

高等学校试用教材

机械可靠性设计

上海工业大学 牟致忠
合肥工业大学 朱文予 主编

机械工业出版社

高等学校试用教材

机械可靠性设计

上海工业大学 牟致忠
合肥工业大学 朱文予 主编



机械工业出版社

(京) 新登字054号

本书是根据1987年11月全国高等工业学校机械设计及制造专业教学指导委员会制定的教学计划和教学大纲编写的。其内容包括：可靠性的基本概念和可靠性的数学基础；载荷和强度的统计数据处理及确定应力、强度分布的方法；可靠性设计的原理和方法及其在机械设计中的应用实例；系统的可靠性设计；失效模式、影响及致命度分析和故障树分析；可靠性试验。内容新颖、实例多，适用性强。

本书除作为机械可靠性设计教材外，也可供广大工程技术人员学习和参考。

机械可靠性设计

上海工业大学 车致忠 主编
合肥工业大学 朱文予

责任编辑：张一萍 版式设计：王 颖
封面设计：郭景云 责任校对：肖新民
责任印制：路 琳

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

邮政编码：100037

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

北京市房山区印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092¹/₁₆·印张 12·字数 290 千字
1993年10月北京第1版·1993年10月北京第1次印刷
印数 0 001—5 000·定价：6.20元

ISBN 7-111-03692-1/TH·438 (课)

前 言

自从Robert Lusser1952年在美国 San Diego提出了可靠性的科学定义以来,可靠性工程作为一门边缘性的工程学科受到重视已有30余年。在此期间,可靠性工程不仅在航空、航天、电子、军工、核电站工业中的应用得到了很大发展,而且从60年代起也逐步地应用到机械、电气、冶金、石油化工、造船、铁路、交通运输、医疗、食品加工等各个民用工业部门中。其发展之迅速、应用之广泛,确非一般应用科学所可比拟。1981年,美国的 E. Henley 和日本的 H. Kumamoto 指出:“在过去的10年内,没有其它应用科学象安全、风险和可靠性分析那样得到惊人的发展和推广,可能只有环境科学和计算机技术是例外”。

可靠性工程研究的内容包括机械和结构的、电子和电气的、零(元)件和系统的、硬件和软件的可靠性设计、试验和验证。可靠性试验数据是可靠性设计的基础,但是试验本身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。国内外的实践经验表明,产品的可靠性是由设计决定的,而由制造和管理来保证。在产品的整个寿命期内,从设计、研制、制造、装配、调试、使用、维修直到报废,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。

可靠性是产品的主要属性之一,是考虑到时间因素的产品质量,对于提高系统的有效性、降低寿命期费用和防止产品责任具有重要意义。日本的坪内和夫在1971年写道:“在美国,可靠性问题涉及的范围极广,甚至连基层中小企业的产品也具有高可靠性,所以对每个小零件均可放心使用;可是,日本中小企业的水平却很低,所以现在必须彻底解决可靠性问题。”从那时以来,日本在民用产品上推广和应用可靠性工程技术取得了巨大成功,日本的机电产品得以畅销全球,主要因为其质量好,可靠性高。日本人因此断言:“今后产品竞争的焦点是可靠性”。这些历史的经验,是值得我们借鉴的。

早在60年代,美国已有40%的大学设置了可靠性课程,到80年代初,设置4门以上可靠性课程的大学至少有20所之多。近年来,我国许多高等工业院校也相继开设了这门课程。我国原机械工业部1986年11月25日发出的《关于加强机电产品可靠性工作的通知》指出:“各级机械工业管理部门和企业,都必须把产品可靠性工作当作一件大事来抓”。从而促进了我国机电产品可靠性工作的推广与应用,使产品质量不断提高,取得了可喜的成就。为了适应国民经济的迅速发展和市场激烈竞争的需要,机械产品的可靠性设计必将得到更为广泛的应用和发展。

本书是为高等工科院校机械设计及制造专业的大学生编写的,也可作为机械类专业研究生的教材。全书共分为十章,几乎涉及到机械可靠性大部分领域。第一章为绪论,第二章为可靠性的数学基础,第三章至第八章为可靠性设计的原理与方法及其应用实例,第九章为失效模式、影响和致命度分析(FMECA)与故障树分析(FTA),第十章为可靠性试验。

本书由五所高等工业院校教师通力合作编写,第一、三、九章和第十章第一节至第五节由上海工业大学牟致忠教授执笔,第二章由合肥工业大学朱文予副教授执笔,第三章由东北工学院黄雨华副教授执笔,第四章由上海工业大学阚树林讲师执笔,第六章由上海工业大学

李玉华讲师执笔，第九章由北京轻工业学院高金钟教授执笔，第十章第六节由吉林工业大学林明芳副教授执笔。本书由牟致忠、朱文予主编，由北京航空航天大学郭可谦教授主审。

书中引用了美国亚利桑那大学 D. Kececioglu 教授和许多中外学者的论文和著作，谨在此深表谢意。限于水平，也限于时间和篇幅，书中如有错误和不当之处，敬希读者批评指正。本书在写作过程中，先后得到杨为民、何国伟、唐金松、傅光民、曾天翔、黄文敏和裘履正等各位专家提供的宝贵意见，谨在此深表谢意。何晓军、王勇硕士为本书的出版做了许多辅助性工作，在此表示感谢。

