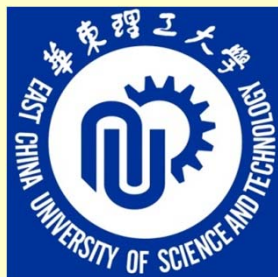




可靠性概论

第4章 机械系统可靠性设计



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

4.3 可靠性分配

- 可靠性分配的任务
- 可靠性分配的目标
- 可靠性分配的原则
- 可靠性分配的方法

- 可靠性分配的任务

将工程设计规定的可靠性指标合理地分配给组成系统的各个单元。

- 可靠性分配的目标

确定各单元合理的可靠性指标，并将他们作为元件设计的依据。

4.3 可靠性分配

4.3.1 可靠性分配的原则

- (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。

可靠性分配的原则

- (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。

可靠性分配的原则

- 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 λ_a 分配给各 i 单元 λ_i 。

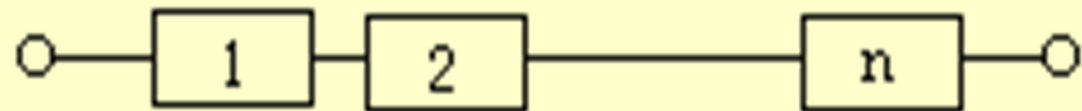
4.3.2 可靠性分配的方法

- 等分配法
- 再分配法
- 相对失效率分配法
- 按复杂度和重要度分配
- 动态规划分配法

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



13.4-3 串联系统可靠性框图

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

式中：Rs--系统要求的可靠度

R_i --第*i*单元分配得的可靠度

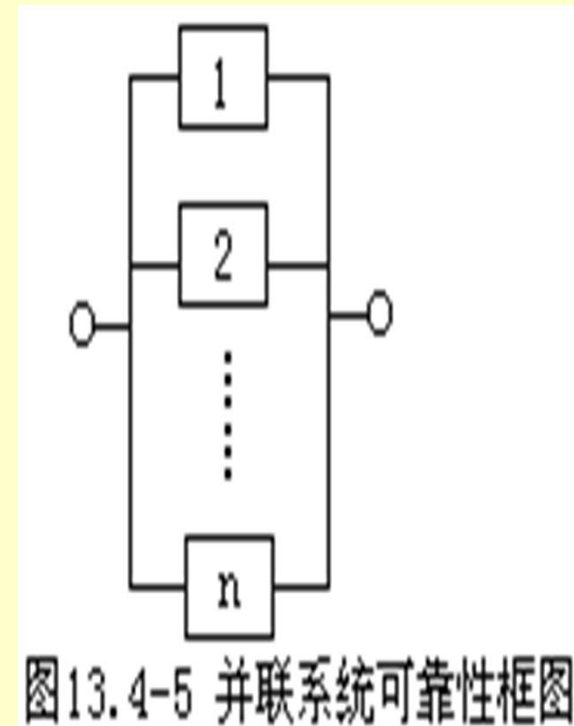
n--串联单元数

1) 等分配法

■ b. 并联系统

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

式中 F --系统要求的不可靠度
 F_i --第*i*单元分配得的不可靠度
 R_s --系统要求的可靠度
 n --并联单元数



1) 等分配法

■ c. 混联系统

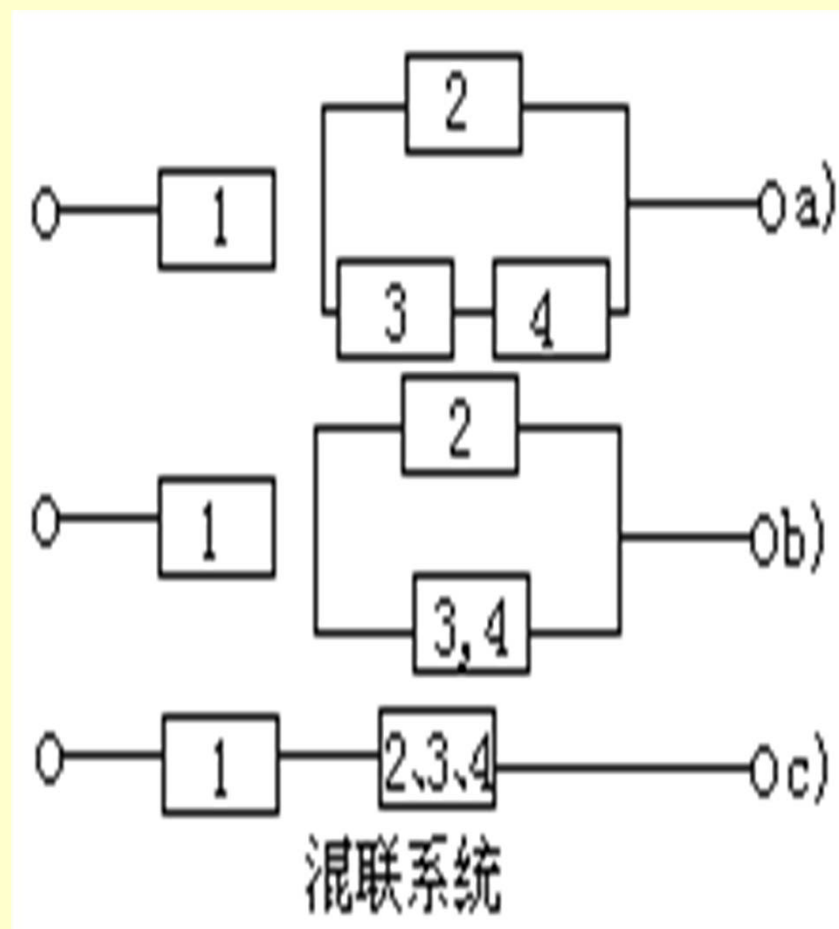
一般可化为等效的单元，同级等效单元分配给相同的可靠度。例如图中的单元可先按图c，分配得

