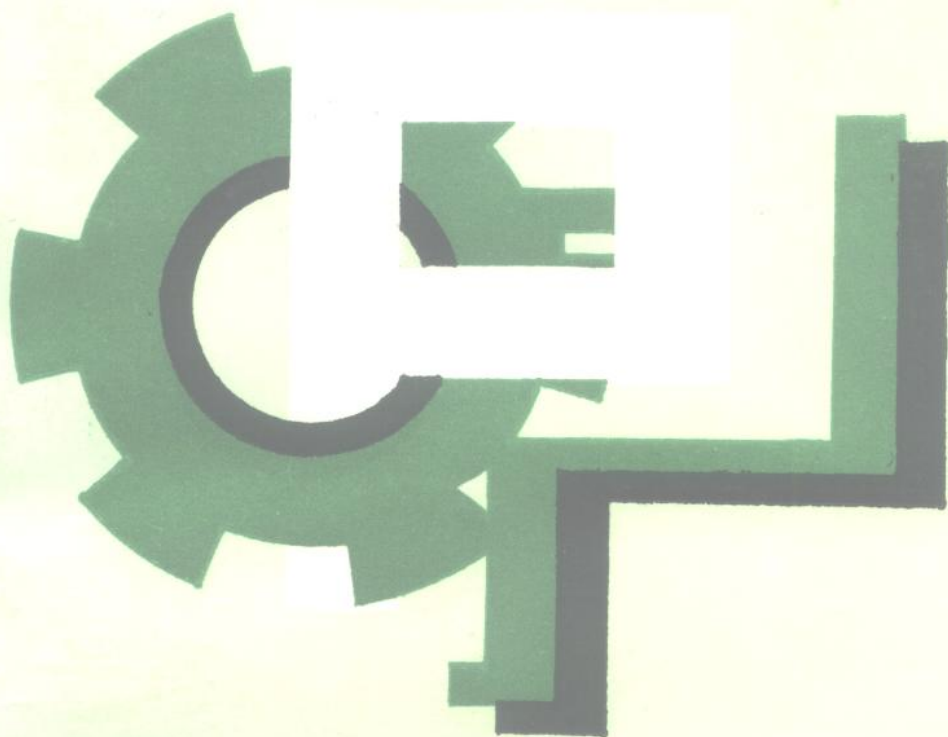




机械可靠性设计

XIE KEKAOXING SHEJI

朱文予 编著

上海交通大学出版社

机械可靠性设计

朱文予 编著

上海交通大学出版社

(沪)新登字 205 号

内 容 提 要

《机械可靠性设计》共十章,系统而全面地阐述了机械可靠性的基本知识、基本理论和基本方法。其主要内容可概括为三部分:一、机械可靠性设计概论和可靠性设计的基础知识(第一、二、三、五章);二、机械零件的可靠性设计理论和方法(第四、六、七章);三、机械可靠性优化设计和系统的可靠性评估(第八、九、十章)。内容新颖、适用性和针对性强,并列有较多的工程实例及必需的计算用表。

本书可作为高等工科院校机械类专业的教材,也可供机械类专业研究生和广大工程技术人员学习和参考。

机械可靠性设计

出版:上海交通大学出版社
(淮海中路 1984 弄 19 号)

发行:新华书店上海发行所

印刷:立信常熟印刷联营厂

开本:850×1168(毫米) 1/32

印张:9

字数:230,000

版次:1992年8月第1版

印次:1992年10月第1次

印数:1—3100

科目:277—299

ISBN7-313-01079-6/TH·11

定价:2.85 元

前 言

机械可靠性设计是可靠性工程学的重要组成部分。它把随机方法(概率论和数理统计)应用于工程设计,不仅解决了传统设计所不能处理的一些问题,而且能有效地提高产品的设计水平和质量,降低产品的成本。因此,先进的工业国家都在机械产品的设计中运用了这种设计方法,并在高等工科院校机械类专业开设了《机械可靠性设计》课程。近年来我国在机械行业开展了多方面的可靠性工作,出版了一些专著,不少学校也相继开设了这门课程。但适合教学的教材却很少,为了满足开设这门新课教学的需要,作者于1985年和1990年两次编写了《机械可靠性设计》内部教材,供我校机械类本科生和研究生使用,受到了他们的欢迎和好评,并提出了许多宝贵的意见;部分兄弟院校也选用了这本教材,写来了不少热情中肯的建议。另外,近年来作者曾在有关杂志和学术会议上发表过多篇“机械可靠性设计”方面的论文,使作者感到有必要将以上所做的工作进行整理、加工成书,以期能为我国的科技教育事业做点贡献。在编写过程中得到了上海交通大学出版社和我校教材科的支持与鼓励。此外,书中引用了不少学者的文献资料及数据。作者在此向帮助过本书的许多同志一并致谢。

