

# 第十章 可靠性

2009-4-13

苏秦主编《质量管理与可靠性》  
机械工业出版社





# 第一节 可靠性概述

2009-4-13

苏秦主编《质量管理与可靠性》  
机械工业出版社

# 可靠性定义

- ❖ 我国国家标准可靠性基本名词术语及定义  
**GB3187-82**规定的可靠性定义为：“产品在规定的条件和规定的时间内，完成规定功能的能力。”
- ❖ 靠性的四大要素：
  - (1) 可靠性对象。
  - (2) 规定的条件。
  - (3) 规定的时间。
  - (4) 规定的功能。

# 可靠性的评价尺度

## ❖ 可靠度

- ❖ 可靠度（**Reliability**）是指产品在规定的条件和规定的时间内，能正常完成规定功能的概率，通常用**R**来表示。
- ❖ 因为可靠度常常是时间的函数，因此又称为可靠度函数，表示为 **$R=R(t)$** 。就概率分布而言，又称为可靠度分布函数，其取值范围为： **$0 \leq R(t) \leq 1$** 。
- ❖ 产品完成规定功能与不能完成规定功能是互逆事件，因此可靠度与不可靠度之间的关系有：

$$F(t) = 1 - R(t)$$

# 可靠性的评价尺度

## ❖ 维修性

❖ 维修性是指在规定条件下使用的产品，在规定时间内按规定的程序和方法进行维修时，保持或恢复到完成规定功能的能力。

❖ 常用的维修性尺度有：

(1) 维修度  $M(t)$

(2) 有效度  $A(t)$

(3) 最大维修时间  $t_{\max}$

(4) 修复率  $\mu(t)$

(5) 平均修复时间 (MTTR)

# 可靠性的评价尺度

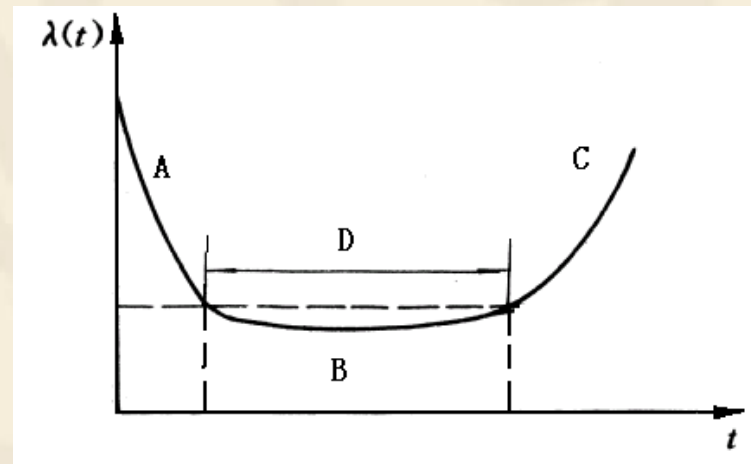
## ❖ 故障率

- ❖ 故障率又称为失效率，是指产品工作到某一时刻时，在单位时间内失效或出现故障的概率。
- ❖ 在给定的时间区间 $[t_1, t_2]$ 内，故障概率可以用不可靠度函数表示为

$$\int_{t_1}^{t_2} f(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^{t_2} f(\tau) d\tau - \int_{-\infty}^{t_1} f(\tau) d\tau = F(t_2) - F(t_1)$$

- ❖ 在给定的时间区间 $[t_1, t_2]$ 内，系统故障发生的比率称为该区间的平均故障率；当故障率定义为给定的区间 $[t, t + \Delta t]$ 趋近于零时，此时的故障率为瞬时故障率，简称为故障率。

# 可靠性的评价尺度

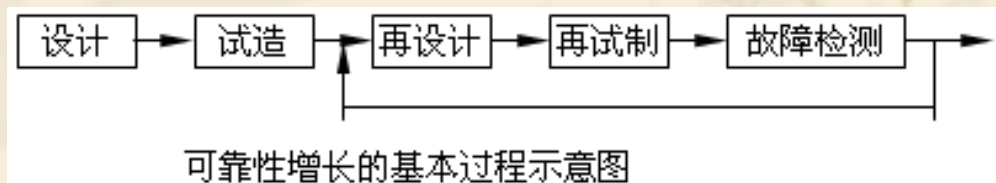


A—早期故障期； B—偶然故障期；  
C—耗损故障期； D—使用寿命

# 可靠性的评价尺度

## ❖ 可靠性增长

- ❖ 在产品最初研制和试验期间，需要反复改进产品设计和制造中的缺陷，可靠性经常得到改善，这种改善可以归因为一些因素的变化和时间的推移得到的经验，用于设计生产更好的产品，使产品的可靠性增加，这种现象叫做“可靠性增长”。



# 可靠性的评价尺度

- ❖ 可靠寿命
- ❖ 可靠寿命是指可靠度为给定值时相对应的工作时间,也称为可靠度寿命。
- ❖ 平均寿命
- ❖ 平均寿命（Mean Life）是指产品寿命的平均值，而产品的寿命则是指产品无故障或不失效的工作时间。

# 可靠性的评价尺度

## ❖ 置信度

❖ 置信度反映的是从母体中抽取的子样进行测试、研究，用子样的试验结果去估计或推断母体性质时的可信程度，是子样的试验结果在母体的某个概率分布参数，在某区间内出现的概率。

