

机械可靠性设计

(上)

张子正

武汉工学院原零教研室

一九八三年十月

前 言

随着科学技术的高度发展，可靠性技术愈来愈为人们所重视，同时又促进了可靠性技术在各个领域的迅速发展。可以预言，可靠性将逐渐成为产品的一项必不可少的质量指标，并有力地推动生产水平和产品质量的不断提高。

近几年来，有关可靠性方面的学术活动也在日益开展，作为一种近代的设计方法，已逐步在机械设计中得到了应用。为了适应实际工作的需要，不仅举办了各种类型的讲座短训班和研讨会，而且在工科院校某些专业教育计划中，已正式列为必修课或选修课向本科学生开课。

为了满足我院机制专业和机械设计专业的教学需要，在学习和参考了有关书刊及兄弟院校讲义的基础上，编写了这本讲义。由于编者水平有限，加之时间仓促，讲义中一定有不少的缺点和错误，欢迎读者批评指正。

编 者

一九八三年七月

目 录

第一章 概论

- § 1-1 可靠性与可靠度
- § 1-2 可靠性理论的发展简史
- § 1-3 可靠性的意义和基本内容

第二章 可靠性尺度

- § 2-1 可靠度与不可靠度
- § 2-2 失效率
- § 2-3 可靠性寿命数量特征
- § 2-4 可修复产品的可靠性指标

第三章 可靠性设计中常用的分布函数

- § 3-1 指数分布
- § 3-2 正态分布
- § 3-3 对数正态分布
- § 3-4 威布尔分布

第四章 概率设计

- § 4-1 应力——强度的干涉理论
- § 4-2 强度和应力都呈正态分布的概率设计
- § 4-3 强度和应力不都是正态分布的概率设计
- § 4-4 可靠度的图解近似算法
- § 4-5 安全系数与可靠度的关系

第五章 疲劳强度的可靠性计算

§ 5-1 交变应力及交变应力作用下零件可靠性设计的特点

§ 5-2 $P-S-N$ 曲线

§ 5-3 极限应力图

§ 5-4 疲劳强度的可靠度计算

§ 5-5 滚动轴承的可靠性计算

第六章 系统可靠性的预测

§ 6-1 概述

§ 6-2 数学模型法

§ 6-3 上下限法

§ 6-4 网络系统可靠度的计算

第七章 系统可靠度的分配

§ 7-1 等分配法

§ 7-2 按相对失效概率用代数法分配

§ 7-3 AGREE法分配

§ 7-4 用拉格朗日乘子法分配可靠度

第八章 可维修系统的可靠性计算

§ 8-1 马尔科夫过程的基本概念

§ 8-2 可维修系统的可靠度

§ 8-3 有效度计算

前 言

随着科学技术的高度发展，可靠性技术愈来愈为人们所重视，同时又促进了可靠性技术在各个领域的迅速发展。可以预言，可靠性将逐渐成为产品的一项必不可少的质量指标，并有力地推动生产水平和产品质量的不断提高。

近几年来，有关可靠性方面的学术活动也在日益开展，作为一种近代的设计方法，已逐步在机械设计中得到了应用。为了适应实际工作的需要，不仅举办了各种类型的讲座短训班和研讨会，而且在工院校某些专业教育计划中，已正式列为必修课或选修课向本科学生开课。

为了满足我院机械专业和机械设计专业的教学需要，在学习和参考了有关书刊及兄弟院校讲义的基础上，编写了这本讲义。由于编者水平有限，加之时间仓促，讲义中一定有不少的缺点和错误，欢迎读者批评指正。

编 者

一九八三年七月

目 录

第一章 概论

- § 1-1 可靠性与可靠度
- § 1-2 可靠性理论的发展简史
- § 1-3 可靠性的意义和基本内容

第二章 可靠性尺度

- § 2-1 可靠度与不可靠度
- § 2-2 失效率
- § 2-3 可靠性寿命数量特征
- § 2-4 可修复产品的可靠性指标

第三章 可靠性设计中常用的分布函数

- § 3-1 指数分布
- § 3-2 正态分布
- § 3-3 对数正态分布
- § 3-4 威布尔分布

第四章 概率设计

- § 4-1 应力——强度的干涉理论
- § 4-2 强度和应力都呈正态分布的概率设计
- § 4-3 强度和应力不都是正态分布的概率设计
- § 4-4 可靠度的图解近似算法
- § 4-5 安全系数与可靠度的关系