多年来作者在开展机械可靠性设计的教学实践中,体会到作为一门新学科的教材,内容应有鲜明的针对性,面不宜涉及太广,必须符合教学要求和规律。因此,本书的核心内容定为机械零件和系统的可靠性设计理论及方法,全书内容无论是设计知识、设计原理、设计数据、设计公式及设计例题都密切结合工程实际,紧紧围绕这一中心而展开,相辅相成,组成一个统一的整体。这些内容既是作者从事本课程教学实践的小结,也是精心探索的部分成果。

本书的主要任务是向机械类专业大学生、研究生和从事机械设计的工程技术人员，介绍机械可靠性设计的专门知识。作者认为，传统的机械设计和机械可靠性设计都是以机械零件和机械系统为其研究对象，可以说机械可靠性设计是在传统的机械设计基础上，补充了可靠性技术的一种新的、靠得住的设计，也是传统机械设计的进一步发展和深化。因此，本书内容力求与《机械设计》课程保持着天然的联系。为了学习机械可靠性设计知识的需要，书中对概率论和数理统计作了必要的、针对性的介绍，并列举了多种类型的工程实例，使读者在掌握传统的设计理论和方法的基础上，了解和熟悉可靠性设计的基本理论和方法，拓宽和加深对产品设计的全面认识，提高设计能力。

尽管作者在编写本书的过程中，按照上述的原则和设想作了许多努力，但因水平所限，书中不妥之处在所难免，热忱欢迎广大读者批评指正。

朱文予

1992.2.于合肥工业大学

目 录

第一章 机械可靠性设计概论	1
1-1 可靠性与可靠性工程学	1
1-2 可靠性工程学的诞生和发展	3
1-3 传统的机械设计与机械可靠性设计	5
第二章 可靠性设计变量及指标的基本概率运算	11
2-1 工程中信息的不确定性	11
2-2 随机事件的概率规则	12
2-3 随机变量的分布和数字特征	19
2-4 产品可靠性的数量指标	28
2-5 产品的失效率曲线	38
第三章 常用的概率分布及其应用	41
3-1 伯努利试验和二项分布	41
3-2 泊松分布	43
3-3 指数分布	47
3-4 伽玛(Γ)分布	51
3-5 正态分布	54
3-6 对数正态分布	58
3-7 威布尔分布	61
第四章 随机变量的组合运算与随机模拟	69
4-1 随机变量的代数运算	69
4-2 泰勒级数近似求解法	76
4-3 蒙特卡罗模拟法	80
第五章 可靠性数据的收集与分析方法	85
5-1 可靠性数据的收集方法	85
5-2 分布参数的估计方法	87

5-3	可靠度的置信区间	94
5-4	概率分布的检验	98
第六章	可靠性设计的原理与方法	105
6-1	可靠度计算的一般方程	105
6-2	几种常用分布的可靠度计算	113
6-3	一次二阶矩法	120
6-4	设计验算点法	123
6-5	当量正态分析法	131
6-6	可靠性安全系数	134
第七章	机械零件的可靠性设计	144
7-1	应力分布类型和分布参数的确定	144
7-2	强度分布类型和分布参数的确定	148
7-3	呈分布状态的疲劳曲线	161
7-4	呈分布状态的疲劳极限应力线图	164
7-5	稳定变应力下的可靠度计算	169
7-6	不稳定变应力下的可靠度计算	173
7-7	轴的可靠性设计	178
7-8	齿轮传动的可靠性设计	181
7-9	滚动轴承的可靠性设计	187
第八章	机械可靠性优化设计	192
8-1	常规的优化设计与可靠性优化设计	192
8-2	可靠度分配的最优化方法	193
8-3	机械强度可靠性优化设计	202
8-4	齿轮减速器的可靠性优化设计	207
第九章	系统可靠性设计	216
9-1	串-并联系统的可靠性	216
9-2	表决系统的可靠性	222
9-3	开关系统的可靠性	225
9-4	多元失效模式系统的可靠度	229
9-5	故障树分析 (FTA)	233

