

# 可靠性概述

可靠性工程师的网上家园

Reliability Engineer Online

(<http://www.reliaonline.com/>)

## 修订记录

日期	版本	修订描述	作者
2005-08-01	1.0	整理完成	Mosch

## 目 录 Table of Contents

1	可靠性基本知识简介 .....	7
1.1	可靠性设计主要符号表 .....	7
1.2	可靠性的概念 .....	8
1.3	可靠性特征量(可靠性指标): .....	9
1.3.1	可靠度 .....	9
1.3.2	可靠寿命 .....	10
1.3.3	累积失效概率 .....	10
1.3.4	平均寿命 .....	11
1.3.4	失效率和失效率曲线 .....	11
1.3.5	失效率 $\lambda$ 的概略值 .....	12
1.4	可靠性特征量间的关系 .....	13
1.5	各类产品常用的可靠性指标 .....	14
1.6	可靠性的技术 .....	14
1.7	维修性特征量 .....	16
2	系统可靠性 .....	18
2.1	不可修复系统的可靠性 .....	18
2.1.1	表决系统可靠性 .....	18
2.1.2	冷储备系统可靠性 .....	19
2.1.3	串联系统可靠性 .....	19
2.1.4	并联系统可靠性 .....	20
2.1.5	混联系统可靠性 .....	21
2.2	可靠性预计 .....	22
2.2.1	设计初期的概略预计法 .....	22
2.2.2	数学模型法 .....	22
2.2.3	上下限法 .....	23
2.3	蒙特卡洛模拟法 .....	23
2.3.1	蒙特卡洛模拟法的概念和求解方法 .....	23
2.3.2	蒙特卡洛模拟法应用举例 .....	24
2.4	应力-强度干涉模型 .....	25
2.5	可靠性分配 .....	27
2.6	可靠性分配的方法 .....	28
2.6.1	等分配法 .....	28
2.6.2	再分配法 .....	29
2.6.3	比例分配法 .....	30
2.6.4	综合评分分配法 .....	30
2.6.5	动态规划分配法 .....	31
2.7	故障树分析 .....	32
2.7.1	故障树的概念 .....	32
2.7.2	故障树分析中常用符号 .....	32
2.7.3	故障树的建立步骤 .....	35

---

3	机械结构可靠性设计 .....	35
3.1	机械结构可靠性设计与传统安全系数法机械设计的关系 .....	35
3.2	机械可靠性的设计方法 .....	36
3.2.1	预防故障设计 .....	36
3.2.2	简化设计 .....	37
3.2.3	降额设计和安全裕度设计 .....	37
3.2.4	余度设计 .....	37
3.2.5	耐环境设计 .....	37
3.2.6	人机工程设计 .....	38
3.2.7	健壮性设计 .....	38
3.2.8	概率设计法 .....	38
3.2.9	权衡设计 .....	38
3.2.10	模拟方法设计 .....	39
3.3	机械故障模式 .....	39
3.3.1	故障模式的基本概念及其分类 .....	39
3.3.2	机械零件常见的故障模式 .....	40
3.3.3	典型零件的故障模式 .....	41
3.3.4	故障模式实例 .....	45
3.4	机械故障的预防 .....	51
3.4.1	可靠性设计准则 .....	51
3.4.2	可靠性设计检查表及其示例 .....	53
3.5	机械故障原因分析的通用程序 .....	54
3.6	机械故障原因分析方法 .....	56
4	可靠性试验和数据分析 .....	58
4.1	可靠性试验 .....	58
4.2	可靠性数据分析中常用的概率分布 .....	59

## 表目录

表1 可靠性设计主要符号表.....	7
表2 失效率 $\lambda$ 的概略值.....	12
表3 可靠性特征量间的关系.....	13
表4 各类产品常用的可靠性指标.....	14
表5 可靠性与维修性对应关系.....	17
表6 故障模式的层次表.....	39
表7 机械零件常见的故障模式.....	40
表8 齿轮轮齿故障模式分类及其特征.....	41
表9 二项分布.....	59
表10 泊松分布.....	60
表11 超几何分布.....	60
表12 正态分布(高斯分布).....	61
表13 均匀分布.....	61
表14 $X^2$ 分布.....	61
表15 指数分布.....	62
表16 威布尔分布.....	62
表17 $\Gamma$ 分布(伽马分布).....	62
表18 瑞利分布.....	63
表19 F分布.....	63
表20 $\beta$ 分布.....	63
表21 对数正态分布.....	64
表22 t分布(学生分布).....	64
表23 最大 I 型极值分布(贡贝尔分布).....	64
表24 最小 I 型极值分布(贡贝尔分布).....	65

## 图目录

图1 可修复产品 .....	9
图2 不可修复产品 .....	9
图3 可靠寿命和中位寿命 .....	10
图4 典型失效率曲线 .....	12
图5 不可靠度与维修度函数 .....	17

# 1 可靠性基本知识简介

## 1.1 可靠性设计主要符号表

表1 可靠性设计主要符号表

符号	含 义	符号	含 义	符号	含 义
a	裂纹尺寸, 威布尔分布的位置参数	A	有效性, 有效度	r	应力比
N	失效循环次数, 疲劳循环数	$N_p$	裂纹扩展寿命	$A(t)$	有效度
$\tau_{-1}$	应力比为-1 的剪切疲劳极限	$K_{Ic}$	平面应变断裂韧性	$\epsilon$	尺寸系数
$\bar{x}$	随机变量 X 的子样均值	$P(A)$	事件 A 发生的概率	$\lambda$	失效率
$P(A B)$	在事件 B 已经发生的条件下事件 A 发生的条件概率	$\Phi(u)$	标准正态分布函数	$\mu$	母体均值
$F(x)$	随机变量 X 的累积分布函数(简称分布函数)	C	置信度, 费用	$\mu(t)$	修复率
$R_{v2}$	可靠度的双侧置信区间上限	$E(x)$	随机变量 X 的均值	q	敏性系数
$\varphi(u)$	标准正态分布的概率密度函数	R	可靠性, 可靠度	$\rho$	相关系数
$f(x)$	随机变量 X 的概率密度函数	$\sigma$	应力, 母体标准差	$s^2$	子样方差
v	自由度, 变异系数, 泊松比	K	应力强度因子	$K_c$	断裂韧性
$R_{L1}(R'_{L1})$	可靠度的单侧置信区间下限	$\beta$	表面加工系数	$\sigma_a$	应力幅
$R_{L2}$	可靠度的双侧置信区间下限	M	维修性, 维修度	$\sigma_b$	抗拉强度
$\sigma_{-1}$	应力比为-1 的疲劳极限	s	子样标准差	$\sigma_m$	平均应力
b	威布尔分布的尺度参数	$n_e$	有效子样容量	t	时间
$\sigma_r$	应力比为 r 的疲劳极限	MTTR	平均修复时间	$\sigma_s$	屈服点
$R_{v1}$	可靠度的单侧置信区间上限	$K_c$	有效应力集中系数	T	转矩, 扭矩
$m(t)$	维修时间的概率密度函数	$\hat{\sigma}$	母体标准差估计值	$\tau$	切应力
MTBF	平均无故障工作时间	$u_p$	标准正态偏量	$\tau_a$	切应力幅
MTTF	失效前平均工作时间	$V(x)$	随机变量 X 的方差	$\tau_m$	平均切应力
$\kappa$	威布尔分布的形状参数	$\gamma$	风险, 置信度的风险	P	概率
n	工作安全系数, 工作循	[n]	许用安全系数	F	失效概率

	环次数, 子样容量				
$z$	可靠度系数, 联结系数	$\alpha$	风险, 显著性水平	$c$	循环, 次数
$s_x$	随机变量 $X$ 的子样标准差	$\alpha_\sigma$	理论应力集中系数	$M(t)$	维修度

## 1.2 可靠性的概念

**可靠性的经典定义:** 产品在规定条件下和规定时间内, 完成规定功能的能力。

**产品:** 指作为单独研究和分别试验对象的任何元件、设备或系统, 可以是零件、部件, 也可以是由它们装配而成的机器, 或由许多机器组成的机组和成套设备, 甚至还把人的作用也包括在内。在具体使用“产品”这一词时, 其确切含义应加以说明。例如汽车板簧、汽车发动机、汽车整车等。

**规定条件:** 一般指的是使用条件, 环境条件。包括应力温度、湿度、尘砂、腐蚀等, 也包括操作技术、维修方法等条件。

**规定时间:** 是可靠性区别于产品其他质量属性的重要特征, 一般也可认为可靠性是产品功能在时间上的稳定程度。因此以数学形式表示的可靠性各特征量都是时间的函数。这里的时间概念不限于一般的年、月、日、分、秒, 也可以是与时间成比例的次数、距离。例如应力循环次数、汽车行驶里程。

**规定功能:** 道德要明确具体产品的功能是什么, 怎样才算是完成规定功能。产品丧失规定功能称为失效, 对可修复产品通常也称为故障。怎样才算是失效或故障, 有时很容易判定, 但更多情况则很难判定。当产品指的是某个螺丛, 显然螺栓断裂就是失效; 当产品指的是某个设备, 对某个零件损坏而该设备仍能完成规定功能就不能算失效或故障, 有时虽有某些零件损坏或松脱, 但在规定的短时间内可容易地修复也可不算是失效或故障。若产品指的是某个具有性能指标要求的机器, 当性能下降到规定的指标后, 虽然仍能继续运转, 但已应算是失效或故障。究竟怎样算是失效或故障, 有时要涉及厂商与用户不同看法的协商, 有时要涉及当时的技术水平和经济政策等而作出合理的规定。

**能力:** 只是定性的理解是比较抽象的, 为了衡量检验, 后面将加以定量描述。产品的失效或故障均具有偶然性, 一个产品在某段时间内的工作情况并不很好地反映该产品可靠性的高低, 而应该观察大量该种产品的工作情况并进行合理的处理后才能正确的反映该产品的可靠性, 因此对能力的定量需用概率和数理统计的方法。

按产品可靠性的形成, 可靠性可分为固有可靠性和使用可靠性。固有可靠性是通过设计、制



造赋予产品的可靠性；使用可靠性既受设计、制造的影响，又受使用条件的影响。一般使用可靠性总低于固有可靠性。

### 1.3 可靠性特征量(可靠性指标):

#### 1.3.1 可靠度

可靠度是产品在规定条件下和规定时间内，完成规定功能的概率，一般记为R。它是时间的函数，故也记为R(t),称为可靠度函数。

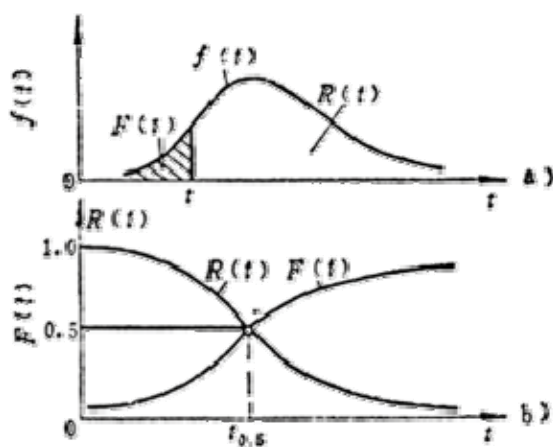


图1 可修复产品

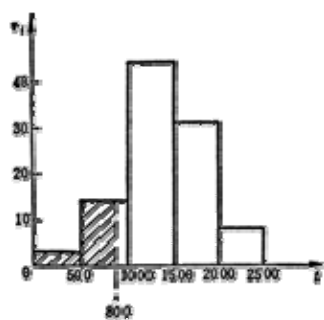


图2 不可修复产品

如果用随机变量T表示产品从开始工作到发生失效或故障的时间，其概率密度为f(t) 如上图所示，若用t表示某一指定时刻，则该产品在该时刻的可靠度

$$R(t) = P(T > t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad \text{图1}$$

对于不可修复的产品，可靠度的观测值是指直到规定的时间区间终了为止，能完成规定功能

的产品数与在该区间开始时投入工作产品数之比，即

$$R(t) = \frac{N_s(t)}{N} = 1 - \frac{N_f(t)}{N} \quad \text{图2}$$

式中:  $N$ ——开始投入工作产品数

$N_s(t)$  ——到  $t$  时刻完成规定功能产品数，即残存数

$N_f(t)$  ——到  $t$  时刻未完成规定功能产品数，即失效数。

### 1.3.2 可靠寿命

可靠寿命：可靠寿命和中位寿命

可靠寿命是给定的可靠度所对应的时间，一般记为  $t(R)$ 。

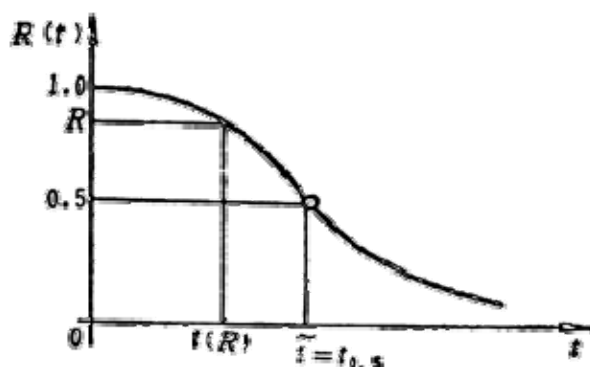


图13-1-5 可靠寿命和中位寿命

图3 可靠寿命和中位寿命

如图3所示，一般可靠度随着工作时间  $t$  的增大而下降，对给定的不同  $R$ ，则有不同  $t(R)$ ，即

$$t(R) = R^{-1}(R)$$

式中  $R^{-1}$ —— $R$  的反函数，即由  $R(t) = R$  反求  $t$

可靠寿命的观测值是能完成规定功能的产品的比例恰好等于给定可靠度时所对应的时间。

### 1.3.3 累积失效概率

累积失效概率：累积失效概率是产品在规定条件下和规定时间内未完成规定功能（即发生失效）的概率，也称为不可靠度。一般记为  $F$  或  $F(t)$ 。

因为完成规定功能与未完成规定功能是对立事件，按概率互补定理可得  $F(t) = 1 - R(t)$

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(t) dt$$

对于不可修复产品和可修复产品累积失效概率的观测值都可按概率互补定理，取

$$\hat{F}(t) = 1 - \hat{R}(t)$$

### 1.3.4 平均寿命

平均寿命：平均寿命是寿命的平均值，对不可修复产品常用失效前平均时间，一般记为MTTF，对可修复产品则常用平均无故障工作时间，一般记为MTBF。它们都表示无故障工作时间T的期望E(T)或简记为t。

如已知T的概率密度函数f(t)，则

$$t = E(T) = \int_0^{\infty} t f(t) dt$$

经分部积分后也可求得

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

### 1.3.4 失效率和失效率曲线

失效率：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。一般记为λ，它也是时间t的函数，故也记为λ(t)，称为失效率函数，有时也称为故障率函数或风险函数。

按上述定义，失效率是在时刻t尚未失效产品在t+Δt的单位时间内发生失效的条件概率。即

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P(t < T \leq t + \Delta t | T > t)$$

它反映t时刻失效的速率，也称为瞬时失效率。

失效率的观测值是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，即

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\Delta N_f(t)}{N_s(t) \Delta t}$$

失效率曲线：典型的失效率曲线 失效率（或故障率）曲线反映产品总体个寿命期失效率的情况。图示13.1-8为失效率曲线的典型情况，有时形象地称为浴盆曲线。失效率随时间变化可分为三段时期：



图4 典型失效率曲线

(1) 早期失效期，失效率曲线为递减型。产品投用使用的早期，失效率较高而下降很快。主要由于设计、制造、贮存、运输等形成的缺陷，以及调试、跑合、起动不当等人为因素所造成的。当这些所谓先天不良的失效后且运转也逐渐正常，则失效率就趋于稳定，到 $t_0$ 时失效率曲线已开始变平。 $t_0$ 以前称为早期失效期。针对早期失效期的失效原因，应该尽量设法避免，争取失效率低且 $t_0$ 短。