## ❖ 保障性

❖ 保障性也称为维修保障性，是指产品的设计特性和计划的保障资源能满足产品使用要求的能力，常常用保障性参数定性和定量地描述产品保障性。

# 可靠性的评价尺度

- ❖ 可用性
- ❖ 可用性（**Availability**）是在要求的外部资源得到保证的前提下，产品在规定的条件下和规定的时刻或时间内处于可执行规定功能状态的能力，即要用产品时就可用的能力。
- ❖ 可信性
- ❖ 可信性是一集合性术语，用来表示可用性及其影响因素：可靠性、维修性、维修保障性，它仅用于非定量的一般性描述，可信性的定性和定量具体要求通过可用性、可靠性、维修性、维修保障性的定性和定量要求来表达。



## 第二节 常见故障分布及其故障率函数

2009-4-13

苏秦主编《质量管理与可靠性》  
机械工业出版社

# 指数分布及其故障率函数

- ❖ 指数分布函数
- ❖ 指数分布的故障前时间 $t$ 的概率密度函数和累积分布函数分别为

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (t \geq 0, \lambda > 0)$$

$$F(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau = \int_0^t \lambda e^{-\lambda \tau} d\tau = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (t \geq 0, \lambda > 0)$$

式中表示故障（失效）率，是指数分布的主要参数。

- ❖ 指数分布的可靠度函数为

$$R(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda t}) = e^{-\lambda t}, \quad (t \geq 0, \lambda > 0)$$

# 指数分布及其故障率函数

## ❖ 指数分布的故障率函数

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

- ❖ 数分布函数的故障率函数为，是一个常数，是平均寿命（**MTBF**）的倒数。

# 指数分布及其故障率函数

- ❖ 指数分布的“无记忆性”
- ❖ 指如果某产品的工作时间服从指数分布时，从开始到工作一段时间 $t_0$ 内，其可靠度为，工作时间 $t_0$ 结束后，产品仍然可以工作，在下一个工作时间间隔 $t_0$ 内，该系统仍然和新的一样，其可靠度仍为。即前一个故障对下一个故障无后效作用。

# 指数分布及其故障率函数

- ❖ 如果系统已经工作了 $t_0$ 时间后，其在 $t_0$ 以后的工作时间 $t$ 的可靠度可用条件概率来表示为

$$\begin{aligned} R(t) &= P(T > t) = P(\{T > t_0 + t\} | \{T > t_0\}) = \frac{P(\{T > t_0 + t\} \cap \{T > t_0\})}{p(T > t_0)} \\ &= \frac{P(T > t_0 + t)}{p(T > t_0)} = \frac{e^{-\lambda(t_0 + t)}}{e^{-\lambda t_0}} = e^{-\lambda t} \end{aligned}$$

# 正态分布及其故障率函数

❖ 正态分布的特性

❖ 正态分布的故障概率密度  $f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}$

❖ 正态分布的累积分布函数  $F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt$

❖ 可靠度函数为  $R(t) = 1 - F(t) = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt$

# 正态分布及其故障率函数

- ❖ 标准正态分布
- ❖ 将正态分布曲线的均值移至零处，使  $\mu = 0$ ，又使标准离差  $\sigma = 1$ ，则得到标准正态分布，表示为  $N(0, 1)$ 。
- ❖ 正态分布的可靠度函数用标准正态分布的形式表示为：
$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t - \mu}{\sigma}\right)$$

# 正态分布及其故障率函数

❖ 正态分布的故障率函数：

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1-F(t)}$$

❖ 用标准正态分布形式表示为：

$$\lambda(t) = \frac{\varphi\left(\frac{t - \mu}{\sigma}\right)}{\sigma R(t)}$$

# 对数正态分布及其故障率函数

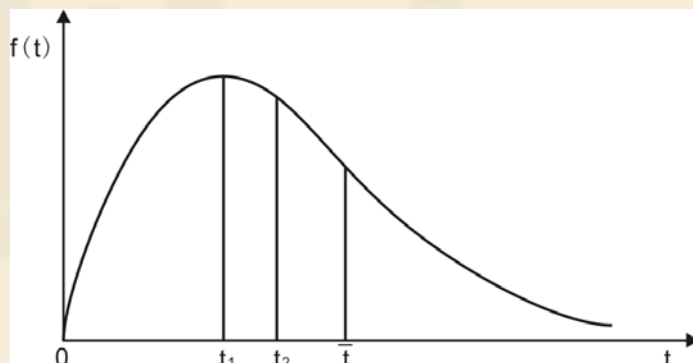
- ❖ 对数正态分布函数
- ❖ 如果随机变量 $t$ 的对数 $x = \ln t$ 服从正态分布，则 $t$ 为对数正态分布，对数正态分布的故障概率密度函数和累计分布函数为

$$f(t) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right)^2}, \quad t \geq 0$$

$$F(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau = \int_0^t \frac{1}{\sigma \tau \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln \tau - \mu}{\sigma} \right)^2} d\tau$$

# 对数正态分布及其故障率函数

## ❖ 对数正态分布的故障密度函数



## ❖ 对数正态分布的故障率函数

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\varphi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)}{t\sigma[1 - \Phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)]} = \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2}}{\sigma t \sqrt{2\pi}[1 - \Phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)]}$$

## ❖ 为标准正态分布的概率密度函数， $\mu$ 和 $\sigma$ 分别为故障时间随机变量 $T$ 的自然对数 $\ln T$ 的均值和标准离差。

# 伯努利试验和二项分布

- ❖ 对试验E重复进行一系列试验，如果在每次试验中只有两种可能的结果，而且结果是相互独立的；每次试验是独立进行的，与其它次试验的结果无关；每次试验事件发生的概率在整个试验中是相同的。只要满足这些条件的试验就为伯努利试验。伯努利试验中，事件发生的次数称为随机事件，它服从二项分布，二项分布是一种离散型分布。

