



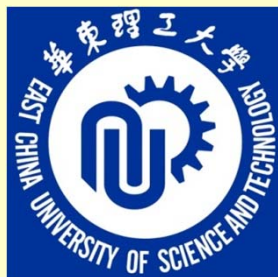
可靠性概论

第4章 机械系统可靠性设计

在上章提到一首小诗

- 钉子缺，蹄铁卸；其概率为0.7;
- 蹄铁卸，战马蹶；其概率为0.4;
- 战马蹶，骑士绝；其概率为0.3;
- 骑士绝，战事折；其概率为0.4;
- 战事折，国家灭。其概率为0.5;

- 国家灭亡的概率= $0.7*0.4*0.3*0.4*0.5$
- $=0.0168$



第4章 系统可靠性设计

- 4.1 系统可靠性设计概述
- 4.2 可靠性预测
- 4.3 可靠性分配
- 4.4 故障树分析

4.1 系统可靠性设计概述

系统定义：

由零部件、子系统组成，为了完成某一特定功能的组合体。

分类：

不可修复系统和可修复系统

系统可靠性设计的目的:

使系统在满足规定的可靠性指标, 完成规定功能的前提下, 使系统的技术性能、重量指标、制造成本及使用寿命取得协调并达到最优化的结果。

系统可靠性设计方法:

可靠性预测——按照已知零部件或各单元的可靠性数据, 计算系统的可靠性指标。

可靠性分配——按照已给定的系统可靠性指标, 对组成系统的单元进行可靠性分配。

4.2 系统可靠性预测

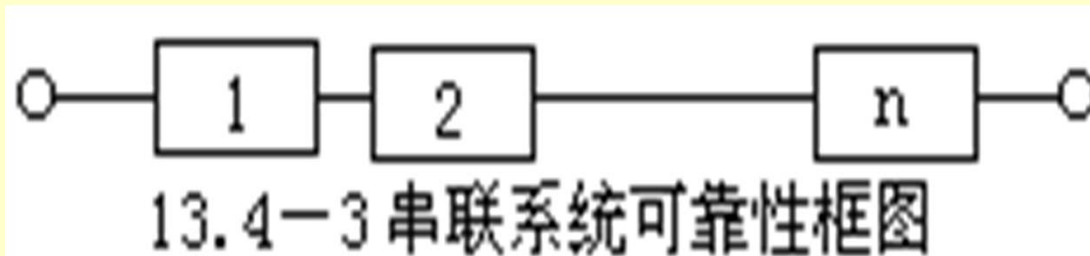
- 4.2.1 系统可靠性分析

- 1) 串联系统可靠性
- 2) 并联系统可靠性
- 3) 混联系统可靠性
- 4) 表决系统可靠性
- 5) 储备系统可靠性

1)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。

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



- 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。图表示各单元可靠度相同时 R_i 和 n 与 R_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。

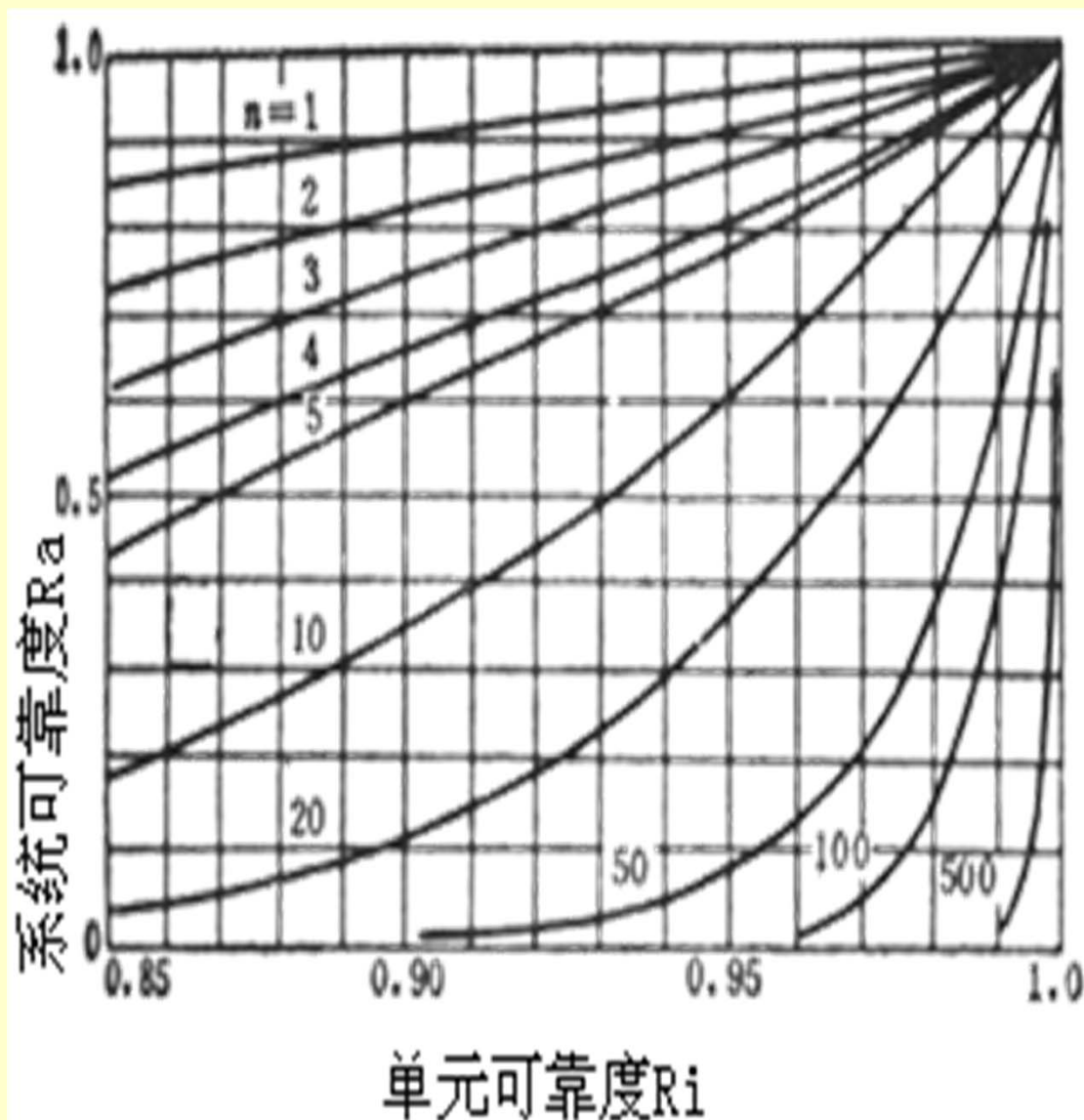


图13.4-4 n 个相同单元串联系统的可靠度

串联系统可靠度的特点：

- 串联系统中系统的可靠度 $R_s \leq \min(R_i)$ ；
- 组成系统的单元数越多，系统的可靠度越低；
- 要想提高串联系统的可靠度，应减少单元数，而且应重视改善最薄弱单元的可靠度；
- 若各单元的失效率服从指数分布，则系统的失效率等于各组成单元失效率之和：

系统失效率:

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

系统可靠度:

$$R_s = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t} = e^{-\lambda_s t}$$

平均寿命:

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

串联系统可靠度计算应用实例：

某带式输送机输送带的接头共有**54**个，已知各接头的强度服从指数分布，其失效率如表所示，试计算该输送带的平均寿命和工作到**1000h**的可靠度。

接头数	3	5	8	10	12	16
$\lambda \times 10^{-4}/h$	0.2	0.15	0.35	0.21	0.18	0.1

2) 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系统。图13.4-5为并联系统的可靠性框图。假定各单元是独立的，则其可靠性数学模型为：

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

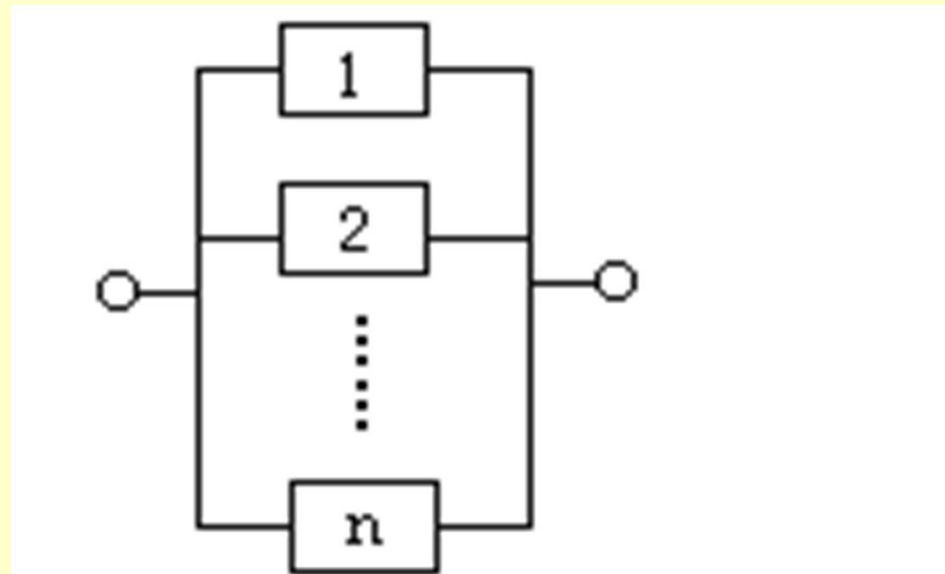


图13.4-5 并联系统可靠性框图

- 并联系统对提高系统的可靠度有显著的效果，图表示各单元可靠度相同时 R_i 和 n 与 R_s 的关系。

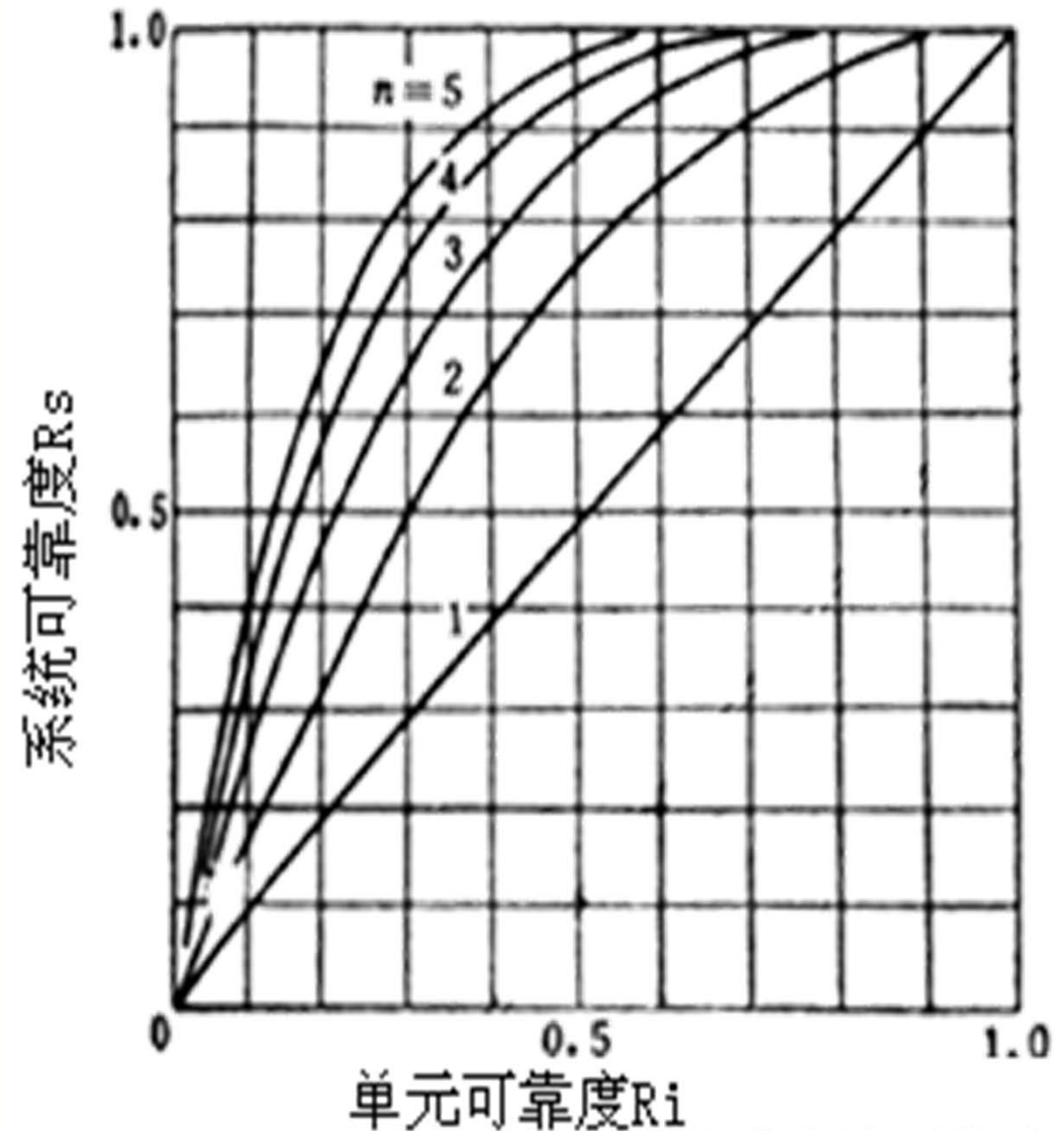


图13.4-6 n 个相同单元并联系统的可靠度

并联系统可靠度的特点：

- 并联系统中系统的可靠度 R_s 大于任一单元的可靠度；
- 组成系统的单元数越多，系统的可靠度越高，但系统的造价也越高；
- 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。在动力装置、安全装置、制动装置采用并联时，常取 $n=2\sim 3$ 。