(2) 偶然失效期，失效率曲线为恒定型，即 $t_0$ 到 $t_1$ 间的失效率近似为常数。失效主要由非预期的过载、误操作、意外的天灾以及一些尚不清楚的偶然因素所造成。由于失效原因多属偶然，故称为偶然失效期。偶然失效期是能有效工作的时期，这段时间称为有效寿命。为降低偶然失效期的失效率而增长有效寿命，应注意提高产品的质量，精心使用维护。加大零件截面尺寸可使抗非预期过戴的能力增大，从而使失效率显著下降，然而过份地加大，将使产品笨重，不经济，往往也不允许。

(3) 耗损失效期，失效率是递增型。在 $t_1$ 以后失效率上升较快，这是由于产品已经老化、疲劳、磨损、蠕变、腐蚀等所谓有耗损的原因所引起的，故称为耗损失效期。针对耗损失效的原因，应该注意检查、监控、预测耗损开始的时间，提前维修，使失效率仍不上升，如图13.1-8中虚线所示，以延长寿命不多。当然，修复若需花很大费用而延长寿命不多，则不如报废更为经济。

### 1.3.5 失效率 $\lambda$ 的概略值

表2 失效率 $\lambda$ 的概略值

零部件名称	$\lambda$ [失效数/( $10^6$ h)]		
	最上限	平均	最下限
机床铸件(基础铸件)	0.7	0.175	0.015
一般轴承	1.0	0.5	0.02
球轴承(高速、重载)	3.53	1.8	0.075
球轴承(低速、低载)	1.72	0.875	0.035

轴套或轴承	1.0	0.5	0.02
滚子轴承	0.004	0.002	0.02
凸轮	1.1	0.4	0.001
离合器	0.93	0.6	0.06
电磁离合器	1.348	0.687	0.45
弹性联轴器	0.049	0.025	0.027
液压缸	0.12	0.008	0.001
气压缸	0.013	0.004	0.005
带传动	1.5	3.875	0.002
O型密封圈	0.08	0.02	0.142
橡胶密封圈	0.03	0.02	0.011
压力表	7.8	4.0	0.135
齿轮	0.20	0.12	0.0118
齿轮箱(运输用)	0.36	0.20	0.11
扇形齿轮	1.8	0.912	0.051
箱体	2.05	1.1	0.051
电动机	0.58	0.3	0.11
液压马达	7.15	4.3	1.45
转动密封	1.12	0.7	0.25
滑动密封	0.92	0.3	0.11
轴	0.62	0.35	0.15
弹簧	0.221	0.1125	0.004
弹簧(校准用)	0.42	0.22	0.009
弹簧(恢复力用)	0.022	0.012	0.001
阀门	8	5.1	2.0

## 1.4 可靠性特征量间的关系

表3 可靠性特征量间的关系

可靠性特征量	$R(t)$	$F(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$
$R(t)$ (可靠度)	-	$1-F(t)$	$\int_0^t f(t)dt$	$e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$
$F(t)$ (累积失效率)	$1-R(t)$	-	$\int_0^t f(t)dt$	$1-e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$
$f(t)$ (概率密度)	$-\frac{dR(t)}{dt}$	$\frac{dF(t)}{dt}$	-	$-\frac{d\lambda(t)}{dt} e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$
$\lambda(t)$ (失效率)	$-\frac{d}{dt} \ln R(t)$	$\frac{dF(t)}{dt} \frac{1}{1-F(t)}$	$\frac{f(t)}{\int_0^t f(t)dt}$	-

## 1.5 各类产品常用的可靠性指标

表4 各类产品常用的可靠性指标

使用条件	连续使用				一次使用	
可否修复	可修复		不可修复		可修复	不可修复
维修种类	预防维修	事后维修	用到耗损期	一定时间后报废	预防维修	
产品示例	电子系统、计算机、通信机、雷达、飞机、生产设备	家用电器、机械装置	电子元器件、机械零件、一般消费品	实行预防维修的零部件、广播设备用电子管	武器、过载继电器、救生器具	保险丝、闪光灯雷管
常用指示	可靠度、有效度、平均无故障工作时间、平均修复时间	平均无故障工作时间、有效寿命、有效度	失效率、平均寿命	失效率、更换寿命	成功率	成功率

## 1.6 可靠性的技术

可靠性的技术基础范围是相当广泛的，大致分为定性和定量的两大类方法。

定量化的方法要从故障（失效）的概率分布讲起，如何能定量地设计、试验、控制和管理产品的可靠性。定性方法则是经验为主，也就是要把过去积累处理失效的经验设计到产品中，使它具有免故障的能力。定性和定量方法是相辅相成的。可靠性设计和试验分析技术，其目的是在设计阶段预测和预防所有可能发生的故障和隐患，消除于未然，把可靠性设计到产品中去。事中分析指产品在运行中的故障诊断、检测，和寿命预测技术，以保持运行的可靠性。事后分析指产品发生故障或失效后的分析，找出产品故障模式的原因，研究预防故障的技术。尤其是事前分析，这便是可靠性研究重点的重点，美国工业中90%的可靠性成本用于设计上，而且在提高可靠性方面已积累了不少经验和技巧，以下作简单介绍。

### 一、可靠性设计经验

(1) 选择设计方案时尽量不采用还不成熟的新系统和零件，尽量采用已有经验并已标准化的零部件和成熟的技术。

(2) 结构简化，零件数削减。如日本横河记录仪表10年中无件数削减30%，大大提高了可靠性。

- (3) 考虑功能零件的可接近性，采用模块结构等以利于可维修性。
- (4) 设置故障监测和诊断装置。
- (5) 保证零件部设计裕度（安全系数/降额）。
- (6) 必要时采用功能并联、冗余技术。如日本的液压挖掘机等，采用双泵、双发动机的冗余设计。
- (7) 考虑零件的互换性。
- (8) 失效安全设计（Failure Safe），系统某一部分即使发生故障，但使其限制在一定范围内，不致影响整个系统的功能。
- (9) 安全寿命设计（Safe Life），保证使用中不发生破坏而充分安全的设计。例如对一些重要的安全性零件如汽车刹车，转向机构等要保证在极限条件下不能发生变形、破坏。
- (10) 防误操作设计（Fool proof）
- (11) 加强连接部分的设计分析，例如选定合理的连接、止推方式。考虑防振，防冲击，对连接条件的确认。
- (12) 可靠性确认试验，在没有现成数据和可用的经验时，这是唯一的手段。尤其机械零部件的可靠性预测精度还很低。主要通过试验确认。

## 二、可靠性设计辅助措施

为了使设计时能充分地预测和预防故障，把更多的失效经验设计到产品中，因而必须帮助设计人员掌握充分的故障情报资料和设计依据。采取以下措施：

- (1) 可靠性检查表，从可靠性观点出发，列出设计中应考虑的重点。设计时逐项检查。考虑预防的对策。
- (2) 推行FMEA，FTA方法。FMEA（失效模式影响分析）和FTA（故障树分析）是可靠性分析中的重要手段。FMEA是从零部故障模式入手分析，评定它对整机或系统发生故障的影响程度，以此确定关键的零件和故障模式。FTA则是从整机或系统故障开始，逐步分析到基本零件的失效原因。这两种方法在国外被看作是设计图纸一样重要，作为设计的技术标准资料，它收集总结了该产品所有可能预料到的故障模式和原因。设计者可以较直观地看到设计中存在的问题。
- (3) 故障事例集。把过去技术上的失败和改进的事例作成手册，供设计者随进参考。通常用简图表示，将故障和改进作对比。对故障的原因、情况附有简单说明。这手册是各公司积累的技术财富，视同设计规范同等重要。
- (4) 数据库。广泛有效地收集设计、制造中的失败和改进经验，试验和实际用的数据形成

检索系统和数据库，使设计者能超越本单位充分利用别人实践过的经验。如电子产品已形成世界性可靠性信息交换网。

(5) 设计、试验规范的不充实、改善。从使用实际得来的故障教训要反馈到设计、试验方法的改进中，要将这些改进效果作为产品设计规范（包括材料选定，结构形式，许用应力，安全系数值）和试验标准的改进依据，使它们成为设计技术的一部分。随着可靠性工作开展。必须加强设计、试验规范的研究，命名如试验规范的制定要以实地使用条件分析为基础，要调查出场的回收品和试验室加速试验件作对比，计算强化系数。通过失效分析反推，验证试验条件是否合适，从而不断改进试验方法和标准。因而这些规范都是公司的财富，对外不轻易泄密。如日本小松10年中试验标准增加三倍，丰田的试验标准有1500项之多。也可见各公司对试验的重视程度。

### 三、加强失效物理技术研究

失效物理是研究故障的原因，材料劣化的机制，缺陷的检测和消除，寿命预测和强化寿命机理，以及应力分析等技术。对于机械来说，主要研究它的常见失效模式，如蠕变，冲击振动，疲劳、断裂、磨损、润滑、腐蚀等。近年来，失效物理技术日举国受到各国重视。例如，由美国政府财政援助的机械故障研究小组（MFWG）的影响及大，它有四个技术咨询委员会：（1）诊断、检测；（2）故障；（3）设计；（4）现有技术的应用推广。研究的对象有系统为燃气轮机，叶片、轴、轴承、齿轮、接头、键槽、转动件、活塞等。该小组自60年成立之后，每年召开1~2次的技术讨论会，至今已有三十余届，许多失效预防和检测技术已投入实用。另外，国外企业都十分重视产品的失效分析工作，千方百计回收失效的零件和残骸加以分析。目的是找出失效原因，作出合更换改进决策，避免内类事故再发生。因而除各大企业配备有完善的失效分析设施外，还设有公共的失效分析中心。公司和保险机构的技术部门都承担分析的任务。

总之，为确保产品可靠，少出故障，必须加强故障的事前（设计），事中（运行的故障诊断）和事后（失效分析）的分析研究工作。

## 1.7 维修性特征量

可靠性的技术基础范围是相当广泛的，大致分为定性和定量的两大类方法。

### 1 维修度

维修度是在规定条件下使用的产品，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。它是维修时间的函数，记为 $M(\tau)$ ，称为函数。



如果用随机变量 $T$ 表示产品从开始维修到修复的时间，其概率密度为 $m(\tau)$ ，则

$$M(\tau) = P(T < \tau) = \int_0^{\tau} m(\tau) d\tau$$

## 2 修复率

修复率是修理时间已达到某个时刻尚未修复的产品，在该时刻后的单位时间内完成修理的概率，记为 $\mu(\tau)$

$$\mu(\tau) = \frac{m(\tau)}{1 - M(\tau)}$$

## 3 平均修复时间

平均修复时间为修复时间的均值,记为 $\bar{\tau}$ ,或MTTR

$$\bar{\tau} = \int_0^{\infty} \tau m(\tau) d\tau$$

## 4 维修性和可靠性特征量对应关系

可靠性是研究产品由正常状态转到故障状态之间时间 $t$ 的分布及其平均时间(MTTF,MTBF)。维修性是研究产品由故障状态恢复到正常状态之间时间 $\tau$ 的分布及其平均时间(MTTR)的。掌握维修性和可靠性特征量的对应关系，则研究可靠性的统计分析方法就可同样用于研究维修性。

维修性和可靠性特征量的对应关系如下图和下表所示。图中 $F(t)$ 与 $M(\tau)$ 相对应， $F(t)$ 越高表示失效概率越高， $M(\tau)$ 越高表示修复概率越高。失效与修复，共效果是对立的，就广义可靠性而言， $F(t)$ 越低， $M(\tau)$ 越高，则可靠性越佳。平均修复时间、平均修复率等观测值与对应的平均寿命、平均失效率等观测值算法均类似。

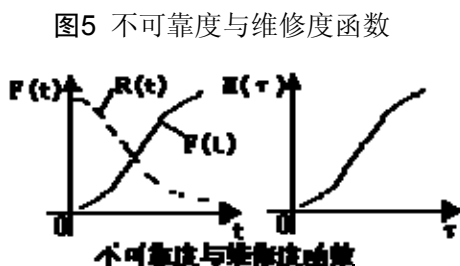


表5 可靠性与维修性对应关系

项目	可靠性	维修性
----	-----	-----

累积分布函数		$F(t) = 1 - R(t)$ $= \int_0^t f(x) dx$	$M(\tau) = \int_0^{\tau} m(x) dx$
概率密度		$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$	$m(\tau) = \frac{dM(\tau)}{d\tau}$
失效率和修复率		$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)}$	$\mu(\tau) = \frac{m(\tau)}{1 - M(\tau)}$
指数分布	累积分布	$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$	
	平均时间	$MTTF = \frac{1}{\lambda} (MTBF)$	$MTTR = \frac{1}{\mu}$

## 2 系统可靠性

### 2.1 不可修复系统的可靠性

#### 2.1.1 表决系统可靠性

表决系统可靠性：表决系统是组成系统的n个单元中，不失效的单元不少于k（k介于1和n之间），系统就不会失效的系统，又称为k/n系统。图13.4-9为表决系统的可靠性框图。通常n个单元的可靠度相同，均为R，则可靠性数学模型为：

$$R_s = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} R^i (1-R)^{n-i} \quad k \leq n \quad \text{式中} \binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!}$$

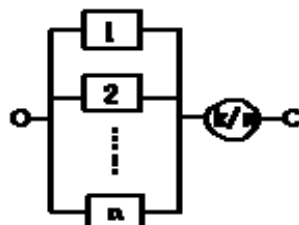
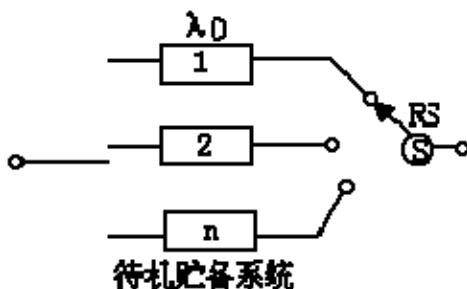


图13.4-9 表决系统

这是一个更一般的可靠性模型，如果k=1，即为n个相同单元的并联系统，如果k=n，即为n个相同单元的串联系统。

### 2.1.2 冷储备系统可靠性

冷储备系统可靠性(相同部件情况):  $n$ 个完全相同部件的冷储备系统,(待机贮备系统),转换开关  $s$  为理想开关  $R_s=1$ , 只要一个部件正常, 则系统正常。所以系统的可靠度:



$$P(t) = P\{\text{在 } 0-t \text{ 时间内故障部件数 } N \text{ 小于 } n\}$$

$$= \sum_{k=0}^{n-1} P\{N=k\} \quad (1)$$

式中,  $P\{N=k\} = P\{0-t \text{ 时间内有 } k \text{ 件发生故障}\}$ , 根据泊松分布:

$$P\{N=k\} = \frac{(\lambda_0 t)^k}{k!} e^{-\lambda_0 t} \quad (2)$$

式中,  $\lambda_0 = \text{常数}$ , 是部件故障率。将上式代入 (1) 得

$$R(t) = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\lambda_0 t)^k}{k!} e^{-\lambda_0 t} \quad (3)$$

$$R(t) = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{R_0}{k!} (-\ln R_0)^k \quad (4)$$

$$MTTF = \frac{n}{\lambda_0} = n(MTTF)_0 \quad (5)$$

$$\text{即, 系统和故障 } \lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (6)$$

$$\text{当 } n=2 \text{ 时, } R(t) = (1 + \lambda_0 t) e^{-\lambda_0 t} \quad (7)$$

$$MTTF = \frac{2}{\lambda_0} = 2(MTTF)_0 \quad (8)$$

### 2.1.3 串联系统可靠性

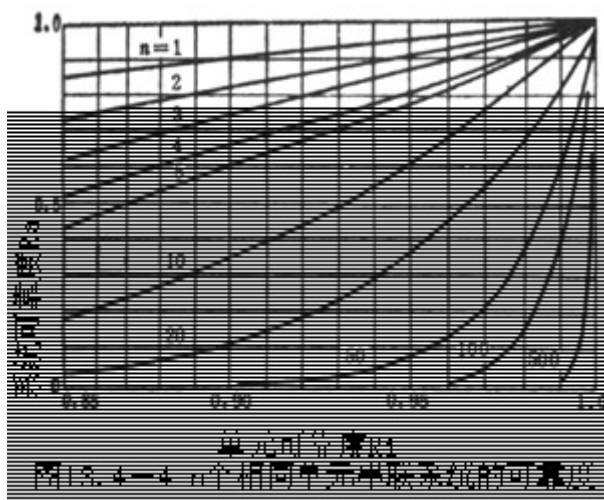
串联系统可靠性: 串联系统是组成系统的所有单元中任一单元失效就会导致整个系统失效的系统。下图为串联系统的可靠性框图。假定各单元是统计独立的, 则其可靠性数学模型为

