

# 第五章 故障树分析 (FTA)

## 内容提要



### § 5-1 FTA 的基本概念

- 一、FTA的含义
- 二、FTA的特点
- 三、FTA的优缺点
- 四、FTA的发展及主要应用方面

### § 5-2 建立故障树

- 一、建立故障树的常用符号
- 二、建立故障树的基本方法
- 三、建立故障树的示例

### § 5-3 故障树的数学描述

- 一、故障树的结构函数
- 二、故障树与可靠性框图的等价关系

## 第五章 故障树分析 (FTA)

### § 5-1 FTA 的基本概念

#### 一、FTA的含义

**FTA:** 是一种系统化的演绎方法, 它以系统不希望发生的一个事件 (顶事件) 作为分析的目标。

**第一步** 去寻找所有引起顶事件的直接原因;

**第二步** 再分别找上述每个直接原因的所有直接原因, 依次进行, 直至最基础的直接原因 (底事件)。

用一定**符号建树**，**表达**上面的关系，用以找出系统内可能存在的元件失效、环境影响、软件缺陷和人为失误等**各种因素（底事件）和系统失效（顶事件）之间的逻辑关系**。

从而**定量地研究**“底事件”对“顶事件”的影响的一种分析方法。俗称“**打破砂锅问到底**”的方法。

## 二、FTA的特点

1. FTA 是一种由上而下（由系统到元件）的系统完整的失效因果关系的分析程序。旨在不漏过一个基本故障模式。
2. FTA是一种定量分析的手段，它使用树形图来进行分析。
3. 因为FTA使用严格的数学公式，故便于编成程序由计算机运算。

### 三、FTA的优缺点

#### 1. FTA的优点:

(1) FTA可追溯系统失效的根源到基础元件失效（底事件）的组合关系。

因此，它是一种**多因素的分析法**，可以分析几种因素同时起作用才能导致的某种后果。

(2) FTA **逻辑推理严谨，数学计算严密**，既能**定性地判断**，又能**定量地计算**各底事件对顶事件影响程度的大小。

## 2. FTA的缺点：

因为FTA是一种系统化的演绎方法，所以分析过程比较繁琐，计算量很大，需借助于计算机完成。且在分析过程中若稍有疏忽，有可能漏过某一后果严重的故障模式。

## 四、FTA的发展及主要应用方面

故障树分析法（FTA）是1961年提出来的，首先用于分析导弹发射系统，后来推广应用到航天部门、核能及化工等许多领域，虽然其出现已经近四十多年了，但其发展仍方兴未艾。