第十章 维修系统的可靠性设计	243
10-1 维修性尺度与维修性方程	243
10-2 马尔科夫过程	246
10-3 单个可维修系统的可用度	253
10-4 两个相同单元的可维修系统	256
10-5 两个不相同单元的维修系统	258
10-6 n 个相同单元的维修系统	260
10-7 预防维修系统的可用度	263
附录	266
附表 1 (1) 正态分布表	266
附表 1 (2) 正态分布表	269
附表 2 Γ 函数	272
附表 3 t 分布的临界值表	273
附表 4 相关系数 ρ 的起码值	274
参考文献	276

第一章 机械可靠性设计概论

1-1 可靠性与可靠性工程学

自古以来，人们在社会活动和生产、技术活动中常常遇到某种事物可靠与不可靠的评论，这种评论已成为一种共同的原则和概念，它总是同事物是否达到某种预期的任务或功能相联系着的。例如设计、制造一台机器或一个零件，要求能连续工作五年，如果使用到四年或更短的时间损坏了，那就是不可靠的；反之，如果能连续工作五年以上，那就是可靠的。但是，这种对可靠性的认识，只是模糊的、定性的，而缺乏严格的计算方法和数量标准。近代，由于科学技术的迅速发展，要求提供的机器设备自动化程度愈来愈高，结构及组成愈来愈复杂，为了保证设备能在预期的时间内安全地运行，对可靠性提出了较高的要求。为了适应这种情况，从40年代开始，美国和许多国家都相继对产品的可靠性进行了大量的研究，如今可靠性不仅是一个抽象的定性的名词，而且可以用一些定量的指标来衡量。可靠性理论从军工、电子产品，扩展到其他许多技术领域，得到了越来越广泛的应用，并且迅速发展成为一门独立的学科。

目前，为大家承认的可靠性定义是：“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。”见GB3187-82，显然，这个定义含有四个要点。

1) 产品 定义中的产品是广义的，它包括零件、设备、系统等。系统的概念是相对的，可大可小。例如汽车可看作一个系统，其中发动机、变速箱等可当作分系统或基本单元，当包括人的因素时，则称为人-机系统。我们也可以把发动机看作一个系统，其中的曲轴、活塞、连杆等零件或部件看成基本单元；而一

个零件，如曲轴仍可以当作一个系统，其结构组成部分(主轴颈、连杆轴颈、曲轴臂等)则作为基本单元。

2) 规定的条件 它是指产品的使用条件、环境条件，也包括运输、保管条件等。诸如载荷、速度、温度、振动、润滑、腐蚀、环境湿度、含尘量以及使用方法、维修保养、操作人员的技术水平等。这些条件对产品的寿命和功能，都有很大影响。

3) 规定的时间 指产品的预期寿命，时间因素是可靠性中的重要问题，产品的功能只有同使用时间相联系，才有实际意义，而产品又只能在一定的时间范围内发挥其功能，不可能永远保持其功能。对不同的产品应作不同的规定，如海底电缆要求使用时间长达三、四十年；机床、汽车、家用电器则规定一个合适的技术经济耗损寿命；而火箭、枪炮子弹发射则要求一次工作。不同产品的寿命，可以用小时表示，也可以用循环数、距离表示。例如滚动轴承用小时；齿轮、轴用应力循环次数；车辆用行驶里程表示。

4) 规定功能的能力 人们为了生产及生活上的需要，设计和制造出各式各样的机器，满足预定的解决生产或生活问题的功能。例如汽车的功能是运输；机床的功能是加工零件；洗衣机的功能是洗衣服。所谓产品可靠，必须是在实际使用中能实现其规定的功能。产品丧失功能的现象称为失效，有时也称为故障。功能有主次之分，失效(或故障)也有主次之分，例如电视机显像管损坏算是失效，而图像时而稍有失真，影响不大，也不一定算是失效；又如齿轮传动的任务是传递运动和动力，当轮齿折断称为失效，而当齿面产生一定的磨损，如果技术标准要求高，可算是失效，若技术标准放宽，也可不算是失效。因此，产品的功能和失效，在某种意义上讲，有一定的相对性，对于具体的产品，失效的分类和判据应有明确的规定与划分。

产品的功能以功能参数表征，它是判断产品是否发生失效的依据。在保证功能参数达到技术要求的同时，产品完成规定功能所处的状态，称为产品的工作能力。产品在使用过程中将逐渐耗

损劣化。由于影响产品工作能力的随机因素很多，因此工作能力损耗过程是个随机过程。根据随机过程的概念，产品在某时刻 t 时的工作能力，就是产品在 t 时刻所处的状态，即产品工作能力的随机函数在 t 时刻的取值。