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

式中， $R_a$ ——系统可靠度； $R_i$ ——第*i*单元可靠度



多数机械系统都是串联系统。串联系统的可靠度随着单元可靠度的减小及单元数的增多而迅速下降。图13-4-4表示各单元可靠度相同时 $R_i$ 和 $nR_s$ 的关系。显然， $R_s \leq \min(R_i)$ ，因此为提高串联系统的可靠性，单元数宜少，而且应重视串联系统的可靠性，单元数宜少，而且应重视改善最薄弱的单元的可靠性。



### 2.1.4 并联系统可靠性

并联系统可靠性：并联系统是组成系统的所有单元都失效时才失效的失效的系统。图13-4-5为并联轴系统的可靠性框图。假定各单元是统计独立的，则其可靠性数学模型为

$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^n F_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

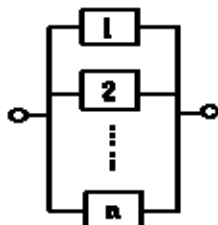


图13.4-6 并联系统可靠性框图

式中  $R_a$ ——系统可靠度

$F_i$ ——第*i*单元不可靠度

$R_i$ ——第*i*单元可靠度

并联系统对提高系统的可靠度有显著的效果，图13·4-6表示各单元可靠度相同时 $R_i$ 和 $n$ 与 $R_s$ 的关系，机械系统采用并联时，尺寸、重量、价格都随并联数 $n$ 成倍地增加，因此不如电子、电讯设备中用得广泛。采用时并联数也不多。例如在动力装置、安全装置、制动装置采用并联时，常取 $n=2\sim 3$ 。

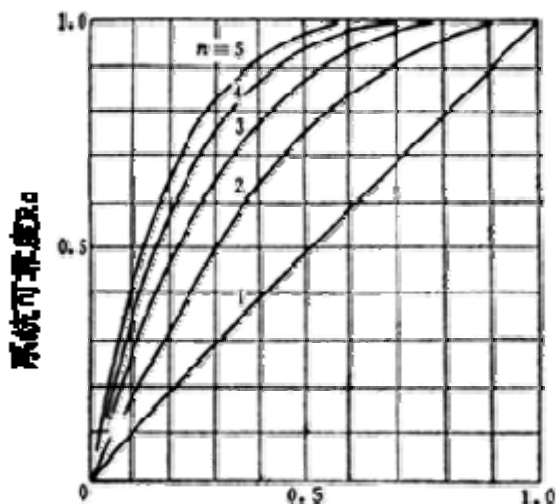


图13.4-6  $n$ 个相同单元并联系统的可靠度

### 2.1.5 混联系统可靠性

机械产品一般属于串联系统.要提高整机可靠性,首先应从零部件的严格选择和控制做起。例如，优先选用标准件和通用件；选用经过使用分析验证的可靠的零部件；严格按标准的选择及对外购件的控制；充分运用故障分析的成果，采用成熟的经验或经分析试验验证后的方案。

混联系统可靠性：混联系统是由串联和并联混合组成的系统。图13·4-7a为混联系统的可靠性框图，其数学模型可运用串联和并联两种基本模型将系统中一些串联及半联部分简化为等效单元。例如图13·4-7的a可按图中b，c，d的次序依次简化，则

$$R_{s1}=R_1R_2R_3$$

$$R_{s2}=R_4R_5$$

$$R_{s3}=1-(1-R_6)(1-R_{s2})$$

$$R_{s4}=1-(1-R_6)(1-R_7)$$

$$R_s=R_{s3}R_{s4}R_8$$

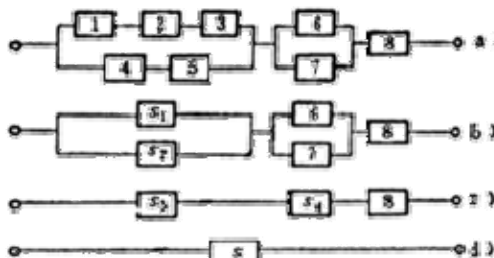


图13.4-7 混联系统及其简化

混联系统的两个典型情况为串并联系统（13·4-8a）和并串联系统（13·4-8b）。

串半联系统的数学模型为：

$R_s = \prod_{j=1}^m \left[ 1 - \prod_{i=1}^{n_j} (1 - R_{ij}) \right]$  当各单元可靠度都相等, 均为  $R_{ij} = R$ ,

且  $m_1 = m_2 = \dots = m_n = m$ , 则  $R_s = [1 - (1 - R)^m]^m$

并串联系统的数学模型为  $R_s = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - \prod_{i=1}^{n_j} R_{ij})$

当各单元可靠度都相等, 均为  $R_{ij} = R$ , 且  $n_1 = n_2 = \dots = n_m = n$ , 则

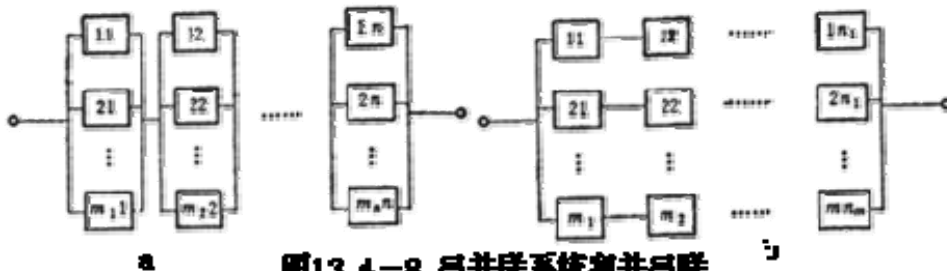


图13.4-8 串并联系统和并串并联系统 a 串并联系统 b 并串并联系统

$$R_s = 1 - (1 - R^n)^m$$

一般串并联系统的可靠度, 对单元相同的情况, 高于并串联系统的可靠度。

## 2.2 可靠性预计

### 2.2.1 设计初期的概略预计法

新设计初期的预计, 虽然没有足够的数据库, 但对可靠性研究、方案的比较等均起着重要的作用, 缺乏数据的情况可以用相类似产品的数据, 或由一批有经验人员按该产品复杂程度与已知可靠性的产品类比评分给定。对于同类产品, 有时利用经验公式的所谓快速预计法。这些经验公式是统计与可靠性有关的主要设计参数及性能参数, 通过回归分析得出的其基本模型为

$$\ln MTBF = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i$$

式中,  $x_i$  ——第  $i$  种参数, 例如零件数、重量、功率、尺寸、温度、速度等。

$b_i$  ——系数,  $i = 0, 1, 2, \dots, n$

### 2.2.2 数学模型法

数学模型法是可靠性预计所用的最主要方法。本方法按各单元可靠性与系统可靠性的关系建立精确或半精确的数学模型, 通过计算预计系统的可靠性。

一般可仅考虑对系统可靠性有影响的主要组成, 按可靠性的逻辑关系绘制可靠性框图, 通常

非串联部分均可单独计算，简化为一个等效单元，最终端是成为一个单间朝气串联模型。故典型模型为

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad A_s(t) = \prod_{i=1}^n A_i(t)$$

式中， $R_i(t)$ ——第*i*单元的可靠度， $i = 1, 2, \dots, n$

$A_i(t)$ ——第*i*单元的有效度， $i = 1, 2, \dots, n$

单元如是设备或装置等某一分系统，最好能有分系统的可靠性数据，否则需要将其分解成更小的单元，直到最基本的零件、元件。关于单元的可靠性数据可以运用以往积累的资料进行预计。资料来源于国家或企业的数据库、标准规范、参考资料及文献、外购件厂商数据、用户的调查、专门试验等。在设计中期和后期，则可按设计的详细资料对主要零部件或性能参数进行预计计算。

### 2.2.3 上下限法

上下限法用于系统很复杂的情况，甚至由于考虑单元并不独立等原因不易建立可靠性预计的数学模型，就可用本方法预计得相当准确的预计值。对不太复杂的系统使用上下限法能比精确的数学模型法较快地求得预计值。本方法在绘得可靠性逻辑框图后，先考虑最简化的情况，再逐步复杂化，逐次算得系统可靠度的上限和下限，并在这上下限间取系统可靠度的预计值。

## 2.3 蒙特卡洛模拟法

### 2.3.1 蒙特卡洛模拟法的概念和求解方法

一、蒙特卡洛模拟法的概念：（也叫随机模拟法）当系统中各个单元的可靠性特征量已知，但系统的可靠性过于复杂，难以建立可靠性预计的精确数学模型或模型太复杂而不便应用则可用随机模拟法近似计算出系统可靠性的预计值。随着模拟次数的增多，其预计精度也逐渐增高。由于需要大量反复的计算，一般均用计算机来完成。

二、蒙特卡洛模拟法求解步骤:应用此方法求解工程技术问题可以分为两类:确定性问题和随机性问题。解题步骤如下:

1.根据提出的问题构造一个简单、适用的概率模型或随机模型，使问题的解对应于该模型中随机变量的某些特征（如概率、均值和方差等），所构造的模型在主要特征参量方面要与实际问题或系统相一致

2. 根据模型中各个随机变量的分布，在计算机上产生随机数，实现一次模拟过程所需的足够数量的随机数。通常先产生均匀分布的随机数，然后生成服从某一分布的随机数，方可进行随机模拟试验。

3. 根据概率模型的特点和随机变量的分布特性，设计和选取合适的抽样方法，并对每个随机变量进行抽样（包括直接抽样、分层抽样、相关抽样、重要抽样等）。

4. 按照所建立的模型进行仿真试验、计算，求出问题的随机解。

5. 统计分析模拟试验结果，给出问题的概率解以及解的精度估计。

在可靠性分析和设计中，用蒙特卡洛模拟法可以确定复杂随机变量的概率分布和数字特征，可以通过随机模拟估算系统和零件的可靠度，也可以模拟随机过程、寻求系统最优参数等。

### 2.3.2 蒙特卡洛模拟法应用举例

蒙特卡洛模拟法确定零件强度的概率分布和数字特性，其步骤如下：

(a) 确定零件强度 $S$ 与其影响因素（变量）之间的函数关系 $S=g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。

(b) 确定零件强度函数中每一个变量 $x_i$ 的概率密度函数 $f(x_i)$ 和累积概率分布函数 $F(x_i)$ ，如图3-1所示，假定这些变量是相互独立的。

(c) 对强度函数中的每一变量 $x_i$ ，在 $[0, 1]$ 之间生成许多均匀分布的随机数 $F(x_{ij})$

$$F(x_j) = \int_{-\infty}^{x_j} f(x_i) dx_i$$

式中  $i$ ——变量个数， $i=1, 2, \dots, n$ ;

$j$ ——模拟次数， $j=1, 2, \dots, m$ 。

对于给定的 $F(x_{ij})$ ，可由上式解出相应的 $x_{ij}$ 。所以，对每一个变量 $x_i$ ，每模拟一次可得一组随机数 $(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj})$ ，例如第一次模拟得出的一组随机数为 $(x_{11}, x_{21}, \dots, x_{n1})$ ，见图3-2。

(d) 计算零件强度函数 $S$ 的统计特征量。将每一次模拟得到的随机数值代入函数的方程中，得

$$S_1=g(x_{11}, x_{21}, \dots, x_{n1})$$

$$S_2=g(x_{12}, x_{22}, \dots, x_{n2})$$

$$S_m=g(x_{1m}, x_{2m}, \dots, x_{nm})$$

因此得到强度函数 $S$ 的均值和标准差为



$$\bar{s} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n s_j$$

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (s_j - \bar{s})^2}$$

以上两式指的是样本的均值和样本的标准差。

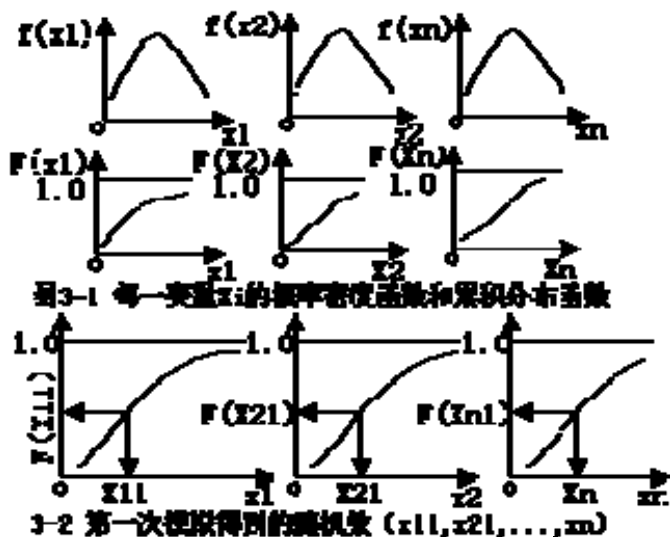
(e) 做强度函数S的直方图，并拟合其他布。将函数 $s_j$ 值按升序排列，得

$$s_1 < s_2 < \dots < s_j < \dots < s_m$$

由此做出直方图，可从正态分布、威布尔分布、对数正态分布、指数分布中，拟合出一至两种可能的分布。

(f) 对强度分布做假设检验。

可用 $\chi^2$ 检验或K-S检验，以得到拟合较好的一种分布，并可用数理统计的区间估计方法，估计出统计模拟结果的误差。



## 2.4 应力-强度干涉模型

机械零部件设计的基本目标是,在一定的可靠度下保证其危险断面上的最小强度(抗力)不低于最大的应呼,否则,零件将由于未满足可靠度要求而导致失效.这里应力的强度都不是一个确定的值,而是由若干随机变量组成的多元随机函数(随机变量),它们都具有一定的分布规律,如图3-6所示.