若单元可靠度服从指数分布：

$$R_i = e^{-\lambda t}$$

当**n=2**时： $R_s = 2R - R^2$

$$\lambda_s(t) = 2\lambda \frac{1 - e^{-\lambda t}}{2 - e^{-\lambda t}}$$

$$\theta_s = \int_0^{\infty} R dt = \frac{2}{\lambda} - \frac{1}{2\lambda} = 1.5\lambda = 1.5\theta$$

3)混联系统的可靠性

- 典型情况：
 - 3.1 串、并联系统的可靠性
 - 3.2 并、串联系统的可靠性
- 一般情况
 - 3.3 混联系统可靠性
- 特殊情况
 - 3.4 全概率公式法求解桥式系统可靠度

混联系统的典型情况：

串并联系统与并串联系统

- 串并联系统的数学模型为：

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

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

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

当各单元可靠度都相等, 均为 $R_{ij} = R$,

且 $n_1 = n_2 = \dots = n_m = n$,

$$\text{则 } R_s = 1 - (1 - R^n)^m$$

3.1、串、并联系统的可靠性

$$R_s(t) = 1 - \left(1 - R(t)^m\right)^n$$

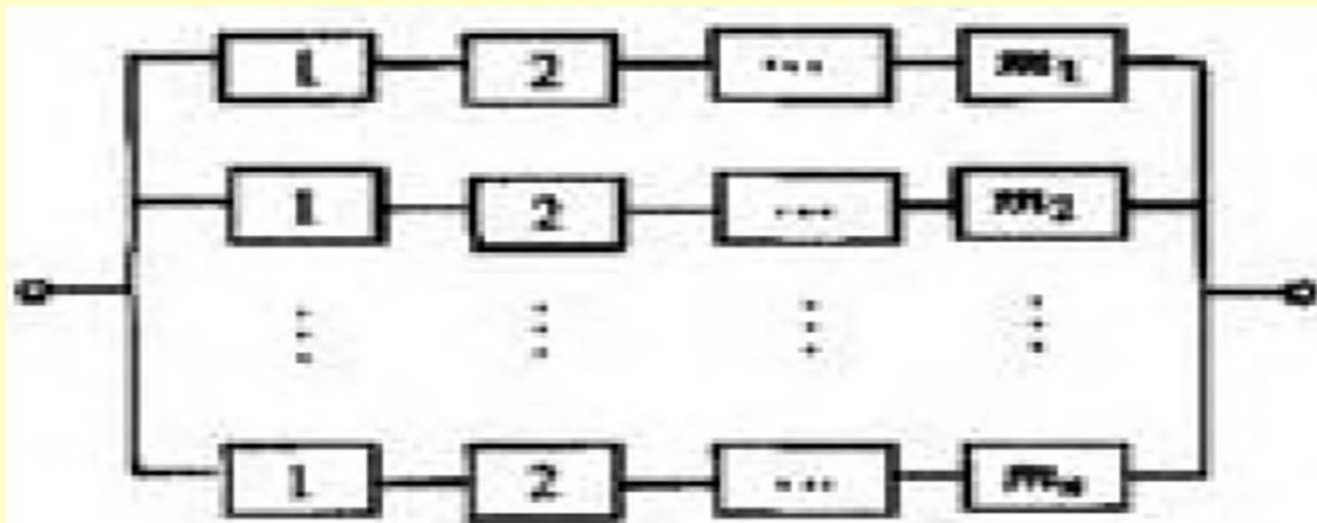
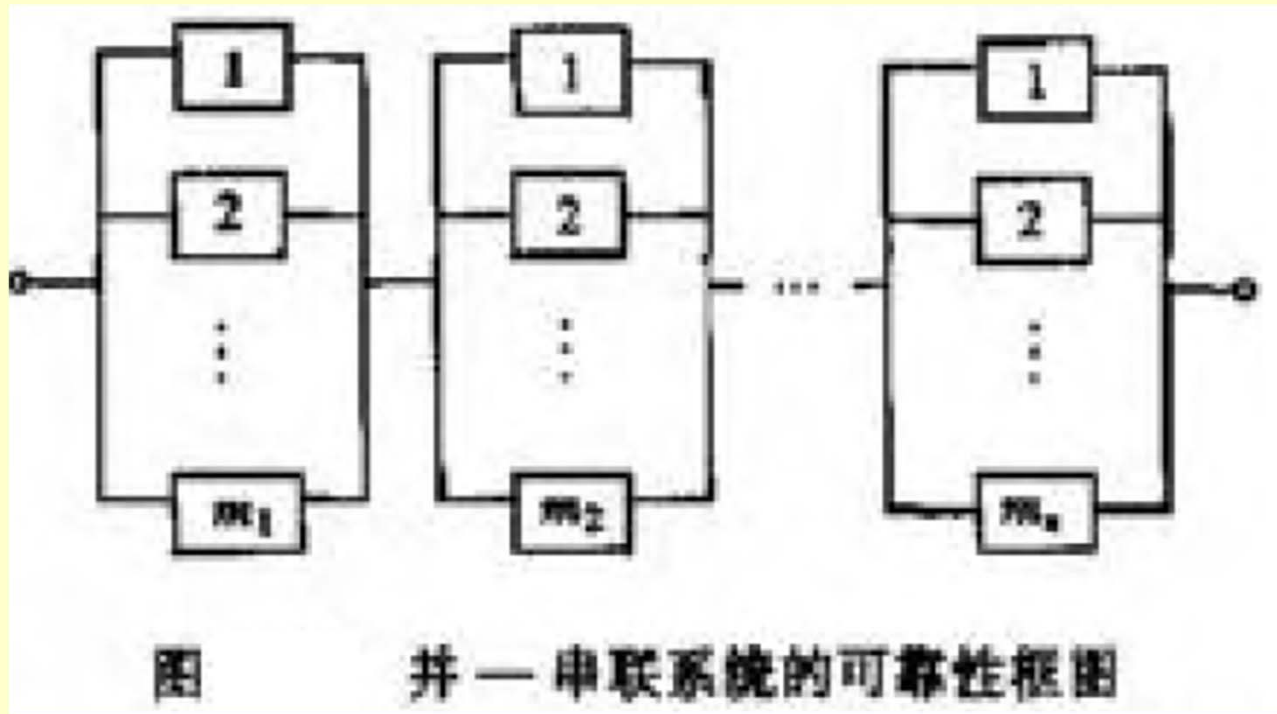


图 串—并联系统的可靠性框图

3.2、并、串联系统的可靠性

$$R_s(t) = \left[1 - (1 - R)^m \right]^n$$



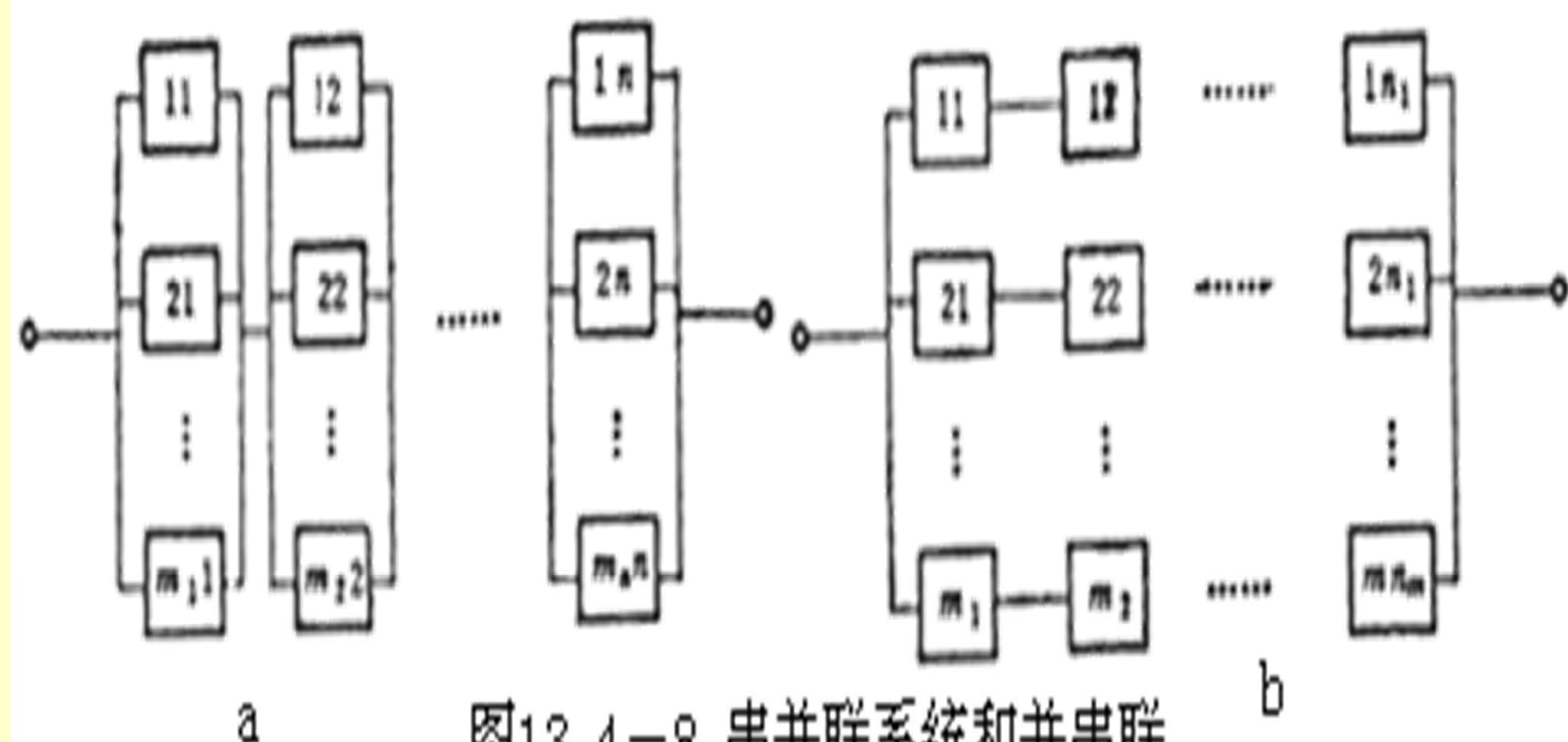


图13.4-8 串并联系统和并串联系统
 系统a 串并联系统 b 并串联系统

3.3、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。下图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并联部分简化为等效单元。例如图中的**a**可按图中**b**，**c**，**d**的次序依次简化。