编 者

1990年5月

符号表

A ——有效性, 有效度	s^2 ——样本的方差
$A(t)$ ——有效度, 可用率	s_s ——应力幅
C. L.——置信度	s_m ——平均应力
$f(x)$ ——随机变量 x 的概率密度函数	V ——变异系数
$F(x)$ ——随机变量 x 的累积分布函数	V_s ——强度的变异系数
L ——寿命	V_s ——应力的变异系数
L_q ——失效百分数为 q 时的寿命	$V(x)$ ——随机变量 x 的方差
m ——平均寿命	$\hat{x}$ ——随机变量 x 的估计值
M ——维修性; 维修度	$\bar{x}$ ——样本的均值
$M(t)$ ——维修度	$\tilde{x}$ ——中位数
MR——中位秩	Z ——联结系数, 标准变量
MTBF——平均无故障工作时间	β ——威布尔分布的形状参数, 威布尔斜率
MTTF——平均失效时间	γ ——威布尔分布的位置参数, 风险
MTTFF——平均首次故障时间	ξ ——强度与应力的差
MTTR——平均修复时间	η ——威布尔分布的尺度参数, 特征寿命
N ——失效循环次数	λ ——失效率
n ——安全系数, 样本量, 工作循环次数	$\lambda(t)$ ——瞬时失效率
$N(\mu, \sigma)$ ——均值为 μ 、标准差为 σ 的正态分布	μ ——总体的均值
$N(\mu, \sigma^2)$ ——均值为 μ 、方差为 σ^2 的正态分布	$\mu(t)$ ——修复率
$N(0, 1)$ ——标准正态分布	ν ——泊松比, 自由度
$P(A)$ ——事件 A 发生的概率	ρ ——相关系数
$P(A B)$ ——事件 B 已经发生的条件下事件 A 发生的概率	σ ——总体的标准差
P_f ——失效概率	σ_b ——强度极限
$Q(t)$ ——不可靠度	σ_s ——屈服极限
R ——可靠性; 可靠度	σ_{sa} ——应力幅的标准差
$R(t)$ ——可靠度	σ_{-1} ——持久极限
r ——应力比, 失效数	σ_m ——平均应力的标准差
R_{L1} ——可靠度的单侧置信区间下限	τ ——切应力
R_{L2} ——可靠度的双侧置信区间下限	τ_{-1} ——剪切持久极限
R_{U2} ——可靠度的双侧置信区间上限	$\Phi(Z)$ ——标准正态累积分布函数
S ——强度	$\phi(Z)$ ——标准正态分布的概率密度函数
s ——应力, 样本的标准差	

目 录

符号表	
第一章 绪论	1
第一节 为什么要重视和研究可靠性	1
第二节 机械可靠性的定义和特征量	2
第三节 机械可靠性设计的内容、特点和方法	6
第四节 机械可靠性设计方法与安全系数设计方法的区别	8
第五节 可靠性管理	11
习题	13
第二章 可靠性的数学基础	15
第一节 随机事件与概率	15
第二节 随机变量	19
第三节 常用的概率分布	24
第四节 数理统计	37
习题	44
第三章 载荷的统计处理	45
第一节 概述	45
第二节 随机载荷及其功率谱统计法	47
第三节 循环计数法	49
习题	53
第四章 确定应力分布和强度分布的方法	55
第一节 概述	55
第二节 影响应力分布和强度分布的物理与几何参数的统计数据	57
第三节 P_f-S-N 曲线	60
第四节 用代数法综合应力分布和强度分布	60
第五节 用矩法综合应力分布和强度分布	63
第六节 用蒙特卡罗(Monte Carlo)模拟法确定应力分布和强度分布	64
习题	67
第五章 应力—强度分布干涉理论和机械零件的可靠度计算	68
第一节 应力—强度分布干涉理论	68
第二节 蒙特卡罗(Monte Carlo)模拟法	69
第三节 机械零件的可靠度计算	71
第四节 可靠度与安全系数的关系	78
习题	80
第六章 机械零件可靠性设计数据的获得方法	82
第一节 概述	82
第二节 静强度分布数据	83
第三节 失效循环次数 N 的分布数据	85
第四节 有限寿命下的强度分布数据	87
第五节 长期寿命下的强度分布—持久极限分布	88
第六节 呈分布状态的古德曼线图的确定	90
第七节 用经验方法得到的强度分布数据	91
习题	92
第七章 可靠性设计应用举例	93
第一节 机械零部件的可靠性设计概述	93
第二节 螺栓联接	95
第三节 花键联接	101
第四节 弹簧	106
第五节 滚动轴承	111
第八章 系统的可靠性	115
第一节 系统可靠性的分析方法	115
第二节 串联系统的可靠性	115
第三节 冗余系统的可靠性	116
第四节 复杂系统	120
习题	125
第九章 失效模式、影响及致命度分析(FMECA)和故障树分析(FTA)	126
第一节 FMECA与FTA概述	126
第二节 FMECA	127
第三节 故障树的建立	131
第四节 故障树的定性分析	135
第五节 故障树的定量分析	141