# 伯努利试验和二项分布

- ❖ 如果投入 $n$ 个相同的零件进行试验，令试验出现故障或失效即不可靠度为 $F(t) = p$ ，可靠度 $R(t) = 1 - F(t) = 1 - p = q$ ，则在规定的时间内零件出现故障或失效这一事件发生 $k$ 次的概率为

$$P(T = k) = C_n^k p^k (1 - p)^{n-k}$$

$T$ 为随机事件发生的次数

- ❖ 如果进行的 $n$ 个产品的试验中，仅仅允许 $r$ 个试验失效，则通过试验的概率为

$$P(k \leq r) = \sum_{k=0}^r C_n^k [F(t)]^k [R(t)]^{n-k}$$

# 泊松分布

- ❖ 当 $p$ 较小( $p \leq 0.1$ ),而 $n$ 较大( $n \geq 50$ )时,可用泊松分布近似二项分布。

$$P_n(T = k) = \frac{(np)^k e^{-np}}{k!} = \frac{\mu^k e^{-\mu}}{k!}$$

- ❖ 如果对 $n$ 个某相同产品进行可靠性试验, 仅仅允许 $r$ 个产品失效, 则通过试验的概率

$$P_n(k \leq r) = \sum_{k=0}^r \frac{(np)^k e^{-np}}{k!} = \sum_{k=0}^r \frac{\mu^k e^{-\mu}}{k!}$$

- ❖ 靠度和计算备件数

$$R(t) = P_n(k \leq r) = \sum_{k=0}^r \frac{\mu^k e^{-\mu}}{k!}$$

$k$ 为备件数,  $R(t)$  为可靠度

# 威布尔分布及其故障率函数

## ❖ 威布尔分布函数

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \delta}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t - \delta}{\eta} \right)^\beta} \quad t \geq \delta \geq 0$$

- ❖ 式中  $\beta$  通称为形状参数，它影响威布尔分布曲线的形状，也叫做威布尔分布斜率； $\eta$  为尺度参数； $\delta$  为位置参数；这三个威布尔参数对威布尔分布曲线有很大的影响，它们总是正的。

- ❖ 可靠度函数为  $R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left( \frac{t - \delta}{\eta} \right)^\beta}$

- ❖ 威布尔分布的故障率函数为  $\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \delta}{\eta} \right)^{\beta-1}$

# 伽马分布及其故障率函数

- ❖ 伽马分布的故障密度函数（ $\eta$  是形状参数， $\lambda$  是尺度参数）

$$f(t) = \frac{\lambda^\eta}{\Gamma(\eta)} t^{\eta-1} e^{-\lambda t} \quad t \geq 0, \eta > 0, \lambda > 0$$

- ❖ 伽马分布的可靠度函数

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \sum_{k=\eta}^{\infty} \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!} = \sum_{k=0}^{\eta-1} \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!}$$

- ❖ 伽马分布的故障率函数为

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\frac{\lambda^\eta}{\Gamma(\eta)} t^{\eta-1} e^{-\lambda t}}{\sum_{k=0}^{\eta-1} \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!}}$$



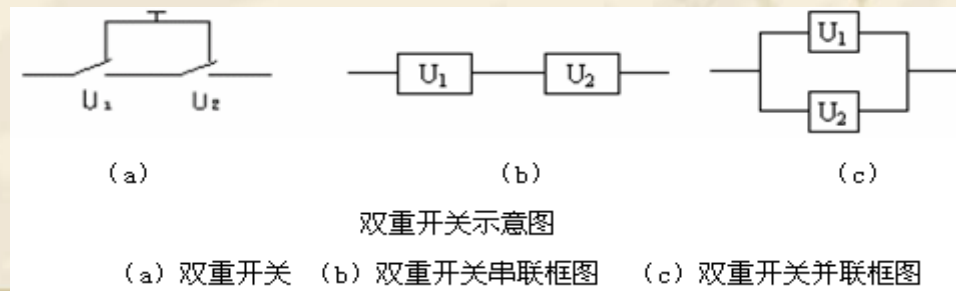
## 第三节 系统可靠性分析模型

2009-4-13

苏秦主编《质量管理与可靠性》  
机械工业出版社

# 可靠性框图

- ❖ 系统的可靠性框图表示产品每次使用能成功地完成任务时所有子系统或单元之间的相互依赖关系。
- ❖ 框图中每一方框代表在评定系统可靠性时必须考虑的，并具有与方框中相联系的可靠性值的单元或功能。所有连接方框的线没有可靠性值。导线或连接器单独放入一个方框或作为一个单元的一部分。所有方框就故障率或失效率而言是相互独立的。

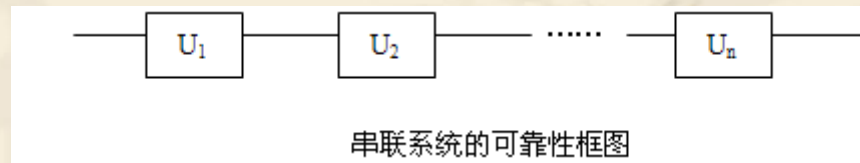


双重开关示意图

(a) 双重开关 (b) 双重开关串联框图 (c) 双重开关并联框图

# 串联模型

- ❖ 串联模型的可靠性框图
- ❖ 组成系统的所有单元中的任一单元的失效或出现故障，都会导致整个系统失效或出现故障的系统称为串联系统。



# 串联模型

- ❖ 串联模型的可靠度计算
- ❖ 根据概率计算的基本规则，可得串联系统中可靠度的表达式为：

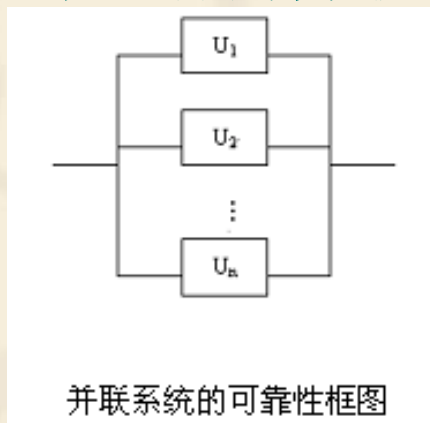
$$R_S = P(U) = P(U_1 \cap U_2 \cap \dots \cap U_n)$$