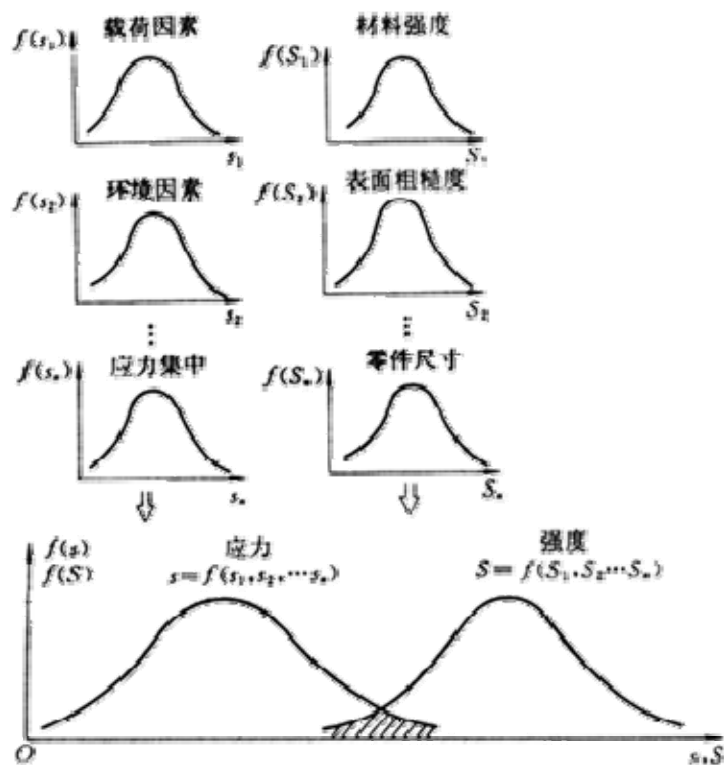
这种应力与强度的分布情况,严格地说都或多或少地与时间因素有关,图3-7表示了应力 $s$ 、强度 $S$ 的分布与时间的关系.当时间 $t=0$ 时,两个分布有一定的距离,不会产生失效,但随着时间的推移,由于环境,使用条件等因素的影响,材料强度退化,导致在 $t=t_2$ 时应力分布与强度分布发生干涉(图中阴

影部分),这时将可能产生失效.通常把这种干涉称为应力——强度干涉模型。此时,零件的不可靠度(失效概率)与可靠度(安全概率)可分别表示为

$$pf=P(S<s) \quad R=P(S>s)$$

具有

$$pf+R=1$$



应当指出,这里定义的可靠度与前面产品可靠度的定义是一致的,即零件的可靠度是指在规定的时间内规定的条件下零件完成规定功能的概率。可靠性的核心是完成规定的功能,它取决于应力和强度相互干涉的结果。强度 $S$ 、应力 $s$ 都是随机变量,都可用多元函数表示,而强度与应力差 $Z=S-s$ ,也是随机变量,也可用一个多元函数来描述,即

$$Z=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

式中随机变量 $x_i$ 表示影响零件功能的各种因素,如载荷、材料强度、零件尺寸、表面粗糙度、应力集中等。这种多元函数称为功能函数或状态函数。它表示了零件所处的状态,即

$Z>0$ , 零件处于安全状态;

$Z<0$ , 零件处于失效状态;

$Z=0$ , 零件处于极限状态;

而  $Z=f(x_1, x_2, \dots, x_n)=0$

称之为极限状态方程。

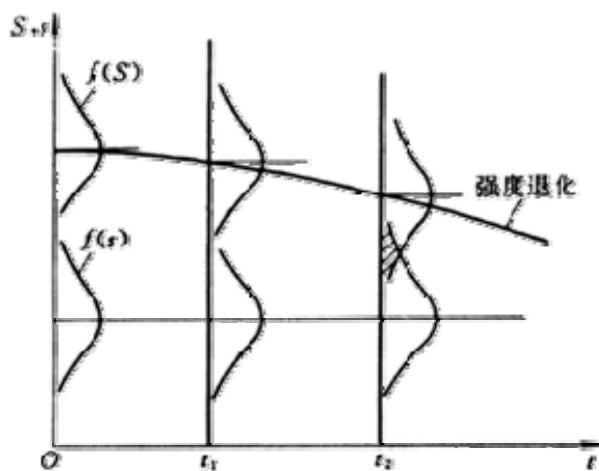


图 3-7 应力—强度分布与时间的关系

通常分配应考虑下列原则：

(1) 技术水平。对技术成熟的单元，能够保证实现较高的可靠性，或预期投入使用时可靠性可有把握地增长到较高水平，则可分配给较高的可靠度。

(2) 复杂程度。对较简单的单元，组成该单元零部件数量少，组装容易保证质量或故障后易于修复，则可分配给较高的可靠度。

(3) 重要程度。对重要的单元，该单元失效将产生严重的后果，或该单元失效常会导致全系统失效，则应分配给较高的可靠度。

(4) 任务情况。对整个任务时间内均需连续工作以及工作条件严酷，难以保证很高可靠性的单元，则应分配给较低的可靠度。

此外，一般还要受费用、重量、尺寸等条件的约束。总之，最终都是力求以最小的代价来达到系统可靠性的要求。

为了问题的简化，一般均假定各单元的故障均互相独立。由于 $R=1-F$ ，对指数分布，当 $F$ 不大时， $F \approx \lambda t$ ，因此可靠性分配可按情况将系统可靠度 $R_s$ 分配给各 $i$ 单元 $R_i$ ，当 $F_s$ 很小时可将不可靠度 $F_s$ 分配给各 $i$ 单元 $F_i$ ，或者将系统的失效率 $\lambda a$ 分配给各 $i$ 单元 $\lambda_i$ 。

## 2.5 可靠性分配

通常分配应考虑下列原则：

(1) 技术水平。对技术成熟的单元，能够保证实现较高的可靠性，或预期投入使用时可靠性可有把握地增长到较高水平，则可分配给较高的可靠度。

(2) 复杂程度。对较简单的单元，组成该单元零部件数量少，组装容易保证质量或故障后

易于修复，则可分配给较高的可靠度。

(3) 重要程度。对重要的单元，该单元失效将产生严重的后果，或该单元失效常会导致全系统失效，则应分配给较高的可靠度。

(4) 任务情况。对整个任务时间内均需连续工作以及工作条件严酷，难以保证很高可靠性的单元，则应分配给较低的可靠度。

此外，一般还要受费用、重量、尺寸等条件的约束。总之，最终都是力求以最小的代价来达到系统可靠性的要求。

为了问题的简化，一般均假定各单元的故障均互相独立。由于 $R=1-F$ ，对指数分布，当 $F$ 不大时， $F \approx \lambda t$ ，因此可靠性分配可按情况将系统可靠度 $R_s$ 分配给各 $i$ 单元 $R_i$ ，当 $F_s$ 很小时可将不可靠度 $F_s$ 分配给各 $i$ 单元 $F_i$ ，或者将系统的失效率 $\lambda_a$ 分配给各 $i$ 单元 $\lambda_i$ 。

## 2.6 可靠性分配的方法

### 2.6.1 等分配法

本方法用于设计初期，对各单元可靠性资料掌握很少，故假定各单元条件相同。

a. 串联系统 如图13.4-3所示



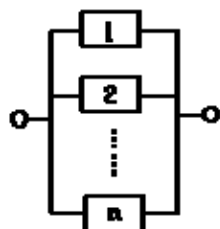
$$R_i = R_s^{\frac{1}{n}} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

式中： $R_s$ --系统要求的可靠度

$R_i$ --第 $i$ 单元分配得的可靠度

$n$ --串联单元数

b. 并联系统 如图13.4-5所示



$$R_i = R_s^{\frac{1}{n}} = (1 - R_s)^{\frac{1}{n}} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

式中 F--系统要求的不可靠度

Fi--第i单元分配得的不可靠度

Rs--系统要求的可靠度

n--并联单元数

c. 混联系统，如图13.1-21，一般可化为等效的单元，同级等效单元分配给相同的可靠度。

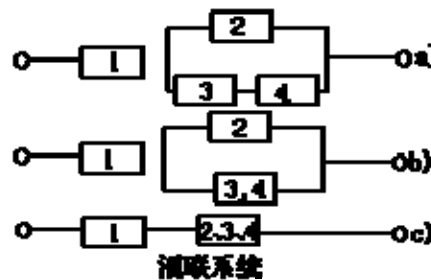
例如图13.4-21中的单元可先按图c，分配得

$$R_1 = R_{2,3,4} = R_3^{\frac{1}{2}}$$

再由图b分配得

$$R_2 = R_{3,4} = 1 - (1 - R_{2,3,4})^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{再求图a中的 } R_3 = R_4 = R_{2,3,4}^{\frac{1}{2}}$$



### 2.6.2 再分配法

若通过预计知串联系统（可包括混联系统的等效单元）各单元的可靠度为R1, R2, Rn。则系统可靠度的预计值为

$$\bar{R}_s = \prod_{i=1}^n \bar{R}_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

若规定的系统可靠度  $R_s \leq \bar{R}_s$ ，表示预计值已满足规定的要求，各单元即可分配给  $\bar{R}_i$ 。反之，若  $R_s > \bar{R}_s$ ，表示预计值未满足规定的要求需改进单元可靠度指标，即按规定的Rs指标进行再分配。由于提高低可靠度单元的效果显著而且常较容易，因此只将低可靠度的单元按等分配法进行再分配。为此先将各预计值由小到大次序编号，则有

$$\bar{R}_1 \leq \bar{R}_2 \leq \dots \leq \bar{R}_m \leq \dots \leq \bar{R}_n$$

$$\text{令 } R_1 = R_2 = \dots = R_m = R_0$$

$$\text{当 } \bar{R}_m \leq R_0 = \left( \frac{R_s}{\prod_{i=1}^m \bar{R}_i} \right)^{\frac{1}{m}} \bar{R}_m + 1$$

$$\text{则 } \left. \begin{aligned} R_1 = \dots = R_m &= \left( \frac{R_s}{\prod_{i=1}^m \bar{R}_i} \right)^{\frac{1}{m}} \\ R_{m+1} &= \bar{R}_{m+1}, \dots, \bar{R}_n = \bar{R}_m \end{aligned} \right\} \text{31}$$

用式31时由于m尚不知道，一般可暂设m进行试算。

### 2.6.3 比例分配法

本法用于新设计院系统与原有系统基本相同，已知原有系统各单元 $R_i$ 或失效率 $\lambda_i$ ，但对新设计的系统规定了新的可靠性要求，或者，根据已掌握的可靠性资料已能预计得新设计系统各单元的 $R_i$ 或 $\lambda_i$ ，但尚未满足新设计系统可靠性的要求。这时可取新系统分配给各单元的失效概率 $F_i$ 与相应单元 $R_i$ 成正比，若为指数分布，则各单元分配的失效率 $\lambda_i$ 与相应单元 $\lambda_i$ 成正比。

a. 串联系统 若系统要求可靠度为 $R_s$

$$R_i = \frac{R_i R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} = \frac{(1 - R_i) R_i}{\sum_{i=1}^n R_i}$$

当各单元寿命服从指数分布

$$\lambda_i = \frac{\lambda_i \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}$$

b. 并联系统 若系统要求不可靠度为 $F$ 。

$$R_i = \left( \frac{R_i}{\prod_{i=1}^n R_i} \right)^{\frac{1}{n}} R_i$$

当各单元寿命服从指数分布时

$$\lambda_i = \left( \frac{R_s}{\prod_{i=1}^n \lambda_i} \right)^{\frac{1}{n}} \lambda_i$$

### 2.6.4 综合评分分配法

本分配法是按经验对各单元考虑主要因素综合评分，根据各单元得分多少分配给相应的可靠性指标。关于考虑的历素，评分办法也可视具体情况而定。通常按有关分配的原则，各评给1~10分，高分则分给较高的失效概率或失效率。

例如，考虑的因素为：

- 1) 技术水平。对技术成熟，有把握保证高可靠性评1分，反之评10分；
- 2) 复杂程度。单元组成元件少，结构简单评1分，反之评10分；
- 3) 重要程度。极其重要评1分，反之评10分；

4) 任务情况。整个任务期中工作时间很微不足道，工作条件好评1分，反之评10分。第*i*单元综合得分可取各因数得分之积，即

$$\omega_j = \prod_{j=1}^4 \omega_{vj} \quad \text{式中 } j=1,2,3,4, \text{ 分别代表前述四项因素系统总分数}$$

$$\omega = \sum_{i=1}^n \omega_i \quad \text{式中, } i=1,2,\dots, n \text{ 为单元编号}$$

$$\text{第 } i \text{ 单元得分比数 } \alpha_i = \frac{\omega_i}{\omega}$$

一般串联系统分配得  $R_0 = R_i^{\alpha_i}$

当各单元寿命为指数分布，则

$$\lambda_i = \alpha_i \lambda_j = \frac{\alpha_i \ln 2}{t} \frac{1}{R_j}$$

$$R_i = e^{-\lambda_i t} = R_j^{\alpha_i}$$

### 2.6.5 动态规划分配法

本方法是解决在满足规定的系统可靠性指标的条件下，使费用或重要，或者尺寸等最小的优化问题。最常用是使费用最小，下面即以最小费用为例。

a. 串联系统

$$\left. \begin{array}{l} \text{目标函数 } \min \sum_{i=1}^n G_i(\bar{R}_i, \tilde{R}_i) \\ \text{约束条件 } \prod_{i=1}^n R_i \geq R_0 \\ \text{和 } 0 < \bar{R}_i \leq \tilde{R}_i \leq 1 \quad i=1,2,\dots,n \end{array} \right\}$$

式中， $R_0$ —规定的系统可靠度

$R_i$ —第*i*单元分配得的可靠度

$\tilde{R}_i$ —第*i*单元现有可靠度

$G_i(\bar{R}_i, \tilde{R}_i)$ —第*i*单元可靠度由 $\tilde{R}_i$ 提高到 $\bar{R}_i$ 的所需费用函数

b. 并联系统

$$\left. \begin{array}{l} \min \sum_{i=1}^n C_i(\bar{R}_i, R_i) \\ \prod_{i=1}^n R_i \leq R_0 \\ 0 < R_i \leq \bar{R}_i < 1 \\ i = 1, 2, \dots, n \end{array} \right\}$$

目标函数  
 式中,  $R_0$  - 规定的系统不可靠度  
 $R_i$  - 第*i*单元分配得的不可靠度  
 $\bar{R}_i$  - 第*i*单元现有不可靠度  
 $C_i(R_i, \bar{R}_i)$  - 第*i*单元不可靠度由 $\bar{R}_i$ 降到 $R_i$ 的所需费用函数

## 2.7 故障树分析

### 2.7.1 故障树的概念

概念：在系统设计过程中通过对可能造成系统失效的各种因素（包括硬件、软件、环境、人为因素）进行分析，画出逻辑框图（失效树），从而确定系统失效原因的各种可能组合方式或其发生概率，已计算系统失效概率，采取相应的纠正措施，以提高系统可靠性的一种设计分析方法。

故障分析是以故障树作为模型对系统经可靠性分析的一种方法。


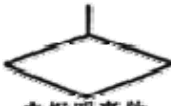


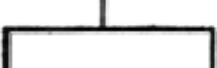

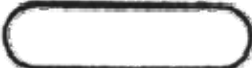
故障树分析把系统最不希望发生的故障状态作为逻辑分析的目标，在故障树中称为顶事件，继而找出导致这一故障状态发生的所有可能直接原因，在故障树中称为中间事件。再跟踪找出导致这些中间故障事件发生的所有可能直接原因。直追寻到引起中间事件发生的全部部件状态，在故障树中称为底事件。用相应的代表符号及逻辑们把顶事件、中间事件、底事件连接成树形逻辑图，责成此树形逻辑图为故障树。




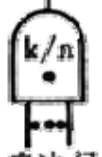
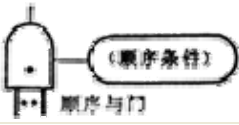
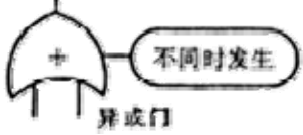
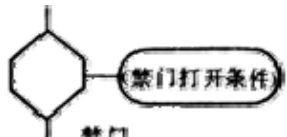

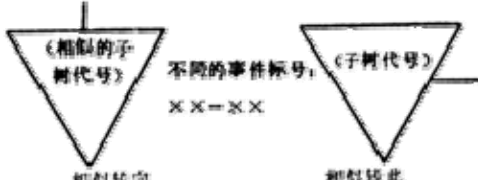
故障树是一种特殊的倒立树状逻辑因果关系图，它用事件符号、逻辑门符号和转移符号描述系统中各种事件之间的因果关系。