- $R_{s1} = R_1 R_2 R_3$
 $R_{s2} = R_4 R_5$

- $R_{s3} = 1 - (1 - R_{s1})(1 - R_{s2})$

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

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

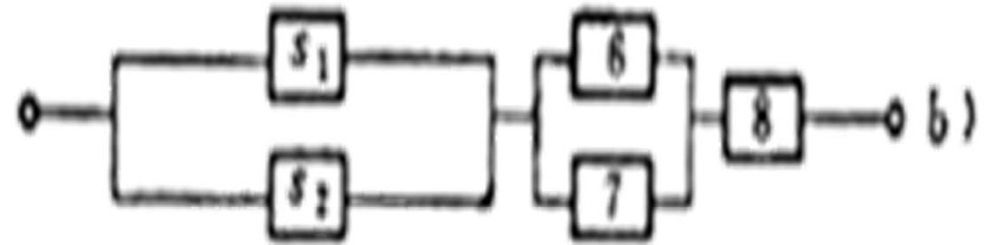
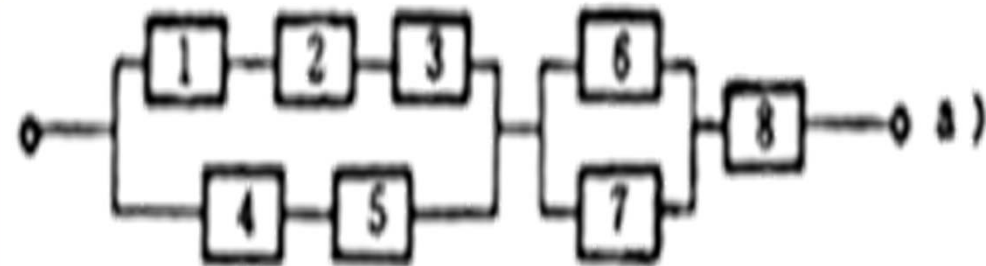


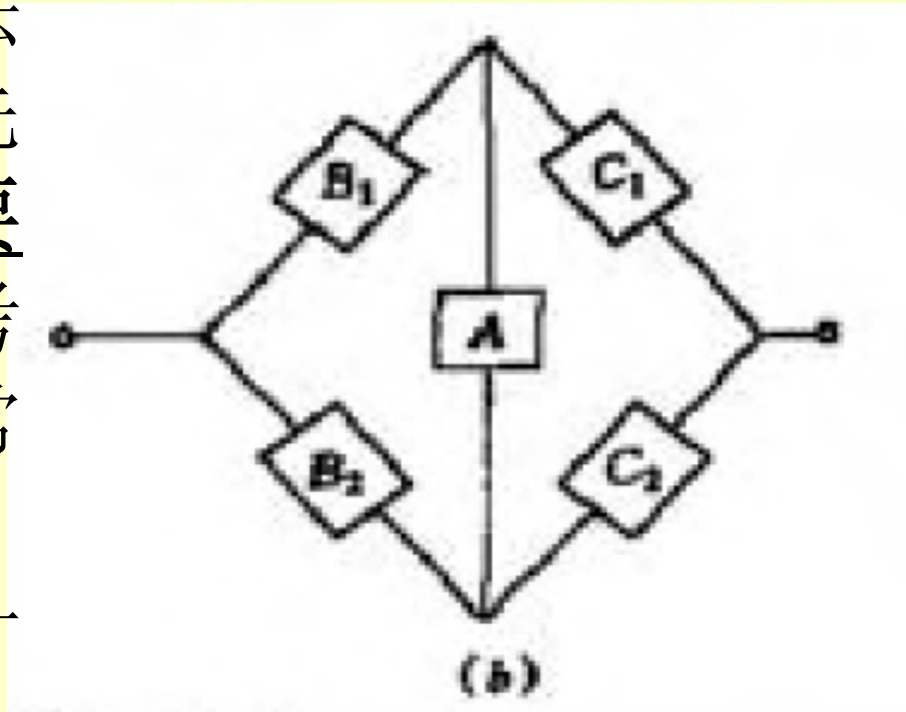
图13.4-7 混联系统及其简化

混联系统可靠性分析要点

- 建立超级的“等效单元”；
- 最终组成一系列由等效单元的简单（串、并联）系统。

3.4 全概率公式法求解桥式系统可靠度

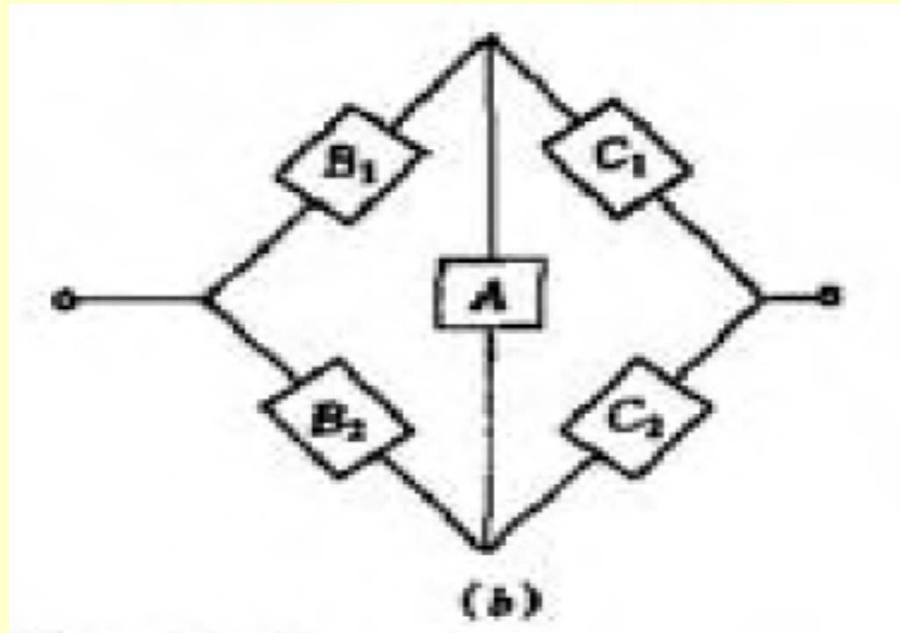
- 根据全概率公式法（分解法）：首先选出系统中的主要单元，然后分别考虑这个单元的正常和故障两种状态，再用全概率公式计算系统可靠度。