从上面对于可靠性定义的粗略分析中，可以看出，产品的可靠性指标是与时间有关的随机变量，也是与产品使用条件、失效方式、失效判据有关的综合指标。因此，对这个随机事件的描述，必须用概率论与数理统计的方法。

一个产品的可靠性与设计、制造、试验、储运、使用、失效分析、维护、保养等环节有关，运用随机方法(概率论与数理统计)和系统方法，以产品的失效和可靠性为研究对象的可靠性工程学，所涉及的内容十分广泛，大体包含以下三个分支：

1) 可靠性应用技术：可靠性设计、可靠性试验、可靠性评估与预测和可靠性管理等；

2) 可靠性物理：研究产品失效的物理原因，物理模型，提出改进措施等；

3) 可靠性数学：研究可靠性的数学模型、计算方法和定量规律等。

以上三方面是相互渗透、相互关联着的，因此，可以说可靠性工程学是一门综合性的新学科。

1-2 可靠性工程学的诞生和发展

一、可靠性的由来

可靠性问题的提出，起源于美国航空设备中的电子管。40年代第二次世界大战期间，美国运往远东的作战飞机，有60%以上难以飞行。经多次检查才搞清楚，原来是电子管经运输、储存就失效了。这引起美国军方的高度重视，从此开始对电子设备不失效的质量指标——可靠性进行系统的研究。

1952年美国成立了电子设备可靠性咨询委员会(AGREE，

Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment)。该机构对电子产品的设计、试制、生产、试验、储存、运输、使用等方面的可靠性问题,作了全面调查研究,于1957年发表了著名的“军用电子设备可靠性报告”,提出了对产品进行试验和鉴定的方法,它被认为是电子产品可靠性奠基性文件。从此可靠性技术发展成为一名独立的工程学科。

二、可靠性技术的发展与渗透

从60年代开始,由于宇航设备、大型成套设备的研制,对可靠性要求越来越高。于是可靠性技术逐步从航空、航天、核电站推广和渗透到机械、化工、冶金、铁道、船舶、电气、建筑、通讯以及家用的洗衣机、冰箱等。值得一提的是,美国于1961年开始计划研制Apollo-11号宇宙飞船,它有720万个零件,上面写着可靠性为99.9999999%,1969年7月登月成功。Apollo计划被称为可靠性的充分体现。尽管Apollo计划的种种技术,现在为世界上的各种产品所应用,但是其中可靠性技术是主要的。

60年代末和70年代初,美国编制了一系列可靠性规范,理论趋于完善,应用领域不断扩大。与此同时,日本、英国、前苏联等许多国家都广泛开展了可靠性技术的研究与应用。其中日本的汽车、家用电器等许多商品之所以畅销全球,是推广应用可靠性技术取得的成功。

三、可靠性技术在机械设计中的应用

60年代可靠性技术开始在机械中应用。在通用零件方面,滚动轴承的批量大、工艺成熟,最早引用了可靠性概念,制定了**额定寿命**的可靠性指标并付诸实用。在齿轮传动方面,一些齿轮强度计算标准(如,AGMA180,ISO/TC60/WG6(199E, 200E),ГОСТ21354-75,GB3480-83等)都相继引进了可靠性指标。目前,可靠性技术在机械设计中的应用已深入到结构设计、机械零件的强度和寿命设计、选材和失效分析,以及机械产品设计。这些问

题的研究不仅为机械可靠性设计提供了理论基础，而且标志着机械可靠性设计已进入实用阶段。与世界先进工业国家相比，我国机械产品的可靠性工作正在普及推广中，相继颁布了一批机电产品的可靠性指标，并限期考核。仪表、汽车的可靠性技术研究与应用，先行了一步，已获得成效。随着可靠性数据的不断积累和整理，机械可靠性设计将得到更为广泛的应用和发展。

四、可靠性是一项具有重大影响的工程技术

当今各种产品由于所承担的工作要求越来越高，结构日益复杂，彼此相关的任一部分失效，便可能导致整个系统失效引起事故，不仅生产、经济受到损失，甚至人的安全遭到危害。如1986年1月28日，美国“挑战者号”航天飞机，就是因为火箭助推器内的橡胶密封圈因温度低而失效、结果引起航天飞机爆炸，造成了七名宇航员的全部遇难和重大的经济损失。