FTA是分析复杂系统可靠性和安全性的有效方法，它便于分析单调关联系统、非单调关联系统、多状态系统和多状态非单调关联等系统的可靠性和安全性。

本章我们仅介绍用FTA分析单调关联系统可靠性的方法。

## § 5-2 建立故障树

**建立故障树**（简称建树）是FTA的**关键**，如有错、漏，定性和定量分析将失去意义。

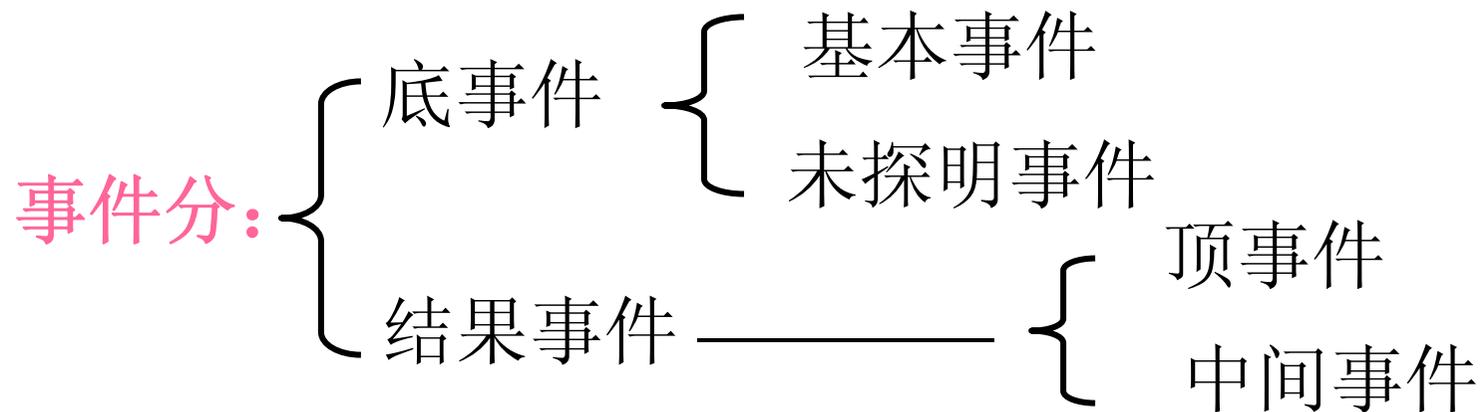
为能正确建树，首先应了解**建树所用符号**。

### 一、建立故障树的常用符号

关于故障树的符号，现在我国已有技术标准，今后大家需用时请详阅**GB4888-85《故障树名词术语和符号》**。

此处我们仅介绍几种常用的有关符号。

## 1. 事件符号



(1) 底事件——FTA中仅导致其他事件的原因事件。

①基本事件——

在FTA中无需探明其发生原因的底事件，符号见图1。

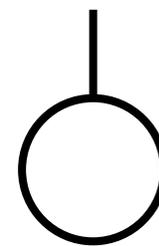


图1

② 未探明事件——

在FTA中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底事件，符号见图2。

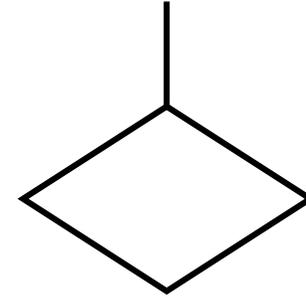


图2

(2) 结果事件——

FTA中由其他事件或事件组合所导致的事件。

① 顶事件——

FTA所关心的结果事件  
(最终研究的结果事件)  
符号见图3。

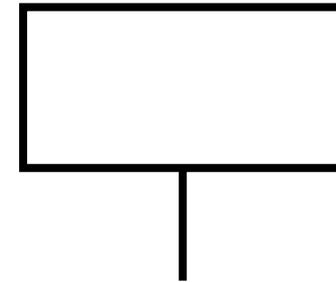


图3

② 中间事件——

FTA中位于底事件和顶事件之间的结果事件。

中间事件符号见图4。

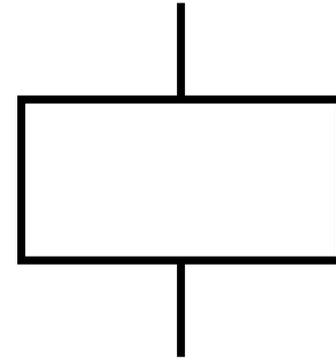
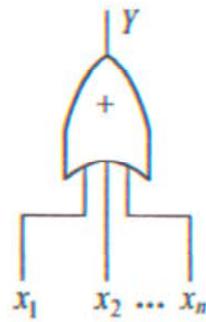
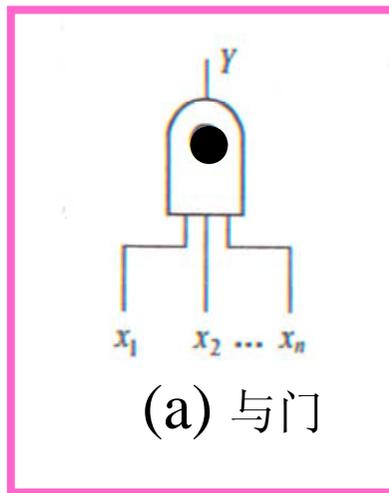


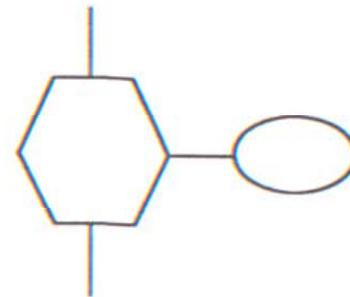
图4

## 2. 逻辑门符号

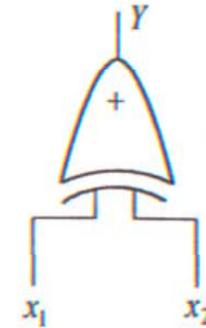
(1) 与门——表示仅当**所有输入事件（原因事件）发生时，输出事件（结果事件）才发生**。符号如图5-1(a)。



(b) 或门



(c) 禁门



(d) 异或门

图5-1逻辑门符号

(2) 或门——表示至少一个输入事件发生时输出事件就发生。符号如图5-1(b)。

(3) 禁门——当给定条件满足时, 则输入事件直接引起输出事件发生, 否则不发生。椭圆形内注明条件。符号如图5-1(c)。

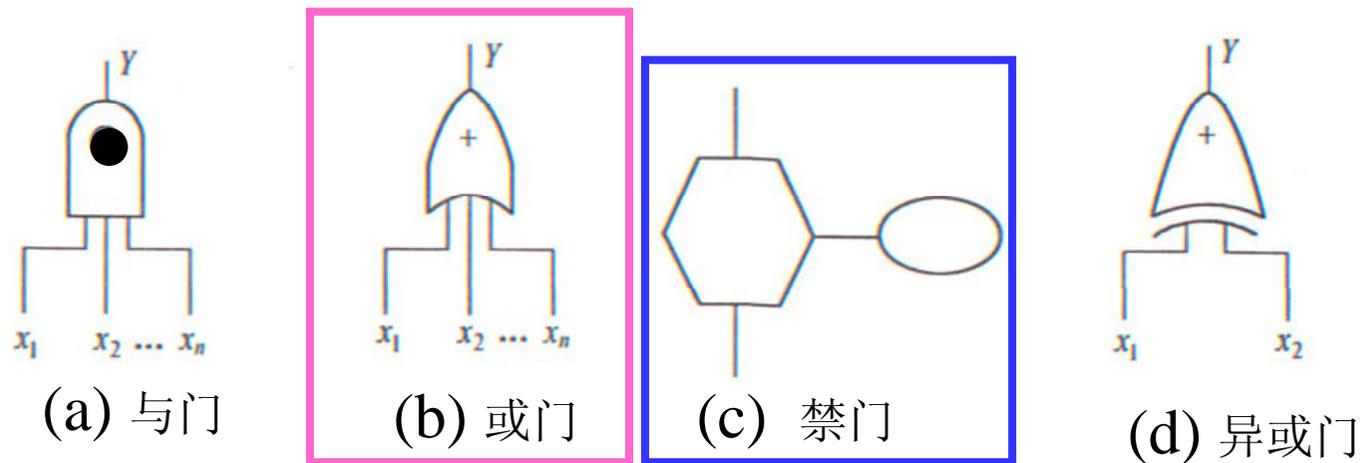
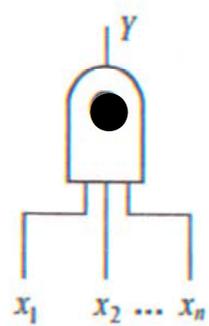
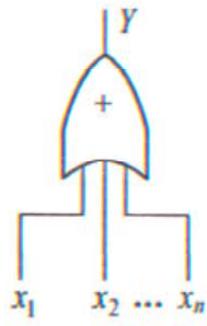