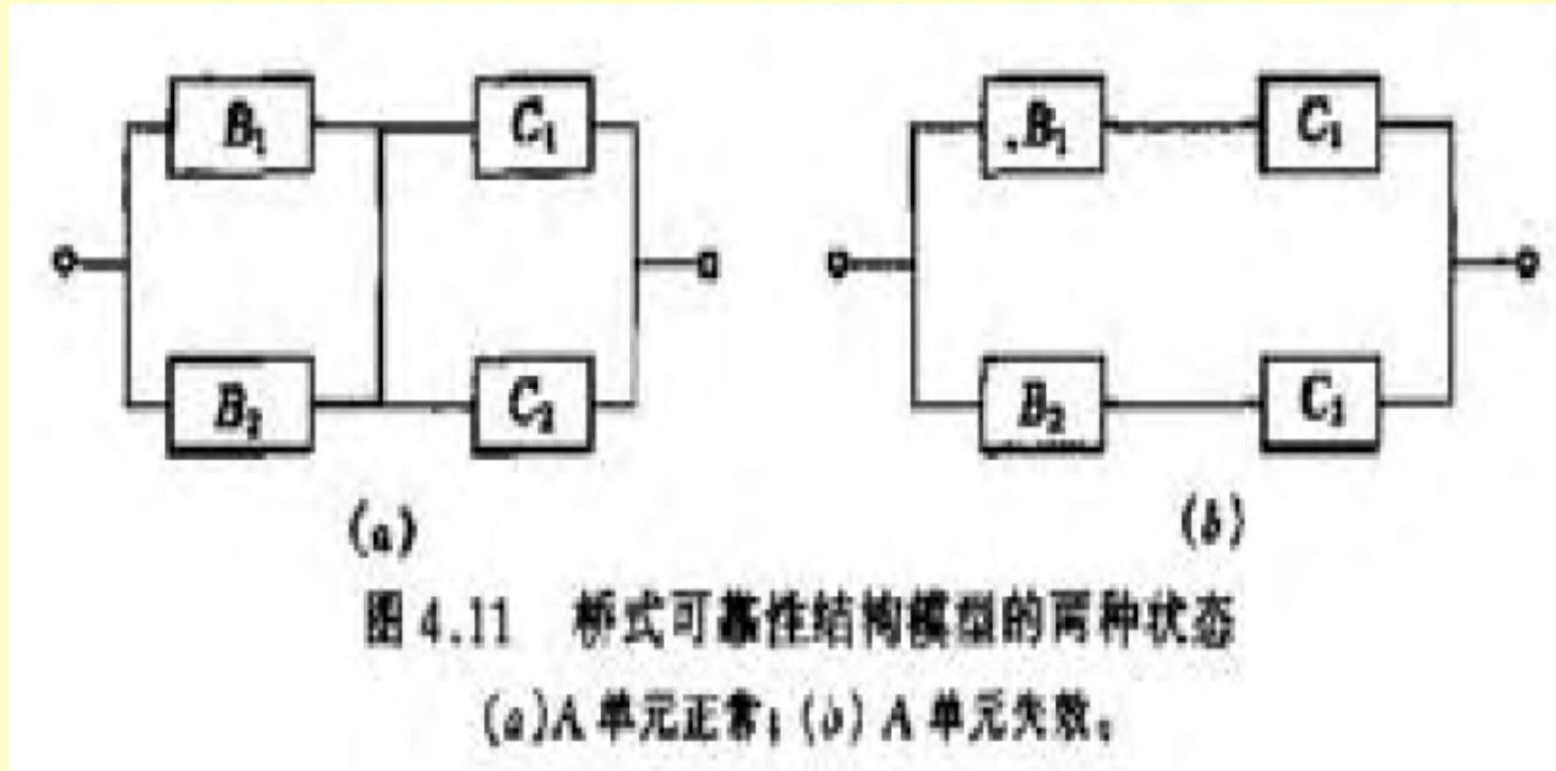
全概率公式

- 设选出单元A，其可靠度 R_A ，不可靠度 $F_A=1-R_A$ ，系统的可靠度由下式计算：

$$R_s = R_A \cdot R(S|R_A) + F_A \cdot R(S|F_A)$$



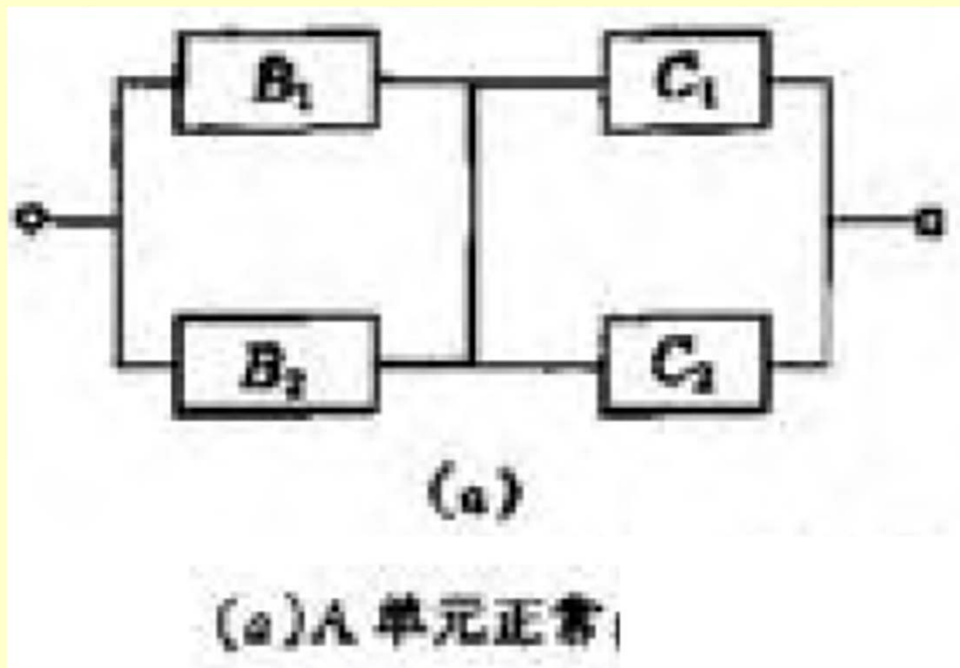
这时系统可以分解为两个等效系统，A单元正常，A单元失效。如下图所示：



$$R_s = R_A \cdot R(S|R_A) + F_A \cdot R(S|F_A)$$

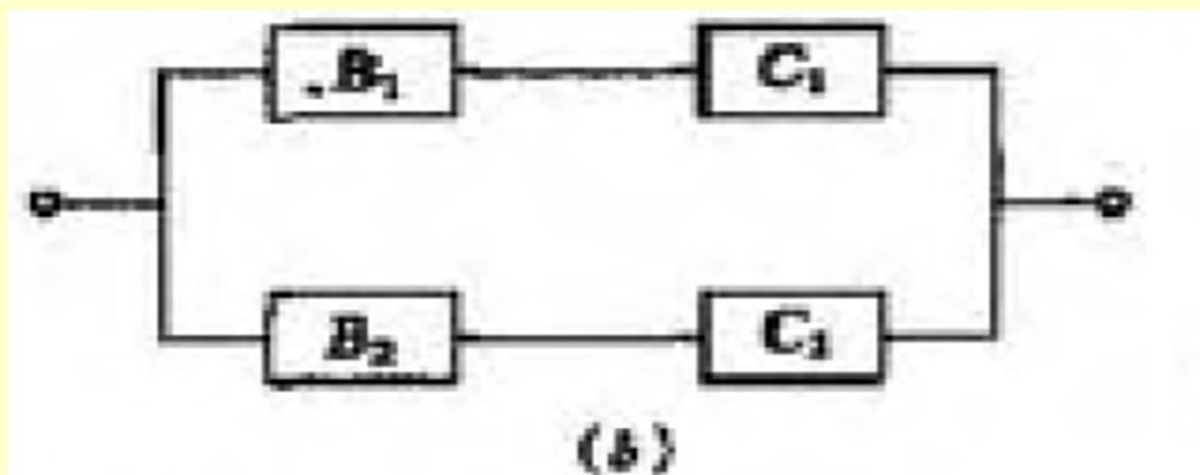
在A单元正常工作情况下，是由两个单元并行在一起，然后再串联起来的系统。这时A单元正常的系统可靠度为：

$$R(S|R_A) = (1 - F_{B1} \cdot F_{B2})(1 - F_{C1} \cdot F_{C2})$$



如果A单元失效，不能正常工作时，系统成为如下串、并联形式。如下图所示：这时系统的可靠度为：

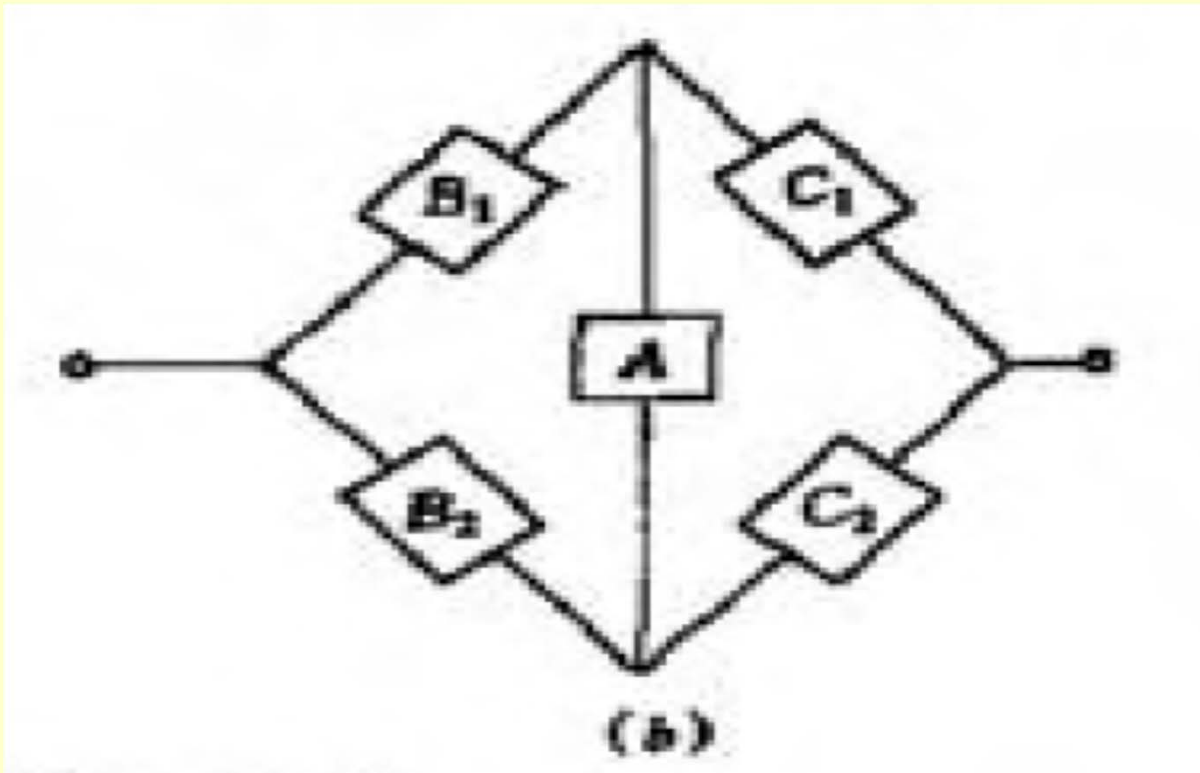
$$\begin{aligned} R(S|F_A) &= 1 - [(1 - R_{B1} \cdot R_{C1}) \cdot (1 - R_{B2} \cdot R_{C2})] \\ &= R_{B1} \cdot R_{C1} + R_{B2} \cdot R_{C2} - R_{B1} \cdot R_{C1} \cdot R_{B2} \cdot R_{C2} \end{aligned}$$



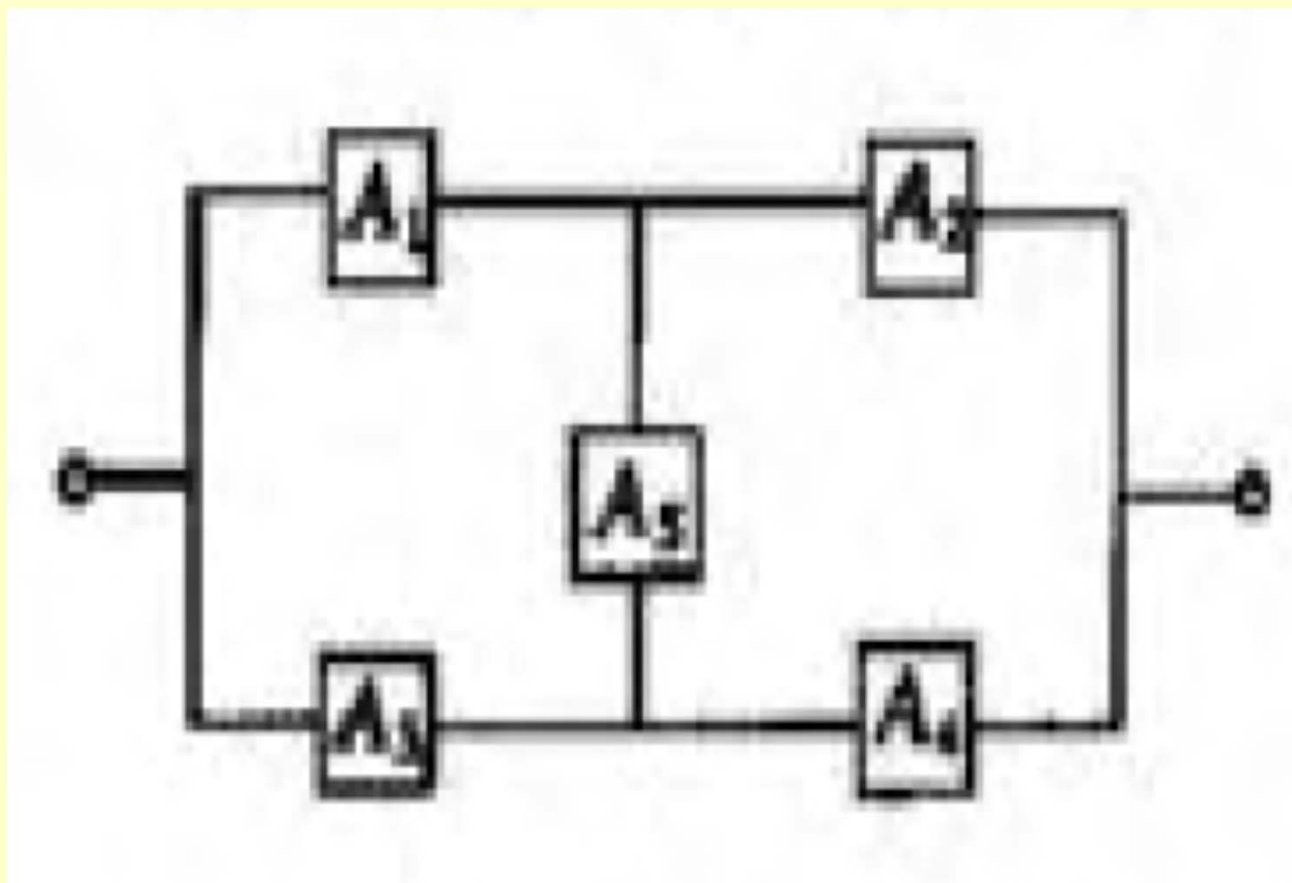
(b) A 单元失效

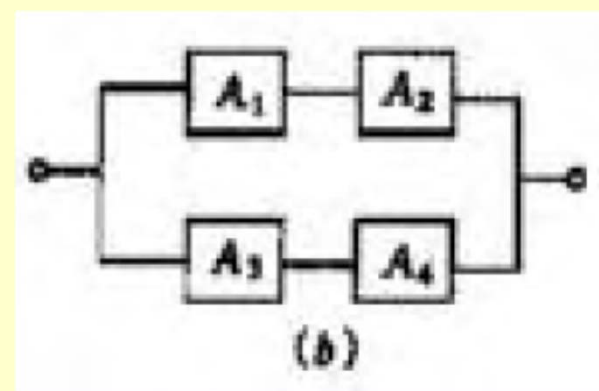
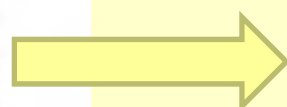
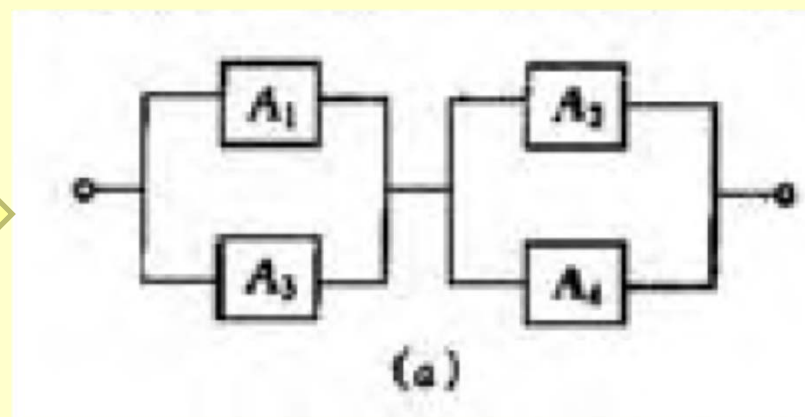
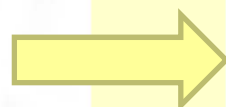
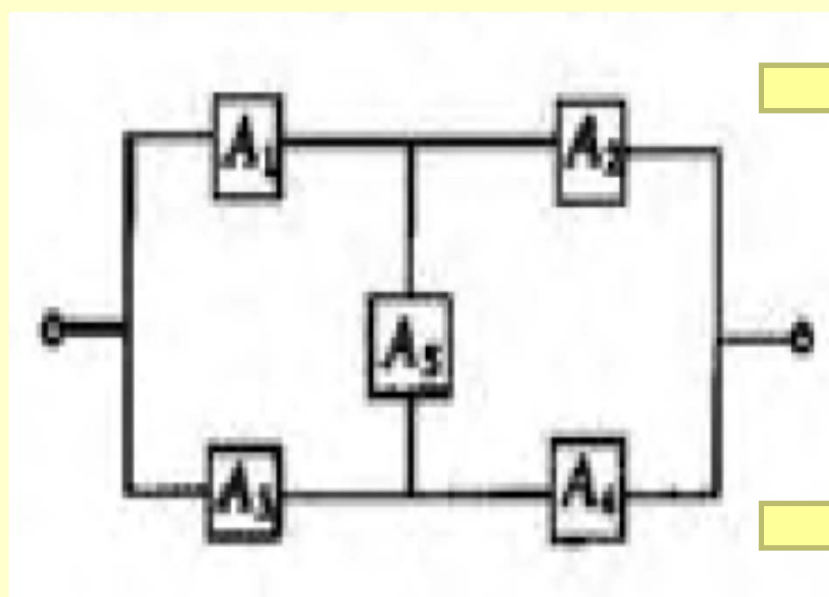
图 桥式可靠性结构模型的两种状态