第五章 疲劳强度的可靠性计算

§ 5-1 交变应力及交变应力作用下零件可靠性设计的特点

§ 5-2 $P-S-N$ 曲线

§ 5-3 极限应力图

§ 5-4 疲劳强度的可靠度计算

§ 5-5 滚动轴承的可靠性计算

第六章 系统可靠性的预测

§ 6-1 概述

§ 6-2 数学模型法

§ 6-3 上下限法

§ 6-4 网络系统可靠度的计算

第七章 系统可靠度的分配

§ 7-1 等分配法

§ 7-2 按相对失效概率用代数法分配

§ 7-3 AGREE法分配

§ 7-4 用拉格朗日乘子法分配可靠度

第八章 可维修系统的可靠性计算

§ 8-1 马尔科夫过程的基本概念

§ 8-2 可维修系统的可靠度

§ 8-3 有效度计算

附表

(一)正态分布密度函数 $\varphi(z)$ 数值表

(二)正态分布 $\Phi(z)$ 数值表

(三)相关函数起码值表

(四) Gamma 函数表

(五)应力为正态分布、强度为威布尔分布时，不同 A 、 C 、 m 值的失效概率数值表

第一章 概 论

§ 1-1 可靠性与可靠度

“可靠性”一词由来已久，是人们用以衡量产品质量的重要指标之一。所谓“可靠性”是指产品在规定的时间内能保持正常工作能力的特性。可是，在现代的可靠性技术出现之前，人们只能对产品的可靠性经验估计作一些抽象的评价，如很可靠、比较可靠、不可靠或者很不可靠等等。这种定性的评价，显然是不能适应科学技术发展的需要，而必须对可靠性进行数量化，即用一定的尺度进行衡量。也只有在有了具体的可靠性尺度，才能更有效地促进产品质量的提高，更科学地、更有说服力地从可靠性角度来评价产品的质量。

用来度量可靠性的指标是多种的，这将在第二章中详细阐述。这里先对常用的可靠性指标——可靠度 (Reliability) 加以定义，以便进一步理解可靠性的内容。

可靠度可以定义为：产品在规定的条件下和规定的时间内保持正常工作能力的概率。例如，可靠度为 95%，这就意味着在一大批产品中，有 95% 的产品可以在规定的寿命内保持工作能力，而有 5% 的产品可能在未达到规定寿命就失效了。对具体一件产品来讲，大致表明它有 95% 的可能性能工作到规定寿命，而有 5% 的可能性在未达到规定寿命而失效。所以，可靠度可以理解为可靠性的概率度量。由此可见，要计算可靠度必须考虑和明确下面四个要点：

- (1)对象；(2)规定的条件；(3)规定的时间（即工作寿命）；
- (4)产品的功能。

(1)研究的对象。我们通常用“产品”来表示。它是泛指，可以是系统、机器、部件，也可以是零件或元件。如果对象是一个系统，则不仅包括硬件，而且也包括软件和人类判断及操作等的因素在内，因此还必须明确失效是由于什么因素引起的。

(2)规定的条件。它包括环境条件、维护条件以及使用条件等。例如承受的负荷、环境温度、振动情况、润滑状况，能否维修保养与维修条件，以及使用者的技术水平等等。因为无论何种产品，如果超载运行、误用、操作不当或有意破坏的话都要损坏。所以不仅要保证产品的可靠度，还应明确规定正确使用产品的切实有效的资料。可见评价产品的可靠性时，离开了

规定的条件就缺乏基础，无法进行鉴定与比较了。显然，条件愈恶劣，可靠性愈低。所以，我们在制定、预测或计算产品可靠度时，是指在相同的规定条件下工作这一前提的。

(3)规定的时间。它是表达可靠性的基本因素，也是可靠性的特征。一般情况下，提到可靠度是离不开寿命这一要素的。寿命愈长，可靠度愈低。若一批产品长期使用下去，最终必然全部失效。所以无限寿命的产品的失效概率等于“1”，即可靠度为“0”。因此，可靠度是时间的函数。