图5-1逻辑门符号

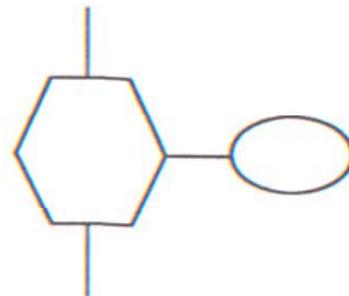
(4) 异或门——输入事件中任何一个发生都可引起输出事件发生,但 $x_1$ 、 $x_2$ 不能同时发生。符号如图5-1(d)。



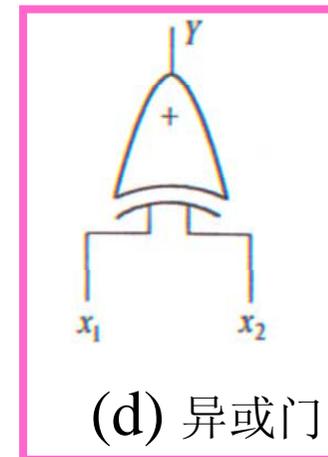
(a) 与门



(b) 或门



(c) 禁门



(d) 异或门

图5-1逻辑门符号

### 3. 转移符号

转移符号是为了避免画图时重复和使图形简明而设置的符号。

转移符号可分为 { 相同转移符号  
相似转移符号

(1) 相同转移符号，见图5所示。

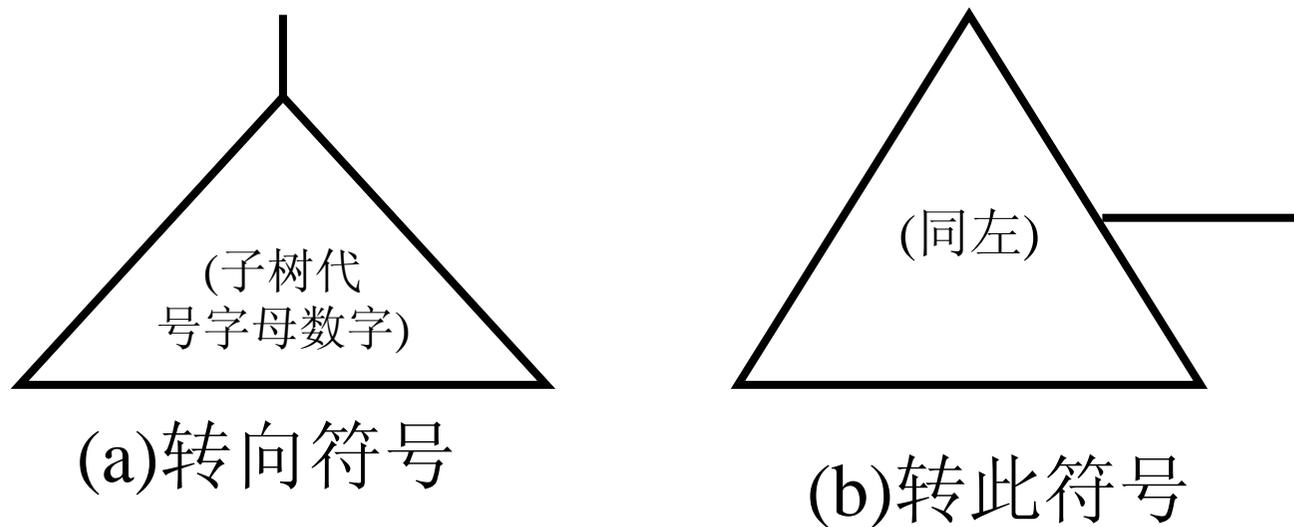


图5相同转移符号

(2) 相似转移符号，见图6所示。

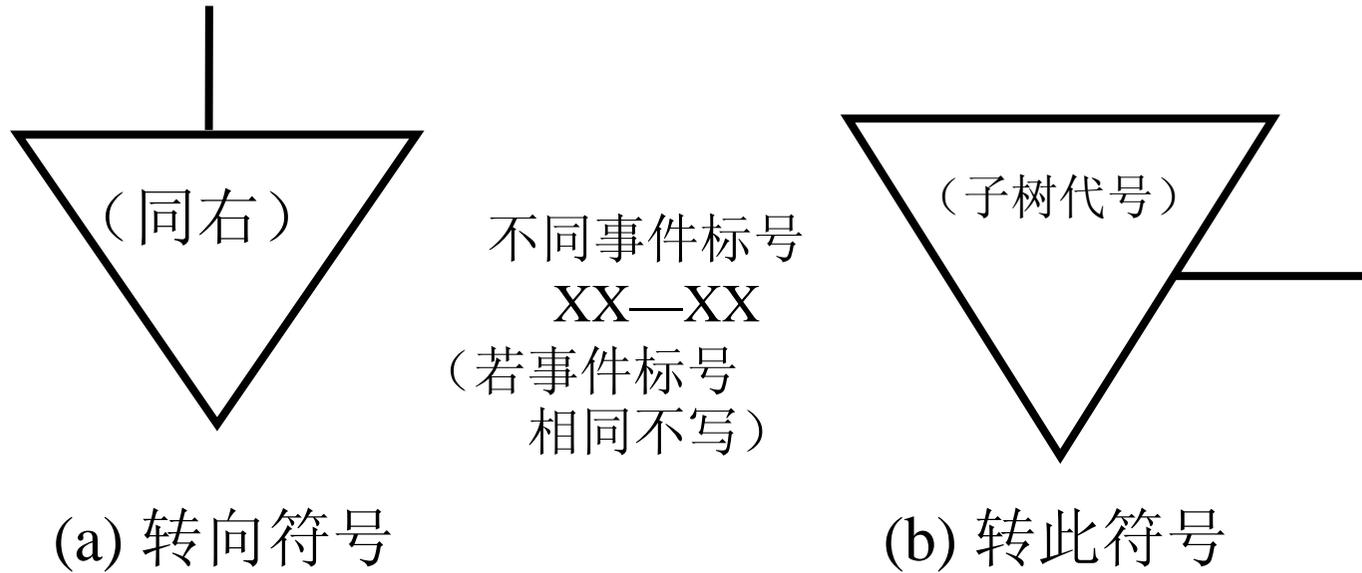
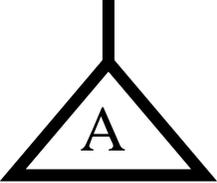
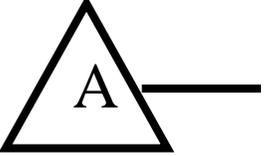
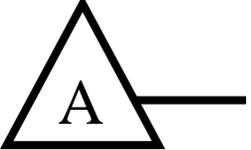
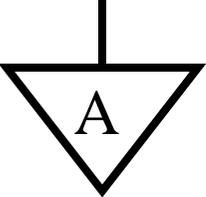