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

再由图b分配得

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

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



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 R_1, R_2, R_n 。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，表示预计值已满足规定的要求，各单元即可分配给规定的可靠度值。反之，若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 R_s 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：

步骤:

(1) 将各单元的可靠度预测值按由小到大的次序排列

$$\hat{R}_1 < \hat{R}_2 < \dots < \hat{R}_m < \hat{R}_{m+1} < \dots < \hat{R}_n$$

(2) 令 $R_1 = R_2 = \dots = R_m = R_0$

(3) 找出m值（低可靠度单元），建立不等式

$$\hat{R}_m < R_0 = \left[\frac{R_s}{\prod_{i=m+1}^n \hat{R}_i} \right]^{\frac{1}{m}} < \hat{R}_{m+1}$$

(4) 单元可靠度的再分配

$$R_1 = R_2 = \dots = R_m = \left[\frac{R_s}{\prod_{i=m+1}^n \hat{R}_i} \right]^{\frac{1}{m}}$$

$$R_{m+1} = \hat{R}_{m+1}, R_{m+2} = \hat{R}_{m+2}, \dots, R_n = \hat{R}_n$$

再分配法应用实例：

设由4个单元组成的串联系统的可靠度的预测值由小到大的排列为： 0.9507,0.9570,0.9856,0.9998;

若设计规定串联系统的可靠度 $R_s=0.9560$ ，试进行可靠度的再分配。

解： $\because \hat{R}_s = \prod_{i=1}^4 \hat{R}_i = 0.8965 < R_s = 0.9560$

设 $m=2$,则有

$$R_0 = \left[\frac{R_s}{\hat{R}_3 \hat{R}_4} \right]^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{0.9560}{0.9856 + 0.9998} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.9850$$

$$R_1=R_2=0.9850,$$

$$R_3 = \hat{R}_3 = 0.9856, R_4 = \hat{R}_4 = 0.9998$$

3)相对失效率分配法

- 原则：使系统中各单元的允许失效率正比于该单元的预计失效率值；
- 适用条件：失效率为常数的串联系统

- 分配方法:

(1) 根据统计数据或现场使用经验, 定出各单元的预计失效率值;

(2) 计算各单元的相对失效率;

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

(3) 按给定的系统可靠性指标Rsa及要求的工作时间t计算系统的允许失效率;

$$\lambda_{sa} = -\frac{1}{t} \ln R_{sa}$$

(4) 计算各单元的允许失效率

$$\lambda_{ia} = \omega_i \lambda_{sa}$$

(5) 计算各单元的可靠度

$$R_{ia} = e^{-\lambda_{ia} t}$$

(6) 检验系统的可靠度是否满足要求

$$R_{sa}(t) \geq R_{sa}$$

相对失效率分配法应用实例

一个串联系统由三个单元组成，各单元的预计失效率分别为 $\lambda_1=0.005/\text{h}$, $\lambda_2=0.003/\text{h}$, $\lambda_3=0.002/\text{h}$, 要求工作20h时系统的可靠度为 $R_{sa}=0.98$, 应给各单元分配的可靠度各为多少？

4) 按复杂度和重要度分配 (AGREE)