可靠性技术不仅航天航空和军工生产需要，而且对于各个行业都具有深远的影响，因为现在人们都强烈关心所买的设备和商品的可靠性，企业如果推行了可靠性技术，就可以制造出满足用户要求的产品，而畅销全球，从而获得巨大的经济效益。也只有高可靠性的产品，企业才可以在市场竞争中生存取胜。日本人则断言，今后产品竞争的焦点是可靠性。国际市场上可靠性指标不同的产品，其价格是不同的。

综上所述，可靠性技术是一项直接影响经济、生命的重大问题，也影响企业和国家的声誉，因此，越来越受到人们的高度重视。

1-3 传统的机械设计 与机械可靠性设计

为了解机械可靠性设计的特点，下面把机械可靠性设计与传统的机械设计作一比较说明。

一、传统的机械设计与机械可靠性设计的相同点

传统的机械设计采用确定的许用应力法和安全系数法研究、设计机械零件和简单的机械系统。这是广大工程技术人员很熟悉的设计方法。而机械可靠性设计, 又称机械概率设计是以非确定性的随机方法研究、设计机械零件和机械系统。它们共同的核心内容都是针对所研究对象的失效与防失效问题, 建立起一整套的设计计算理论和方法。在机械设计中, 不论是传统设计或概率设计, 判断一个零件是否安全都是将引起失效的一方, 如零件中的载荷、应力或变形等, 与抵抗失效能力的一方, 如零件的许用载荷、许用应力或许用变形等, 加以对比来判断。

如果引起零件失效的一方, 简称为“应力”用 s 表示, 可用一多元函数来描述, 即

$$s = f(s_1, s_2, \dots, s_n) \quad (1-1)$$

式中 s_1, s_2, s_n 表示影响失效的各项因素, 如力的大小、力的作用位置、应力集中、环境因素等。

若抵抗失效能力的一方, 简称为“强度”用 r 表示, 也可用一多元函数来表示, 即

$$r = g(r_1, r_2, \dots, r_n) \quad (1-2)$$

式中 $r_1, r_2, \dots, r_n$ 表示影响零件强度的各项因素, 如材料性能、表面质量、零件尺寸等。

这里所指的“应力” s 和“强度” r 显然都是广义的, 当 $r-s > 0$, 表示零件处于安全状态, 当 $r-s < 0$, 零件处于失效状态, $r-s = 0$, 零件处于极限状态。因此, 传统的机械设计和机械可靠性设计的共同设计原理可表示为

$$\begin{aligned} s &= f(s_1, s_2, \dots, s_n) \\ &\leq g(r_1, r_2, \dots, r_n) \end{aligned} \quad (1-3)$$

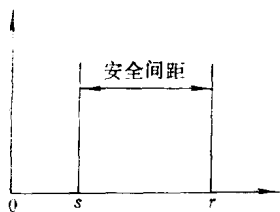
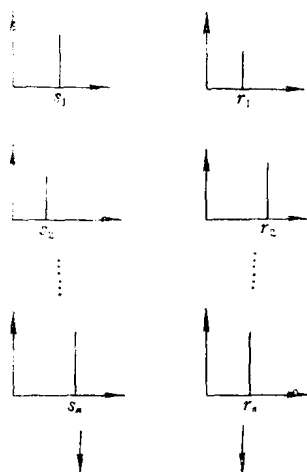
上式表示了零件完成预期功能所处的状态, 因此称为状态方程,

或称为工作能力方程。不论是传统的机械设计或机械可靠性设计，都是以式(1-3)所表示的零件或系统各种功能要求的极限状态和安全状态作为设计依据，以保证零件在预期的寿命内正常运行。

二、传统的机械设计与机械可靠性设计的不同点

1. 设计变量处理方法的不同

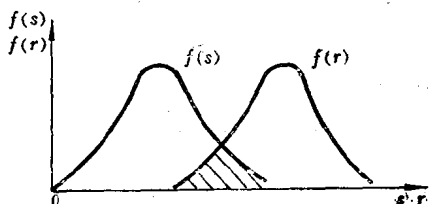
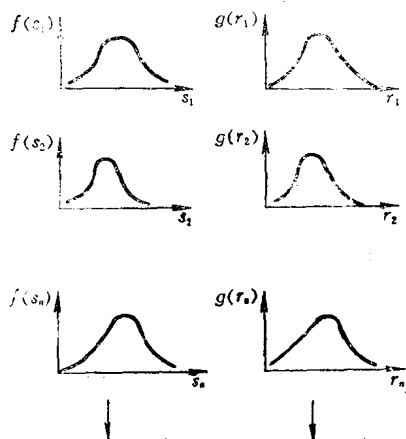
传统的机械设计，把影响零件工作状态的设计变量，如应力、强度、安全系数、载荷、零件尺寸、环境因素等，都处理成确定性的单值变量。而描述状态的数学模型，即变量与变量之间的关