图6相似转移符号

 表示同  下面的子树，

 在分图中找。

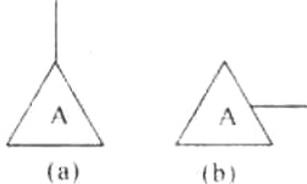
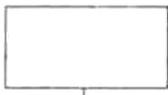
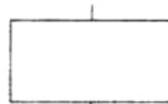
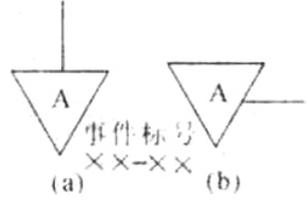
 表示同  下面的子树，

仅是将事件  $\times \times \text{—} \times \times$  改成  $\times \times \text{—} \times \times$ ，

 应在总图中找。

小结：故障树常用**主要符号**列于下表

表 1 故障树常用符号

序号	分类	名称	符 号	序号	分类	名称	符 号
1	事 件	基本 事件		6	逻辑 门	或门	
2		未探明 事件		7	子 树 转 移	相同 转移	
3		顶事件					
4		中间 事件		8	相 似 转 移	相似 转移	
5		逻辑 门	与门				

由上述可见，故障树是用事件符号、逻辑门符号和转移符号描述系统中各事件之间的倒立树状因果关系图。下面讨论如何建树。

## 二、建立故障树的基本方法

建立故障树的基本方法分人工建树和计算机自动建树两种。

建立故障树过程中应注意以下问题：

### 1. 正确选取顶事件

顶事件就是最不希望发生的故障状态。

### 2. 准确写出故障事件方框中的说明。

### 3. 正确划分每个事件方框中的故障类型。

例5-1 如图5-2所示某马达系统故障类型见表5-1。

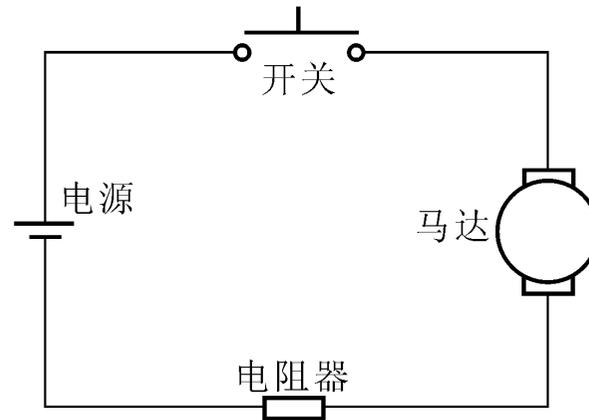


图5-2 马达电路



表5-1

马达电路故障分析

系统所处状态	故障说明	故障分类
工作状态	压按钮时开关接不通	部件状态故障
	压按钮时开关偶然断开	部件状态故障
	马达加电时不起动	部件状态故障
	马达加着电而马达停转	部件状态故障
贮备状态	未压按钮开关偶然接通	部件状态故障
	马达偶然起动的	系统状态故障

4. 严格遵守循序渐进的原则
5. 严格禁止“门—门”短路
6. 建树方法指导方面应注意的问题

以上六大方面问题中易犯的毛病是忽视第4、5条。

第4条严格遵守循序渐进的原则（即应逐级建立不要跃进）。

第5条严禁“门—门”短路，这是在“建树”时最易“顾此失彼”的问题。

这些在以后建造故障碍树中可有体会。

### 三、建造故障树的示例

例5-2图5—3

所示输电网络，有三个变电站，由A站向B、C两站供电，共有五条线路。

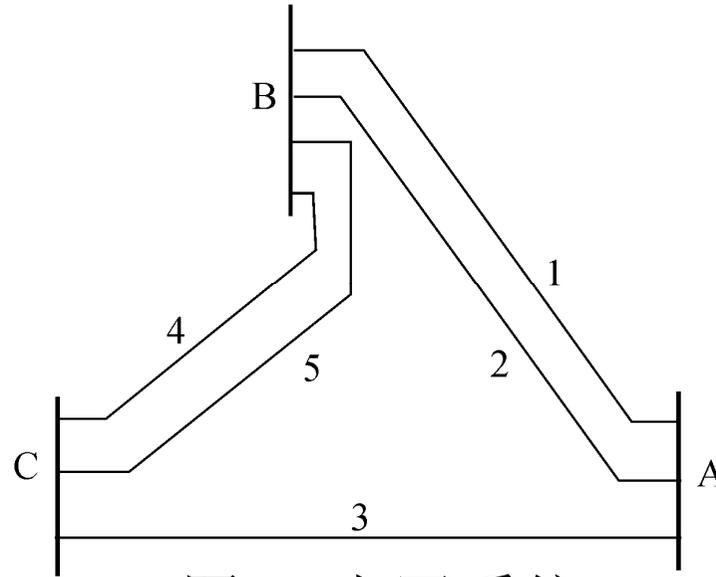


图5-3电网系统

电网失效的判据是：

- ① B和C中任何一站无输入；
- ② B和C两站由单线供电。

请画出电网失效的故障树。

解：(1) 选取顶事件

根据要求，选**电网系统失效**为顶事件 **$T$** 。

(2) 从 **$T$** 开始确定各失效事件之间的逻辑关系：

由分析可知 **$T$**   $\left\{ \begin{array}{l} \text{B 站无输入 } (P) \\ \text{C 站无输入 } (Q) \\ \text{B、C 单线供电 } (R) \end{array} \right.$