- ❖ 依据乘法法则有：

$$R_S = \prod_{i=1}^n P(U_i) = \prod_{i=1}^n R_i$$

# 并联模型

- ❖ 并联模型的可靠性框图
- ❖ 组成系统的所有子系统或单元都失效或出现故障时才会失效或出现故障的系统称为并联系统。

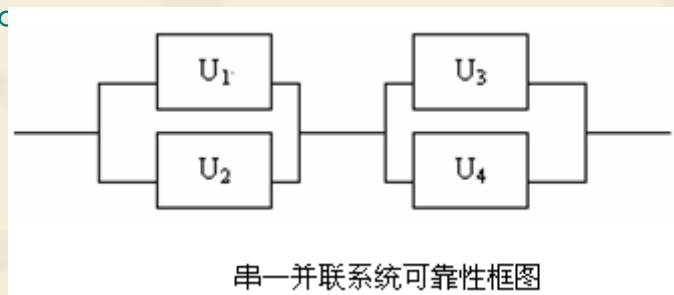


- ❖ 并联模型的可靠度计算公式

$$R_S = 1 - F_S = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$$

# 串—并联混合模型

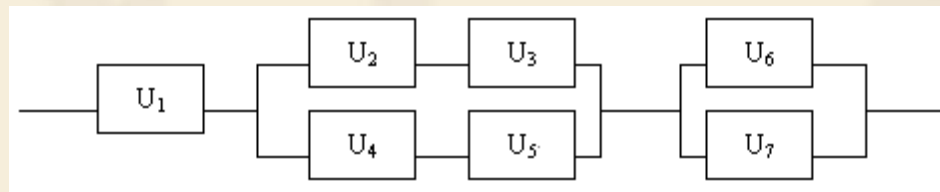
- ❖ 串—并联混合模型的可靠性框图
- ❖ 把若干个串联系统或并联系统重复地加以串联或并联，得到更复杂的可靠性结构模型，称为串—并联混合系统。



- ❖ 串—并联混合模型，是基本串联和并联系统组合，对于其可靠性的计算，可以连续地用串联和并联的基本公式来分析计算。

# 串—并联混合模型

- ❖ 例 某系统由7个单元串并联组成，如图所示，已知这7个单元的可靠度为 $R_1=R_2=R_3=R_4=R_5=R_6=R_7=0.91$ ，试求该系统的可靠度。



- ❖ 解：首先计算 $U_2$ 和 $U_3$ 、 $U_4$ 和 $U_5$ 组成的串联子系统 $U_{23}$ 和 $U_{45}$ 的可靠度分别为

$$R_{23}(t) = R_2 R_3 = 0.91 \times 0.91 = 0.8281$$

$$R_{45}(t) = R_4 R_5 = 0.91 \times 0.91 = 0.8281$$

# 串—并联混合模型

- ❖ 然后计算 $U_{23}$ 和 $U_{45}$ 再并联的子系统 $U_{2345}$ 以及 $U_6$ 和 $U_7$ 组成的并联子系统 $U_{67}$ 的可靠度分别为

$$R_{2345}(t) = 1 - [1 - R_{23}(t)][1 - R_{45}(t)] = 1 - (1 - 0.8281)^2 = 0.97045$$

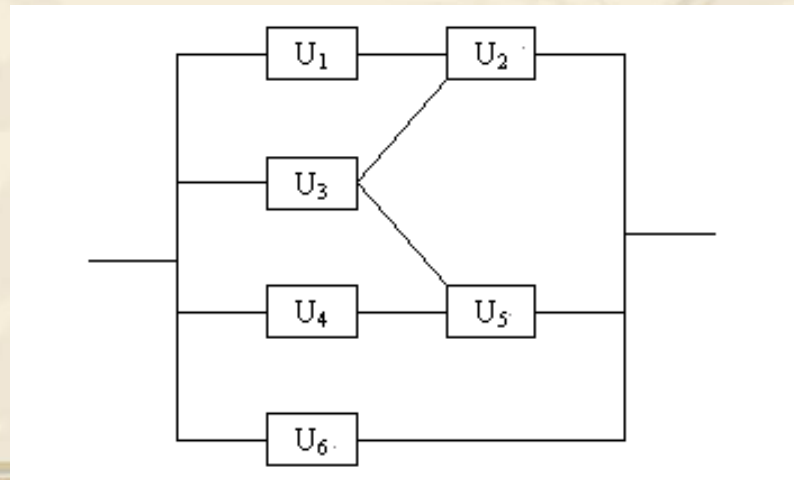
$$R_{67}(t) = 1 - (1 - R_6)(1 - R_7) = 1 - (1 - 0.91)^2 = 0.9919$$

- ❖ 整个系统就由单元 $U_1$ 、 $U_{2345}$ 和 $U_{67}$ 串联组成，故得整个系统的可靠度为

$$R_s(t) = R_1 R_{2345} R_{67} = 0.91 \times 0.97045 \times 0.9919 = 0.876$$

# 复杂系统模型

- ❖ 有些复杂系统不是由简单的串联、并联子系统组合而成的，因此就不能用计算串联、并联可靠度的方法来计算系统的可靠度。
- ❖ 对于复杂系统的可靠度计算，常常采用状态枚举法（或称为真值表法）、全概率公式法（或称为分解法）、路径枚举法等。