VI

习题	147	习题	177
第十章 可靠性试验	149	附录	178
第一节 概述	149	附表 1 标准正态分布表	178
第二节 指数分布寿命试验	151	附表 2 Γ 函数	183
第三节 威布尔分布寿命试验	158	附表 3 t 分布的临界值表	183
第四节 加速寿命试验	161	附表 4 χ^2 分布表	184
第五节 序贯试验	173	附表 5 $K-S$ 表	185
第六节 带传动的可靠性试验	174	参考文献	186

第一章 绪 论

第一节 为什么要重视和研究可靠性

可靠性问题的提出,首先是从军用航空电子设备开始的。在第二次世界大战期间,军用航空电子设备的失效率高,难以维护,引起了对可靠性问题的高度重视。

对可靠性的系统研究是从1952年开始的。当时,美国国防部成立了著名的电子设备可靠性顾问团(AGREE),并于1957年6月4日发表了第一个报告。这个报告的内容为可靠性工程学科奠定了理论基础。

60年代以来,可靠性工程技术逐步地在各个工业领域内得到了发展和应用,而且日益得到重视。主要原因可以概括如下。

一、现代产品结构的复杂化和 工作环境条件的严酷

随着现代科学技术的发展,机械产品(包括机电一体化产品)的结构日益复杂,见图1-1,性能参数越来越高,工作环境条件更加严酷,

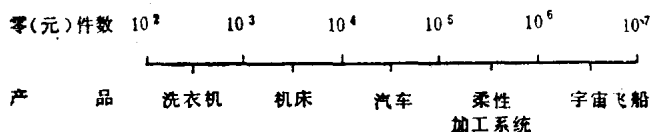


图1-1 产品结构的复杂化

往往因一个零件的失效而造成灾难性的后果,即使有些机械产品由于采用了新原理、新材料、新工艺而简化了结构,但对其可靠性要求也不断提高。因此,对产品和零件的可靠性的要求越来越高。1986年1月28日美国航天飞机“挑战者”号在发射后进入轨道前,因助推火箭燃料箱密封装置在低温下失效,使燃料溢出而引起爆炸,就是可靠性不高造成灾难性后果之例。

二、可靠性涉及巨大的经济效益

例如,一台300MW汽轮发电机组因叶片失效而被迫停机一天,则少发电 $72 \times 10^5 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 直接损失为65万元,间接损失约为1000万元。因为国产设备的可靠性不高,每年不得不进口很多机电成套设备,耗费大量外汇。据统计,1985年和1986年进口的机电设备费用分别为170亿美元和190亿美元。

国际市场上机械产品的价格与其可靠性水平的高低直接有关。许多产品在投标、签订合同和鉴定、验收时都采用了可靠性指标。在商品广告中利用可靠性特征量的内容越来越多。在发达国家中产品质量和可靠性几乎没有一天不成为新闻。

早在60年代初,美国有人预言,今后在激烈的国际市场竞争中,只有可靠性高的产品及其企业才能幸存下来。在80年代,日本有人断言,今后国际市场上产品竞争的焦点是可靠性。日本从美国引进可靠性工程技术之后,在民用产品上的应用十分成功,其汽车、工程机械、发电设备、日用设备(复印机、洗衣机、电冰箱等)能够畅销全球,根本原因是由于其质量及可靠性高,这使日本获取了巨额的利润。

目前在国际上盛行的产品责任法、保用期、索赔制，也都与产品的可靠性有关。例如，1959年美国小汽车的保用期仅为4个月或6400km，而到70年代提高到5年或80000km。又如，1975年美国由于产品责任法而支付的赔偿费高达500亿美元。而推进产品责任预防（PLP）的重要手段是提高产品的可靠性。

三、可靠性影响到国家的安全和声誉

例如，1979年3月28日美国三哩岛核电站发生的放射性物质泄漏事故是由于硬件（冷凝器循环泵）的不可靠和操作人员的不可靠所造成的；又如1986年4月苏联切尔诺贝里核电站爆炸事故，都对国家的安全和声誉造成了严重损害。所以，对于重要的大型成套设备如电站、冶金、化工设备等，都应进行可靠性和安全性设计与风险评估，以控制其最低失效概率。

四、可靠性是国防、军工的需要

例如在美国，几乎所有的军事订货合同中，都有可靠性与维修性条款。70年代后期，美国的国防技术政策有了引人注目的变化，从过去主要追求武器系统的高性能转而为更加重视武器系统的可靠性与维修性。