- AGREE——美国电子设备可靠性顾问团
- 复杂度——单元中所含的重要零件、组件（其失效会引起单元失效）的数目 N_i 与系统中重要零件、组件的总数 N 之比。

$$V_i = \frac{N_i}{N} = \frac{c_i}{\sum_{i=1}^n c_i}$$

- 重要度——该单元的失效引起系统失效的概率。 E_i

复杂度和重要度分配方法：

(1) 确定各单元的复杂度 c_i 和重要度 E_i ;

(2) 计算各单元的相对复杂度 V_i

$$V_i = \frac{c_i}{\sum_{i=1}^n c_i}$$

(3) 由系统可靠度 R_{sa} 计算分配给各单元的可靠度 R_{ia}

$$R_{ia} = 1 - \frac{1 - R_{sa}^{V_i}(T)}{E_i}$$

式中： c_i ——各单元的复杂度；

$R_{sa}(T)$ ——系统工作T时间的可靠度；

E_i ——单元i的重要度。

复杂度和重要度分配方法应用实例：

一个四单元的串联系统，要求在连续工作48h期间的系统可靠度为0.96，而单元1，单元2的重要度为 $E_1=E_2=1$ ；单元3工作时间10h,重要度为 $E_3=0.90$ ；单元4的工作时间为12h,重要度 $E_4=0.85$ ，问怎样分配系统的可靠度？（已知各种零件组数分别为10，20，40，50）

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，使费用或重量，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

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

式中, R_s — 规定的系统可靠度

R_i — 第*i*单元分配得的可靠度

R_i — 第*i*单元现有可靠度

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

b. 并联系统

$$\left. \begin{array}{l} \min \sum_{i=1}^n G_i(\bar{F}_i, F_i) \\ \prod_{i=1}^n F_i \leq F_S \\ 0 < F_i \leq \bar{F}_i < 1 \\ i = 1, 2, \dots, n \end{array} \right\}$$

式中, F_S —规定的系统不可靠度

\bar{F}_i —第*i*单元分配得的不可靠度

F_i —第*i*单元现有不可靠度

$G_i(F_i, \bar{F}_i)$ —第*i*单元不可靠度由 F_i 降到 \bar{F}_i 的所需费用函数

习题布置



4.4 故障树分析

4.4.1 基本概念

4.4.2 故障树分析中的常用符号

4.4.3 故障树的建立

4.4.4 故障树的定性分析

4.4.5 故障树的定量计算

4.4.1 故障树分析的基本概念

1) 定义:

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，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。

2) 作用

- (1) 在工程设计阶段可以帮助寻找潜在的事故;
- (2) 在运行阶段可以用作失效预测。

4.4.1 故障树分析的基本概念

3) 事件描述:

事故事件——研究系统的各种故障、失效和不正常情况;

成功事件——各种正常状态和完好情况;

顶事件——事故分析的目标和关心的结果;

底事件——导致其他事件发生的原因, 及顶事件发生的根本原因这一事件;

中间事件——位于顶事件与底事件之间的中间结果事件。

4.4.1 故障树分析的基本概念

4) 故障树分析的特点:

- (1) 形象、直观（图形演绎方法），能了解故障事件的内在联系及单元故障与系统故障间的逻辑关系；
- (2) 可提高系统可靠度的分析精度；
- (3) 可以用计算机来辅助建树；
- (4) 能进行定性分析和定量计算；
- (5) 可用于经济管理和人员培训等其他工作。