作为时间这一条件，它既可以是泛指广义时间，也可以是因为对象不同而采用的诸如次数、周期、距离等相当于时间的量。例如车辆的“时间”往往用公里数来表示，滚动轴承用转数来表示，齿轮用应力循环次数来表示等等。

(4)工作能力。是指产品保持功能参数（例如滑动轴承的径向间隙）在规定值内完成规定功能的能力。一般把丧失工作能力称为“失效”。但必须强调的是，“失效”不一定仅仅指产品不能工作。有些产品虽然能工作，但由于其功能参数已漂移到规定界限之外了，即使尚能运行，却已不是正常工作，我们也视为失效了。

纵观所有产品，大致可以分为不能修复的产品和可修复产品两大类。

对于一些不能修复的产品，例如齿轮、轴、滚动轴承等机械零件，或诸如灯泡等的消耗品，要适当地控制应力（在可靠性理论

，“应力”是泛指，它包括应力、温度、冲击、振动、磨损等等，都用“应力”这一名词来表示），或者提高产品本身的强度（同理，“强度”这一名词也是泛指的，它表示各种抗“应力”的能力，例如机械性能、耐磨性、抗振性、抗冲击性、耐温能力等等）。这种抗失效的性质可用可靠度表示。

对于有些产品，例如系统、机器等，为使其经常保持正常状态，可定期更换零部件或早期发现问题，进行维护保养。这里不仅维修技术是重要的，而且从开始设计和制造时就应考虑使其结构易于早期发现问题，易于进行维修。这可用表示产品修复能力大小的维修度（Maintainability）来衡量。

所以，要对产品考虑到广泛的可靠性，把使之不发生故障与排除故障克服不良情况这两者结合起来融贯在产品之中，使产品具有高可靠度和高维修度。当然，对于象人造卫星等不载人的以及无法进行维修的系统、产品的零部件等，就不能依赖维修度，应该从开始就致力于提高可靠度了。

把可靠度和维修度综合在一起的可靠性尺度是有效度（Availability）。有效度的定义是“在一定条件下，在规定时间内，维持正常功能的概率”。有关有效度的问题将在后面详述。

如上所述，评价产品的质量除了好的功能外，还应有高的可靠性，即要求产品能在规定的条件下和规定的时间内，能正常而可靠地工作，我们把设备运转时的可靠性称为工作可靠性（Operational Reliability）。它包含了产品的制造

与产品的使用两方面的因素，所以，它又分为固有可靠性（Inherent Reliability）与使用可靠性（Use Reliability）两种可靠性。

在生产过程中已经确立的可靠性称为固有可靠性，是产品内在的可靠性，是生产厂在模拟实际工作条件的标准环境下，进行检测并给以保证的，它和产品的材料、设计与制造技术有关。

使用可靠性则与产品的使用有关。工厂生产出来的产品要经过包装、运输和保管才能转给使用者。同时，使用过程中还要受到环境、操作状况、维修等因素的影响。而且，在实际使用过程中，人的因素对产品影响也很大。所以，使用可靠性与使用条件密切相关。

总之，要提高产品的可靠性应对制定规划、研究、试制、设计、制造、试验、鉴定以及检查等所有环节都进行周密的计划与组织，并把整个过程有机地联系起来。因为一个产品的失效数据可以作为经验为下一批产品的生产提供借鉴，所以可靠性工作自产品的生产到完全报废，要贯穿始终。而要想有效地发挥可靠性工程的作用，生产出质量好的产品，还必须进行可靠性管理，有关可靠性管理的知识请参阅有关书籍。