### 2.7.2 故障树分析中常用符号

	符号名称	定义
事	底事件	底事件是故障树分析中仅导致其他事件的原因事件



件 符 号	 <p>基本事件</p>	圆形符号是故障树中的基本事件,是分析中无需探明其发生原因的事件
	 <p>未探明事件</p>	菱形符号是故障树分析中的未探明事件,即原则上应进一步控明其原因但暂时不必或暂时不能探明其原因的事件.它又代表省略事件,一般表示那些可能发生,但概率值微小的事件;或者对此系统到此为止不需要再进一步分析的故障事件,这些故障事件在定性分析中或定量计算中一般都可以忽略不计
	 <p>结果事件</p>	矩形符号,是故障树分析中的结果事件,可以是顶事件,由其他事件或事件组合所导致的中间事件和矩形事件的下端与逻辑门连接,表示该事件是逻辑门的一个输入
	 <p>顶事件</p>	顶事件是故障树分析中所关心的结果事件
	 <p>中间事件</p>	中间事件是位于顶事件和底事件之间的结果事件
	特殊事件	特殊事件指在故障树分析中需用特殊符号表明其特殊性或引起注意的事件
	 <p>开关事件</p>	房形符号是开关事件,在正常工作条件下必然发生或必然不发生的事件,当房形中所给定的条件满足时,房形所在门的其它输入保留,否则除去.根据故障要求,可以是正常事件,也可以是故障事件
	 <p>条件事件</p>	扁圆形符号是条件事件,是描述逻辑门起作用的具体限制的事件

逻辑符号	 与门	与门表示仅当所有输入事件发生时，输出事件才发生
	 或门	或门表示至少一个输入事件发生时，输出事件就发生
	 非门	非门表示输出事件是输入事件的对立事件
	 表决门	表决门表示仅当n个输入事件中有k个或k个经上的事件发生时，输出事件才发生
	 顺序与门	顺序与门表示仅当输入事件按规定的顺序发生时，输出事件才发生
	 异或门	异或门表示仅当单个输入事件发生时，输出事件才发生
	 禁门	禁门表示仅当条件发生时输入事件的发生方导致输出事件的发生
		相同转移符号用经指明子树的位置，转向和转引字母代号相同
		相似转移符号用以指明相似子树的位置，转向和转此字母代号相同，事件的标号不同

### 2.7.3 故障树的建立步骤

- a 选择和确定顶事件：顶事件是系统最不希望发生的事件，或是指定进行逻辑分析的故障事件。
- b 分析顶事件：寻找引起顶事件发生的直接的必要和充分的原因。将顶事件作为输出事件，将所有直接原因作为输入事件，并根据这些事件实际的逻辑关系用适当的逻辑门相联系。
- c 分析每一个与顶事件直接相联系的输入事件。如果该事件还能进一步分解，则将其作用下一级的输出事件，如同b中对顶事件那样进行处理。
- d 重复上述步骤，逐级向下分解，直到所有的输入事件不能再分解或不必要再分解为止，即建成了一棵倒置的故障树。

## 3 机械结构可靠性设计

### 3.1 机械结构可靠性设计与传统安全系数法机械设计的关系

在机械结构的传统设计中，产品的设计者主要从满足产品使用要求和保证机械性能要求出发进行产品设计。在满足这两方面要求的同时，必须利用工程设计经验，使产品尽可能可靠，这种设计不能回答所涉及产品的可靠程度或发生故障概率是多少。

当设计者不能确定设计变量和参数时，为了保证所设计的产品的结构安全可靠，一般情况下在设计中引入一个大于1的安全系数，试图一次来保证机械产品不会发生故障。所以传统设计方法一般也称“安全系数法”。

安全系数法的基本思想是：机械结构在承受外载荷后，计算得到的应力应该小于该结构材料的许用应力。

在传统设计中，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是安全的。但安全系数本身就实质而言，仍是一个“未知”的系数。安全系数的概念本身包含着一些无法定量表示的影响因素。不同的设计者由于经验的差异，其设计的结果有可能偏于保守或危险，前者会导致结构尺寸过大，重量过重，费用增加，后者则可能使产品故障频繁，甚至产生严重“机毁人亡”后果。

从可靠性角度考虑，影响机械产品故障的各种因素可概括为“应力”和“强度”。“应力”大于“强度”时，故障发生。应力包括各种环境因素，例如：温度、湿度、腐蚀、粒子辐射等。应力使一个

受多种因素影响的随机变量，具有一定的分布规律。受材料的讥刺恶性能、工艺环节的波动和加工精度等的影响，强度也是具有一定分布规律的随机变量。在这种情况下，研究机械结构的可靠性问题就是机械概率可靠性设计。

概率论和数理统计位理论基础的可靠性设计方法比常规的安全系数法更合理，可靠性设计能得到所要求的恰如其分的设计，能得到较小的零件尺寸、体积和重量，从而节省原材料、加工时间，可以是所设计的零件具有可预测的寿命和失效概率，而安全系数则不能。

## 3.2 机械可靠性的设计方法

机械可靠性一般可分为结构可靠性和机构可靠性。结构可靠性主要考虑机械结构的强度以及由于载荷的影响使之疲劳、磨损、断裂等引起的失效；机构可靠性则主要考虑的不是强度问题引起的失效，而是考虑机构在动作过程由于运动学问题而引起的故障。

机械可靠性设计可分为定性可靠性设计和定量可靠性设计。所谓定性可靠性设计就是在进行故障模式影响及危害性分析的基础上，有针对性地应用成功的设计经验使所设计的产品达到可靠的目的。所谓定量可靠性设计就是充分掌握所设计零件的强度分布和应力分布以及各种设计参数的随机性基础上，通过建立隐式极限状态函数或显式极限状态函数的关系设计出满足规定可靠性要求的产品。

机械可靠性设计方法是常用的方法，是目前开展机械可靠性设计的一种最直接有效的方法，无论结构可靠性设计还是机构可靠性设计都是大量采用的常用方法。可靠性定量设计虽然可以按照可靠性指标设计出满足要求的恰如其分的零件，但由于材料的强度分布和载荷分布的具体数据目前还很缺乏，加之其中要考虑的因素很多，从而限制其推广应用，一般在关键或重要的零部件的设计时采用。

机械可靠性设计由于产品的不同和构成的差异，可以采用的可靠性设计方法有：

### 3.2.1 预防故障设计

机械产品一般属于串联系统.要提高整机可靠性,首先应从零部件的严格选择和控制做起。例如，优先选用标准件和通用件；选用经过使用分析验证的可靠的零部件；严格按标准的选择及对外购件的控制；充分运用故障分析的成果，采用成熟的经验或经分析试验验证后的方案。

### 3.2.2 简化设计

在满足预定功能的情况下，机械设计应力求简单、零部件的数量应尽可能减少，越简单越可靠是可靠性设计的一个基本原则，是减少故障提高可靠性的最有效方法。但不能因为减少零件而使其它零件执行超常功能或在高应力的条件下工作。否则，简化设计将达不到提高可靠性的目的。

### 3.2.3 降额设计和安全裕度设计

降额设计是使零部件的使用应力低于其额定应力的一种设计方法。降额设计可以通过降低零件承受的应力或提高零件的强度的办法来实现。工程经验证明，大多数机械零件在低于额定承载应力条件下工作时，其故障率较低，可靠性较高。为了找到最佳降额值，需做大量的试验研究。当机械零部件的载荷应力以及承受这些应力的具体零部件的强度在某一范围内呈不确定分布时，可以采用提高平均强度（如通过加大安全系数实现）、降低平均应力，减少应力变化（如通过对使用条件的限制实现）和减少强度变化（如合理选择工艺方法，严格控制整个加工过程，或通过检验或试验剔除不合格的零件）等方法来提高可靠性。对于涉及安全的重要零部件，还可以采用极限设计方法，以保证其在最恶劣的极限状态下也不会发生故障。

### 3.2.4 余度设计

余度设计是对完成规定功能设置重复的结构、备件等，以备局部发生失效时，整机或系统仍不致于发生丧失规定功能的设计。当某部分可靠性要求很高，但目前的技术水平很难满足，比如采用降额设计、简化设计等可靠性设计方法，还不能达到可靠性要求，或者提高零部件可靠性的改进费用比重复配置还高时，余度技术可能成为较好的一种设计方法，例如采用双泵或双发动机配置的机械系统，但应该注意，余度设计往往使整机的体积、重量、费用均相应增加。余度设计提高了机械系统的任务可靠度，但基本可靠性相应降低了，因此采用余度设计时要慎重。

### 3.2.5 耐环境设计

耐环境设计是在设计时就考虑产品在整个寿命周期内可能遇到的各种环境影响，例如装配、运输时的冲击，振动影响，贮存时的温度、湿度、霉菌等影响，使用时的气候、沙尘振动等影响。因此，必须慎重选择设计方案，采取必要的保护措施，减少或消除有害环境的影响。具体地讲，可以从认识环境、控制环境和适应环境三方面加以考虑。认识环境指的是：不应只注意产品的工

作环境和维修环境，还应了解产品的安装、贮存、运输的环境。在设计和试验过程中必须同时考虑单一环境和组合环境两种环境条件；不应只关心产品所处的自然环境，还要考虑使用过程中所诱发出的环境。控制环境指的是：在条件允许时，应在小范围内为所设计的零部件创造一个良好的工作环境条件，或人为地改变对产品可靠性不利的环境因素。适应环境指的是：在无法对所有环境条件进行人为控制时，在设计方案、材料选择、表面处理、涂层防护等方面采取措施，以提高机械零部件本身耐环境的能力。

### 3.2.6 人机工程设计

人机工程设计的目的是为减少使用中人的差错，发挥人和机器各自的特点以提高机械产品的可靠性。当然，人为差错除了人自身的原因外，操纵台、控制及操纵环境等也与人的误操作有密切的关系。因此，人机工程设计是要保证系统向人传达的住处的可靠性。例如，指示系统不仅显示器靠，而且显示的方式、显示器的配置等都使人易于无误地接受；二是控制、操纵系统可靠，不仅仪器及机械有满意的精度，而且适于人的使用习惯，便于识别操作，不易出错，与安全有关的，更应有防误操作设计；三是设计的操作环境尽量适合于人的工作需要，减少引起疲劳、干扰操作的因素，如温度、湿度、气压、光线、色彩、噪声、振动、沙尘、空间等。

### 3.2.7 健壮性设计

健壮性设计最有代表性的方法是日本田口玄一博士创立的田口方法，即所谓的一个产品的设计应由系统设计、参数设计和容差设计的三次设计来完成，这是一种在设计过程中充分考虑影响其可靠性的内外干扰而进行的一种优化设计。这种方法已被美国空军制定的RM2000年中作为一种抗变异设计以及提高可靠性的有效方法。

### 3.2.8 概率设计法

概率设计法是以应力—强度干涉理论为基础的，应力—强度干涉理论将应力和强度作为服从一定分布的随机变量处理。本书第3、4章将介绍这方面内容。

### 3.2.9 权衡设计

权衡设计是指在可靠性、维修性、安全性、功能重量、体积、成本等之间进行综合权衡，以

求得最佳的结果。

### 3.2.10 模拟方法设计

随着计算机技术的发展，模拟方法日趋完善，它不但可用于机械零件的可靠性定量设计，也可用于系统级的可靠性定量设计。

当然，机械可靠性设计的方法绝不能离开传统的机械设计和其它的一些优化设计方法，如机械计算机辅助设计、有限元分析等。

## 3.3 机械故障模式

### 3.3.1 故障模式的基本概念及其分类

被试件外形尺寸故障模式的基本概念

在国军标GJB451-89《可靠性维修术语》中，故障模式的定义是：故障的表现形式。更确切地说，故障模式一般是对产品所发生的、能被观察或测量到的故障现象的规范描述。

在分析产品故障时，一般是从产品故障的现象入手，通过故障现象（故障模式）找出原因和故障机理。对机械产品而言，故障模式的识别是进行故障分析的基础之一。

故障模式一般按发生故障时的现象来描述。由于受现场条件的限制，观察到或测量到的故障现象可能是系统的，如发动机不能起动；也可能是某一部件，如传动箱有异常响；也可能就是某一具体的零件，如履带析断裂、油管破裂等。因此，针对产品结构的不同层次，其故障模式有互为因果的关系。如“发动机损坏”这一故障模式是它上一层次“汽车不能开动”的因，又是它下一层次故障模式“连杆疲劳断裂”的结果，表2-1反映出故障模式的层次。

表6 故障模式的层次表

故障现象（故障模式）	故障产生的原因和机理
汽车不能开动	发动机损坏
发动机损坏	曲轴断裂
曲轴断裂	疲劳
曲轴断裂	硬度不合格、热处理温度偏低、测

	温仪表故障、管理等
--	-----------

由于故障分析的目的是采取措施、纠正故障，因此在进行故障分析时，需要在调查、了解产品发生故障现场所记录的系统可分系统故障模式的基础上，通过分析、试验逐步追查到组件、部件或零件级（如曲轴）的故障模式，并找出故障产生的机理。

故障模式不仅是故障原因分析的依据，也是产品研制过程中进行可靠性设计的基础。如在产品设计中，要对组成系统的各部、组件潜在的各种故障模式对系统功能的影响及产生后果的严重程度进行故障模式、影响及危害性分析，以确定各故障模式的严酷度等级和危害度，提出可能采取的预防改进措施。因此将故障的现象用规范的词句进行描述是故障分析工作中不可缺少的基础工作。目前，一些行业、专业均编制了故障模式表。中国汽车工业总公司在1992年发布了标准QC/T34-92《汽车的故障模式及分类》。装甲兵组织有关专家研究现役装备使用可靠性，编制了装甲车辆的故障模式表。

为了便于分析和统计故障模式，一般将故障模式进行分类，在QC/T34-92《汽车的故障模式及分类》将汽车常见故障模式分成6类：

- (a) 损坏型故障模式。如：断裂、碎裂、开裂、点蚀、烧蚀、击穿、变形、拉伤、龟裂、压痕等。
- (b) 退化型故障模式。如：老化、变质、剥落、异常磨损等。
- (c) 松脱型故障模式。如：松动、脱落等。
- (d) 失调型故障模式。如：压力过高或过低、行程失调、间隙过大或过小、干涉等。
- (e) 堵塞与渗漏型故障模式。如：堵塞、气阻、漏水、漏气、渗油等。
- (f) 性能衰退或功能失效型故障模式。如：功能失效、性能衰退、异响、过热等。

### 3.3.2 机械零件常见的故障模式

由于机械产品种类繁多，不可能逐个列举各产品的故障模式，但各产品零件的故障模式是有限的，下表给出了常用机械零件的故障模式。

表7 机械零件常见的故障模式

序号	故障模式	说明
1	断    裂	具有有限面积的几何表面分离现象。如：轴类、杆类、支架、齿轮等
2	碎    裂	零件变成许多不规则形状的碎块现象。如：轴承、磨擦片、齿轮






3	开 裂	零件产生的可见缝隙
4	龟 裂	零件表面产生的网状裂纹。如磨擦片表面
5	裂 纹	在零件表面或内部产生的微小裂缝
6	异常变形	零件在外力作用下超出设计允许的弹、塑性变形的现象，如：轴、杆类的弯曲
7	点 蚀	零件表面由于疲劳而产生的点状剥落，如：齿轮齿面、轴承等
8	烧 蚀	零件表面因高温局部熔化或改变了金相组织而发生的损坏，如轴瓦等
9	锈 蚀	零件表面因化学反应而产生的损坏
10	剥 落	零件表面的片状金属块与原基体分离的现象
11	胶 合	二个相对运动的金属表面，由于局部粘合，而又撕裂的损坏，如齿轮齿面
12	压 痕	在零件表面产生凹状痕迹
13	拉 伤	相对运动的金属表面沿滑动方向形成的伤痕，如缸筒等
14	异常磨损	运动零件表面产生的过快的非正常磨损
15	滑 扣	螺纹紧固件丧失连接的损坏



### 3.3.3 典型零件的故障模式

由于机械产品种类繁多，不可能逐个列举各产品的故障模式，但各产品零件的故障模式是有限的，下表给出了常用机械零件的故障模式。

表8 齿轮轮齿故障模式分类及其特征

	故障模式特征	举 例	损坏部位示意图
表面接触疲劳损伤	<b>麻点疲劳剥落</b> 在轮齿节圆附近，由表面产生裂纹，造成深浅不同的点状或豆状凹坑	承受较高的接触应力的软齿面（正火调质状态）和部分硬齿面齿轮	
	<b>浅层疲劳剥落</b> 在轮子齿节圆附近，由内部或表面产生裂纹，造成深浅不同、面积大小不同的片状剥落	承受高接触应力的重载硬齿面（表面经强化处理）齿轮	
	<b>硬化层剥落</b> 经表面强化处理的齿轮在很大接触应力作用下，由于应力/强度比值大于0.55，在强化层过渡区产生平行于表面的疲劳裂纹，造成硬化层压碎，大块剥落	承受高接触应力的重戴硬齿面（表面经强化处理）齿轮	