**$T$**  与  **$P$** 、 **$Q$** 、 **$R$** 的逻辑关系为**或门**。

根据图5-3**寻找产生 **$P$** 、 **$Q$** 、 **$R$** 的原因**，一直到**基本事件**。

(3) 绘制故障树见图5—4。

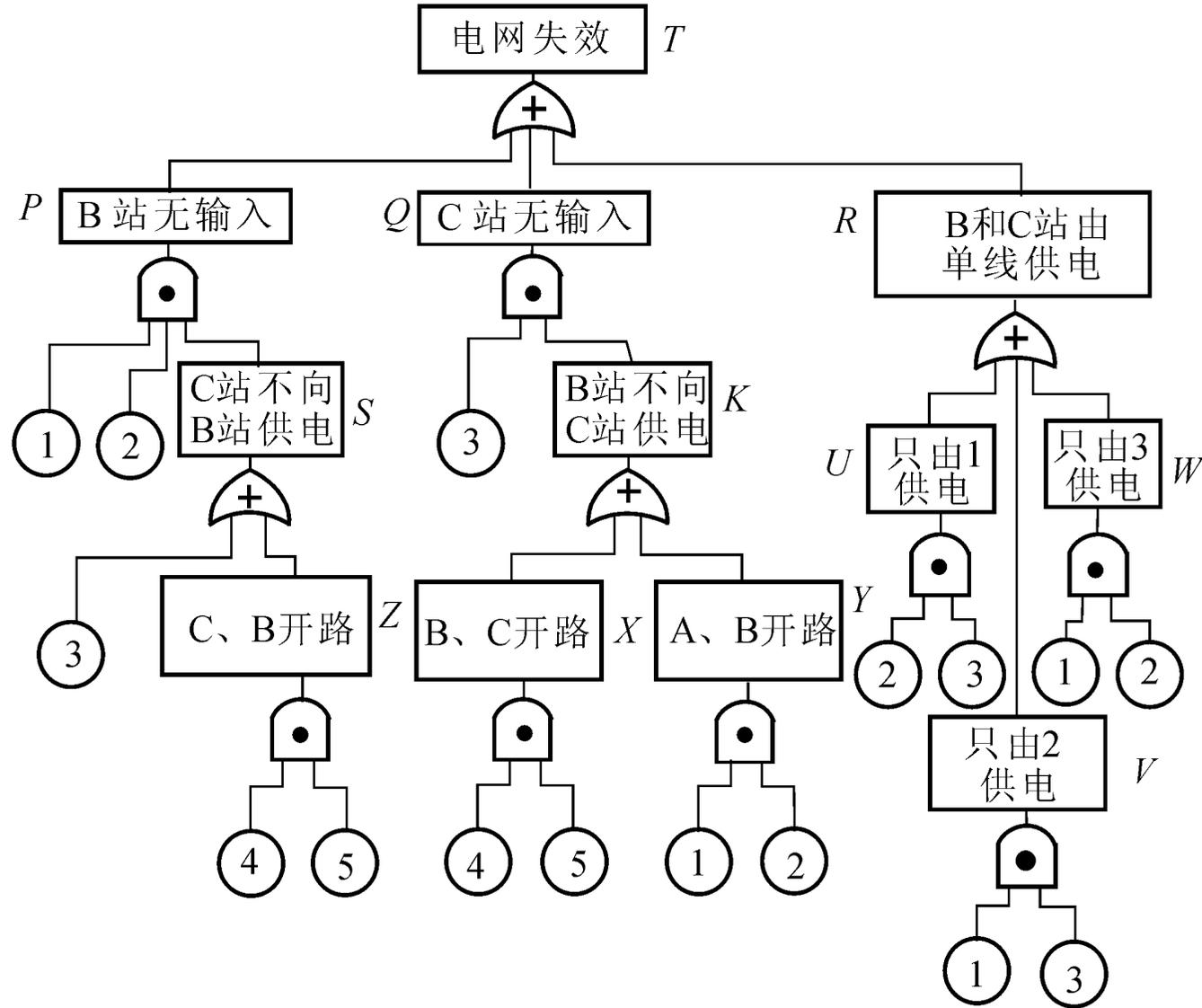


图5-4 例5-2的故障树

例5-3：某输电网络的变电站和线路情况见图5-5，电网失效判据同例5-2，请画出其故障树图。

解：

按例5-2的方法进行分析，绘制该例子的故障树见图5—6。

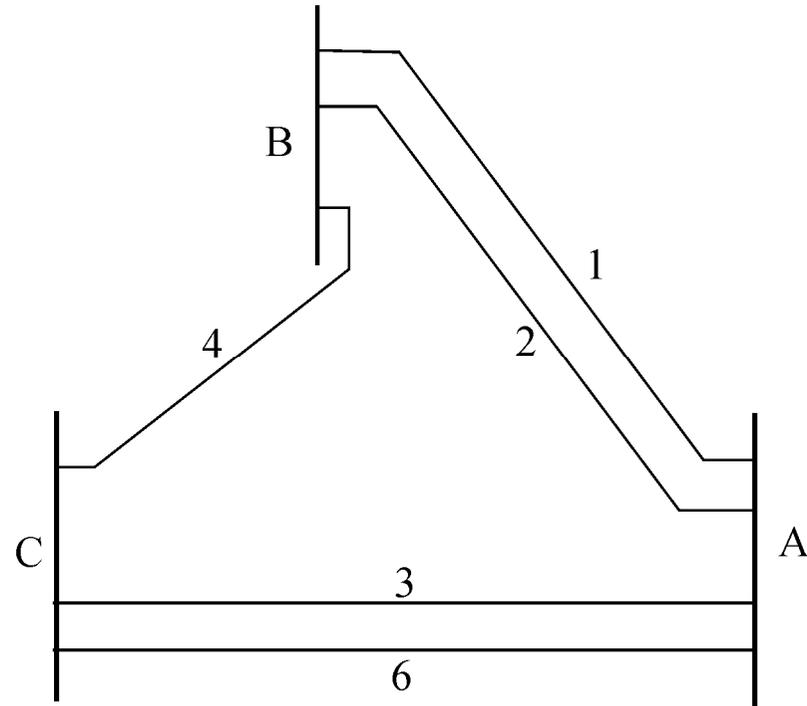


图5-5电网系统

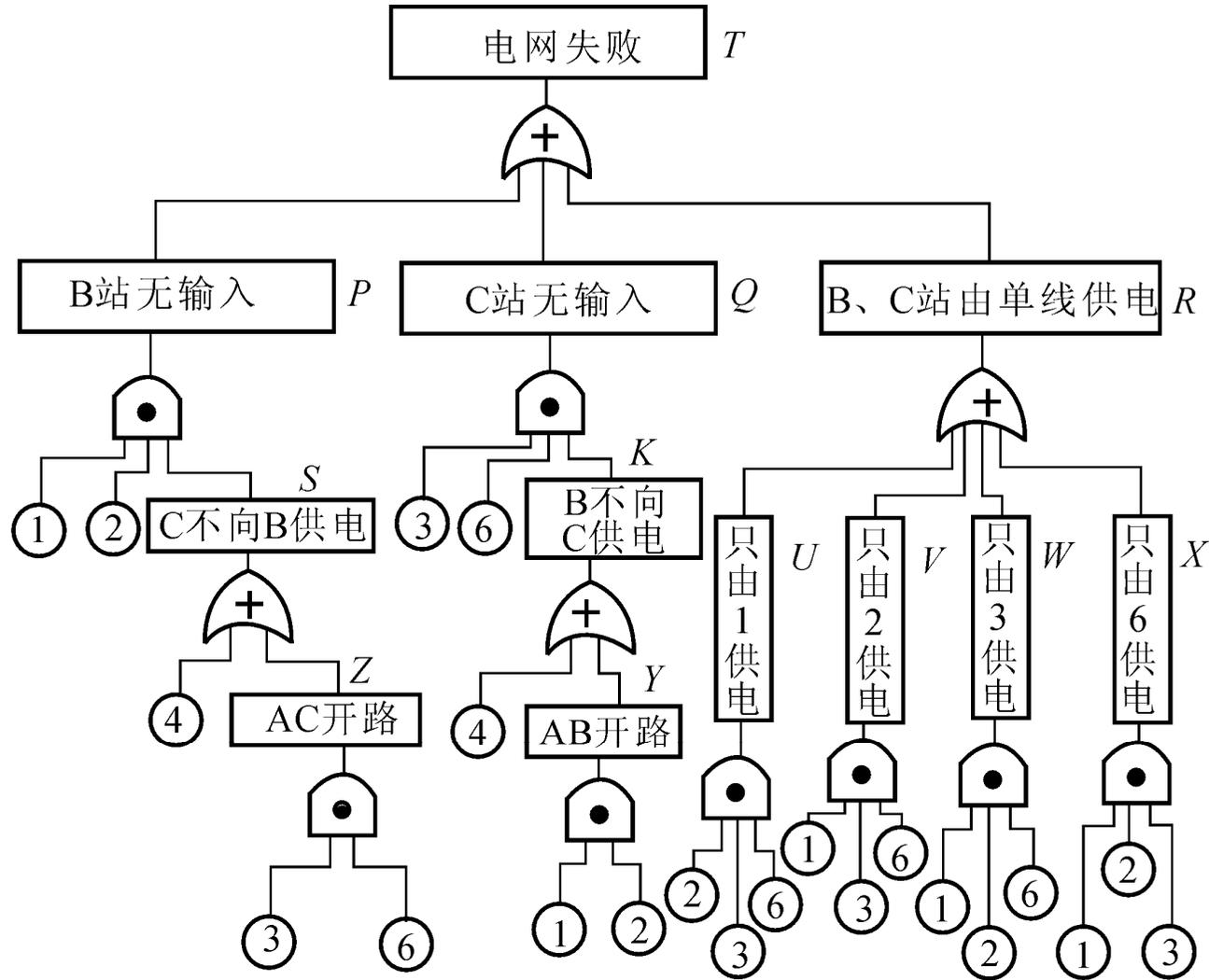


图5-6 图5-5的故障树

