16940
3	805~1205	1005	37	37185
4	1205~1605	1405	23	32315
5	1605~2005	1805	9	16245
6	2005~2405	2205	5	11025
7	2405~2805	2605	1	2605
8	2805~3205	3005	1	3005
总 计			110	120550

由于
$$f(t) = -dR(t)/dt \quad (1-13)$$

故
$$\theta = -\int_0^{\infty} t dR(t) = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (1-14)$$

由式 (1-14) 可见, θ (MTTF) 值为图1-3中所示 $R(t)$ 曲线下的面积值。

(二) 平均故障间隔时间 (MTBF)

对于可维修产品, 平均故障间隔时间的定义为, 产品在两个相邻故障间工作时间的平均值。设有一个可维修产品, 在使用期中, 发生了 N_0 次故障。每次修复后, 又如新的一样, 继续正常工作。经统计, 其故障间的工作时间分别为 $t_1, t_2, \dots, t_{N_0}$, 则其平均故障间隔时间 θ 为

$$\theta = \text{MTBF} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} t_i \quad (1-15)$$

如

$$T = \sum_{i=1}^{N_0} t_i$$

则式 (1-15) 可改写为

$$\theta = \text{MTBF} = T/N_0 \quad (1-16)$$

式中的 T 为产品的总工作时间, N_0 为产品的总故障次数。

(三) 平均维修时间 (MTTR)

平均维修时间是对可维修产品而言, 其定义为产品事后维修所需时间的平均值。例如, 有一批产品, 在进行维修时, 其所需的维修时间如表1-4所示。

表 1-4 维修时间表

件 数	2	1	5	3	1	4
维修日数	1	2	3	4	5	6

这批产品共16件, 因维修所需的时间不同, 故先算出总维修时间为

$$1 \times 2 + 2 \times 1 + 3 \times 5 + 4 \times 3 + 5 \times 1 + 6 \times 4 = 60 \text{ (d)}$$

然后再求该产品的平均维修时间

$$MTTR = 60/16 = 3.75 \text{ (d)}$$

与上相似，如对某一件产品维修了16次，总维修时间仍为60d，则平均维修间隔时间仍为3.75d。

与可靠度类似，平均维修时间MTTR可以表示为

$$MTTR = \int_0^{\infty} [1 - M(\tau)] d\tau \quad (1-17)$$

三、用单位时间比率计量的指标

(一) 故障（失效）率（ λ ）

故障（失效）率是指工作到时刻 t 尚未发生故障（失效）的产品，在该时刻后的单位时间内，发生故障（失效）的概率。设 $N_s(t)$ 为到 t 时刻尚未发生故障的产品残存数，根据故障（失效）率 $\lambda(t)$ 的定义，得

$$\lambda(t) = \frac{1}{N_s(t)} \frac{dr(t)}{dt} \quad (1-18)$$

故障（失效）率的观测值为，在某时刻后单位时间内故障的产品数与工作到该时刻尚未发生故障的产品数之比。如以 Δt 表示 t_i 之后的时间增量， $N_s(t_i)$ 表示在 t_i 时刻尚未发生故障的产品残存数， $\Delta r(t_i)$ 表示在时间增量 Δt 内的故障产品数，则平均故障（失效）率的观测值 $\bar{\lambda}(t_i)$ 为

$$\bar{\lambda}(t_i) = \Delta r(t_i) / [N_s(t_i) \cdot \Delta t] \quad (1-19)$$

式 (1-19) 也适用于在时间区间 $(t_i, t_i + \Delta t)$ 内故障（失效）率不等于常数的情况。当 $N_s(t_i) \rightarrow \infty$, $\Delta t \rightarrow 0$ ，则 $\bar{\lambda}(t_i)$ 趋近于故障率真值 $\lambda(t_i)$ 。平均故障率也可理解为，某一时间内的故障数占该时间内总工作时间的比例。故障率的单位以每千小时的百分比或次/h表示。