4.4.1 故障树分析的基本概念

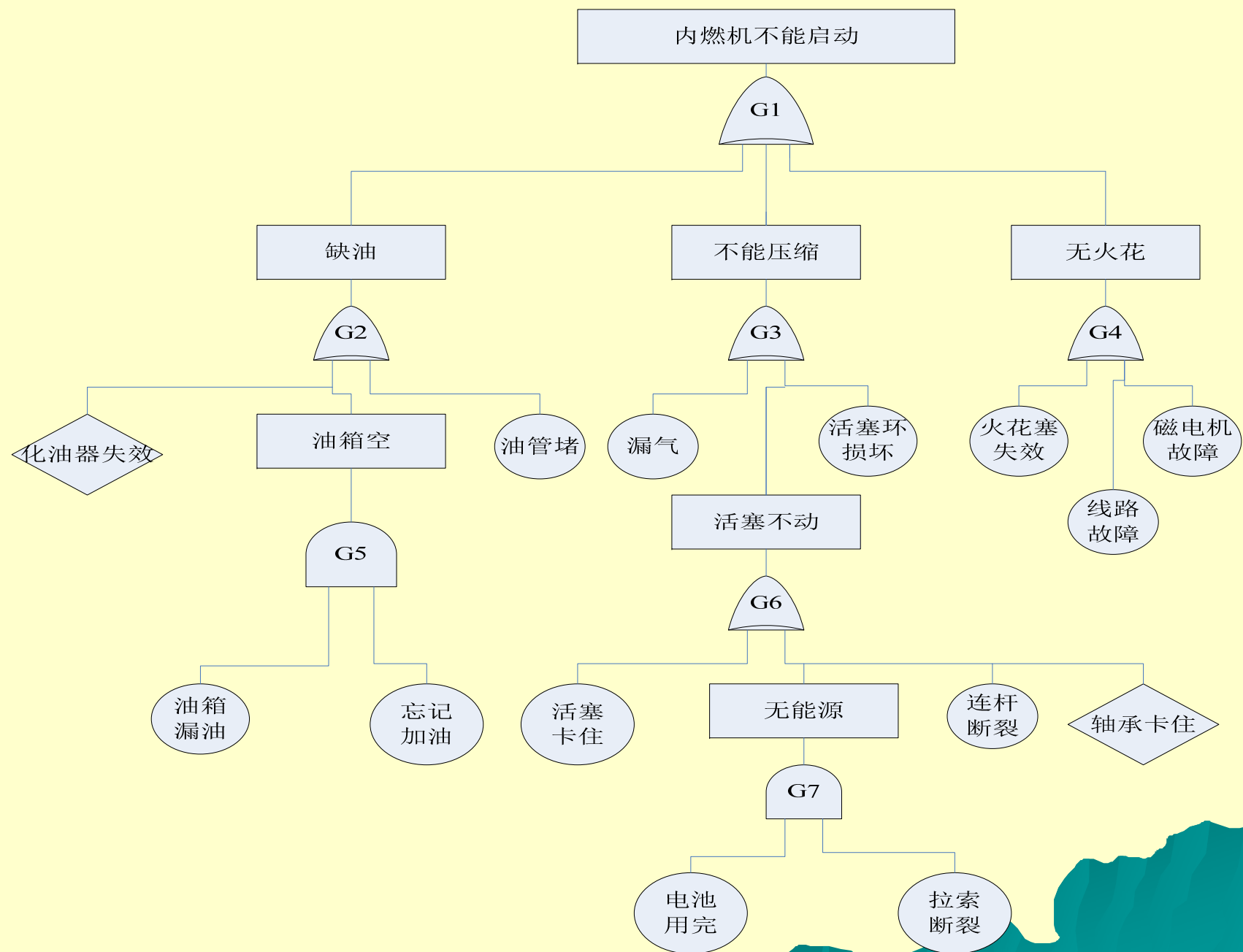
5) 故障树分析的一般步骤:

- (1) 建立故障树;
- (2) 建立故障树的数学模型;
- (3) 进行系统可靠性的定性分析;
- (4) 进行系统可靠性的定量计算。

- ◆ 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。



4.4.2故障树分析中常用符号

1)事件符号

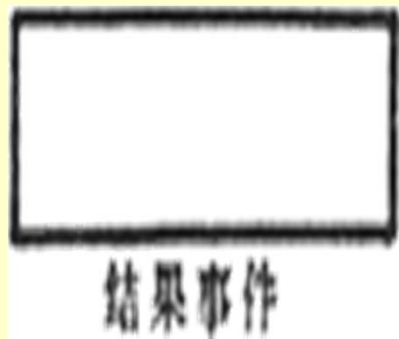
底事件 ——底事件是故障树分析中仅导致其他事件的原因事件，圆形符号是故障树中的基本事件,是分析中无需探明其发生原因的事件



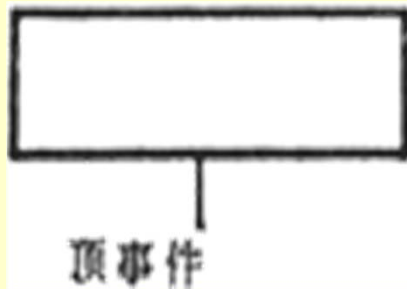
圆形符号是故障树中的基本事件,是分析中无需探明其发生原因的事件



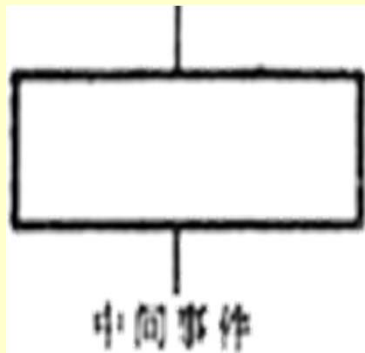
菱形符号是故障树分析中的未探明事件,即原则上应进一步探明其原因但暂时不必或暂时不能探明其原因的事件.它又代表省略事件,一般表示那些可能发生,但概率值微小的事件;或者对此系统到此为止不需要再进一步分析的故障事件,这些故障事件在定性分析中或定量计算中一般都可以忽略不计