五、发达国家还把可靠性问题提高到节约能源的高度来认识

通过可靠性设计可以得到体积小、重量轻的产品，降低材料消耗和加工工时。对于只求有限寿命的产品，可靠性设计的优点尤其明显，高可靠性的产品能够以一顶二，甚至以一顶十。

鉴于上述原因，原国家机械工业委员会指出，机械产品的可靠性工作不是可搞可不搞，而是一定要搞，并且要通过质量立法来加以推动。具体措施是，首先对20种仪表产品公布其可靠性指标，限期考核，如果在规定期限达不到指标，必须停产整顿。接着，于1986年11月25日发出了《关于加强机电产品可靠性工作的通知》，指出：“‘七五’期间产品可靠性工作的重点是：大型成套设备，基础零部件，量大面广的产品，出口产品。其中，基础零部件是重中之重。因为它是构成产品的基础，有了高可靠性的基础零部件，才能保证主机产品的可靠性”。“要求达到的预期目标是：在七五计划期间，要求考核1000种机电产品具有相当于国际上同类产品70年代末水平的可靠性指标”。

第二节 机械可靠性的定义和特征量

一、机械可靠性的定义和要点

通常采用的可靠性定义是：产品在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力。如果用“概率”来量度这一“能力”，就是可靠度，用 $R(t)$ 表示。这一定义也适用于机械产品。

可靠性定义的要点如下：

（一）产品

首先要弄清可靠性问题的产品对象是什么，产品包括零件（元件）、设备和系统，可以从一个很小的零件到一个很大的机电一体化系统。不仅如此，包含操作人员在内的人机系统也可看作是产品，这时系统里也包括了人的因素。实际上，系统的失效常常是由于人的不可靠而引起的。还应注意，产品这一概念还在不断扩大，计算机软件也可看作是产品。

（二）规定条件

主要指工作环境条件,如压力、温度、湿度、盐雾、腐蚀、辐射、冲击、振动、噪声等。还包括使用和维修条件、动力和载荷条件、操作工人的技术水平等。任何产品如果误用或滥用,都可能引起损坏,因此在使用说明书中应对使用条件加以规定,这是判断发生失效(故障)的责任在于用户还是制造厂的关键。

(三) 规定时间

可靠度是时间性的质量指标,产品只能在一定的时间范围内达到目标可靠度,不可能永远保持目标可靠度而不降低。因此,对时间的规定一定要明确。时间可能是指区间 $(0, t)$,也可能是指区间 (t_1, t_2) 。时间一般是以小时、年为单位,但根据产品的不同,广义的时间包括车辆行驶的里程数、回转零件的转数、工作循环次数、机械装置(起重机、机械手、柱塞泵等)的动作次数等。

(四) 规定功能

功能通常是指产品的工作性能,但是可靠性工程师的工作重点不是产品的功能,而是产品的失效或故障。可靠性标准(GB3187—82)规定:“失效即产品丧失了规定的功能。对可修复产品失效也称为故障”。因此,规定的功能与失效密切相关,如何正确判断产品是否失效,合理地确定失效判据非常重要。

功能有主次之分,故障也有主次之分。次要的故障不影响主要功能,因而也不影响可靠性。但有时动作不稳、性能下降或响应缓慢也构成故障,例如大型设备的保护装置,如果响应缓慢就会引起主体设备的损坏,所以是不允许的。

顺便指出,通常对失效和故障不加严格区分。

(五) 概率

概率是可以度量的,其值在0到1之间,即 $0 \leq R(t) \leq 1$ 。由于可靠度是时间的函数,所以产品从零时刻工作到 t_1 时刻后的可靠度为 $R(t=t_1)$;产品从 t_1 时刻工作到 t_2 时刻后的可靠度为 $R(t_1, t_2)$,显然, $R(t_1, t_2)$ 为条件可靠度。还应注意,可靠度是在一定置信度(Confidence Level)下的条件概率。所谓置信度,是指所求得的可靠度在多大程度上是可信的。

二、机械可靠性的特征量(指标)

机械可靠性有许多个特征量,在不同的场合,应当根据不同的目的和需要,采用不同的可靠性特征量来度量产品的可靠性。

(一) 可靠度 $R(t)$

GB3187—82规定,对于不可修复的产品,可靠度的观察值是指到规定的时间终了为止,能完成规定功能的产品数与在该时间区间开始时投入工作的产品数之比。表示为

$$\hat{R}(t) = 1 - \frac{N_f(t)}{N_T} = \frac{N_s(t)}{N_T} \quad (1-1)$$

式中 $\hat{R}(t)$ ——与时间 t 相应的平均可靠度估计值;

$N_f(t)$ ——产品工作到 t 时刻的失效数;

N_T ——产品数,通常取 N_T 等于样本量 n ;

$N_s(t)$ ——产品工作到 t 时刻的存活数。

$\hat{R}(t)$ 是根据样本得出的平均可靠度估计值,其置信度等于50%。当 $N_T \rightarrow \infty$,则 $\hat{R}(t) \rightarrow R(t)$ 。 $R(t)$ 是根据总体得出的可靠度真值,也叫理论值,其置信度为100%。通常研

究的对象都是样本, 为了方便, 省略了样本均值的估计值的符号“ Δ ”。

可靠度是产品不失效的概率, 不可靠度是产品的失效概率, 产品失效和不失效是互逆事件, 因此

$$R(t) = 1 - Q(t) = 1 - P_f \quad (1-2)$$

式中 $Q(t)$ ——不可靠度。有时也用 $F(t)$ 表示不可靠度;