$$R_S = R_A(1 - F_{B1}F_{B2})(1 - F_{C1}F_{C2}) \\ + F_A(R_{B1}R_{C1} + R_{B2}R_{C2} - R_{B1}R_{C1}R_{B2}R_{C2})$$



请考虑





4)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：

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

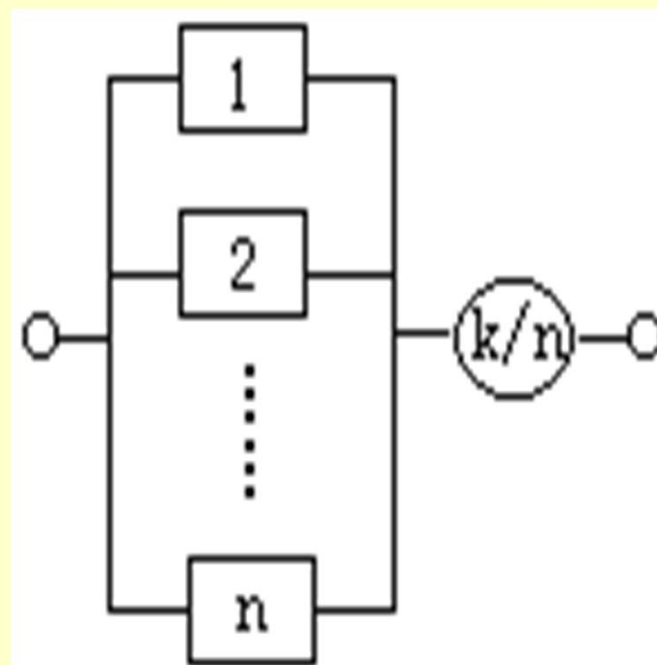
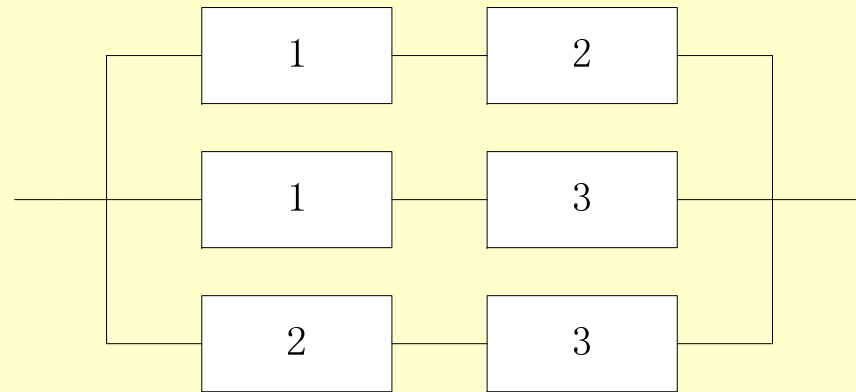


图13.4-9 表决系统

- 当 $k=2, n=3$ 时: $R_s(t)=3R^2(t)-2R^3(t)$
- 若各单元的失效寿命服从指数分布, 且失效率相同时:



$$R_s(t) = 3R^2 - 2R^3 = 3e^{-2\lambda t} - 2e^{-3\lambda t}$$

$$MTBF = \frac{1}{n} + \frac{1}{(n-1)} + \dots + \frac{1}{k\lambda}$$

$$R_s = (1 - R_A)R_BR_C + (1 - R_B)R_AR_C + (1 - R_C)R_AR_B + R_AR_BR_C$$

表决系统可靠度计算实例：

有一架装有3台发动机的飞机，它至少需要2台发动机正常才能飞行，设飞机发动机的平均无故障工作时间MTBF=2000h，试估计工作时间为10h和100h的飞机可靠度。

解： $n=3, k=2$

$$R_s(t) = 3R^2 - 2R^3 = 3e^{-2\lambda t} - 2e^{-3\lambda t}$$

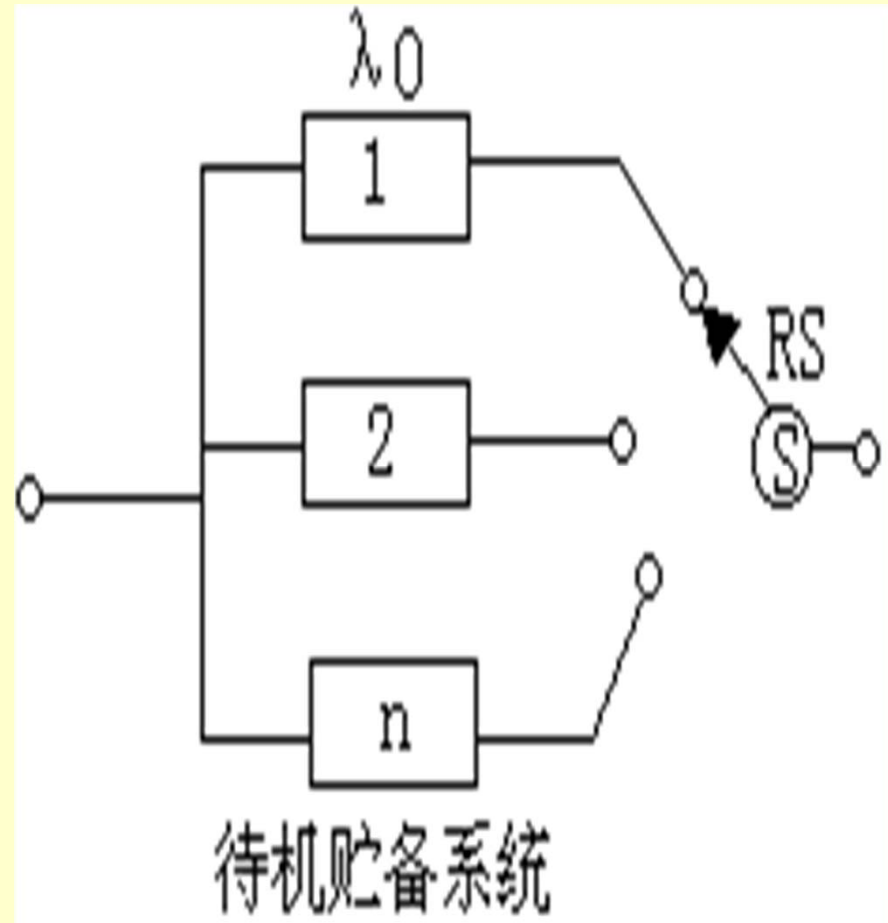
$$R(10)=0.9999; R(100)=0.9931$$

若飞机发动机的MTBF=1000h,则：

$$R(10)=0.9997; R(100)=0.97456; R(1000)=0.3064$$

5) (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贮备系统,(待机贮备系统),转换开关 s 为理想开关 $Rs=1$,只要一个部件正常,则系统正常。



冷储备系统

系统的寿命为

$$T_s = T_1 + T_2 + \cdots + T_{n+1},$$

系统的平均寿命为

$$\bar{t} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \cdots + \frac{1}{\lambda_{n+1}}.$$

- 若各单元的失效率相同,

$$\lambda_1(t) = \lambda_2(t) = \dots = \lambda_n(t) = \lambda$$

- 则储备系统的可靠度:

$$R_S(t) = e^{-\lambda t} \left[1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \frac{(\lambda t)^3}{3!} + \dots + \frac{(\lambda t)^{n-1}}{(n-1)!} \right]$$

- 当n=2时:

$$R_s(t) = e^{-\lambda t} (1 + \lambda t)$$

$$\lambda_s = \frac{-1}{R_s} \cdot \frac{dR_s}{dt} = \frac{\lambda^2 t}{1 + \lambda t}$$

$$\theta_s = \int_0^\infty R_s(t) dt = \int_0^\infty e^{-\lambda t} dt + \int_0^\infty \lambda t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda} = \frac{2}{\lambda} = 2\theta$$

注意：

1) 并联系统和表决系统为工作冗余，即热储备；而储备系统为非工作冗余，叫冷储备。

2) 应用——飞机起落架收放系统：

液压、气压、机械应急释放装置

3) 平均寿命：（ $n=2$ ）

并联系统： $\theta_s = 1.5\theta$

储备系统： $\theta_s = 2\theta$

4) 当单元的失效率不同时 (λ_1, λ_2)，且当检测装置和转换开关亦存在失效 ($R_{sw} < 1$)，则储备系统的可靠度：

$$R_s(t) = e^{-\lambda_1 t} + R_{st} \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

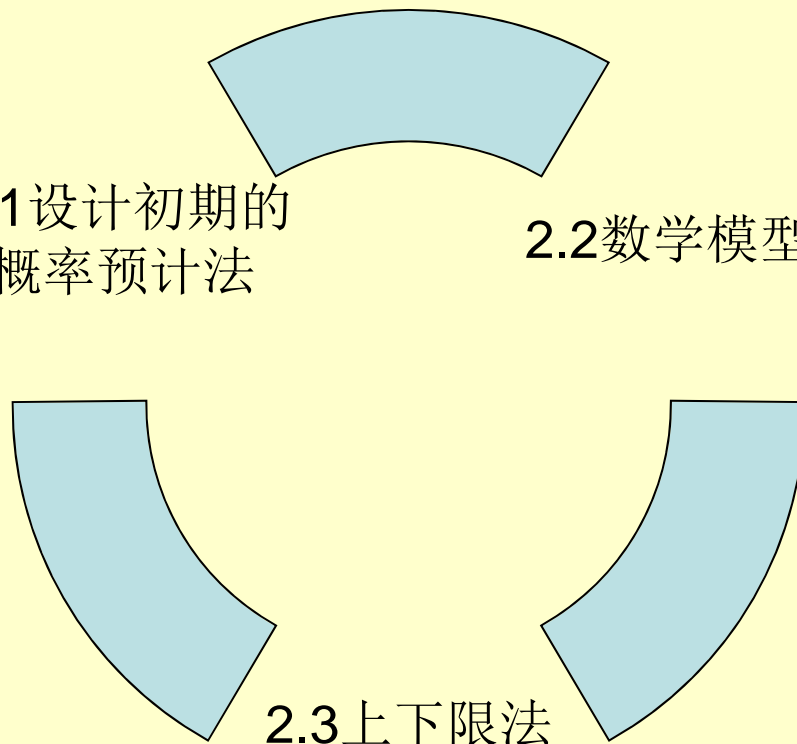
例：一储备系统由失效率为 $\lambda_1 = 0.0002/\text{h}$ 的发电机和失效率为 $\lambda_2 = 0.001/\text{h}$ 的备用电池组成，其失效检测和转换开关在10h时间的可靠度 $R_{sw} = 0.99$ ，求该电源系统工作10h的可靠度。