齿轮弯曲断裂	<p><u>疲劳断齿</u> 表面硬化（渗碳、碳氮共渗、感应淬火等）齿轮，一般在轮齿承受最大交变弯曲应力的齿轮根部产生疲劳断裂。断口呈疲劳特征</p>	承受弯曲应力较大的变速箱齿轮和最终传动齿轮等	
	<p><u>过载断齿</u> 一般发生在轮齿承受最大弯曲应力的齿根部位，由于材料脆性过大或突然受到过载和冲击，在齿根处产生脆性折断，断口粗糙</p>	变速箱齿轮等	
磨损	<p><u>磨粒磨损</u> 润滑介质中含有类角硬质颗粒和金属屑粒，犹如刀刃切削轮齿表面，使齿面几何形状发生畸变，严重时会使齿顶变尖，磨得像刀刃一样</p>	在有灰沙环境工作的开式齿轮，矿山机械传动齿轮等	
	<p><u>腐蚀磨损</u> 在润滑介质中含有化学腐蚀成分，与材料表面发生化学和电化学反应，产生红褐色腐蚀产物（主要是三氧化二铁），受啮合磨擦和润滑剂的冲刷而脱落</p>	在化学腐蚀环境中工作的齿轮	
	<p><u>胶合磨损</u> 轮齿表面在相对运动时，由于速度大，齿面接触点局部温度升高（热粘合）或低速重载（冷粘合）使表面油膜破坏，产生金属局部粘附而又撕裂，一般在接近齿顶或齿根部位速度大的地方，造成与轴线重直的刮伤痕迹和细小密集的粘焊节瘤，齿面被破坏，噪音变大</p>	高速传动齿轮、蜗杆等	
	<p><u>齿端冲击磨损</u> 变速箱换档齿轮在换档时齿端部受到冲击载荷，使齿端部产生磨损、打毛或崩角</p>	变速箱换档齿轮受多次换档冲击载荷作用	
	<p><u>塑性变形</u> 在瞬时过载和磨擦力很大时，软齿面齿轮表面发生塑性变形，呈现凹沟、凸角和飞边，甚至使齿轮扭曲变形造成轮齿塑性变形</p>	软齿面齿办过载	

形	<u>压痕</u> 当有外界异物或从轮齿上脱落的金属碎片进入啮合部位，在齿面上压出凹坑，一般凹痕线平，严重时会使轮齿局部变形	齿轮啮合时有异物压入	
	<u>塑变折皱</u> 硬齿面齿轮（尤其是双曲线齿轮）当短期过载磨擦力很大时，齿面出现塑性变形现象，呈波纹形折皱，严重破坏齿廓	硬齿面齿轮过载	

通过对汽车拖拉机的931个齿轮损坏实例进行统计分析，得出了齿轮子的各故障式比例。

齿轮故障模式所占比例

序号	齿轮故障模式	占总故障模式所占比例/%
1	疲劳断齿	32.8
2	过载断齿	19.5
3	轮齿碎裂	4.3
4	轮子毂撕裂	4.6
5	表面疲劳	20.3
6	表面磨损	13.2
7	齿面塑性变形	5.3

### 轴类零件的故障模式

轴件的故障模式可以分成三种类型，见表2-5。

表 2-5 轴件的故障模式

模式分类		说明
断裂	静载断裂	超出设计允许的过度的弹性、塑性变形
	冲击断列	一次性施加的静载荷过大引起断裂
	应力腐蚀及腐甸 疲劳断裂	一次性高速冲击载荷引起的断裂
	疲劳劳断裂	在腐蚀性介擗中使用的零件，在静应力或交变应力作用下产生的断裂
表	磨损	零件在交变应力作下产生的断裂

面 损 伤	腐蚀	零件表面与周围介质发生化学或电化学反应形成腐蚀导致表面损伤
	接触疲劳	零件在交变接触应力作用下，出现表面剥落现象

### 弹簧的故障模式

弹簧是机械产品中的重要基础件之一。它的种类很多，按形状划分有：螺旋弹簧、板（片）簧、碟形弹簧、环形弹簧、平面（截锥）蜗卷弹簧等；按承载特点划分有：压缩、拉伸、扭转等弹簧。还有按成形方式、材质等划分弹簧的方法。

弹簧承受的应力主要有：弯曲应力、扭转应力、拉压应力和复合应力等。

弹簧的故障模式主要有：断裂、变形、松弛、磨损。其中最主析是断裂和变形菜（松弛）。

### 弹簧的故障模式分类

模式分类		说 明
断 裂	脆性断裂	弹簧断裂中绝大部属于脆性断裂。只有当工作温度较式时，才有可能出现塑性断裂（如切变形断裂及蠕变断裂等）。在工程上把疲劳断裂、应力腐蚀断裂及氢脆断裂等称为脆性断裂
	疲劳断裂	弹簧在循环载荷作用下的断裂
	应力腐蚀断裂	在拉应力和腐蚀介质共同作用下引起弹簧断裂现象
	腐蚀疲劳断裂	弹簧在循环载荷和腐蚀介质共同作用下发生的断裂
	氢脆、镉脆、黑脆	由于弹簧材料中有害物质含量过高引起的脆断
松弛或变形		
磨损		磨损分为：磨料、疲劳和腐蚀磨损

### 紧固件的故障模式

紧固件一般分为：螺纹紧固、铆钉和专用紧固件（如卡环等），其中螺纹紧固和一些专用紧固件能方便拆卸重复使用。铆钉类的紧固是永久性联接的紧固件。

紧固件一般承受：静载（拉伸、剪切、弯曲、扭转），疲劳载荷，冲击戴荷。

### 紧固件主要故障模式

故障模式		说 明
断 裂	脆性断裂	
	延滞破坏断裂	包括氢损伤、应力腐蚀破坏、液体金属脆断

	腐蚀断裂	
	高温应力断裂	
	变形	
	扣滑	

### 3.3.4 故障模式实例

由于机械产品种类繁多，不可能逐个列举各产品的故障模式，但各产品零件的故障模式是有限的，下表给出了常用机械零件的故障模式。

#### 损坏型故障模式

故障模式		说 明
1 断	齿	齿轮在外力或应力作用下发生至少有一个轮齿掉落（但不包含整个轮齿的掉落）现象
2 剃	齿	齿轮件在外力或内应力作用下发生全部轮齿掉落的现象
3 断	裂	零件在外力或内应力作用下断开的现象。如轴类、杆类、支架、齿轮等的断裂
4 碎	裂	零件在外力的作用下，超过了强度极限而被破坏，就成多个不规则形状碎块的现象。如轴承、衬套等的碎裂
5 龟	裂	零件表面网状裂纹扩展的现象。如离合器磨擦片等的龟裂
6 开	裂	零件因强度不够，裂开一个或多个可见缝隙的现象。如橡胶件等的开裂
7 裂	纹	零件表面或内层产生细微纹路的现象。如轴类、杆类、支架、齿轮、磨擦片等的裂纹
8 开	焊	焊缝或焊缝与基体间出现裂纹或开裂的现象
9 滑	扣	螺接信件因螺纹损坏造成不能拧紧的现象。例扣、乱扣亦归人滑扣之列
10 点	蚀	零件表面在循环变化的接触应力作用下，由于疲劳而产生的点状剥落的现象。如齿轮齿面、凸轮表面、轴承滚道等出现的点蚀
11 拉	伤	相对运动的磨擦副之间由于过热或含有杂质，在磨擦表面滑动方向形成明显的伤痕的现象。如筒式减振器、发动机缸套、轴瓦等的拉伤

12	粘 附	零件间的接触表面由于过热等原因，致使接触表面处材料分子的转移，产生局部吸附的现象。如磨擦片的粘附
13	咬 住	零件间接表面由于粘付或带卡严重，产生阻力，进而导致相对运动中中断的现象
14	塑性变形	零件的许用应力在超过弹性极限后，产生永久变形，即使除去外力也不能恢复到变形前状态的现象。如轴类、杆类、弹簧等的塑性变形
15	压 痕	零件表面在接触压应力作用下，产生有规律凹状波的现象。如离合器活动盘弹子槽表面出现的压痕
16	烧 蚀	零件因高温、过热等原因，致使其局部表面产生损伤或熔化等现象，如发动机活塞顶部、轴瓦等的烧蚀
17	击 穿	1 绝缘体（在高电压的作用下）丧失绝缘能力，通过绝缘体的电流突然大量增加，造成破坏性放电的现象。如电容器的击穿 2 在装甲车辆中也指尘土直接穿过空气滤清器而进入发动机的现象
18	爆 炸	高压、骤热造成零件突然损坏的现象。如蓄电激爆炸
19	炸 裂	骤冷造成零件突然损坏的现象。如潜望镜玻璃炸裂
20	脱 胶	负重轮胶带出现整条胶带从钢圈上脱开（或脱落），或胶带内外层碎裂（掉块）的现象

### 失调型故障模式

序号	故障模式	说 明
1	干 涉	零部件之间因外部或内部原因，出现运动件与运动件或运动件与固定件之间发生碰撞或磨擦现象
2	顶 齿	齿轮件因啮合间隙消失而不能转动的现象
3	发 卡	因调整不当，维护不善等原因，致使运动不灵活，产生滞卡的，如操纵装置拉杆的发卡
4	异 响	机件运转中发生不正常声响的现象
5	不能调压	高压装置（例如高压继电器）丧失调压能力的现象
6	压力过高（或过低）	油或气压不符合技术条件规定值，出现过高（或低）的现象。如发动机机油压力过高（或过低）
7	压力不稳定	油压或气压出现压力忽高忽低的现象
8	行程过大（或过小）	操纵件或运动件所能达到极限位置之间的距离不符合技术要求，出现过大（或过小）的现象。如踏板、操纵杆等的选种过大（或过小）
9	间隙过大（或过小）	配合件的配合间隙或触点间隙不符合技术要求，出现过大（或过小）的现象

10	照度过亮 (或过暗)	照明元器件因电压等原因出现照度不适(过亮或过暗)的现象
11	接触不良	电子元器件出现时通时断的现象。如继电器接触不良
12	断 路	通电电路出现电流中的断的现象
13	短 路	电路中电阻消失造成破坏性放电的现象
14	指示不准	装甲车辆车载监测仪表出现指针显示值与实际工况不符合的现象。 如发动机转速表指示不准
15	指示不归零	监测仪表指针不能回归起始原点现象
16	无 指 示	因监测仪表结构等故障出现指针不显示的现象
17	性能下降	车辆行驶一定时间后, 出现性能降至低于规定的性能指标的现象。 如车辆最大行驶速度达不到规定指标
18	功率不足	发动机工作一定时间后, 出现输出功率低于同样条件新发动机输出功率的现象
19	功率变大	发动机工作一定时间后, 其功率出现反常(变大)的现象
20	不能熄火	因发动机操纵装置等零部件发生故障, 致使发动机无法正常停止工作的现象
21	着 火	装甲车辆内发生明火燃烧的不应有的现象。如发动机因铜石棉垫断裂引起的发动机着火
22	倒 爆	因操作不当, 出现发动机反常程序工作, 造成发动机反常程序工作, 造成发动机短时间严重磨损或损坏的现象
23	起动困难	发动机、起动电动机的起动齿轮等零部件按操作规程起动时, 出现不易起动的现象
24	不 运 转	发动机、起动机齿轮等零部件因外部或内部等原因, 出现起动不起来的现象
25	转速不稳	发动机工作时, 出现转速忽高忽低, 且很难或无法控制的现象
26	飞 车	发动机调控失效, 转速迅速无限升高, 超过允许的最高值, 并伴有巨大响声的现象
27	过 热	某一部位的零部件温度超过正常工作温度的现象。如冷却系开锅
28	供油不畅	出现发动机燃油供给系供给的油量不足或断续供油的现象
29	不 供 油	出现发动机燃油供给系不供给燃油致使发动机无法正常工作的现象
30	供气不足	出现发动机空气供给系不能正常供给所需的空气, 致使发动机无法正常工作的现象
31	供油过大	因发动机油量调整器故障, 造成超供油, 出现燃油消耗率增大、发动机工作粗暴等不良的现象
32	排 黑 烟	因油和(或)气供给不均, 雾化不良等原因, 引起发动机排黑烟现象
33	自行熄火	在发动机正常使用的情况下, 出现发动机突然停止工作的现象

34	不 充 电	发动机正常工作时，出现由发动机拖动的发电机不能向本车蓄电池充电的现象
35	抖 动	传动箱、变速箱等组件工作时，出现箱体上下剧烈、频繁颤拦的现象
36	摆 动	因磨损过度等原因，造成转动件以支承轴为轴线的前后幌动，如负重轮的摆动
37	不传递动力	发动机工作时，出现具有独立功能的组件（如传动箱）输不出动力的现象
38	分离不彻底	工作中需要正常开合的主、被动磨擦零件出现闭合后不能完全分开的现象
39	不 分 离	工作中需要正常开合的主、被动磨擦零件，出现闭合后不能分开的现象
40	打 滑	主、被动磨擦零件闭合后，施以规定的作用力仍不能中止相对运动和传递所需扭矩的现象
41	踏板沉重	出现脚啃踏板费力的现象
42	踏板回不到原位	啃下的踏板卸载后不能自行回到原始位置的现象
43	踏板抖动	踏板上下运动过程中出现明显颤抖的现象
44	不 闭 锁	换（挂）档时因闭锁器故障，出现传动（变速）杆不能到位的现象
45	乱 档	换（连）档时，实际档位与档位指针不一致的现象
46	挂不上档	使用中速杆已到挂档位置仍不能挂上档的现象
47	自行挂档	使用中摘档后，未作任何操作而变速杆自动挂上档或变速杆一次操作同时挂上双档的现象
48	摘不下档	变速杆挂上档后不能正常退档或变速杆已在空档位置实际仍未脱档的现象
49	自行掉档	在未作任何变速操纵情况下，变速杆自动回到空档位置或变速杆还在原档位上实际已发生脱档，使车辆速度突然减慢或停止的现象
50	转向困难	按规定操作要求操纵，行驶的车辆仍不能正常转向的现象
51	不 转 向	在未作任何转向操纵情况下，行驶的车辆向一侧转向的现象
52	操纵困难	车辆起步和转向时，推拉操纵杆费力或挂（换）档时变速杆操作费力的现象
53	回位不彻底	操纵杆不能完全恢复到规定位置的现象
54	不 回 位	操纵杆不能恢复到规定位置的现象
55	无 助 力	操纵装置助力机构不起助力作用的现象
56	联 动	制动车辆过程中，出现手操纵装置工作也带动脚操纵装置工作或脚操纵装置工作或脚操纵装置工作也带动手操纵装置工作的不应有的现象



57	雾化不良	有能形成均匀雾状油气的现象。如喷油器雾化不良
----	------	------------------------

### 装甲车辆松脱型故障模式

序号	故障模式	说 明
1	窜 动	零、部件离开原安装位置一定距离的现象。如扭力轴的窜动
2	松 动	紧固件、连接件丧失应有的紧固力的现象。如螺栓、铆钉等联接件的松动
3	脱 开	由于联接失效造成被联接零件位移、错开一段原安装位置但未彻底分离的现象。如减振器联接臂、联接销的脱开
4	脱 落	由于联接失效造成被联接零件原安装位置彻底分离的现象。如减振器联接销的脱落