P_f ——失效概率。

通常所研究的是可靠度 $R(t) \geq 0.90$ 的领域。

(二) 失效率 $\lambda(t)$

失效率是“工作到某时刻尚未失效的产品, 在该时刻后单位时间内发生失效的概率”, 其观察值为“在某时刻后单位时间内失效的产品数与工作到该时刻尚未失效的产品数之比”, 表示为

$$\hat{\lambda}(t_i) = \frac{N_f(\Delta t)}{N_s(t_i)\Delta t} \quad (1-3)$$

式中 $N_f(\Delta t)$ ——在时间增量 Δt 内的失效数;

$N_s(t_i)$ ——在时间增量 Δt 开始时 (即 t_i 时刻) 的工作产品数;

Δt —— t_i 之后的时间增量;

$\hat{\lambda}(t_i)$ ——平均失效率的估计值。

式 (1-3) 也适用于在时间区间 $(t_i, t_i + \Delta t)$ 内失效率不等于常数的情况。当 $N_s(t_i) \rightarrow \infty, \Delta t \rightarrow 0$, 则 $\hat{\lambda}(t_i) \rightarrow \lambda(t_i)$, $\lambda(t_i)$ 称为失效率真值或理论值。

典型的失效率曲线如图 1-2 所示, 称浴盆曲线。它可划分为 3 个阶段: 早期失效期、偶然失效期 (有用寿命期) 和耗损失效期。

开始失效率高, 是由于设备中有不合格的零件, 或由于材质不良, 或由于加工和装配工艺不好。在剔除或更换之后, 产品进入了耗损期, 犹如人到了老年, 所以失效率又急剧上升。浴盆曲线对人们的启发是, 在产品装配之前, 应进行筛选, 以剔除不合格的零(元)件; 在使用之前, 应先进行跑合运转, 以渡过早期失效期。在有用寿命期内, 失效率最低, 而且几乎为常数, 这时, 产品何时发生失效是无法预测的, 在这一时期内, 更换零件(元件)并不能提高产品的可靠度。在进入耗损期之前, 如能更换已经磨损、老化的零件, 则可使失效率大大降低, 这是进行预防维修的依据。

应当注意, 只有在产品寿命服从指数分布时, 才有 $\lambda(t) = \text{常数} = \lambda = 1/\text{平均寿命}$, 这时使用失效率这一指标才有意义。大多数电子、电气产品的寿命可以认为服从指数分布。然而, 大多数机械产品的寿命并不服从指数分布, 其失效率并不呈现为典型的浴盆曲线, 而是随着时间的增加而增大。在这种情况下, $\lambda(t)$ 是时间的函数, 难以用失效率来预测产品的可靠度。

即使某些机械产品(系统)的寿命近似服从指数分布, 其失效率也不一定呈现为光滑的

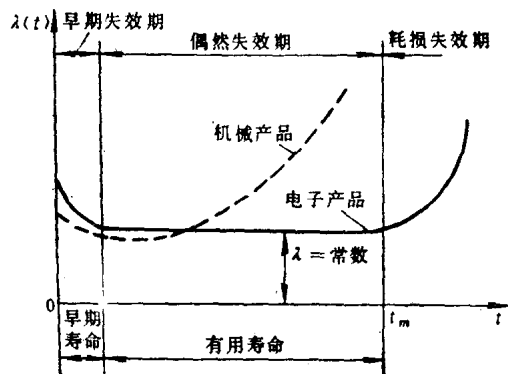


图1-2 失效率曲线

浴盆曲线, 如图1-3所示。

失效率的单位是失效次数/小时 ($f./h$), 常用的量级有 10^{-3} 、 10^{-6} 等。高可靠的电子元件甚至达到 10^{-9} 级。

(三) 平均寿命

对于可修复的产品, 采用平均无故障工作时间 (MTBF), 指的是一个或多个产品在规定的时间内, 无故障工作时间的总和与故障总次数之比。对于不可修复的产品, 采用平均失效时间 (MTTF)。

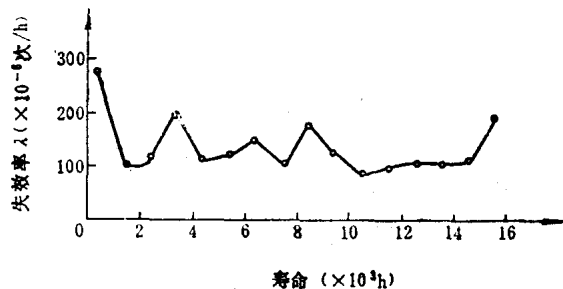


图1-3 离心式水泵的失效率曲线

有许多产品, 例如交通工具、家用电器等, 用户更加关心的是平均首次故障的时间。

关于MTBF, 还可以分为两种情况: 考虑所有故障时的 MTBF 和只考虑重大故障时的 MTBF。显然, 后一种情况下的 MTBF 比第一种情况下的 MTBF 要大得多。