§ 1—2 可靠性理论的发展简史

可靠性理论作为单独的一门学科来进行有组织地研究是在第二次世界大战末期开始的，当时，纳粹德国妄想扭转败局，使用了刚刚研制成功的V型飞弹。可是大部分飞弹都发生了故

障，没有达到预期的效果。由于在飞弹失灵时期的概率论与统计学的研究已有相当发展，参加飞弹研究的鲁塞尔（R. Lusser）等人就利用这些教学工具来探讨这个问题，进行可靠性数理研究。他们认为整个飞弹系统的可靠度，是由组成飞弹的各个部分（如动力部分、导航部分、引爆部分等）可靠度的乘积。所以，如果要攻击某一目标，则同时发射飞弹的数目应该大于飞弹的可靠度的倒数。

与此同时，美军运往远东的电子元件、设备及装置在运输和保管过程中，待到达了前线已有半数以上因不能使用而报废，而那些运抵前线的中间也有近半数已失效。这就促使美国投入力量去进行可靠性的研究，所以，美国对可靠性的研究是从1943年开始的，当时由军队、学术界及生产部门联合组成小组进行了各种研究活动，直到1957年，当美国国防部电子元件可靠性咨询小组 AGREE (Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment) 提出了“电子设备的可靠性报告”以后，可靠性工程的研究方向才大体被确定下来。该报告成为当时美军处理可靠性问题的基础文件。1969年7月美国阿波罗11号登月成功以后，可靠性成果得到了广泛的宣传与推广。

日本是从1951年开始接受可靠性想法的。1953年日本科学技术联盟设立了可靠性研究委员会，1960年进行了第一次学术讨论活动。

其它如英国、法国、苏联以及东欧各国到了六十年代在可靠性研究方面也都不同程度地开展了研究工作和学术活动。

可见，可靠性的研究是从四十年代由处理电子元件问题而发展起来的，到了六十年代则由于复杂的空间研究和宇航事业的要求而得到了进一步的发展和提高。

§ 1—3 可靠性的意义和基本内容

从可靠性的发展简史可以看到，可靠性问题是从生产实际和使用实际中提出来的，随着科学技术的迅速发展，生产领域的日益扩大与生产过程自动化程度的不断提高，以及人们物质生活与社会要求的变化，产品可靠性的意义愈来愈显得重要，人们对这个问题及认识也愈来愈深刻了。举例来说，日本汽车业在1969年6月发生了汽车“退货事件”。根据调查与分析，问题的中心是社会对汽车的要求发生了变化，而不是汽车的故障增加了。归纳起来是由于：用户对可靠性要求高了，汽车的使用条件发生了变化，汽车保有量增加，行驶密度高了行车速度也高了，产品技术日趋先进，结构复杂，零件数增加等等，使汽车发生故障的机会增加出现故障后的危险性也增大了。除此之外，市场条件的变化以及保险费用的增加等，凡此种种，可靠性就变得非常重要了。

在当前各类产品向着巨型化、复杂化、高速化以及自动化等方面发展的情况下，由于其中一个机构或一个零件、一个元件的失效而导致整个系统或设备出现故障所引起的后果往往是不堪设想的。以平常的例子来说，例如电视机中的一个元件有缺陷，就会引起经济损失和使用的方便。而在航空与航天技术中，高可靠

性的必要性更是不可忽视的。飞机上的着落装置损坏纵使乘客没有伤亡也会使飞机报废。开关装置工作失灵或遥测系统不工作，可使一个卫星完全无用。美国的火星发射的“水手”1号火箭，由于电子计算机的程序系统脱落了一个字符而导致了失败。

从纯经济观点讲，为了减少总费用，高可靠性也是非常必要的。据统计，维持某些军用设备处于可工作状态每年花的费用高达设备原价的十倍。机床在整个过程中，维修费和技术服务费约为本身价格的八倍，汽车为六倍，飞机为五倍，等等。但是，若不考虑具体对象、具体情况而过份地强调安全性、可靠性，过份要求坚固、可靠，也将是不切实际的。为了提高产品的可靠性，满足各方面的要求，使得利润高、成本低，就要找出最佳可靠性。如图1—1所示，并不是可靠性最高时总费