4.2.2 可靠性预计

2.1 设计初期的
概率预计法

2.2 数学模型法

2.3 上下限法



1)设计初期的概率预计法

设计初期的预计，虽然没有足够的数
据，但对可靠性研究、方案的比较等均起
着重重要的作用，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。

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。

该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，最终端是成为一个简单串联模型。故典型模型为：

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

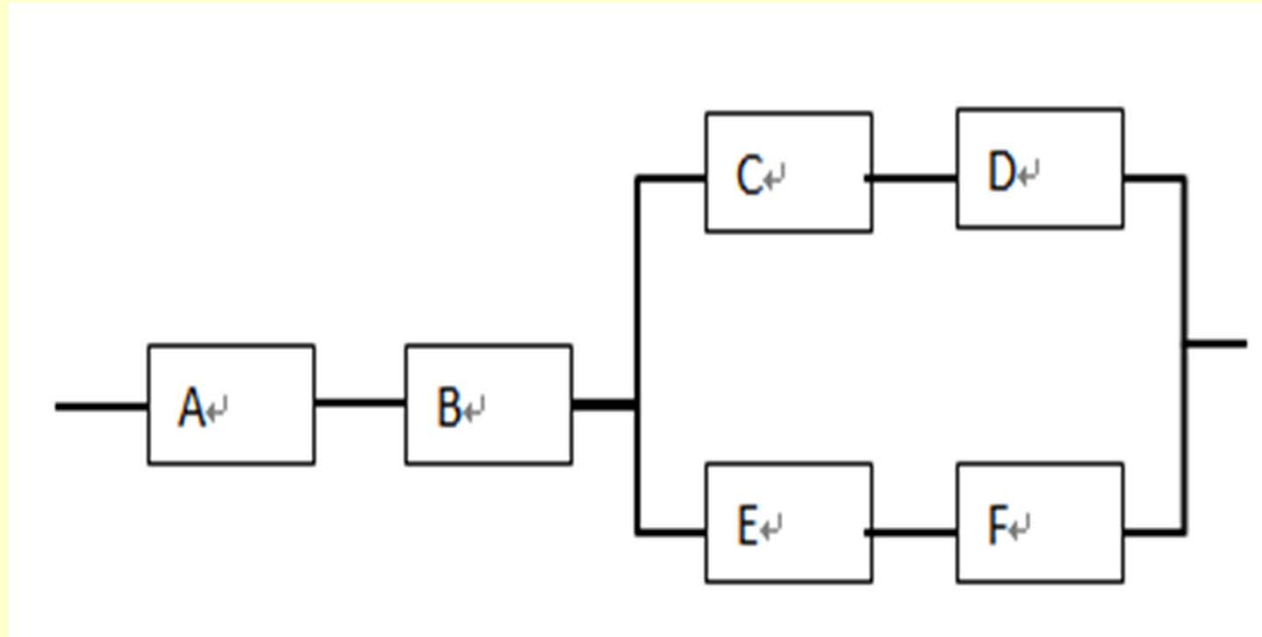
式中， $R_i(t)$ ——第*i*单元的可靠度， $i = 1, 2, \dots, n$

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

3)上下限法

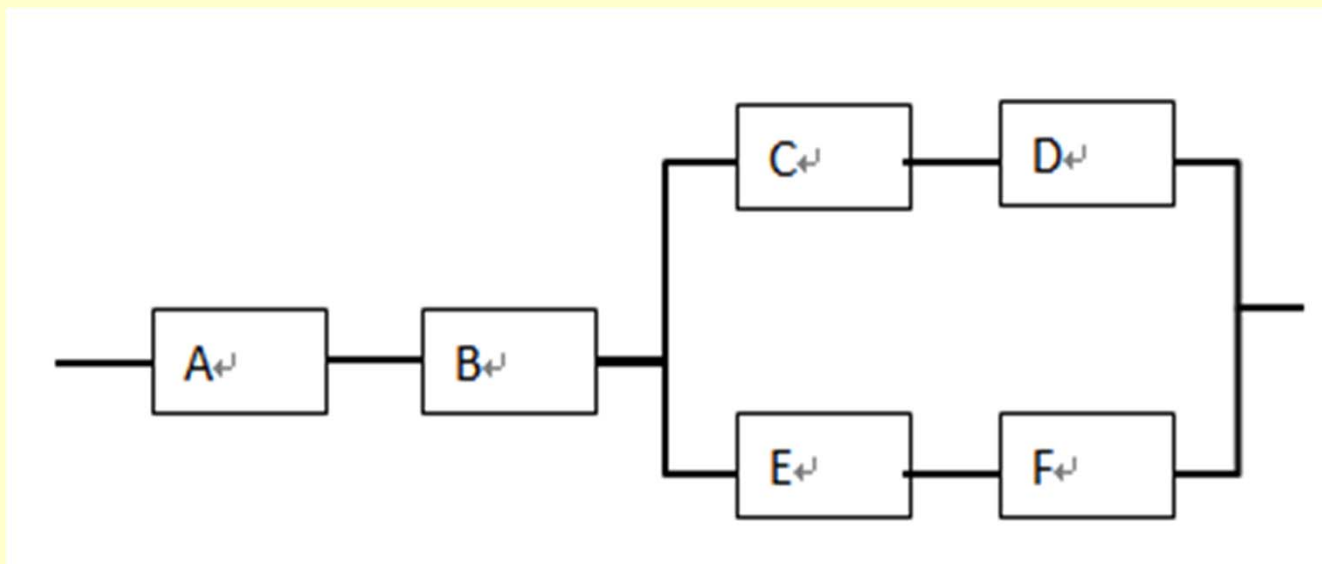
上下限法用于系统很复杂的情况，甚至由于考虑单元并不独立等原因不易建立可靠性预计的数学模型，就可用本方法预计得到相当准确的预计值。对不太复杂的系统使用上下限法能比精确的数学模型法较快地求得预计值。本方法在绘得可靠性逻辑框图后，先考虑最简化的情况，再逐步复杂化，逐次算得系统可靠度的上限和下限，并在这上下限间取系统可靠度的预计值。

例如下图所示的六个单元的串并联系统



精确答案：

$$R_S = R_A R_B (R_C R_D + R_E R_F - R_C R_D R_E R_F)$$



1) 上界值计算方法:

第一步: 只考虑串联单元发生故障的概率:

$$R_{U1} = 1 - F_1$$

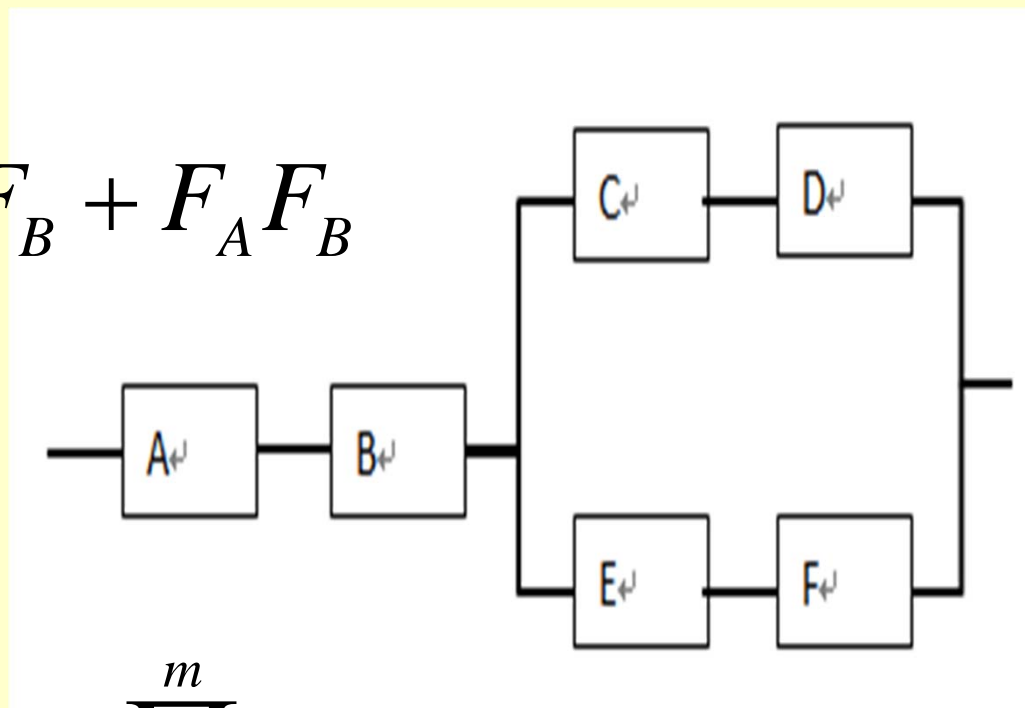
$$F_1 = F_A R_B + R_A F_B + F_A F_B$$

$$= 1 - R_A R_B$$

$$R_{U1} = R_A R_B$$

一般式为:

$$R_{U1} = \prod_{i=1}^m R_i$$



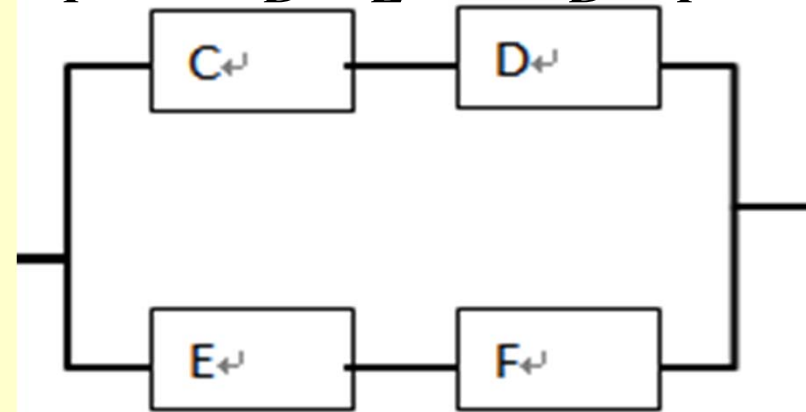
第二步：当串联单元正常，并联单元中各有一对（两个）单元失效的情况。

$$F_2 = R_A R_B (F_C F_E + F_C F_F + F_D F_E + F_D F_F)$$

$$R_{U2} = 1 - F_1 - F_2$$

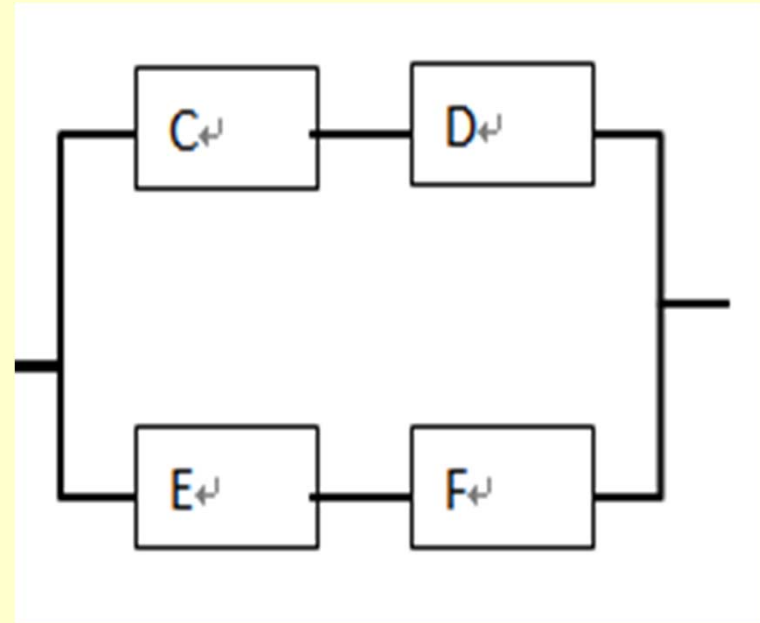
$$= R_A R_B [1 - (F_C F_E$$

$$+ F_C F_F + F_D F_E + F_D F_F)]$$



与精确结果比较可知：略去了故障概率的高阶项。

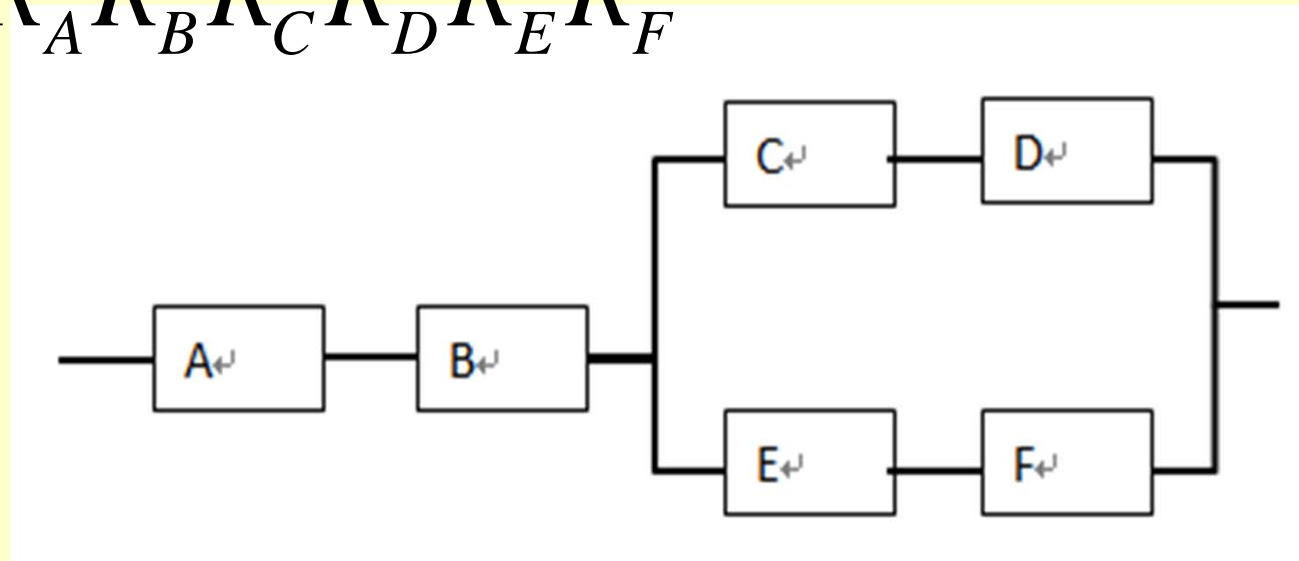
$$\begin{aligned} R_{U_2} &= 1 - F_1 - F_2 \\ &= R_A R_B [1 - (F_C F_E \\ &\quad + F_C F_F + F_D F_E + F_C F_F)] \end{aligned}$$



2) 下限值计算

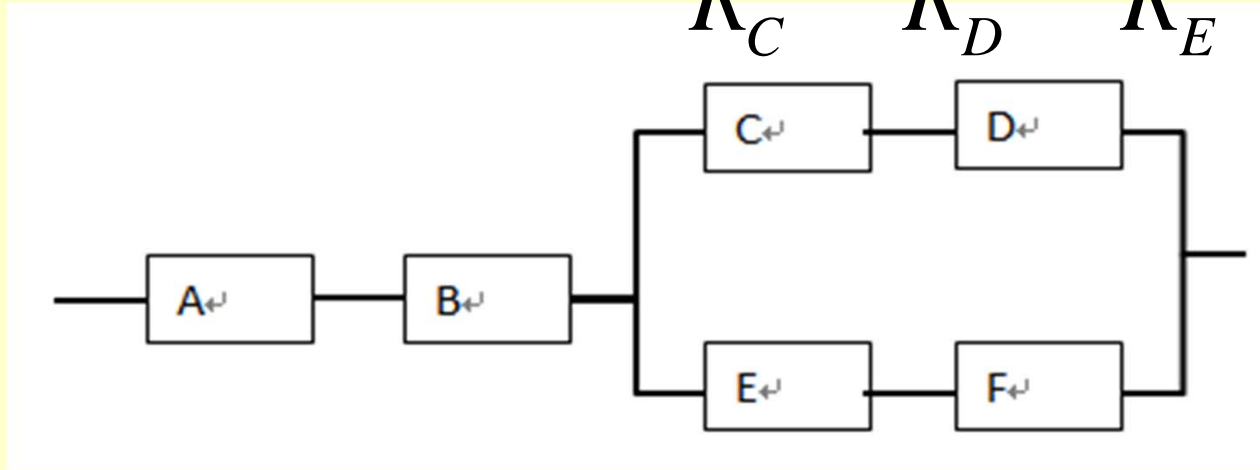
第一步：没有元件故障时，系统正常工作的概率。

$$R_{L0} = R_A R_B R_C R_D R_E R_F$$



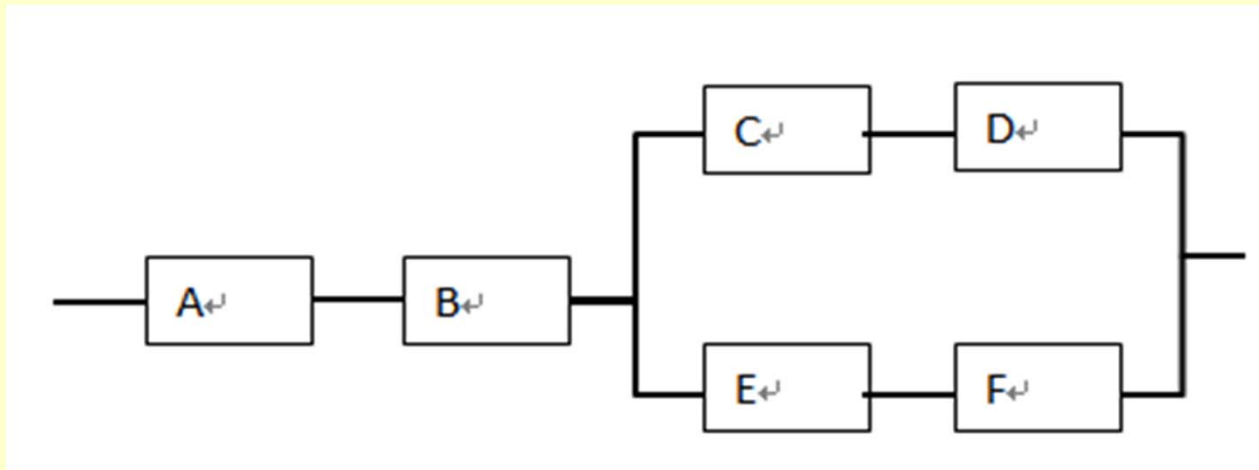
第二步：并联单元中有一个单元失效，系统能够正常工作的概率。

$$\begin{aligned} R_{Lp} &= R_A R_B F_C R_D R_E R_F + R_A R_B R_C F_D R_E R_F \\ &+ R_A R_B R_C R_D F_E R_F + R_A R_B R_C R_D R_E F_F \\ &= R_A R_B R_C R_D R_E R_F \left(\frac{F_C}{R_C} + \frac{F_D}{R_D} + \frac{F_E}{R_E} + \frac{F_F}{R_F} \right) \end{aligned}$$



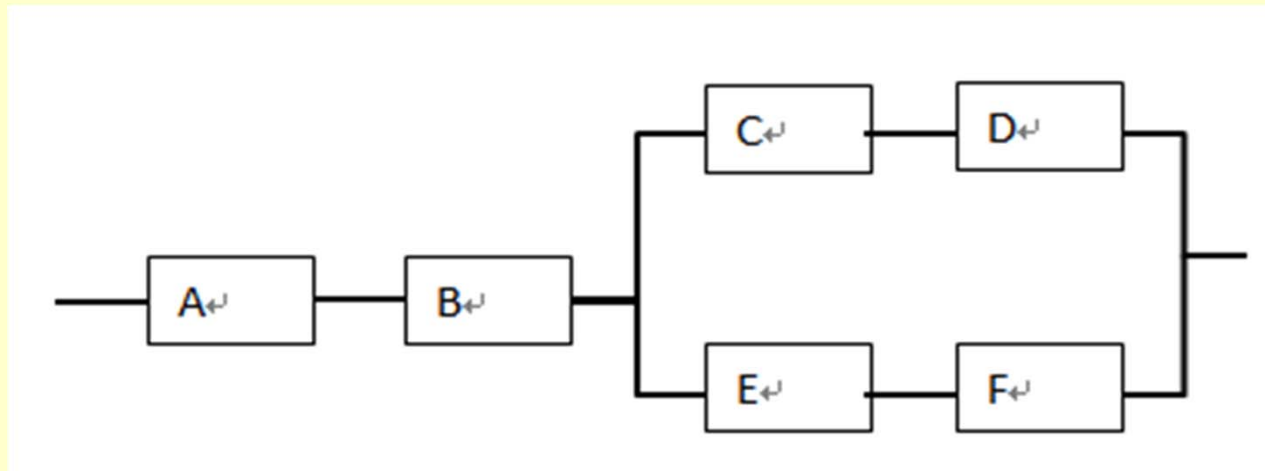
第三步：并联系统有两个单元失效，系统能够正常工作的概率。

$$\begin{aligned} R_{Lt} &= R_A R_B F_C F_D R_E R_F + R_A R_B R_C R_D F_E F_F \\ &= R_A R_B R_C R_D R_E R_F \left(\frac{F_C F_D}{R_C R_D} + \frac{F_E F_F}{R_E R_F} \right) \end{aligned}$$

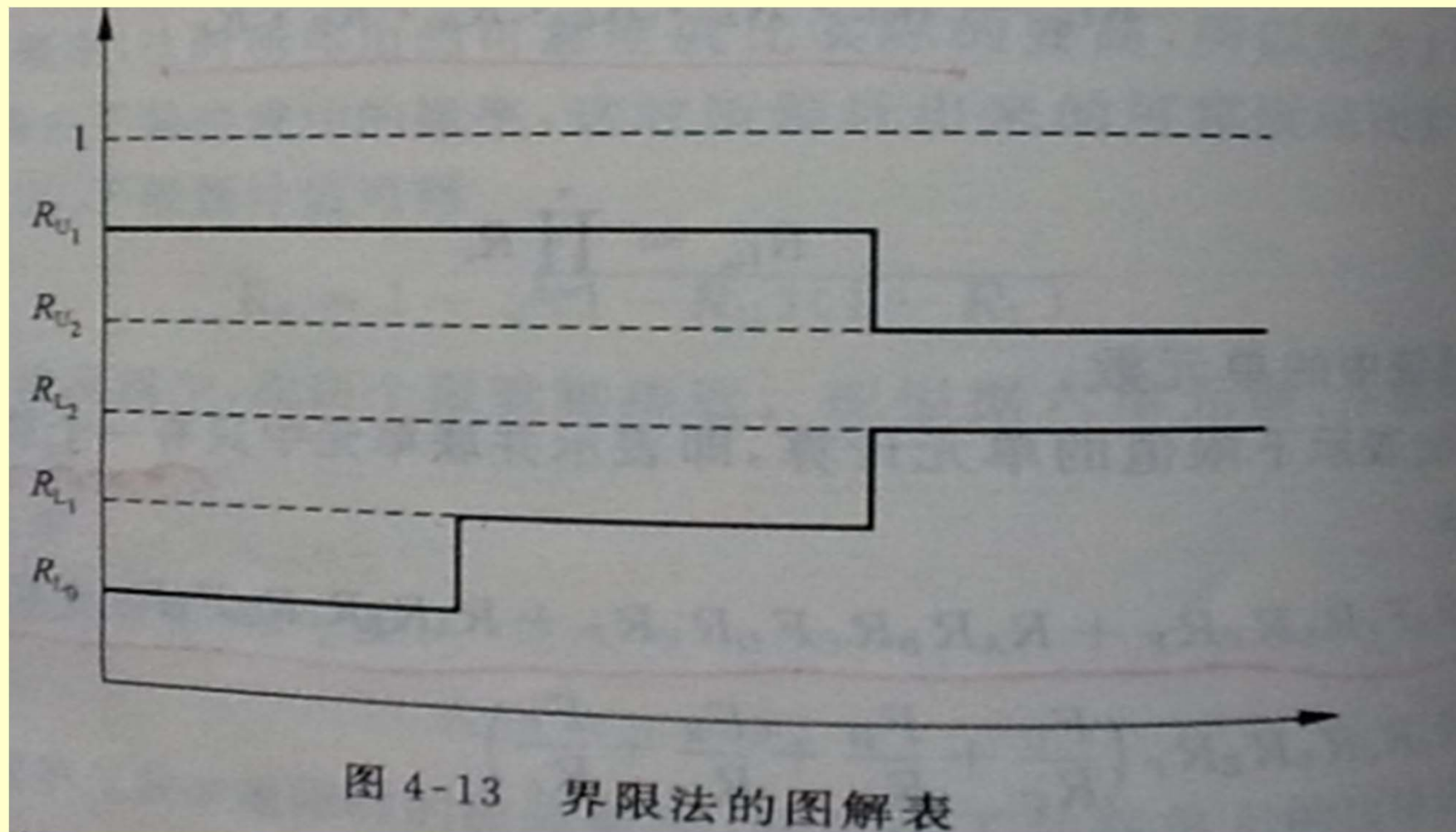


考虑系统具有0、1、2个并联单元出现故障，
系统能够正常工作的概率：

$$R_{L2} = \prod_{i=1}^n R_i \left(1 + \sum_{j=1}^n \frac{F_j}{R_j} + \sum_{k,l=1}^n \frac{F_k F_l}{R_k R_l} \right)$$