(四) 维修度 $M(t)$

维修度是指在维修条件下使用的产品, 在规定时间内按照规定的程序和方法进行维修时, 保持或恢复到能完成规定功能状态的概率。可表示为

$$M(t) = P(T \leq t) \quad (1-4)$$

式中 T ——维修时间, 是随机变量。

维修度的观测值为

$$\hat{M}(t) = \frac{n_s(t)}{n} \quad (1-5)$$

式中 n ——投入维修的产品数;

$n_s(t)$ —— t 时刻已维修的产品数。

维修与未维修是对立事件, 因此未维修度为 $[1 - M(t)]$ 。

(五) 修复率 $\mu(t)$

修复率是修理时间已达到某个时刻但尚未修复的产品, 在该时刻后的单位时间内完成修理的概率其观测值的表达式与式 (1-3) 形式相同, 即

$$\mu(t) = \frac{n_r(\Delta t)}{n_f(t_i) \Delta t} \quad (1-6)$$

式中 $n_r(\Delta t)$ ——在时间增量 Δt 内的修理数;

$n_f(t_i)$ ——在时间增量 Δt 开始时 (即 t_i 时刻) 的未修复产品数。

(六) 平均修复时间 (MTTR)

它指的是修复时间的平均值。平均修复时间的观测值, 按修复时间的总和和修理次数之比确定。

(七) 有效度 (可用率) $A(t)$

有效度可以分为: 瞬时有有效度、平均有效度和稳态有效度。瞬时有有效度 $A(t)$ 是指产品在某时刻具有或保持其规定功能的概率。平均有效度是指在某个规定时间区间内有效度的平均值。当时间趋于无限时, 瞬时有有效度的极值称为稳态有效度, 表示为 $A(t) = A_0$ 。

有效度的观测值为某个时期内, 产品能工作的时间 t_u 对能工作时间 t_u 和不能工作时间 t_d 之和的比, 表示为

$$A(t) = \frac{t_u}{t_u + t_d} \quad (1-7)$$

产品不能工作时间包含了许多内容, 如果只考虑修复时间, 则有效度可表示为

$$A(t) = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR}) \quad (1-8)$$

由式(1-8)可知, 为了提高有效度, 应尽可能使MTBF增大, 使MTTR减小。

许多机械设备, 如载重汽车、工程机械、发电设备等, 习惯上把有效度称为可用率, 意即设备或系统在任一时刻处于可用状态的概率。

(八) 可靠寿命 t_R

可靠寿命是指与规定的可靠度相对应的的时间。

(九) 平均大修间隔 MTBO(Mean Time Between Overhauls)或平均维修间隔 MTBM(Mean Time Between Maintenances)。

对于有些产品, 如机电设备, 一般采用有计划的定期预防维修, 规定几年一次大修期, 进行备件更换和设备调整等维修措施, 这个指标就是 MTBO(或 MTBM), 也称平均大修寿命。大修周期的确定是个统筹学的问题, 要根据大修的成本及设备故障频发的程度和损失而定。

(十) 强迫停机率 (Forced Outage Rate)

$$\text{FOR} = \frac{\text{停机时间}}{\text{运行时间} + \text{停机时间}} \quad (1-9)$$

(十一) 重要度 I

$$I = \frac{\text{某一设备故障引起的系统故障次数}}{\text{系统中所有设备发生故障的次数}} \quad (1-10)$$

(十二) 经济尺度

经济尺度有许多种, 可以根据需要采用比较适合的一种或几种, 常用的经济尺度有:

- 1) 费用比 $\text{CR} = (\text{年})\text{维修费}/\text{购置费}$ 。
- 2) $(\text{维修费} + \text{操作费})/\text{动作时间}$ 。
- 3) $\text{MTBF}/\text{成本}$ 。
- 4) 寿命期总费用(Life Cycle Cost)。

第三节 机械可靠性设计的内容、特点和方法

一、可靠性设计在整个可靠性计划中的地位

为了确保产品(零件、设备或系统)的可靠性, 必须制订可靠性计划。这时必须设计正确, 确保设计阶段的可靠性是最重要的一环。机械可靠性构思及设计在整个可靠性计划中占有重要地位。可靠性计划的要点如下。

(一) 可靠性技术要求

可靠性技术要求中主要包括下列内容: 可靠性指标、失效定义、维修性指标、工作剖面、环境设计、可靠性保证。

（二）冗余分析

冗余是提高系统或设备可靠度的主要手段之一，在进行设计方案审查时，需要进行冗余分析。冗余设计的内容是：确定冗余方式和预测冗余系统的可靠性。冗余有多种方式，常用的有：并联冗余、表决冗余、旁联（待机）冗余、均分载荷并联冗余。在冗余系统中还有热贮备和冷贮备之分。

当然，为了提高系统的可靠性，应首先考虑采用下列方法：1）简化设计；2）提高零部件的可靠度；3）降额使用。在采用上述方法后仍不能满足要求时，采用冗余是提高系统可靠度最有效的办法。

（三）维修性分析

包括确定修复时间分布、预测维修度、备件数、维修方针、最佳维修周期及维修人员的规模和技术水平等。

二、可靠性设计的特点

可靠性设计有以下特点：

1）与传统的设计方法中将安全系数作为唯一的评价项目和度量完全不同，可靠性设计要求根据不同的产品、场合而采取不同的可靠性指标，如可靠度、失效率、MTBF、维修度、有效度等。