例5-4 已知某飞机有3个发动机(A、B、C),当其同时发生故障时,飞机不能正常飞行。A、B、C的故障树见图5—7(a)、(b)、(c)。

使用相同和相似符号绘制飞机不能正常飞行的故障树。

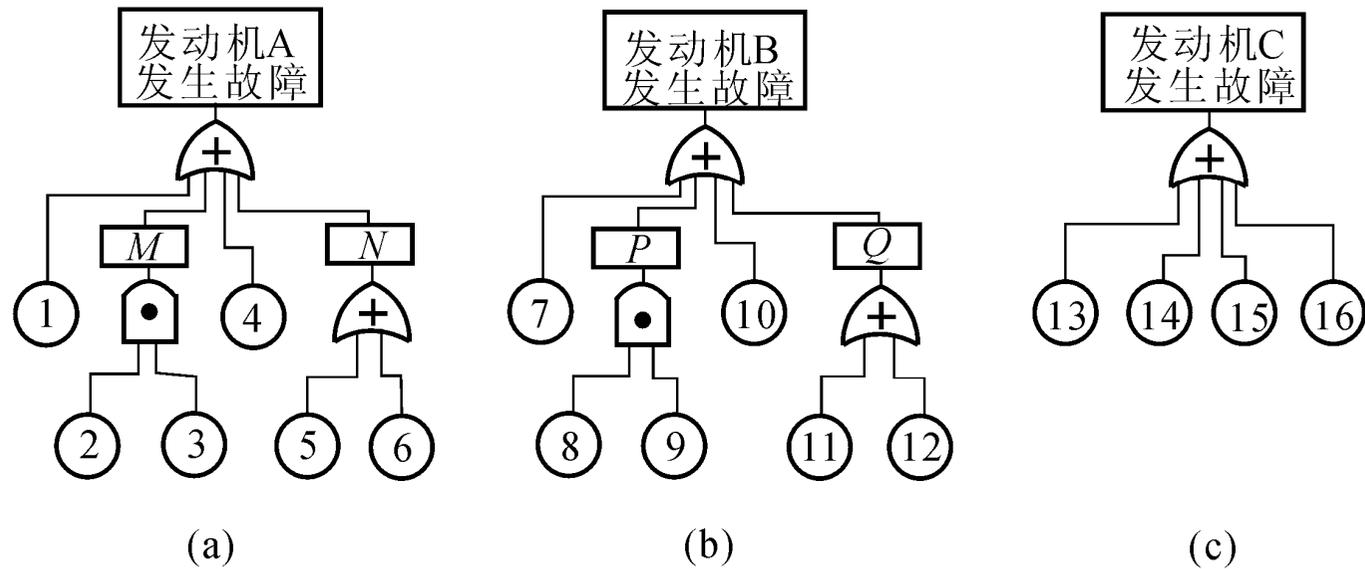


图5-7 飞机发动机故障树



建造故障树的根本目的是定量分析系统失效情况。前面已讲过用系统的可靠性框图定量地计算系统的可靠度问题，现想用系统的故障树定量地计算系统的失效概率。

## § 5-3 故障树的数学描述

### 一、故障树的结构函数

#### 1. 故障树与门的结构函数

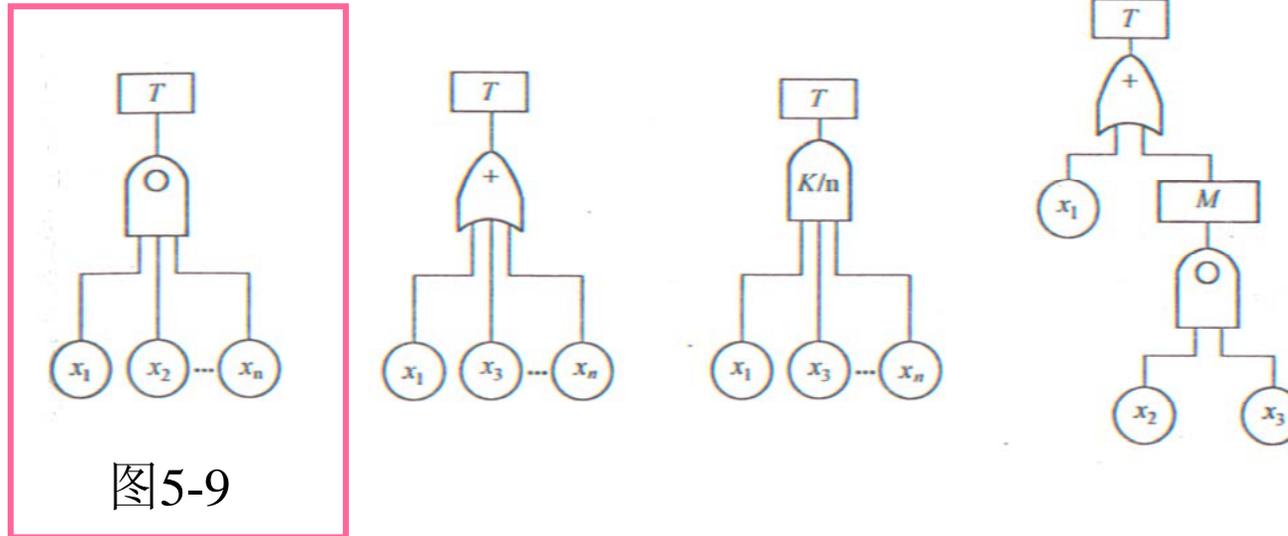
设由 $n$ 个独立事件组成的故障树，事件间的故障相互独立。 $\phi(x)$ 为故障树的结构函数，则与门的结构函数为

$$\phi(x) = x_1 \cap x_2 \cap \cdots \cap x_n \quad i = 1, 2, \cdots, n$$

当 $x_i$ 只取0, 1二值时，则有

$$\phi(X) = \prod_{i=1}^n x_i \quad (5-1)$$

其故障树如图5-9所示,相当于可靠性框图并联系统。



## 2. 故障树或门的结构函数

$$\phi(X) = x_1 \cup x_2 \cup \cdots \cup x_n \quad i = 1, 2, \cdots, n$$

当  $x^i$  只取 0, 1 二值时, 则有

$$\phi(X) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - x_i) \quad (5-2)$$