界限法的上、下界值图示



4) 蒙特卡洛模拟法

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：

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。

蒙特卡洛模拟法的概念和求解方法

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。

蒙特卡洛模拟法的概念和求解方法

二、蒙特卡洛模拟法求解步骤:

- 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。

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 $F(x_i)$ ，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 $F(x_{ij})$

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

式中 i ——变量个数， $i=1, 2, \dots, n$;
 j ——模拟次数， $j=1, 2, \dots, m$ 。

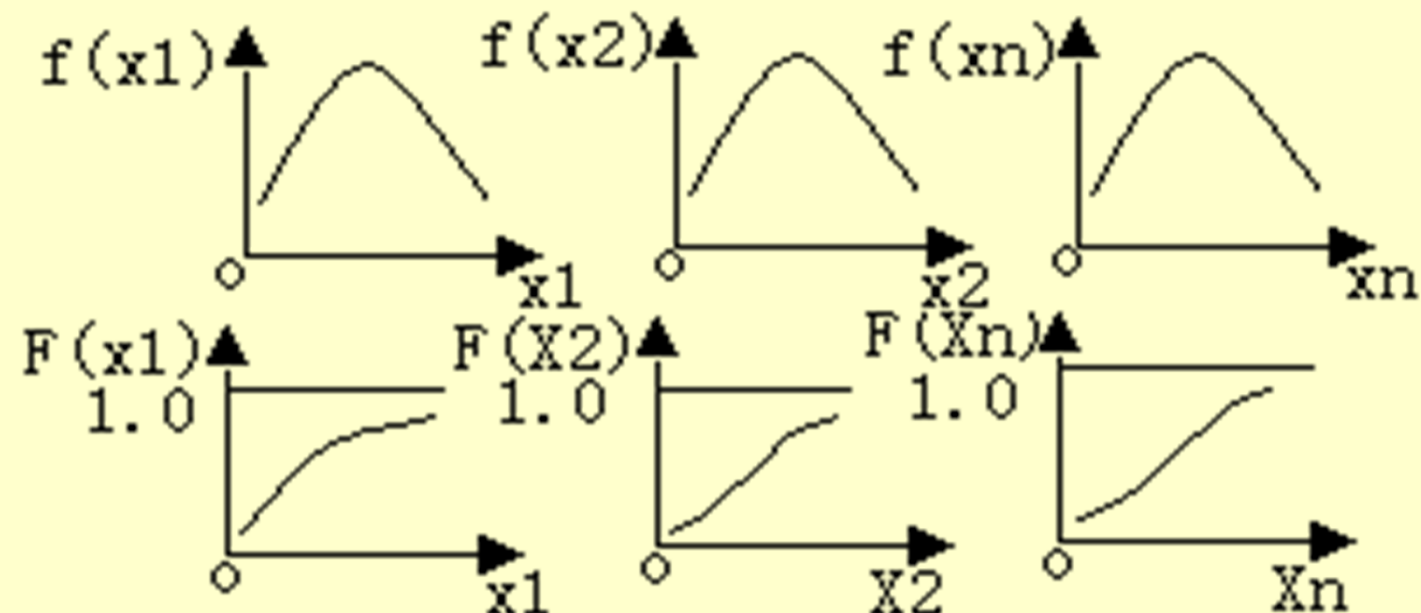
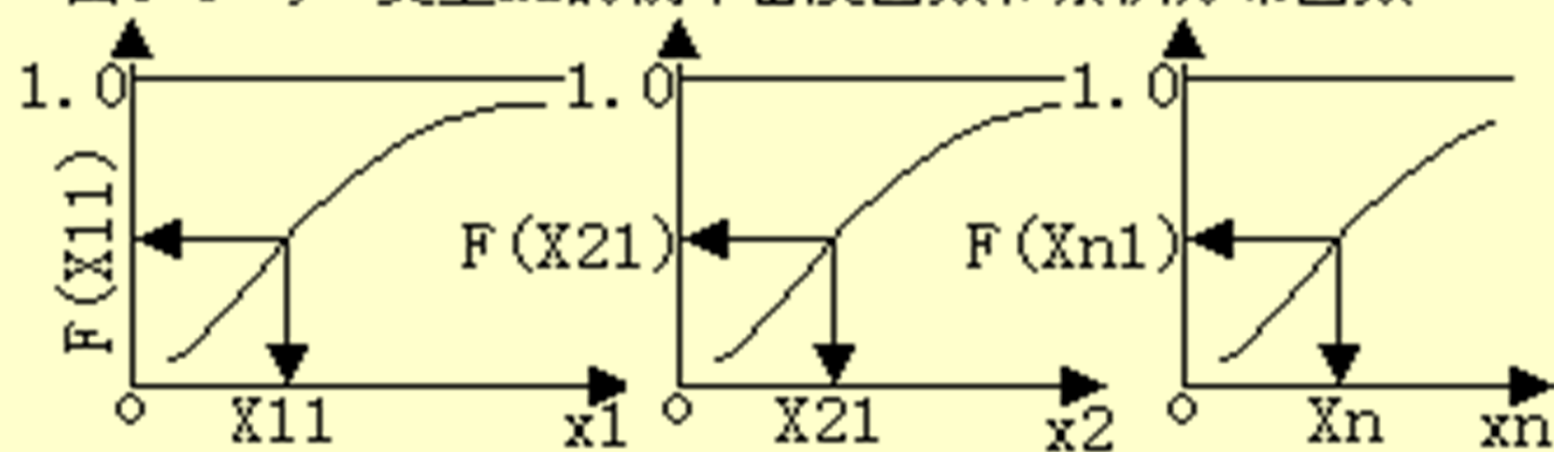


图3-1 每一变量 x_i 的概率密度函数和累积分布函数



3-2 第一次模拟得到的随机数 $(x_{11}, x_{21}, \dots, x_n)$

蒙特卡洛模拟法应用举例

- (d) 计算零件强度函数 S 的统计特征量。

$$\bar{S} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m S_j$$

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (S_j - \bar{S})^2}$$

蒙特卡洛模拟法应用举例

(e) 做强度函数**S**的直方图，并拟合其分布。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**x²**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。

习题及练习

大作业一、德国高铁惊魂

- 根据所发生的事故，考虑如果引起事故的各个事件的概率分别为： $P_1 \dots P_n$ 。
- 求：发生这个事故的失效概率。以及如何避免此类事故的发生？

1998年6月3日10点59分

德国高铁ICE884号在艾须得镇出轨撞毁
共造成101人丧生，105人受伤

德国高铁惊魂--事故的起因

1. 一个轮子严重受损，钢圈已经脱落。
2. 护轨被钢圈末端铲起，巨大的冲击力造成车厢后端车轮出轨。
3. 交汇点上车头与车身的分离。
4. 第三节车厢撞毁支柱后，路桥开始崩塌。
5. 第五节车厢被崩塌的桥梁的几吨重落下的水泥块击中，后半节全毁。
6. 第四节车厢飞出轨道撞上附近的树木。
7. 时速近**200**公里的后段车头栽进残骸中，挤压在一起。

大作业之二 北海大爆炸

- 根据所发生的事故，考虑如果引起事故的各个事件的概率分别为： $P_1 \dots P_n$ 。
- 求：发生这个事故的失效概率，如何避免此类事故发生？

英国的派珀·阿尔法钻井平台是北海产量最高的石油平台之一，12年来它为英国创造了巨额利润。但在1988年7月6日晚九时四十五分，这座平台突然发生连环大爆炸，上百万吨重的采油平台随即沉入海底，短短一个半小时内，167人失去了生命！

北海油田大爆炸 -- 事故的起因

1. 一个已拆下安全阀的泵被当作备用泵启动。
。
2. 爆炸的冲击力造成的碎片撞断了一根天然气管道，引发了第二次爆炸。
3. 工作人员大面积铺设了一层厚厚的脚垫，引起上窜的火苗。
4. 炙烤另一根高压天然气输出管，引起更大的爆炸和火势，灭顶之灾发生了。

重大事故原因

- 重大事故的后果是环环相扣的，只要有一个环节不成立，灾难就不会发生。

习题（包括第四讲全部）

1. 什么是可靠性模型，为什么要建立可靠性模型？
2. 如果要求系统可靠度为99%，设每个单元的可靠度为60%，需要多少个单元并联工作才能满足系统要求？
3. 系统由5个单元组成，其可靠度分别为，
 $R_1=0.9918$ ， $R_2=0.9879$ ， $R_3=0.9995$ ，
 $R_4=0.9796$ ， $R_5=0.975$ ；
其中 R_2 ， R_3 ， R_4 组成一个并联子系统，与 R_1 和 R_5 串联在一起。求：系统可靠度。

4、试述进行系统可靠性预计和分配的目的，并简述可靠性预计和可靠性分配的关系。

5、设系统由A、B、C三个分系统串联组成，各个分系统的可靠度 $R_a=0.9$, $R_b=0.8$, $R_c=0.85$ 。要求系统可靠度为 $R_s=0.7$ ，试进行可靠度再分配。

6、一个系统由10个部件串联组成，各个部件相互独立且可靠度相同，如果系统可靠度为0.9，求：各个部件的可靠度最小为多少？

7、如果是10个部件并联，系统可靠度仍为0.9，求各个部件可靠度。

8、一个串联系统由三个单元组成，各个单元的预计失效率分别为：

$L_1=0.005(1/h)$, $L_2=0.003(1/h)$, $L_3=0.002(1/h)$.

要求工作20h时，系统的可靠度 $R_s=0.98$,试分配各单元的可靠度值。

作业：查表练习

(1) $Z=0;$

(2) $Z=1;$

(3) $Z=2;$

(4) $Z=3;$

(5) $Z=4;$

(6) $Z=1.5;$

(7) $Z=2.5;$

(8) $Z=3.5;$

(9) $Z=0.59;$

(10) $Z=1.57,$

练习题答案（查表练习）

- (1) $Z=0$, $P_f = 0.5$; $R=0.5$;
- (2) $Z=1$, $P_f = 0.4602$; $R=0.5398$;
- (3) $Z=2$, $P_f = 0.02275$; $R=0.97725$;
- (4) $Z=3$, $P_f = 0.00135$; $R=0.99865$;
- (5) $Z=4$, $P_f = 0.00003167$; $R=0.99996833$;
- (6) $Z=1.5$, $P_f = 0.06681$; $R=0.93319$;
- (7) $Z=2.5$, $P_f = 0.00621$; $R=0.99379$;
- (8) $Z=3.5$, $P_f = 0.0002326$; $R=0.9997674$;
- (9) $Z=0.59$, $P_f=0.2776$; $R=0.7224$;
- (10) $Z=1.57$, $P_f=0.05821$; $R=0.94179$;

Thank You

- （第四讲的第一部分完）