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



顶事件是故障树分析中所关心的结果事件



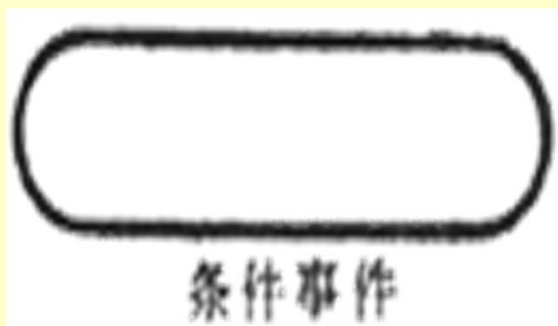
中间事件是位于顶事件和底事件之间的结果事件

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。



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。



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

2) 逻辑符号



与门表示仅当所有输入事件发生时，输出事件才发生



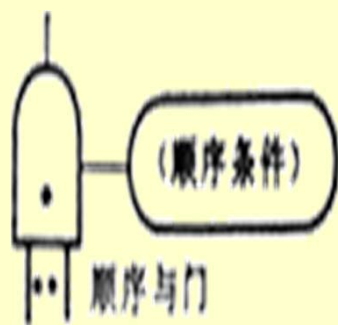
或门表示至少一个输入事件发生时，输出事件就发生



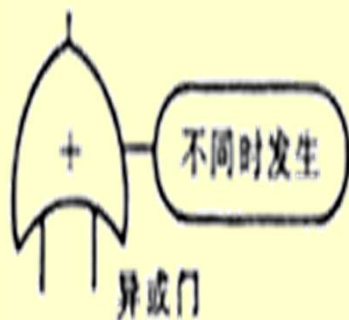
非门表示输出事件是输入事件的对立事件



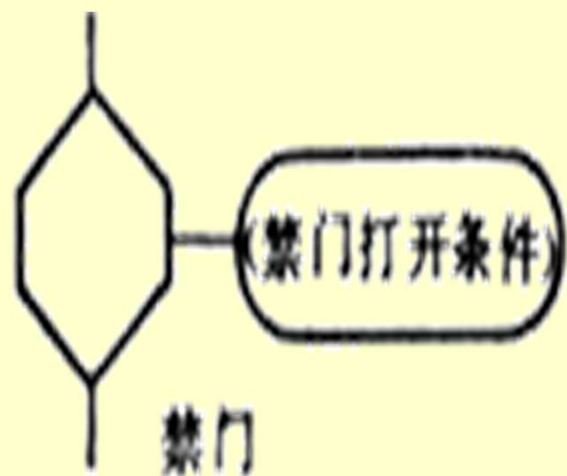
表决门表示仅当 n 个输入事件中有 k 个或 k 个以上的事件发生时，输出事件才发生



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

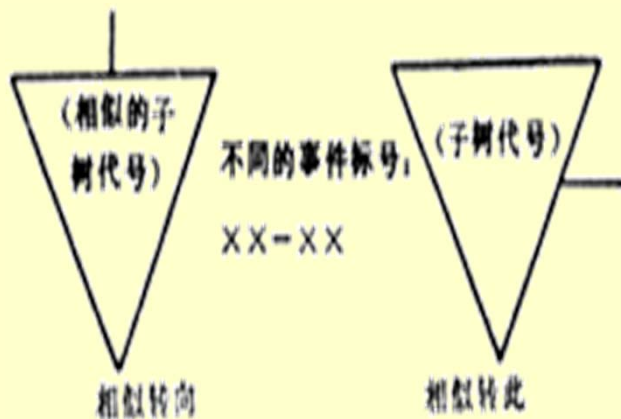


异或门表示仅当单个输入事件发生时，输出事件才发生



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

3) 转移符号



相同转移符号用以指明子树的位置，转向和转此字母代号相同

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

4.4.3故障树的建立

1)故障树建立的步骤:

- 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。

故障树建立的步骤

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。

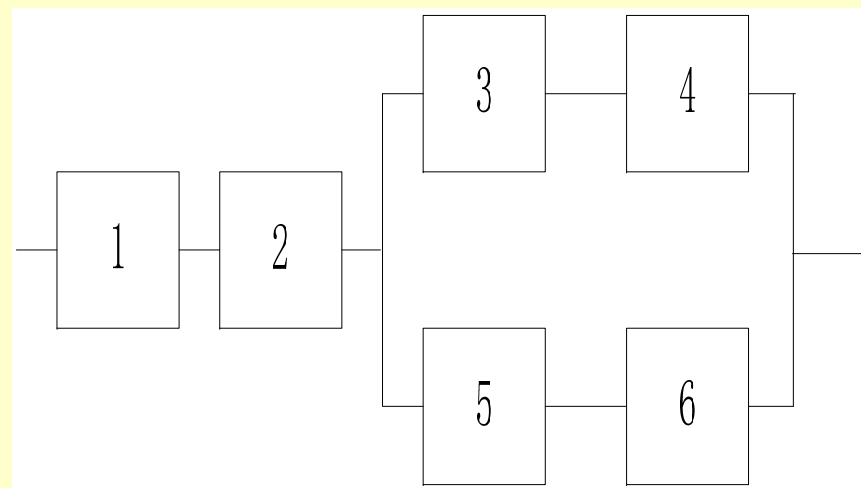
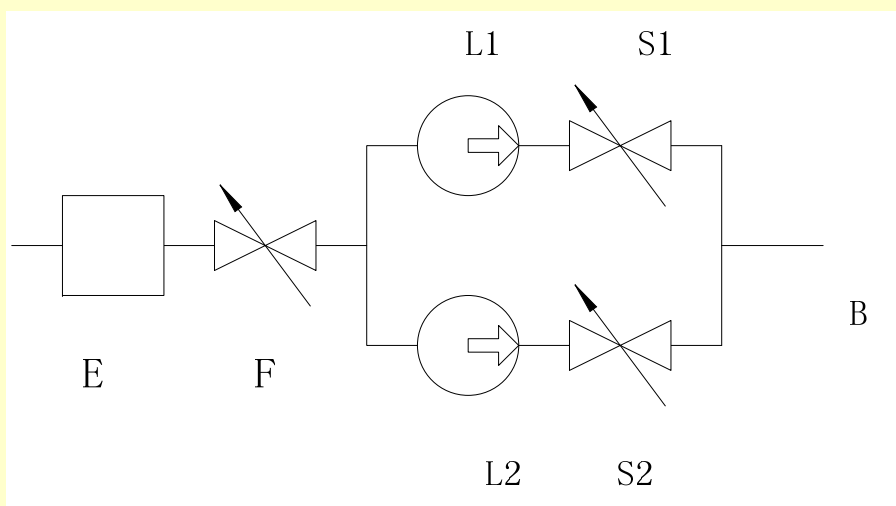
4.4.3故障树的建立

2)建树时的注意事项

- a.选择建树流程时，以系统功能为主线，按演绎逻辑贯穿始终；
- b.合理选择和确定系统及单元的边界条件；
- c.故障事件定义要明确，描述要具体，且具有唯一解释；
- d.系统中的各逻辑关系和条件必须十分清楚；
- e.应尽量简化，去掉逻辑多余事件。

4.4.3故障树的建立

3) 建树实例



4.4.4故障树的定性分析

- ◆ 目的——找出故障树中所有导致顶事件发生的最小割集；
- ◆ 割集——导致故障树顶事件发生的若干底事件的集合；即当这些底事件发生时，顶事件必然发生。
- ◆ 最小割集——若割集中的任一底事件不发生，顶事件就不发生，则这样的割集为最小割集；
- ◆ 最小割集的阶——组成最小割集的底事件的个数。