# 复杂系统模型

- ❖ 全概率公式法的原理是首先选出系统中的主要单元，然后把该单元分成正常工作与故障两种状态，再用全概率公式计算系统的可靠度。
- ❖ 路径枚举法是根据系统的可靠性逻辑框图，将所有能使系统正常工作的路径一一列举出来，再利用概率加法定理和乘法定理来计算系统的可靠度。

# 复杂系统模型

- ❖ 状态枚举法的原理是将系统中各个子系统或单元的完好和失效两种状态的所有可能出现的情况一一搭配排列出来，排出来的每一种情况为一种状态，并确定对应的系统状态是失效或是完好状态，然后计算各种状态是失效或完好的概率，最后累加起来就得到系统失效或完好的概率即可靠度。



## 第四节 可靠性分析方法

2009-4-13

苏秦主编《质量管理与可靠性》  
机械工业出版社

# 可靠性分析方法

- ❖ 系统可靠性分析是利用归纳、演绎的方法对系统可能发生的故障进行研究，研究故障的原因、后果和影响及危害程度，确定薄弱环节，并预测系统的可靠性，从而为系统设计提供改进建议。
- ❖ 常用的分析方法有故障模式及影响分析（FMEA），以及故障模式、故障影响及危害性分析（FMECA）和故障树分析（FTA）。

# 故障模式及影响分析(FMEA)

❖ 故障模式及影响分析 (Failure Mode and Effect Analysis, FMEA)

❖ 实施步骤:

(1) 根据设计文件, 弄清所有零部件、接口的工作参数及其功能, 从各方面全面确定产品的定义, 并按重要度递减的原则分别考虑产品的每一种工作模式 (即工作状态);

(2) 针对每一种工作模式分别画出系统的功能原理图和可靠性框图;

(3) 确定分析的范围, 列出每一个部件、零件与接口明显和潜在的故障模式、发生的原因与影响;

# 故障模式及影响分析(FMEA)

- (4) 按可能的最坏结果评定每一种故障模式的危害性级别；
- (5) 研究检测每一种故障模式的方法；
- (6) 针对各种故障模式，找出故障原因，提出可能的补救措施或预防措施；
- (7) 提出修改设计或采取其它措施的建议，同时指出设计更改或其它措施对各方面的影响；
- (8) 写出分析报告，总结设计上无法改正的问题，并说明预防故障或控制故障危险性的必要措施。

# 故障模式及影响分析(FMEA)

## ❖ FMEA的用途:

FMEA分析每一个的所有故障模式，用于单一故障分析，采用归纳方法进行分析。该方法只能进行定性分析，但由于FMEA分析法容易掌握，因此被广泛接受，已经标准化。其缺点是只能分析硬件，花费时间较多，经常不能考虑故障与人为因素的关系。

# 故障模式、故障影响及危害性分析 (FMECA)

- ❖ 故障模式、故障影响及危害性分析 (FMECA) 包括故障模式及影响分析 (FMEA) 和危害性分析 (CA)，目的在于查明一切可能的故障模式，重点在于查明一切灾难性和严重性的故障模式，以便通过修改设计或采取某种补救和预防措施，消除或减轻其影响的危害性，最终目的是提高系统的可靠性和可维修性。

# 故障模式、故障影响及危害性分析 (FMECA)

- ❖ 危害度数字=故障模式故障率×故障影响发生概率×工作时间（或工作次数）
- ❖ 危害度分析的目的在于按照危害性级别及危害度数字或发生改良系的联合影响来对FMEA所确定的每一种故障模式进行分级。

# 故障模式、故障影响及危害性分析 (FMECA)

- ❖ 故障的危害性级别
- ❖ I类——灾难性故障：它是一种会造成操作人员死亡或使系统毁坏的故障；
- ❖ II类——致命性故障：是一种导致人员严重受伤、器材或系统严重损坏，从而任务失败的故障；
- ❖ III类——严重故障：将使人员轻度受伤、器材及系统轻度损坏，从而导致系统不工作；
- ❖ IV类——轻度故障：其严重程度不足以造成人员受伤、器材或系统损坏，但这些损坏会导致非计划性维修。

# 故障模式、故障影响及危害性分析 (FMECA)

- ❖ FMECA的定性分析：
- ❖ 当得不到零部件结构的故障率时，用故障模式出现的概率等级做定性分析，一般可分为五个等级来评定故障发生的概率：
- ❖ A级——经常发生的故障模式
- ❖ B级——极普通的故障模式
- ❖ C级——偶然发生的故障模式
- ❖ D级——很少发生的故障模式
- ❖ E级——极少发生的故障模式

# 故障模式、故障影响及危害性分析 (FMECA)

- ❖ FMECA的定量分析
- ❖ 故障后果概率（ $\beta$ ）或称为损失概率，是当故障模式发生时由故障后果造成危害性级别的条件概率。

$\beta$  值与故障后果之间的关系

故障后果	$\beta$ 值
必然损失	1.00
可能损失	$0.10 < \beta < 1.00$
很少损失	$0 < \beta < 0.10$
无影响	0

# 故障模式、故障影响及危害性分析 (FMECA)

- ❖ 故障模式危害度数字 ( $C_m$ ) 是在一种危害度级别下由故障模式之一所占危害度数字的份额，其表示为

$$C_m = \beta \alpha \lambda_p t$$

式中： $C_m$ ——故障模式危害度数字； $\beta$ ——工作任务失败的条件概率（即故障后果概率）； $\alpha$ ——故障模式相对频率； $\lambda_p$ ——元件的故障率； $t$ ——某任务阶段内的工作时间，常以小时或工作次数表示。