### 装甲车辆退化型故障模式

序号	故障模式	说 明
1	老 化	非金属零件随着使用或存放时间的延长，丧失原有性能的现象。如橡胶密封件，橡胶管等的老化
2	氧 化	电子元器件随着使用或存放时间的延长，其接触面丧失原有良好的导电性能的现象。如接线柱的氧化
3	超 泡	橡胶件、塑料件表层出现气泡的现象。如轮式装甲车辆轮胎的起泡
4	变 质	油、脂及特种液由于内部或外部原因，改变原有物理或化学特性的现象，如钙基脂、机油的变质
5	剥 落	金属或涂层以薄片状从零件表面脱落或分离的现象
6	锈 蚀	由于水、杂质等原因致使零件表面产生锈、斑及腐蚀的现象
7	异常磨损	由于设计、制造、装配或使用等原因，在寿命期内运动件表面产生超过正常磨损的现象
8	翘 曲	片板状零件由于内部或外部原因，致使表面出现高低不平，或标准平台上检测时贴合面出现超过规定的间隙值的现象

## 装甲车辆堵塞与渗透漏型故障模式

1	堵 塞	管路中有异物阻挡,造成液体或气体不能流动或流动不畅的现象。如柴油箱油路堵塞
2	气 阻	因油、水管路中有空气,造成发动机或液压系统无法正常工作的现象。如发动机高压泵气阻
3	泄 油	密封装置严重失效或管路等零件损坏,引起油料、特种油液在短时间内大量漏出现象
4	甩 油	旋转机件工作时,由于离心力作用,使其内的润滑油(脂)从密封失效处甩出现象。如转向机甩油,负重轮甩油
5	漏 油	因密封装置失效或零件损坏等引起油、脂较快流出现象
6	滴 油	因密封装置失效或零件损坏等引起油、脂呈点滴状流出现象
7	渗 油	因密封装置失效或零件引起油、脂少量渗透,零件表面出现油迹的现象
8	漏 水	因密封装置失效或零件损坏等引起水较快流出现象
9	滴 水	因密封装置失效或零件损坏等引起水呈点滴状流出现象
10	渗 水	因密封装置失效或零件损坏等引起少量渗签字,零件表面出现水迹的现象
11	喷 水	因密封装置严重失效或零件损坏等,引起冷却水在短时间内大量漏出呈柱的现象
12	进 泥 水	因密封失效,出现泥水进入零件内腔,造成润滑油(脂)变质的现象
13	漏 气	因密封装置失效或零件损坏引起泄漏,可听见明显的气流声,或有“手感”或肥皂液检查出现连续起泡的现象,如发动机缸垫漏气
14	渗 气	轻微漏气,听不见气流声或无明显的“手感”用肥皂液检查有连续气泡出现的现象
15	油水混合	因加工、装配缺陷或零件损坏,造成发动机燃油、润滑油和水混合在一起的现象

## 装甲车辆综合型故障模式

序号	故障模式	说 明
1	跑偏	车辆直线行驶时,自动偏向一边的现象

2	损坏	“损坏”作为故障模式太笼统不确切。但在当时对可靠性问题尚未有深刻认识的情况下，当试验现场出现零部件已不符合规定的要求时，因工作责任心不强，或因一时难以判明其确切的故障形式，试验员以“损坏”给予记录。目前整理时，只好予以保留
---	----	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------

## 3.4 机械故障的预防

### 3.4.1 可靠性设计准则

可靠性设计准则是设计人员在长期的设计实践中积累起来的、能提高产品可靠性的行之有效的经验和方法，并归纳、总结形成具有普遍适用价值的设计原则。它是设计人员进行产品设计时必须遵循的准则，以避免重复发生过去已发生过的故障或设计缺陷。

可靠性设计准则一般是针对某个具体产品制定的。但也可以将产品的可靠性设计准则的共性部分上升为某类产品的可靠性设计准则。如：HB7251-95《直升机可靠性设计准则》、HB7232-95《军用飞机可靠性设计准则》、GJB2635-96《军用飞机腐蚀防护设计和控制要求》等。

### 可靠性设计准则

#### 1.通用设计准则

(1) 优先选用经过充分验证、技术比较成熟的设计方案，提高产品设计的继承性。日本一些企业的专家认为：一个新产品的的设计，其80%是采用原有产品或相似产品的设计经验，只有20%是因为产品的功能、性能的变化需要进行重新设计。

(2) 简化设计方案，尽量采用模块化、通用化设计方案。优先选用标准件，提高互换性。在通用化设计时，应使接口、连接方式是通用的。

(3) 在满足强度、刚度要求下，力求重量轻、体积小。

(4) 零部件、原材料的选择和控制原则如下：

a.选用的零部件、原材料除满足结构尺寸、重量、强度、刚度要求外，还应满足使用环境和寿命要求；

b.压缩零部件、原材料的种类和规格，优先采用符合国军标、国标和专业标准的通用件和标准件；

c.列出关键零部件的清单，选择合理的公差值，适当的降额使用要求；

(5) 进行防差错设计，采用不同的安全保护装置，如灯光、音响等报警装置，监视装置，保护性开关、防误插定位卡、定位销等，并有符合国家标准的醒目的识别标志、防差错或危险标志；

(6) 包装、运输和贮存防护设计应满足没地区、不同气候条件和不同运输工具的使用要求，并符合国家标准的有关规定。

### 机械结构设计准则

1 对于那些损坏可能对产品的安全性和可靠性有比较大的不利影响的零件所用材料，其环境适应性和耐久性必须：

a.建立在经验或试验的基础上；

b.考虑环境的影响，如温度、湿度、振动和大气污染等。

2 结构的每个构件必须适当地加以防护，以防因气候、腐蚀、磨损等原因引起的员伤或强度降低。

3 相邻结构若有较大温差，必须注意热变形引起过应力而造成零件的损坏。

4 应尽量减少应力集中，减少或避免附加弯矩，避免不利的传力形式出现，控制复杂载荷的应力出现。

5 为了提高结构的搞疲劳能力，在设计中必须注意：

a.合理的选材；

b.减少应力集中（如断面的急剧变化、尖角、锐边、表面粗糙度等）；

c.控制尺寸公差，以免负公差的累积导致构件的断面厚度偏小；

d.尽量采用干涉配合的紧固件；

e.局部关键部位应进行强化；

f.在噪声疲劳部位（发动机附近），应降低工作应力，或采用夹层结构。

6 为防止某个构件的损坏而引起其它构件的损坏，在设计时应采用：

a.止裂措施；

b.多路传力设计；

c.多重元件设计。

7 密封材料应具有良好的耐磨、耐压、耐油、耐高低温和抗老化的性能。

## 机构的设计准则

- 1 采用抗磨损措施，注意选择表面镀层或涂层，如正确选择金属镀层和化学处理方法。
- 2 防卡滞设计。应进行结构的刚度设计，提高抗弯和抗扭刚度，减少接触变形，提高公差配合精度，进行磨擦学设计等。
- 3 防止机构运动终止时冲击过大，应有缓冲装置。
- 4 起动和停止位置必要时可采用冗余设计。

### 3.4.2 可靠性设计检查表及其示例

设计人员在其产品设计中，应能预见到所有可能发生的故障模式，特别是那些与工作载荷无关的、由内部因素产生的载荷引发的故障模式，如：惯性载荷、热膨胀等影响产生的载荷，随工作时间推移而变化的间隙（如磨损）产生的载荷等，往往容易被忽略。而这些载荷在某种情况下，恰恰是导致故障的主要原因。有经验的设计人员对这些总是都能提出适当的预防措施，而对于缺少经验或对此领域不熟悉的设计人员容易忽视这些可能的、潜在的故障模式。因此有必要在产品的设计过程中，为设计人员提供一个设计检查表，检查设计人员在设计过程中是否对可能的、潜在的故障模式都考虑到了，以保证产品的设计质量和可靠性，不致重复发生过去已经发生过的故障。当然，设计检查表仅为经验的记录和总结，应将使用经验经常不断地反馈到设计检查表中，使之逐步完善。

在制定设计检查表时，应从设计方案、使用环境、材料选择、各种应力、工艺、安全、维修、试验等方面提出设计时应考虑的问题，以督促、检查设计人员是否全面地考虑了各方面的问题。

设计检查表中的问题在产品的设计之初就应予以回答，并贯穿于设计的全过程。越早回答所提的问题，对完善设计的价值越大。

故障分析的主要目的是在产品研制中，根据以往的工程经验和各种信息，采取各种有效的方法，预防产品的故障发生，或控制故障发生的概率在规定的范围内。因此，必须在产品的设计和生产过程中，对可能的故障陷患或薄弱环节进行分析，通过各种可靠性设计方法，并综合应用其它设计方法和传统的设计经验，预防或消除故障隐患。

机械产品在其长期的发展过程中，积累了大量的设计、制造和使用等方面的经验，因此机械产品的设计主要彩传统技术（即研究材料、强度、刚度、机构功能等）和以经验为主的设计规范、

设计准则，如材料的选定、结构形式、许用应力和安全系数等的确定，并应用可靠性分析技术的设计方法来保证产品的可靠性。

日本的一些企业总结机械产品可靠性设计的三大法宝：一是设计规范，二是故障模式影响分析和可靠性检查表，三是故障分析案例集。

对于不同的研制单位、不同的产品，其设计检查表是不同的。下面提供的设计检查表是一个通常格式，以便说明检查设计的方法。

在以下提出的设计检查表中，将要检查的问题分成23方面的问题，主要有：

(1) 设计思想 (2) 环境 (3) 运行 (4) 材料选用 (5) 应力 (6) 热影响 (7) 磨损 (8) 老化 (9) 表面精整加工 (10) 尺寸因素 (11) 制造 (12) 装配 (13) 动力源 (14) 轴承 (15) 密封 (16) 旋转部件 (17) 压力容器 (18) 液压、流体系统 (19) 连接 (20) 维修 (21) 仪器 (22) 试验 (23) 安全考虑

其中(1)～(12)方面的问题是比较通用的问题，适用于多数的机械设计；(13)～(18)方面的问题适用于一些常用的专用部件；最后的(19)～(23)方面的问题属于一般的问题，但这些问题要等部件的设计方案都确定后再考虑。以下为设计检查表要检查的具体问题。

### 3.5 机械故障原因分析的通用程序

故障分析的目的在于判别故障的性质、查找故障原因，更重要的在于将故障机理识别清楚，提出有效的改进措施，以预防故障重复发生。通过故障分析，找到造成故障的真正原因，从设计、材料选择、加工制造、装配调整、使用与保养等方面采取措施，提高机械产品的可靠性。

故障原因分析是一门涉及众多技术领域的综合学科，例如：系统分析、结构分析、材料物理、测试分析，以及有关疲劳、断裂、磨损、腐蚀等各种学科的知识。这里仅对故障原因分析程序和方法作一些简要的介绍。值得注意的是：发生故障的部件、零件虽各不相同，其分析的方法与步骤也各有差异，但故障分析的基本程序却是共同的。

机械故障原因分析的通用程序一般是：

#### 1 现场调查

(a) 收集背景数据和使用条件，其主要内容有：

- a. 部件发生故障的日期、时间；工作温度和环境；
- b. 部件损坏的程度，部件故障发生的顺序；
- c. 故障发生时的操作阶段，故障件有无反常情况或不正常的音响；

- d.对故障部件及其邻近范围部件进行拍照或画草图；
  - e.在使用中可以导致故障的任何差错；
  - f.使用人员的技术水平和对故障的看法。
- (b) 故障现场摄像或照相的重点是：
- a.对有可能迅速变更位置的事，应尽快地拍照。它包括：设备；仪表指示的读数和控制的位置；那些或能被天气、来往的行人、车辆或者清扫人员去掉的证据。例如，地面上的痕迹、受热证据、液体等等。
  - b.正在燃烧的火灾，摄取烟和火焰的彩色图像。调查人员可以分析燃烧材料的种类和温度的高低等信息。
  - c.对整个故障现场要有足够的表示。在特写镜头中，应包括一件熟悉的东西在内，甚至放把直尺，以表示拍摄实物的尺寸。对断口照片，一定要从不同角度来反映断口形貌。
  - d.重要的部件或断口要有特写镜头。开始用广角镜头表示部件之间的关系，如果需要可进行实验室照相。这对断口的形貌和成分分析都是必要的。
- (c) 故障件的主要历史资料。包括：
- a.部件名称，标记，制造编号，厂家，使用单位；
  - b.部件的功能，使用的材料，设计书中规定的有关项目；
  - c.到发生故障时的使用时间；
  - d.设计图样，说明书，指导部件生产、制造、检验和操作规范；
  - e.生产厂的验收技术报告的质量控制报告；
  - f.使用情况记录；
  - g.过去的故障情况记录和维修报告等。
- (d) 对故障件进行初步检查。
- (e) 故障件残骸的鉴别、保存和清洗。

## 2 分析并确定故障原因和故障机理

- (a) 对故障件的检查与分析。包括无损控伤检验、机械性能试验、断口的宏观与微观检查与分析、金相检查与分析、化学分析等。
- (b) 必要的理论分析和计算。包括强度、疲劳、断裂力学分析及计算等。
- (c) 初步确定故障原因和机理。
- (d) 模拟试验，确定故障原因与机理。

### 3 分析结论

当每一件故障分析工作做到一定阶段或试验工作结束时，都要对所获得的全部资料、调查记录、证词和测试数据，按设计、材料、制造、使用四个方面是否有问题来进行集中归纳、综合分析和判断处理，逐步形成初步的简明结论。

对设计和材料的要求以说明书为准，对制造过程以故障部件的分析检测结果为准，而对使用则以操作规程为准。反复核对其中的差异，正是这种差异能够说明故障的起因。

对汇集整理力学测量数据、化学分析数据和断口形貌以及显微镜组织照片的同时，要回答或说明这些结果是否符合设计要求和使用要求。

故障分析结束时必须提出一个结论明确、建议中肯的报告。一方面是为了改进工作、积累资料、交流经验；另一方面也是为索赔和法律仲裁提供依据。

分析招待主要内容有：

故障分析结论；

改进措施与建议及对改进效果的预计；

故障分析报告提交给有关部门，并反馈给有关承制单位；

必要时应对改进措施的执行情况进行跟踪和管理。

## 3.6 机械故障原因分析方法

推土机的柴油机飞轮飞裂的故障分析

### 1 现场调查

(a) 收集背景数据及使用条件。

(b) 损坏的飞轮初步检查：

a. 飞轮碎成五大块、四小块。飞轮有五块较大的碎块，其中三条断裂线通过M30螺孔。M30螺栓共找到4个，其中一个螺栓的螺纹部分断在螺孔内，三个基本完好，但有一个弯曲。现场找到飞轮齿圈大小五块。

b. 飞轮的一块飞出7.5米远。

c. 一碎块两侧（内固定孔凸台附近及外侧螺孔附近）有锈蚀，面积约9cm<sup>2</sup>，据反映旧伤长约25mm。

d. 调速器拉板弯曲8.2mm。

(c) 对现场失效的飞轮带回二大残块及孔内一圈的小块作失效分析。



## 2 分析并确定故障原因和机理

## (1) 进行检验与分析

(a) 机械性能试验：材料为HT20~40

拉伸试验结果：Sb=97.15MPa

Ss=85MPa

远低于标准抗拉强度限Sb=200MPa(GB979-67)。

硬度HB：内孔边 114、111、107

外 缘 111、108、107

远低于标准值HB=170~241。

## (b) 化学分析

材料	C%	Si%	Mn%	P%	S%
该飞轮	3.18	1.58	0.38	0.052	0.092
标准	3.13~3.41	1.52~2	0.6~0.9	<0.3	<0.12

## (c) 断口分析：

断裂区为解理断口，外螺孔及内孔附近有疲劳辉纹及磨痕，内孔附近有疏松等缺陷。

(d) 金相检查：基本组织为铁素体加少量珠光体，石墨为短片状。

## (2) 理论分析与计算（强度计算）

对损坏的飞轮进行有限元计算，最大周向应力发生在外螺孔内边，为0.94384MPa，离孔6mm处为34.1MPa，最大径向应力在内孔边为55.6MPa，凸台孔处为12.9MPa，应变片遥测，测得结果与有限元计算结果相吻合，在受力不均时，在700r/min左右有较大动应力（超过工作应力），飞车（2.5n）时应力超过强度极限（n为工作转速）。