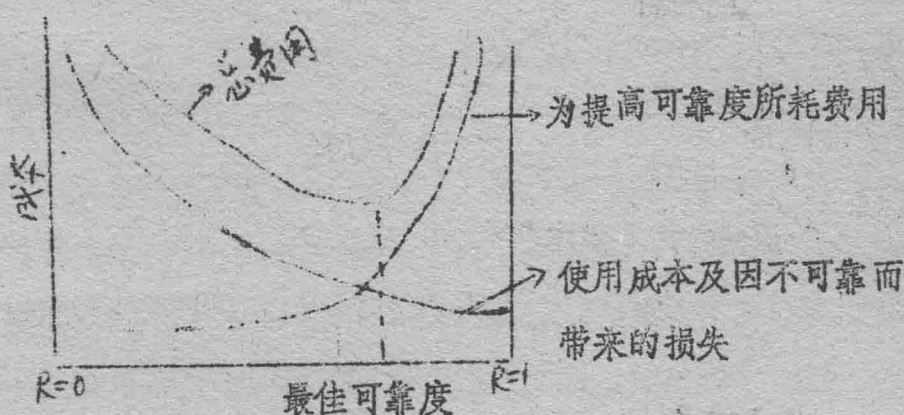


图 1—1 可靠性和成本

用最低，而是有一个最佳可靠度才能使总费用最低。

图 1—2 表示可靠度（或不可靠度）与纯利润的关系。它反映了设计产品的原始费用与产品失效费用（反映在预计利润中）两种设计费用的相互效应。“纯利润”是两条曲线间之差。若不可靠度（即失效概率） F 低，则原始费用（即成本）就高，“纯利润”就低。同样，如不可靠度高，就要增加维修或更换零件的费用，也会使“纯利润”逐渐下降。最大的“纯利润”发生在 F 处，这时的不可靠度表示在修理费用与原始费用两者之间进行权衡所得的最佳值。

从上面介绍的情况可见可靠性理论无论在科学实验、生产实践或者人们日常生活等方面都具有极为重要的意义，从 1943 年开始研究可靠性理论以来，迄今已四十年左右，有了较为迅速的发展。在可靠性理论的成长过程中，开发了三个主要领域

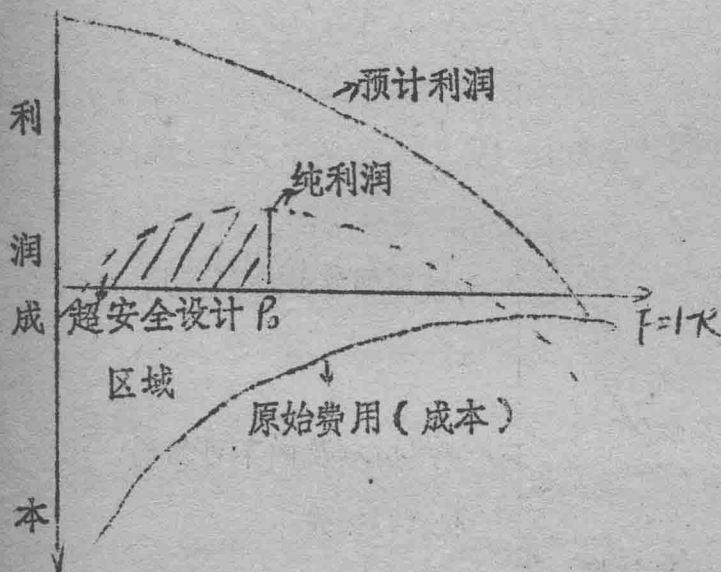


图 1—2

可靠度与纯利润

(1)可靠性工程，包括零、部件和系统的可靠性分析、设计和有关任务；(2)可靠性物理（或可靠性分析），包括失效的物理原因与模型的研究和纠正措施；(3)可靠性数学，研究可靠性定量方面的教学方法。这些领域都发展成为一门独立的学科。尽管它们之间很难找出明确而具体的界限，但实际工作上可靠性工作常常分成这样三个部分的。

“机械可靠性设计”是可靠性工程学的主要内容之一，它研究的内容包括：

- 1、机械零部件和机器的可靠性指标的判定和数量化；
- 2、机械零件的失效分布函数与参数的确定与研究；
- 3、系统可靠性设计，包括系统可靠性的预测、分配与评价
- 4、机械零件的工作能力计算与概率设计。
- 5、提高产品可靠性途径的探索与研究。