# 故障模式、故障影响及危害性分析 (FMECA)

- ❖ 系统或产品危害度数字 ( $C_r$ )
- ❖ 一个系统的危害度数字是在某一任务阶段内, 同一危害度级别下各故障模式危害度数字  $C_m$  之和, 用  $C_r$  表示
$$C_r = \sum_{i=1}^n (\beta \alpha \lambda_p t)_i$$

式中:  $C_r$  ——表示系统危害度数字;  $i$  ——表示属于某一危害度的故障模式数;  $n$  ——表示系统在该危害度下的最后一个故障模式。

# 故障树分析（FTA）

- ❖ 故障树分析概述
- ❖ 故障树分析法（**Fault Tree Analysis**，简称**FTA**）也称为失效树分析法，它是一种可靠性、安全性分析和预测的方法。
- ❖ 故障树分析法研究的是引起整个系统出现故障这一事件的各种直接的和间接的原因（这些原因也是事件），在这些事件间建立相应的逻辑关系，从而确定系统出现故障原因的可能组合方式及其发生的概率。

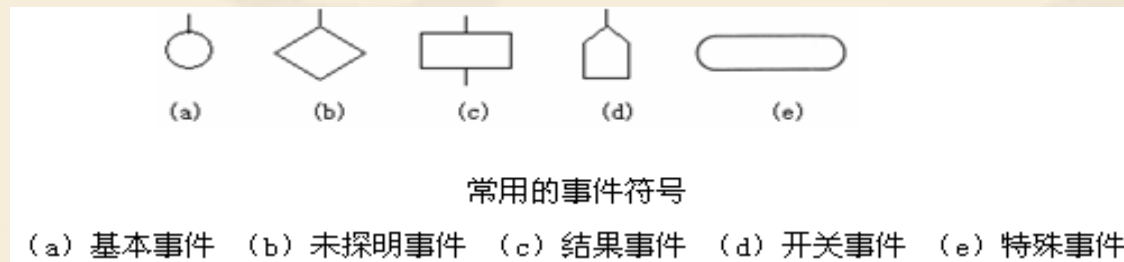
# 故障树分析（FTA）

❖ 故障树分析法的一般步骤为：

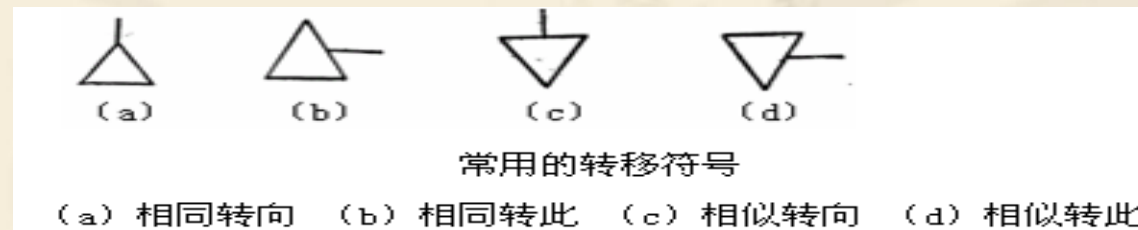
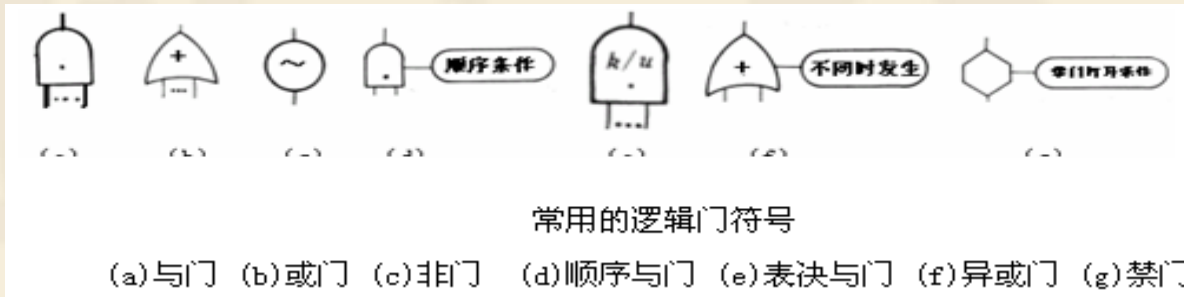
- （1）选择和确定顶事件；
- （2）自上而下建造故障树；
- （3）建立故障树的数学模型；
- （4）根据故障树对系统进行可靠性的定性分析；
- （5）根据故障树对系统进行可靠性的定量计算。

# 故障树分析（FTA）

- ❖ 故障树中常常使用的符号有三类：事件符号、逻辑门符号和转移符号



# 故障树分析 (FTA)



# 故障树分析（FTA）

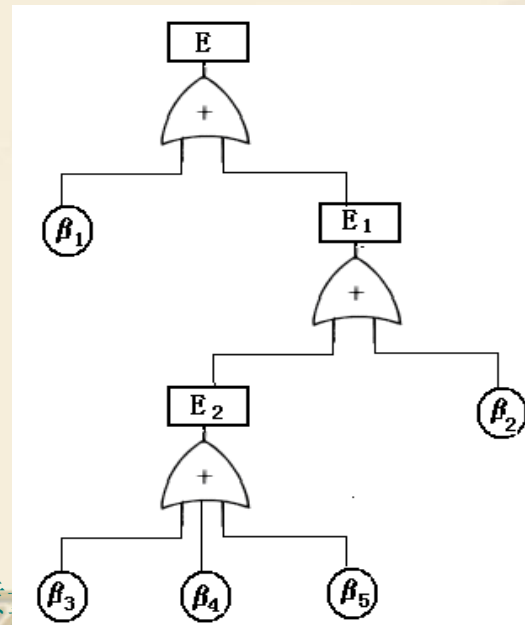
- ❖ 故障树的建树方法可以分为人工建树和计算机辅助建树。
- ❖ 人工建树采用演绎法进行，计算机辅助建树采用合成法和决策表法进行。
- ❖ 人工建树从顶事件开始，由上而下，逐级追查事件的原因，直到找出全部底事件，主要步骤有：选择和确定顶事；建造故障树。