## (3) 断裂力学分析

断裂参数测定：测和K1c为10 ~13MPa·m<sup>1/2</sup>(32~41.7kg·mm<sup>-3/2</sup>)

断纹扩展速率da/dn=0.1747×10<sup>-9</sup>△K<sup>4.49818</sup>;

比球墨铸铁及一般钢材的裂纹扩展速率快两个数量级,在△K=20左右裂纹扩展就达10<sup>-3</sup>mm/次数量级。

因而可算出临界裂纹尺寸如下：

工作条件K1c	K1d	M	M1	Q	σ(MPa)	ac(mm)
1500r/min(外螺孔处)	29	2.8	1.09	2.3	0.405	4.26

1500r/min(内螺孔处)	29	2.5	1.09	2.3	0.208	20.27
1500r/min(内孔处)	32	2.5	1.09	2.3	0.208	24.7

可看出旧痕和临界裂纹尺寸相近。

#### (4) 初步确定故障原因和机理

经分析可初步确定:飞轮的化学成分、硬度、强度、断裂韧性均没有达到标准规定值,同时飞轮中还存在疏松等缺陷,产品质量不合格是造成飞裂事故的主要原因。

飞轮已有缺陷,经疲劳裂纹扩展已达临界裂纹尺寸(外侧1.29mm,内侧24.7mm),在正常转速时即可脆断

### 3 结果(对策与实施)

(a) 灰口铸铁飞轮由于强度、韧性、疲劳裂纹抗力都极差,采用目前结构的飞轮是极不安全的,应立即全部更换为已经安全评定过的球墨铸铁飞轮;

(b) 应严格控制飞轮质量,改进铸造工艺,保证外螺孔及内孔处不存在表面裂纹,增加控伤工序;

(c) 应采取各种措施,防止飞车;

(d) 由于飞轮离合器结构不合理,为从根本上改进,改为湿式离合器,对湿式离合器亦应进行可靠性评审。

## 4 可靠性试验和数据分析

### 4.1 可靠性试验

进行可靠性设计时,为明确所涉及产品可靠性的要求,指定可靠性的目标、预计和验证可靠性有关特征量等,必须掌握可靠性数据。可靠性实验是获得可靠性数据的重要手段。可靠性实验是为了提高或证实产品(包括系统、身背、零部件及材料)可靠性而进行试验的总称。寿命试验是可靠性试验的一个很重要的部分,是评价分析产品寿命特征量所进行的试验。

寿命试验的几种分类

1 根据试验场所分类:根据试验截止情况分类根据试验中失效后是否用新事件替换后继续试验分类

(1) 现场寿命试验 这是产品在实际使用条件下观测到的实际寿命数据,最能说明产品可靠性的特征,可以说是最终的客观标准。因此,收集现场中产品的寿命数据很重要。然而,收集现

场数据也会遇到各种困难，需要时间长，工作情况也难以一致，而且必须要有相应的组织管理工作。

(2) 实验室寿命试验 实验室试验是模拟现场情况的试验，它将现场重要的应力条件搬到实验室，并加以人工的控制，也可进行影响寿命的单项或少数几项应力组合的试验，也可设法缩短试验时间加速取得试验的结果。

## 2 根据试验截止情况分类

(1) 全数寿命试验 样本全部失效才停止试验。这种试验可以获得较完整的数据，统计分析结果也较为可信。但是所需试验时间较长，甚至难以实现。

(2) 实时截尾寿命试验 试验到规定的时间，不管样本已失效多少，试验就截止。

(3) 定数截尾寿命试验 试验到规定的失效数时试验就截止。若规定失效数为全部试样 $n$ ，即为全数寿命试验。

## 3 根据试验中失效后是否用新事件替换后继续试验分类

(1) 有替换定时截尾试验；

(2) 有替换定数截尾试验；

(3) 无替换定时截尾试验；

(4) 无替换定数截尾试验（包括全数寿命试验）。

此外尚有分组最小值寿命试验，中止寿命试验等。分组最小值寿命试验是将 $n$ 个试件分为 $m$ 个组，各组试件同时试验到1个失效就截止试验，以节省试验时间。中止寿命试验在试验开始时，样本大小为 $n$ ，随着试验的进行，有些试件中余逐渐截止，这在收集现场数据时，就常发生这种情况。

## 4.2 可靠性数据分析中常用的概率分布

表9 二项分布

名称 记号	概率分布及其定义域、 参数条件	均值 $E(X)$	方差 $D(X)$	图形

二项分布	$P_2(X=x) = \binom{n}{x} p^x q^{n-x}$ $x=0,1,\dots,n$ $0 < p < 1, p+q=1$ $n \text{ 为正整数}$	$np$	$npq$	
------	-------------------------------------------------------------------------------------------	------	-------	--

二项分布：当进行一种试验只有两种可能的结果时，叫成败型试验。在可靠性工程中，二项分布可用来计算部件相同并行工作冗余系统的成功概率，也适用于计算一次使用系统的成功概率。

表10 泊松分布

名称记号	概率分布及其定义域、参数条件	均值 E(X)	方差 D(X)	图形
泊松分布 P(λ)	$Pp(X=x) = \frac{\lambda^x}{x!} e^{-\lambda}$ $x=0,1,2,\dots$ $\lambda > 0$	$\lambda$	$\lambda$	

泊松分布：一个系统，在运行过程中由于负载超出了它所能允许的范围造成失效，在一段运行时间内失效发生的次数X是一随机变量，当这随机变量有如下特点时，X服从泊松分布。特点1：当时间间隔取得极短时，智能有0个或1个失效发生；特点2：出现一次失效的概率大小与时间间隔大小成正比，而与从哪个时刻开始算起无关；特点3：各段时间出现失效与否，是相互独立的。例如：飞机被击中的炮弹数，大量螺钉中不合格品出现的次数，数字通讯中传输数字中发生的误码个数等随机变数，就相当近似地服从泊松分布。

表11 超几何分布

名称记号	概率分布及其定义域、参数条件	均值 E(X)	方差 D(X)	图形
------	----------------	---------	---------	----

超几何分布 $H(n, M, N)$	$P_H(X=x) = \frac{\binom{N-M}{n-x} \binom{M}{x}}{\binom{N}{n}}$ $x = \max(0, n - N + M), \dots, \min(n, M)$ $N, M, n \text{ 为正整数}$ $0 \leq M \leq N, 0 \leq n \leq N$	$\frac{nM}{N}$	$\frac{n(N-n)(N-M)M}{N^2(N-1)}$	
-----------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------	---------------------------------	--

表12 正态分布(高斯分布)

名称记号	概率分布及其定义域、参数条件	均值 E(X)	方差 D(X)	图形
正态分布(高斯分布) $N(\mu, \sigma)$	$f_N(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$ $-\infty < x < \infty$ $-\infty < \mu < \infty, \sigma > 0$	$\mu$	$\sigma^2$	

正态分布：是在机械产品和结构工程中，研究应力分布和强度分布时，最常用的一种分布形式。它对于因腐蚀、磨损、疲劳而引起的失效分布特别有用。

表13 均匀分布

名称记号	概率分布及其定义域、参数条件	均值 E(X)	方差 D(X)	图形
均匀分布 $u(a, b)$	$f_u(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 0, & x < a \text{ 或 } x > b \end{cases}$ $-\infty < a < b < \infty$	$\frac{a+b}{2}$	$\frac{(b-a)^2}{12}$	

表14  $\chi^2$ 分布

名称记号	概率分布及其定义域、参数条件	均值 E(X)	方差 D(X)	图形
------	----------------	------------	------------	----

<p><math>\chi^2</math>分布 <math>\chi^2(v)</math></p>	$f_{\chi^2}(x) = \begin{cases} \frac{1}{2^{\frac{v}{2}} \Gamma(\frac{v}{2})} x^{\frac{v}{2}-1} e^{-\frac{x}{2}}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$ <p>自由度<math>v</math>为正整数</p>	<p><math>v</math></p>	<p><math>2v</math></p>	
---------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------	------------------------	--

表15 指数分布

名称 记号	概率分布及其定义域、参数条件	均值 $E(X)$	方差 $D(X)$	图形
<p>指数分布 <math>e(\lambda)</math></p>	$f_e(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$ <p><math>\lambda &gt; 0</math></p>	<p><math>\frac{1}{\lambda}</math></p>	<p><math>\frac{1}{\lambda^2}</math></p>	

指数分布：许多电子产品的寿命分布一般服从指数分布。有的系统的寿命分布也可用指数分布来近似。它在可靠性研究中最常用的一种分布形式。指数分布是伽玛分布和威布尔分布的特殊情况，产品的失效是偶然失效时，其寿命服从指数分布。

表16 威布尔分布

名称记号	概率分布及其定义域、参数条件	均值 $E(X)$	方差 $D(X)$	图形
<p>威布尔分布(III型极值分布)<math>W(k, a, b)</math></p>	$f_W(x) = \begin{cases} \frac{k}{b} \left(\frac{x-a}{b}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^k}, & x \geq a \\ 0, & x < a \end{cases}$ <p>形状参数 <math>k &gt; 0</math> 尺度参数 <math>b &gt; 0</math> 位置参数 <math>a</math></p>	<p><math>b\Gamma(1+\frac{1}{k})+a</math></p>	<p><math>b^2[\Gamma(1+\frac{2}{k})-\Gamma^2(1+\frac{1}{k})]</math></p>	

威布尔分布：在可靠性工程中被广泛应用，尤其适用于机电类产品的磨损累计失效的分布形式。由于它可利用概率纸很容易地推断出它的分布参数，被广泛应用与各种寿命试验的数据处理。

表17  $\Gamma$ 分布(伽马分布)

名称 记号	概率分布及其定义域、参数条件	均值 E(X)	方差 D(X)	图形
Γ分布 (伽马分布) Γ( α, β)	$f_{\Gamma}(x) = \begin{cases} \frac{\beta^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\beta x}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$	$\frac{\alpha}{\beta}$	$\frac{\alpha}{\beta^2}$	

伽玛分布：要比指数分布和正态分布更具有普遍性，适用于各种形式的分布。能用来表示早期失效、偶发失效和耗损失效等不同的失效分布。

表18 瑞利分布

名称 记号	概率分布及其定义域、参数条件	均值 E(X)	方差 D(X)	图形
瑞利分布 R(μ)	$f_R(x) = \begin{cases} \frac{x}{\mu^2} e^{-\frac{x^2}{2\mu^2}}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$ <p>μ &gt; 0</p>	$\sqrt{\frac{\pi}{2}} \mu$	$\frac{(4-\pi)\mu^2}{2}$	

表19 F分布

名称 记号	概率分布及其定义域、参数条件	均值E(X)	方差D(X)	图形
F分布 F (V <sub>1</sub> , V <sub>2</sub> )	$f_F(x) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\frac{v_2}{2}) \left(\frac{v_1}{2}\right)^{\frac{v_1}{2}}}{\beta(\frac{v_1}{2}, \frac{v_2}{2})} \frac{x^{\frac{v_1}{2}-1}}{\left(1 + \frac{v_1 x}{v_2}\right)^{\frac{v_1+v_2}{2}}}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$ <p>贝塔函数  <math display="block">\beta\left(\frac{v_1}{2}, \frac{v_2}{2}\right) = \frac{\Gamma(\frac{v_1}{2})\Gamma(\frac{v_2}{2})}{\Gamma(\frac{v_1+v_2}{2})}</math>                     自由度v<sub>1</sub>, v<sub>2</sub>为正整数</p>	$\frac{v_2}{v_2-2} (v_2 > 2)$	$\frac{2v_2^2(v_1+v_2-2)}{v_1(v_2-2)2(v_2-4)} (v_2 > 4)$	

表20 β分布

名称记号	概率分布及其定义域、参数条件	均值E(X)	方差D(X)	图形
β分布 (贝塔分布) β(α, β)	$f_{\beta}(x) = \begin{cases} \frac{x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}}{\beta(\alpha, \beta)}, & 0 < x < 1 \\ 0, & x \leq 0 \text{ 或 } x \geq 1 \end{cases}$ 贝塔函数 $\beta(\alpha, \beta) = \frac{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}{\Gamma(\alpha + \beta)}$ $\alpha > 0, \beta > 0$	$\frac{\alpha}{\alpha + \beta}$	$\frac{\alpha\beta}{(\alpha + \beta + 1)(\alpha + \beta)^2}$	

表21 对数正态分布

名称记号	概率分布及其定义域、参数条件	均值E(X)	方差D(X)	图形
对数正态分布 (自然对数) ln(μ, σ²) (常用对数) lg(μ, σ²)	$f_{ln}(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$ $f_{lg}(x) = \begin{cases} \frac{lg e}{\sigma x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lg x - \mu)^2}{2\sigma^2}}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$	$\mu + \frac{\sigma^2}{2}$ $e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}$	$e^{2\mu + \sigma^2}(e^{\sigma^2} - 1)$ $10^{2\mu + \frac{\sigma^2}{2} \lg 10} \times (10^{\sigma^2 \lg 10} - 1)$	

表22 t分布 (学生分布)

名称记号	概率分布及其定义域、参数条件	均值E(X)	方差D(X)	图形
t分布 (学生分布) t(ν)	$f_t(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{\nu+1}{2}\right)}{\sqrt{\nu\pi} \Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)} \times \left(1 + \frac{x^2}{\nu}\right)^{-\frac{\nu+1}{2}}$ 自由度ν为正整数	0 (ν > 1)	$\frac{\nu_2}{\nu_2 - 2} (\nu_2 > 2)$	

表23 最大 I 型极值分布 (贡贝尔分布)

名称记号	概率分布及其定义域、参数条件	均值E(X)	方差D(X)	图形
------	----------------	--------	--------	----



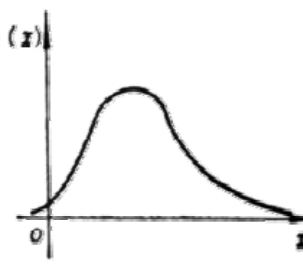
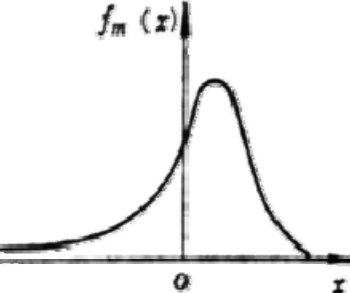
最大 I 型极值分布 (贡贝尔分布) ( $\alpha$ , $\mu$ )	$f_M(x) = \frac{1}{\sigma} e^{-\frac{x-\mu}{\sigma}} e^{-\frac{x-\mu}{\sigma}}$ $-\infty < x < \infty$ $-\infty < \mu < \infty$ $0 < \sigma$	$\mu + \gamma\sigma$ 欧拉常数 $\gamma = 0.5772$	$\frac{\pi^2}{6} \sigma^2 \approx (1.283\sigma)^2$	
-----------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------	----------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------

表24 最小 I 型极值分布 (贡贝尔分布)

名称记号	概率分布及其定义域、参数条件	均值E(X)	方差D(X)	图形
最小 I 型极值分布 (贡贝尔分布) $m(\mu, \sigma)$	$f_m(x) = \frac{1}{\sigma} e^{-\frac{x-\mu}{\sigma}} e^{-\frac{x-\mu}{\sigma}}$ $-\infty < x < \infty$ $-\infty < \mu < \infty$ $0 < \sigma$	$\mu - \gamma\sigma$ 欧拉常数 $\gamma = 0.5772$	$\frac{\pi^2}{6} \sigma^2 \approx (1.283\sigma)^2$	

**参考资料清单:**

- [1] 徐灏等. 机械设计手册. 机械工业出版社, 2000
- [2] 李良巧、顾唯明. 机械可靠性设计与分析. 国防工业出版社, 1998
- [3] 周广涛. 计算机辅助可靠性工程. 宇航出版社, 1990
- [4] 中国机械网