2）可靠性设计强调在设计阶段要把可靠度直接设计到零件中去。即由设计决定固有可靠度，由制造保证固有可靠度。

3）可靠性设计必须考虑环境的影响。高温、低温、冲击、振动、潮湿、盐雾等环境条件对应力有很大影响，而研究表明，应力分布的尾部比强度分布的尾部对可靠度的影响大得多。

4）对维修性的考虑。在浴盆曲线的耗损失效期及当有效度是主要可靠性指标时，都必须考虑维修性。设计决定了机械产品的固有可靠性，而环境、使用、维修等则影响了使用可靠性。

5）可靠性设计承认在设计阶段及其以后的阶段都需要可靠性增长。即随着产品设计、研制、生产各阶段工作的逐步进行，产品的可靠性特征量值也逐步提高。

三、机械可靠性设计的内容

机械设备和系统的可靠性设计内容最基本的有以下几方面：

1）确定可靠性指标及其量值。根据产品设计要求决定采用什么可靠性指标，而指标的高低则取决于产品的重要性。要重视过去的经验、用户的要求及市场调查。

2）可靠性预测。可靠性预测是指在设计开始时，运用以往的可靠性数据资料计算系统可靠性的特征量并进行详细设计，即通过合适手段所获得的数据得出比较确切的可靠性指标，并加以验证。在不同的阶段，系统的可靠性预测要反复进行几次。

3）对可靠性指标进行合理的分配。将可靠性指标分配到各子系统，并与各子系统能达到的指标相比较，判断是否需要改进设计。再把改进设计后的可靠性指标分配到各子系统。根据同样的方法，可把可靠性指标进一步分配到各个零件。

4）把规定的可靠度直接设计到零件中去。

四、机械可靠性设计的方法

现代的复杂而昂贵的零件和系统要求高可靠度，所以必须保证把规定的目标可靠度设计

到零件中去,从而设计到系统中去。所以,机械可靠性设计方法包括下述步骤:

1) 确定设计的问题及任务轮廓。对于复杂系统,必须确定完整的任务轮廓,以及相应的环境轮廓。环境因素包括载荷、温度、噪声、速度等。在此基础上,确定各子系统的目标可靠度。

2) 确定有关的设计变量和参数。它们应当是:对设计任务是有意义的,唯一的和不重复的,在试验前后和进行期间都能量度的。

3) 进行失效模式、影响及致命度分析(FMECA)。

4) 确定零件的失效模式是独立的还是相关的。如一种失效模式的性质受到另一种可能发生的失效模式的影响,则受到影响的应力和强度应加以修正。

5) 确定涉及到的每种失效模式的判据。

6) 确定应力函数及每个失效模式下的应力分布。

7) 确定强度函数及每个失效模式下的强度分布。

8) 对于每一种致命的失效模式,确定其与应力分布和强度分布相关的可靠度。

9) 确定同时考虑到所有致命失效模式的零件的整个可靠度。

10) 确定零件可靠度的置信度。置信度的概念是对于试验本身而言的。

11) 对于系统中所有的关键零部件重复上述步骤,求出各自的可靠度。

12) 对系统进行失效树分析(FTA)。

13) 在已知每个零部件可靠度的基础上,计算子系统的以及整个系统的可靠度,然后对设计进行迭代,直到系统的可靠度等于或大于事先规定的系统可靠度目标值为止。

14) 必要时对整个设计的诸方面内容进行优化。

第四节 机械可靠性设计方法与安全系数设计方法的区别

传统的机械零件设计方法(安全系数法)是基于这样的前提:它认为零件的强度 S 和应力 s 都是单值的,见图1-4 a, 因为安全系数也是单值的。众所周知的公式是 $n = \frac{S}{s}$ 。