# 故障树分析（FTA）

- ❖ 故障树的定性分析
- ❖ 割集是一些能使事件发生的底事件的集合，当这些底事件同时发生时顶事件必然发生。系统故障树的一个割集，代表该系统发生故障的一种可能性，即指一种故障模式。
- ❖ 故障树分析方法中定性分析就是找出所有导致顶事件发生的最小割集。
- ❖ 组成最小割集的底事件个数称为最小割集的阶，阶数愈小，愈容易出故障，最低阶的最小割集是最容易出故障的薄弱环节。

# 故障树分析（FTA）

- ❖ 下图所示故障树的最小割集为： $\{\beta_1\}$   $\{\beta_2\}$   
 $\{\beta_3, \beta_4, \beta_5\}$
- ❖ 该最小割集中 $\{\beta_1\}$   $\{\beta_2\}$  为一阶割集， $\{\beta_3, \beta_4, \beta_5\}$  为三阶割集。



# 故障树分析（FTA）

- ❖ 故障树的定量分析
- ❖ 利用故障树作为计算模型，在确定各底事件的故障模式和分布参数或故障概率值的情况下，按故障树的逻辑结构逐步向上运算，计算出系统顶事件发生的概率，从而对系统的可靠性、安全性和风险作出评估。



## 第五节 可靠性管理

2009-4-13

苏秦主编《质量管理与可靠性》  
机械工业出版社



# 可靠性管理概述

- ❖ 可靠性管理就是从系统的观点出发，对产品全寿命周期中的各项可靠性工程技术活动进行计划、组织、监督和控制等综合性的工作，用最少的资源达到产品计划所要求的定量可靠性，以实现既定的可靠性目标和全寿命周期费用最省。
- ❖ 就是预防产品在使用过程中发生随机故障，使其发生故障的概率小到可以忽略的程度，这只能依靠系统而周密的控制和管理。

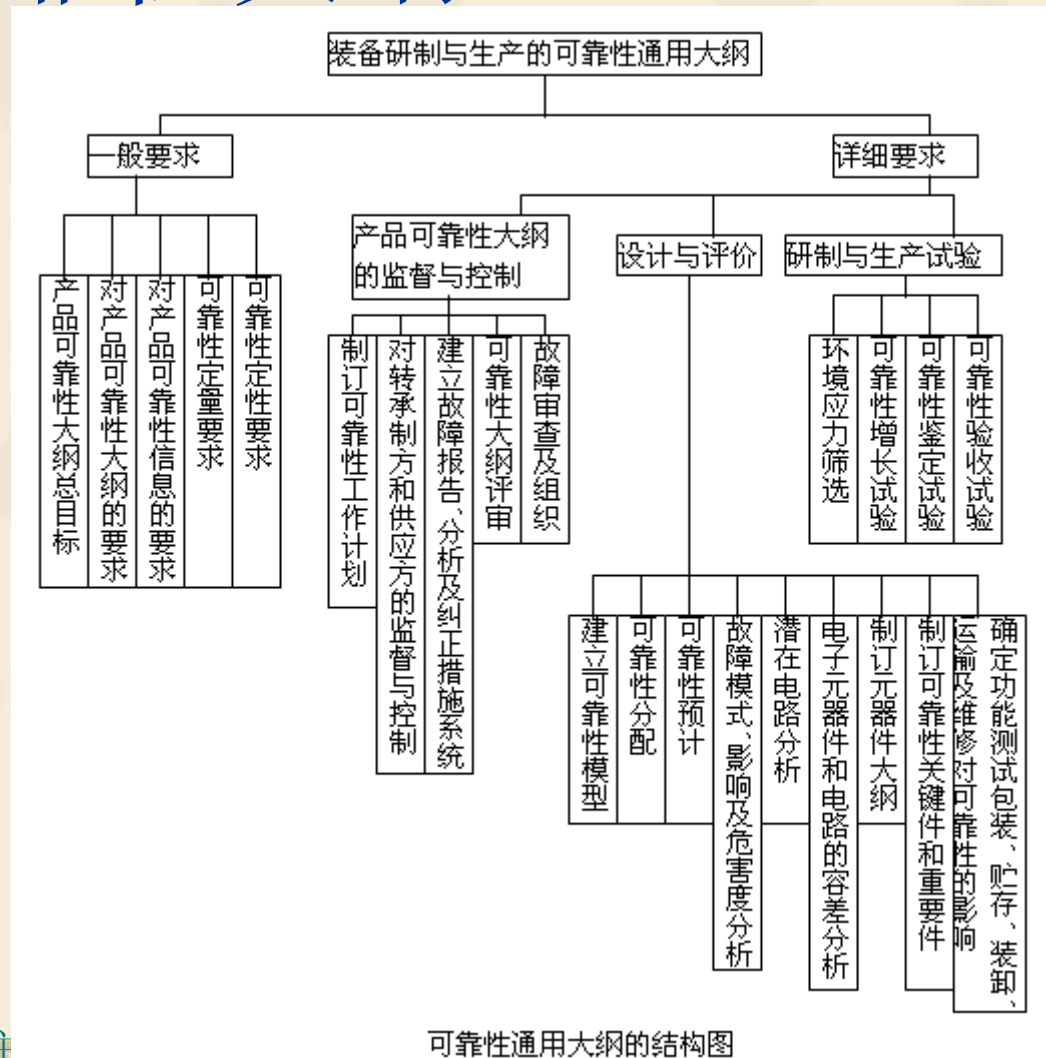
# 可靠性管理概述

## ❖ 可靠性管理的特点

- (1) 可靠性管理是一项技术性很强的管理工作，它既要有可靠性工程技术的基础知识，又要有与产品相关的专业知识，以及需要管理方面的知识。
- (2) 可靠性管理是一个全过程的管理。
- (3) 可靠性管理是数据管理。
- (4) 可靠性管理具有很强的经济性，不是单纯的技术管理。