$$s = f(s_1, s_2, \dots, s_n)$$

$$r = g(r_1, r_2, \dots, r_n)$$

图 1-1 确定性设计法



$$s = f(s_1, s_2, \dots, s_n)$$

$$r = g(r_1, r_2, \dots, r_n)$$

图 1-2 非确定性概率设计法

系，可通过确定性的函数进行单值变换，这种把设计变量处理成单一确定值的方法，称为确定性设计法。图 1-1 表示了这种确定性设计法的模型。

机械可靠性设计，把设计中所涉及的变量，都处理成多值的随机变量，它们都服从一定的概率分布，这些变量间的关系，可通过概率函数进行多值变换，得到“应力” s 和“强度” r 的概率分布，这种运用随机方法对设计变量进行描述和运算的方法，称为非确定性概率设计法。图 1-2 表示了这种非确定性概率设计法模型。

2. 设计变量运算方法的不同

在传统的机械设计中，有一受拉力作用的杆件，则横断面上的正应力为

$$s = \frac{F}{A} \quad (1-4)$$

上式表示了拉力 F 、横断面积 A 和应力 s 之间确定性的函数关系，变量之间通过实数代数运算，可得到确定性的单值变换。

在机械可靠性设计中，由于设计变量是非确定性的随机变量，因此，它们均服从一定的分布规律，用概率函数及分布参数（如随机变量的均值和标准差）来表征。于是式(1-4)可写成

$$s(\mu_s, \sigma_s) = \frac{F(\mu_F, \sigma_F)}{A(\mu_A, \sigma_A)} \quad (1-5)$$

式中 μ_s 和 σ_s 表示应力 s 的均值和标准差； μ_F 和 σ_F 表示力 F 的均值和标准差； μ_A 和 σ_A 表示面积 A 的均值和标准差。式(1-5)表示非确定性随机变量的数字特征之间的函数关系，可运用随机变量的组合运算规则（见第四章），得到变量与函数间的多值变换。

3. 设计准则含义的不同

在传统的机械设计中，判断一个零件是否安全，是以危险断面的计算应力 σ_{ca} 是否小于许用应力 $[\sigma]$ ，计算安全系数 n 是否大于许用安全系数 $[n]$ 来决定，相应的设计准则为

$$\begin{cases} \sigma_{ca} \leq [\sigma] \\ n \geq [n] \end{cases} \quad (1-6)$$

上式表示零件的强度储备和安全程度，是一个确定不变的量，未能定量反映影响零件强度的许多非确定因素，因而不能回答零件在运行中有多大可靠程度。

在可靠性设计中，由于应力 s 和强度 r 都是随机变量，因此，判断一个零件是否安全可靠，是以强度 r 大于应力 s 所发生的概率来表示。其设计准则为

$$R(t) = P(r > s) \geq [R] \quad (1-7)$$

式中 $R(t)$ 表示零件在运行中的安全概率，即可靠度。它是指零件在工作时间 t 内的一种能力，这种能力是以“强度” r 超过“应力” s 的概率来度量，显然它是零件工作时间 t 的函数。式中 $[R]$ 称为零件的许用可靠度，它表示零件在规定的时间内、规定的条件下实现设计要求的一种能力，即许用安全概率。上式不仅能定量地回答零件在运行中的安全、可靠程度，而且可以预测零件的寿命。

三、几点说明

(1) 传统的设计方法，一直沿用至今，积累了大量数据，其设计准则，表达形式简单、直观明确，应用方便，因此为广大工程技术人员所熟练地采用。但是，由于它停留在确定性的概念上，没有考虑事物的不确定性质，因而不能真正反映客观实际情况，而且计算中只要安全系数大于某一实际使用经验规定的数值，就认为是安全的，这个规定的安全系数，与一系列无法定量表示的因素有关，实际上仍是一个“未知”系数。因此，这种计算有较大的经验性与盲目性，有时取强度和应力的平均值算得的安全系数，虽然大于 1，但是，由于强度和应力数值是离散的，在图 1-2 中应力 s 和强度 r 分布曲线下方的干涉区内（阴影面积），有时会出现应力大于强度的情况，实际上并不能保证在任何情况下都安全。为了追求安全，设计中有时则盲目取用优质材料或加