例如有200台同型机床在相同条件下工作，每隔100h检测一次，得故障机床台数，并将其残存数和故障率列于表1-5中。

表 1-5 故障率计算表

$t_i(\text{h})$	$\Delta t(\text{h})$	$\Delta r(t_i)$	$N_s(t_i)$	$\bar{\lambda}(t_i)(\text{次}/10^3\text{h})$
0	100	10	200	0.5
100	100	40	190	2.1
200	100	80	150	5.3
300	100	50	70	7.1
400	100	14	20	7.0
500	100	6	6	10.0

根据式 (1-5) 和 (1-18) 可推导出故障（失效）率和可靠度间的关系式。即

$$f(t)/\lambda(t) = N_s(t)/N_0 = R(t) \quad (1-20)$$

再将式 (1-13) 代入式 (1-20) 中，得

$$\lambda(t)dt = -dR(t)/R(t) \quad (1-21)$$

将式 (1-21) 从 0 到 t 积分，得

$$\int_0^t \lambda(t)dt = -\ln R(t)$$

或

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (1-22)$$

如按指数分布, $\lambda = \text{常数}$, 与时间 t 无关, 则

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1-23)$$

$$\theta = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = 1/\lambda \quad (1-24)$$

例如某零件寿命服从指数分布, 其故障率与时间无关, 其值为 $\lambda = 0.001$ 。根据式 (1-23) 得

$$R(t) = e^{-\frac{t}{1000}}$$

零件在50h的可靠度为

$$R(50) = e^{-\frac{50}{1000}} = 0.951$$

零件工作到100和1000h的可靠度分别为

$$R(100) = e^{-100/1000} = 0.915$$

$$R(1000) = e^{-1} = 0.368$$

从上可见, 随着工作时间的加长, 零件的可靠度逐渐减小。根据 (1-24) 式, 该零件的平均寿命为

$$\theta = 1/\lambda = 1000 \text{ (h)}$$

在工程上也可以根据零件的平均寿命确定故障率值。例如, 对12个同样零件进行寿命试验, 其寿命值分别为 270、65、722、210、397、115、433、72、356、531、172、297h。这12个零件的总寿命为3640h, 零件的平均寿命为

$$\theta = 3640/12 = 303.3 \text{ (h)}$$

故障率为

$$\lambda = 1/\theta = 329 \times 10^{-6} \text{ (次/h)}$$

故障(失效)率的概念是由人类死亡率概念扩展而来, 是把观察人类寿命随着年龄增长而变化的规律扩展到机械寿命上。人不仅是由大量“器件”构成的复杂系统, 而且大部分“器件”是不便于维修更换的。图1-7示出典型的人类死亡率曲线, 图中统计了1950~1952年间及1978年日本男人的死亡率。从图1-7中可以看出, 人类的死亡率变化大致可分为三个时期: 小于10岁时, 死亡率由高而变低的幼儿期, 或称故障(失效)率减少型(DFR型); 从10岁左右开始到40岁左右为止的青壮年期中, 死亡率达到最低而且比较稳定, 这个时期的故障(失效)率大致相同, 故称故障(失效)率一定型(CFR型); 40岁以后的中老年期

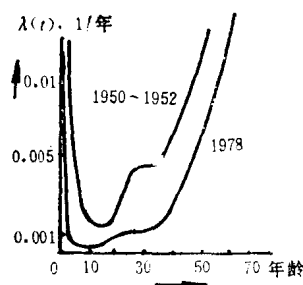


图 1-7 人类的死亡率曲线

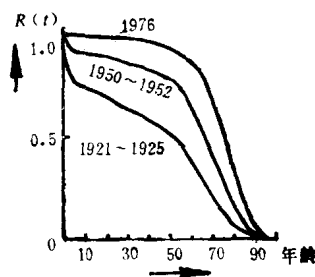


图 1-8 人类的生存率曲线