# 可靠性大纲

- ❖ 可靠性大纲是产品在研制过程中全部可靠性工作的总体规划，包括可靠性目标要求，必须进行的工作及实施要求，它是一份纲领性文件。



# 可靠性大纲

- ❖ 可靠性大纲的评审
- ❖ 为了使制订的可靠性大纲进行有效的贯彻，必须要对产品的各个阶段进行可靠性大纲的评审，并需要制订一个对可靠性大纲评审的评审计划。
- ❖ 主要对产品的方案设计阶段、研制阶段、生产阶段和使用阶段进行检查评审。

# 可靠度目标预测与分配

- ❖ 确定产品的可靠度目标的步骤
  - (1) 要选择适合产品使用条件的可靠性尺度
  - (2) 根据选择的可靠性尺度，以用户的要求为出发点确定其目标值。
- ❖ 可靠度目标值的确定规则：
  - (1) 根据售后服务水平来确定。
  - (2) 根据过去的实践资料来确定。
  - (3) 根据产品的社会责任来确定。
  - (4) 根据经济性来确定。
  - (5) 根据产品的价值来确定。

# 可靠度目标预测与分配

例 根据市场预测，需要某种产品1000台。根据以往类似产品的实际资料，确定该产品的平均修理时间为 $MTTR=2h$ ，这1000台产品，有三名维修人员即可承担维修工作，产品发生故障后往复搬运时间估计为 $T_w=4h$ ，设维修人员每班工作时间为8h。设每天该产品运行的时间为10h。试在产品设计开发过程中确定其可靠度目标值。

# 可靠度目标预测与分配

❖ 解：（1）确定可靠度目标值

按照发生一次故障，就修理一次计算，修理一台产品所需的时间为

$$T_S = T_W + \text{MTTR} = 4 + 2 = 6\text{h}$$

维修人员的日维修能力 $T_M$ 为：

$$T_M = \text{每班工作时间} \times \text{人数} = 8 \times 3 = 24\text{h}$$

一天的维修能力 $M_S$ 为一天所容许的故障台数， $M_S$ 表示为：

$$M_S = T_M / T_S = 24 / 6 = 4\text{台}$$

# 可靠度目标预测与分配

由一天的维修能力 $M_S$ 可得一天所容许的不可靠度 $F(t)$ 为：

$$F(t) = \frac{\text{容许故障台数}}{\text{维修对象台数}} = \frac{4}{1000} = 0.004$$

于是可靠度 $R(t)$ 为：

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - 0.004 = 0.996 = 99.6\%$$

99.6%就是要求的可靠度目标值。

# 可靠度目标预测与分配

## (2) 计算平均寿命和故障率

利用可靠度和平均寿命的近似公式可得产品的平均寿命为： $R(t) = e^{-\lambda t} \approx 1 - \lambda t = 1 - \frac{t}{MTBF}$

得  $MTBF = \frac{t}{1 - R(t)} = \frac{10}{1 - 0.996} = 2500h$

根据平均寿命**MTBF**与故障率互成倒数的关系可得故障率为  $\lambda = \lambda(t) = \frac{1}{MTBF} = \frac{1}{2500} = 0.004 = 400 \times 10^{-5} / h$

通过计算表明，该产品的可靠度目标值可以规定为：可靠度目标值为**99.6%**；平均寿命**MTBF**目标值为**2500h**；故障率的目标值为 **$400 \times 10^{-5} / h$** 。

# 可靠度目标预测与分配

- ❖ 可靠度预测是在产品可靠性结构模型的基础上，利用已有的数据和资料，对产品及其组成部分所能达到的可靠性水平进行的一种预测过程。
- ❖ 可靠度预测的方法：
  - 产品开发设计初期：图估法、相似设备法、相似复杂性法、功能预测法、简单枚举归纳推理可靠性快速预测法
  - 详细设计阶段：元器件计数预测法
  - 最终设计阶段：应力分析法

# 可靠度目标预测与分配

❖ 可靠度分配是将经过确定和论证的产品可靠性目标值，按一定的分配原则和分配方法，合理地分配到组成产品的各组成部分。

❖ 平均分配法（等分法）

平均分配法的基本思想是，当产品可以分解为n个串联零部件或子系统时，则可把产品的可靠度平均分摊到每个零部件或子系统。

❖ 当产品的可靠度目标值为时，则每个零部件或子系统应分摊的可靠度值为： $R = \sqrt[n]{R_S}$

# 可靠度目标预测与分配

- ❖ **AGREE分配法。**AGREE分配法是以各个子系统、组成单元对系统的重要性以及相对复杂性为基础来进行可靠性目标值的分配的。该方法相对于平均分配法，相对更合理。

# 可靠度目标预测与分配

- ❖ 工程加权分配法。产品的各个子系统或单元采用的元器件质量、采用标准件的程度和维修的难易有差异，各个子系统所处的工作环境也不一定相同。工程加权分配法在考虑各个子系统重要度和复杂性的同时，还考虑多种工程因素，并将多种因素的影响用不同的加权因子来反映的一种可靠度目标值分配方法。