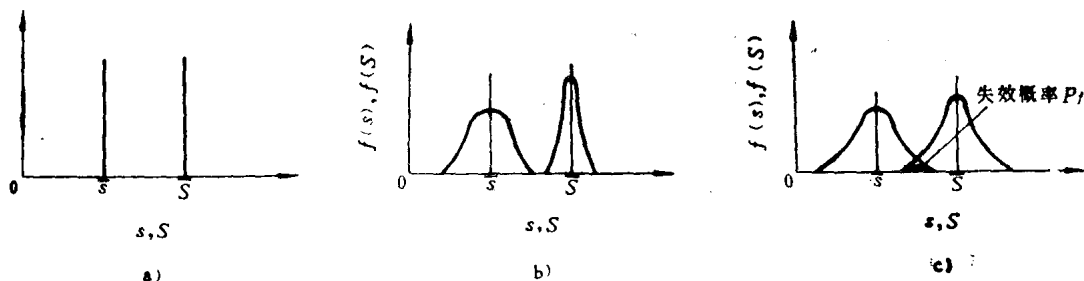


图1-4 单值的和多值的(分布的)应力与强度

a) 单值的应力和强度 b) 互不干涉的应力分布和强度分布 c) 尾部发生干涉的应力分布与强度分布

只要安全系数大于某一根据实际使用经验规定的数值,就认为零件是安全的。

安全系数法对问题的提法是:“这个零件的安全系数是多少。”但是安全系数本身实质是一个“未知”系数,安全系数的概念包含了一些无法定量表示的影响因素在内。因此,安全系

数不能够给出一个精确的度量,说明所设计的零件究竟在多大程度上是安全的。

概率机械设计方法则认为零件的应力、强度以及其它的设计参数如载荷、几何尺寸和物理量等都是多值的,即呈分布状态,如图1-4 b、c所示。

为了便于说明问题,假设强度分布和应力分布都是正态分布。对于同样大小的强度均值 $\bar{S}$ 和应力均值 $\bar{s}$, 其平均安全系数 $\bar{n}$ 的值仍等于 $\bar{S}/\bar{s}$ 。但这时零件是否安全或失效,不仅取决于平均安全系数 $\bar{n}$ 的大小,还取决于强度分布和应力分布的离散程度,即根据强度和应力分布的标准差 σ_s 和 σ_s 的大小而定。如图1-4 b所示,两个分布的尾部不发生干涉和重叠,这时零件不致于破坏。但如果出现两个分布的尾部发生干涉,如图1-4 c所示,则表示将会出现应力大于强度的可能性。应力分布与强度分布的干涉部分(重叠部分)在性质上表示零件的失效概率 P_f (即不可靠度)。

应当注意,因为失效概率是两个分布的合成,所以仍为一种分布。同时,图1-4 c中的阴影部分的面积不能作为失效概率的定量表示。因为即使应力分布与强度分布完全重合,失效概率仅为50%,即仍有50%的可靠度。

概率机械设计方法对问题的提法是:
“这个零件在经过多少小时(例如1000 h, 或 2.5×10^6 循环次数)之后,失效的概率是多少(例如0.0001)。”如果失效概率为0.0001,这意味着可靠度为0.9999。显然,这种提法比安全系数法合理得多。它不仅能够定量地表示这个零件的安全、可靠的程度,而且还能使零件有可以预测的寿命。

为了说明安全系数法的不合理,进一步分析如下:

1) 保持应力分布和强度分布的标准差 σ_s 和 σ_s 不变,同时以同样的比例 K 改变两个分布的均值 $\bar{s}$ 和 $\bar{S}$ 。当 $K > 1$, 如图1-5 a所示, $\bar{s}_1$ 和 $\bar{S}_1$ 向右移,有 $K\bar{S}/K\bar{s} = S_1/s_1 = \bar{n}$; 当 $K < 1$, 如图1-5 b所示, $\bar{s}_2$ 和 $\bar{S}_2$ 向左移,有 $K\bar{S}/K\bar{s} = \bar{S}_2/\bar{s}_2 = \bar{n}$ 。

由图1-5可知,当 $K > 1$ 时,失效概率 P_f 变小,即可靠度 $R(t)$ 增大;而当 $K < 1$ 时,正好相反。

由此可见,给定一个平均安全系数 $\bar{n}$, 并使它保持不变,但由于 $\bar{s}$ 和 $\bar{S}$ 的改变,可以有不同的可靠度。因此,对于零件设计,单值的安全系数是一个靠不住的表示方法。

如果保持均值 $\bar{s}$ 和 $\bar{S}$ 不变,而改变标准差 σ_s 和 σ_s , 则可以得到类似的结果。如图1-6所示,曲线1表示原来的分布,其尾部发生干涉(重叠)的部分较大,因而失效概率 P_f 较大;曲线2表示两个分布的标准差之一(σ_s 或 σ_s)减小了,从而使分布的干涉部分减小,因而失效概率 P_f 也减小了;曲线3表示 σ_s 和 σ_s 同时都减小了,以至于使分布的干涉部分为零,因而失效概率为零。

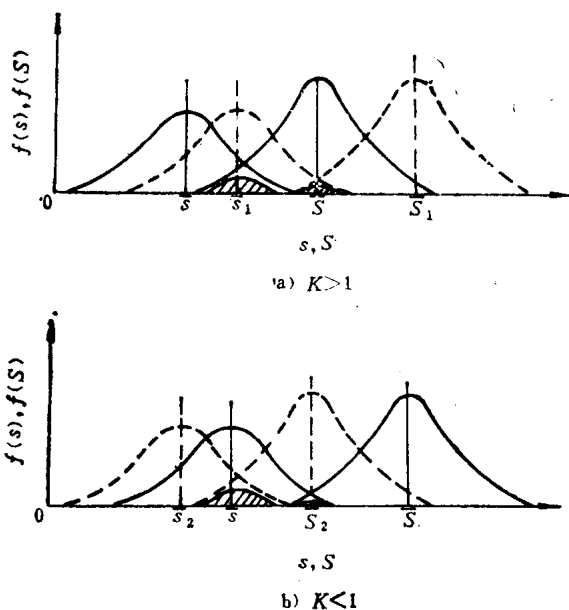


图1-5 当 σ_s 和 σ_s 不变,以同一比例 K 改变 $\bar{s}$ 和 $\bar{S}$ 时,对 P_f 的影响