$\{x_1\}$ 、 $\{x_2\}$ 为一阶割集；

$\{x_1, x_2\}$ 为二阶割集；

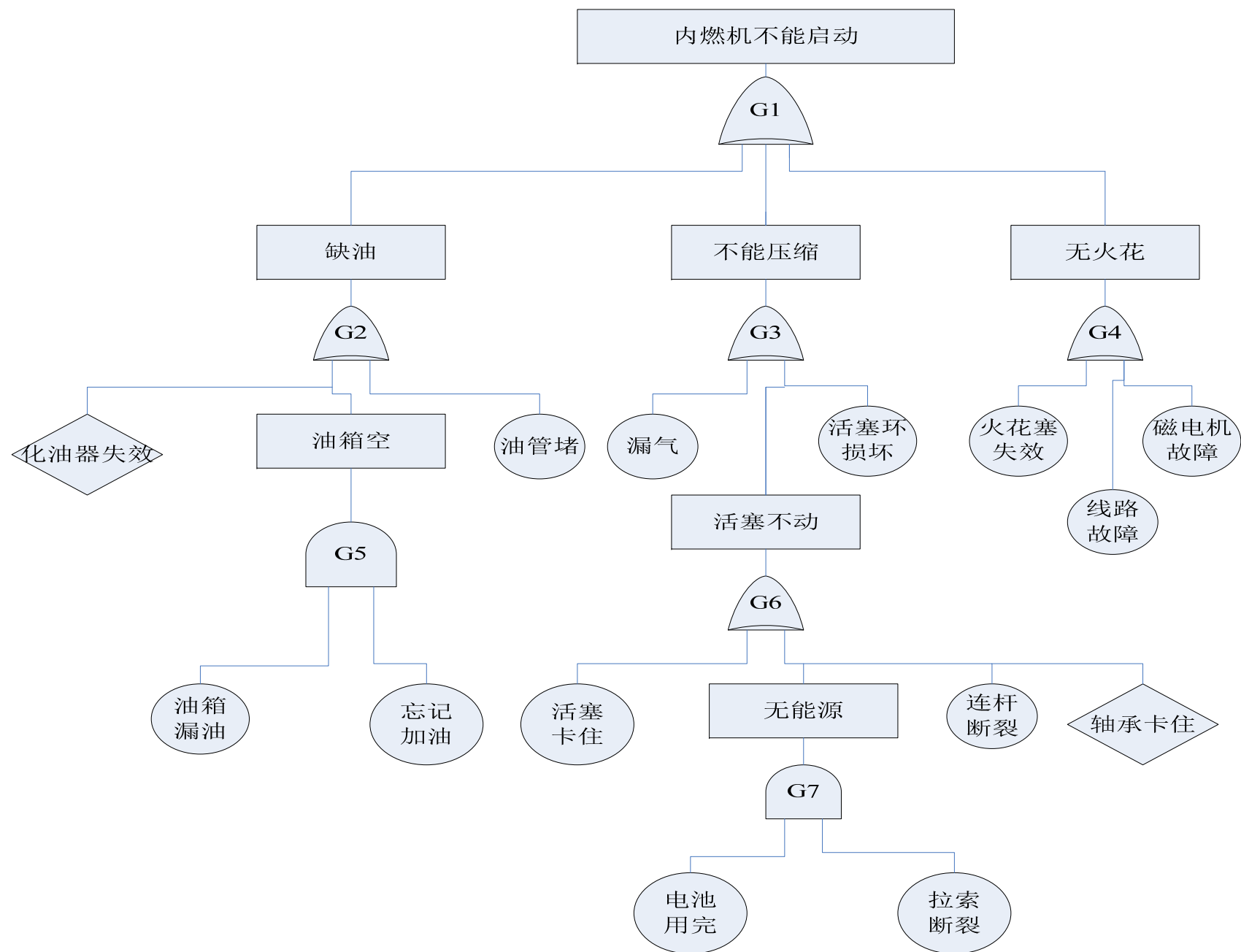
注：阶数越低，越容易出故障，因此，最低阶的最小割集通常是系统的薄弱环节。

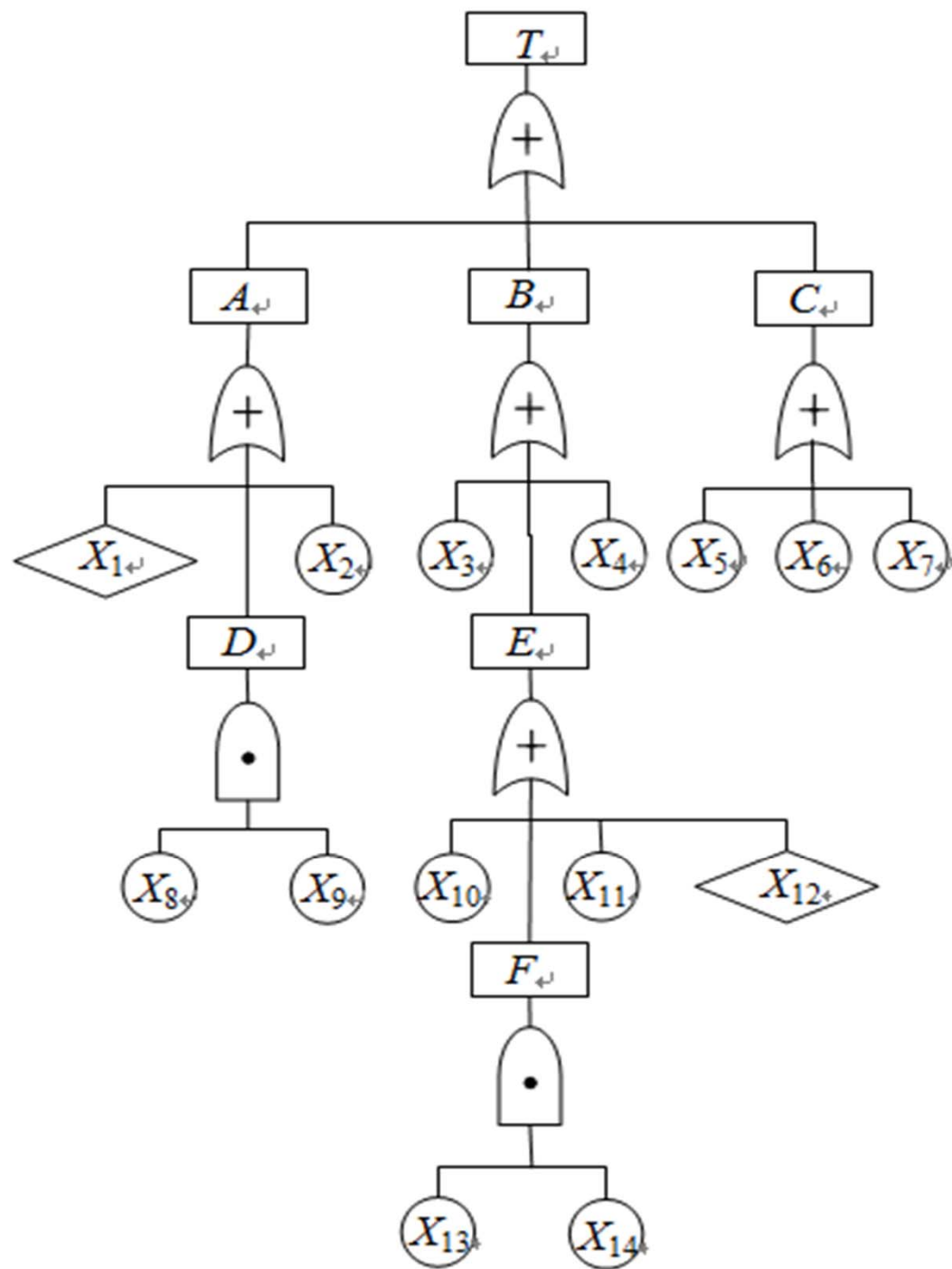
4.4.5故障树的定量分析

- 目的——当给定所有底事件发生的概率时，求出顶事件发生的概率及其他定量指标。
- 方法——直接概率法
- 准则——故障树中的“或门”相当于可靠性框图中的“串联”模型；
故障树中的“与门”相当于可靠性框图中的“并联”模型；

注意：

- 1) 对于复杂故障树，应依据此原则依次计算，直至求出顶事件发生的概率；
- 2) 要求所有底事件相互独立，且同一底事件在故障树中只能出现1次。





T—内燃机不能起动;
A—燃料不足;
B—压缩不足;
C—无火花;
D—油箱内无油;
E—活塞不能移动;
F—转动能量不足;
X1—汽化器故障;
X2—油管堵塞;
X3—密封漏气;
X4—活塞环故障;
X5—火花塞故障;
X6—磁电机故障;
X7—线路故障;
X8—上次用完;
X9—未检查油箱;
X10—活塞楔住;
X11—活塞杆断裂;
X12—轴承咬合;
X13—电池用完;
X14—拉索断裂

可靠度计算:

已知: $P(X1)=0.08$, $P(X2)=0.01$,
 $P(X3)=0.001$, $P(X4)=0.001$,
 $P(X5)=0.02$, $P(X6)=0.01$, $P(X7)=0.01$,
 $P(X8)=0.08$, $P(X9)=0.02$,
 $P(X10)=0.001$, $P(X11)=0.08$,
 $P(X12)=0.001$, $P(X13)=0.04$,
 $P(X14)=0.03$ 。

$$P(D) = P(X_8) \times P(X_7) = 0.0016$$

$$P(F) = P(X_{13}) \times P(X_{14}) = 0.0012$$

$$P(A) = 1 - \prod_{i=1}^N [1 - P(X_i)] = 1 - [1 - P(D)][1 - P(X_1)][1 - P(X_2)] = 0.03135$$

$$P(E) = 1 - [1 - P(X_{10})][1 - P(F)][1 - P(X_{11})][1 - P(X_{12})] = 0.004193$$

$$P(B) = 1 - [1 - P(X_3)][1 - P(E)][1 - P(X_4)] = 0.006184$$

$$P(C) = 1 - [1 - P(X_5)][1 - P(X_6)][1 - P(X_7)] = 0.03950$$

顶事件发生的概率为：

$$P(T) = 1 - [1 - P(A)][1 - P(B)][1 - P(C)] = 0.07536$$

习题

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。

Thank You

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) $Z=1.57$, $P_f=0.05821$; $R=0.94179$;