其故障树如图5-10所示,相当于可靠性框图串联系统。

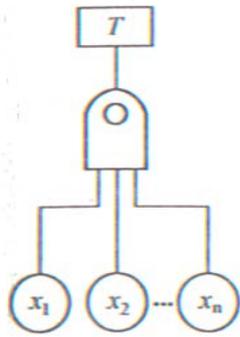


图5-9

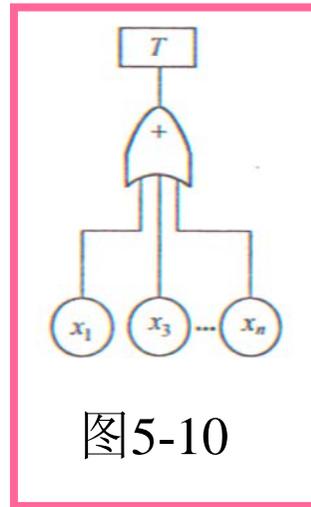
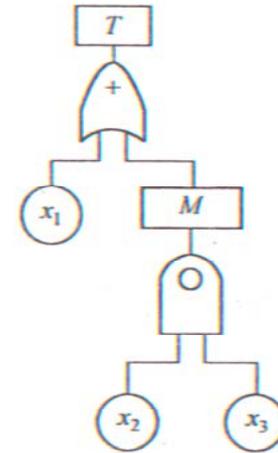
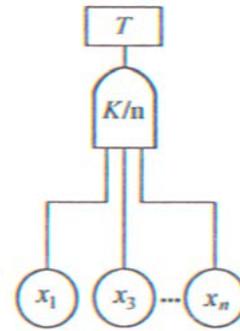


图5-10



### 3. $n$ 中取 $k$ 的结构函数

$$\phi(X) = \begin{cases} 1 & \text{当 } i \geq k, i = 1, 2, \dots, n \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

(5-3)

式中  $k$ --- 使系统发生故障的最少底事件。

其故障树如图5-11所示,相当于可靠性框图  $k/n$  [G] 的表决系统。

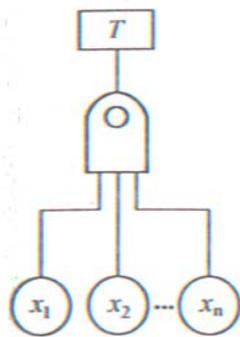


图5-9

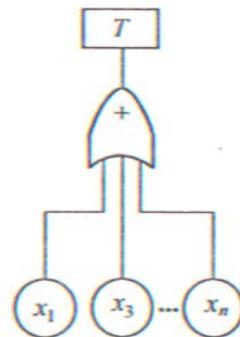


图5-10

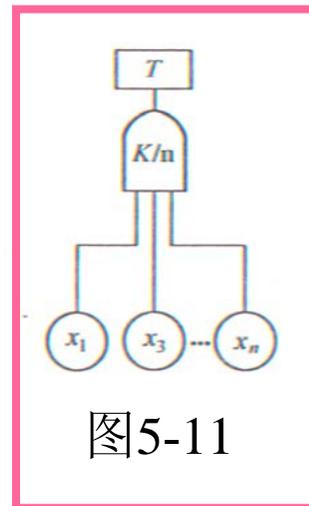
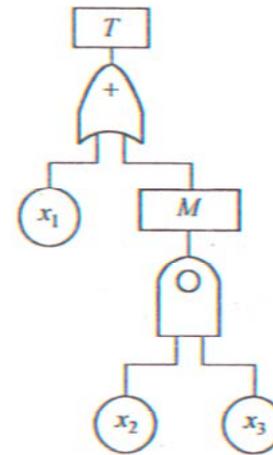


图5-11



#### 4. 简单与门、或门混合系统的结构函数

如图5-12所示。

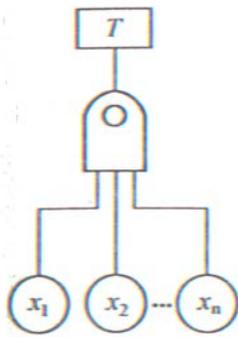


图5-9

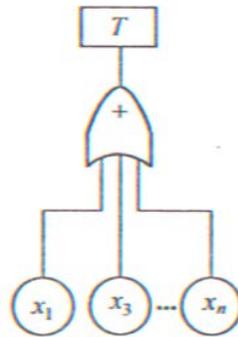


图5-10

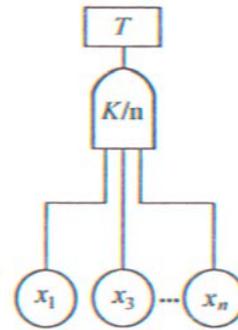


图5-11

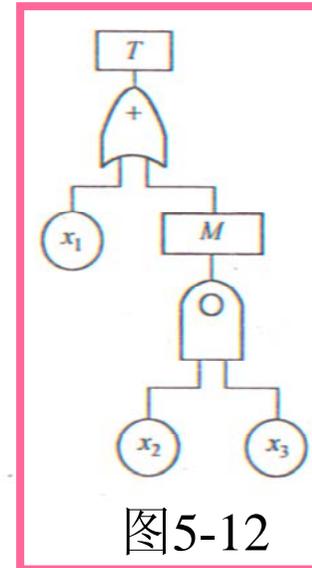


图5-12

其结构函数为

$$\phi(X) = x_1 \cup (x_2 \cap x_3) \quad (5-4)$$

当  $x_i$  只取 0, 1 二值时, 则有

$$\phi(X) = 1 - (1 - x_1)(1 - x_2 x_3) \quad (5-5)$$

该故障树相当于可靠性框图的串并联系统。

## 二、故障树与可靠性框图的等价关系

设 $x'_i$ 表示第 $i$ 个部件正常， $x_i$ 表示第 $i$ 个部件故障；  
设 $T'$ 表示系统正常， $T$ 表示系统故障。

### 1. 可靠性串联系统

可靠性串联系统的结构函数为

$$T' = x'_1 \cap x'_2 \cap \cdots \cap x'_n \quad (5-6)$$

由德·摩根定律,即式(2-4)和式(2-5)得

$$\begin{aligned} T &= (T')' = (x'_1 \cap x'_2 \cap \cdots \cap x'_n)' \\ &= x_1 \cup x_2 \cup \cdots \cup x_n \end{aligned}$$

该结构函数正是故障树或门的结构函数。

因而可靠性串联系统与故障树或门系统是等价的，如图5-13所示。

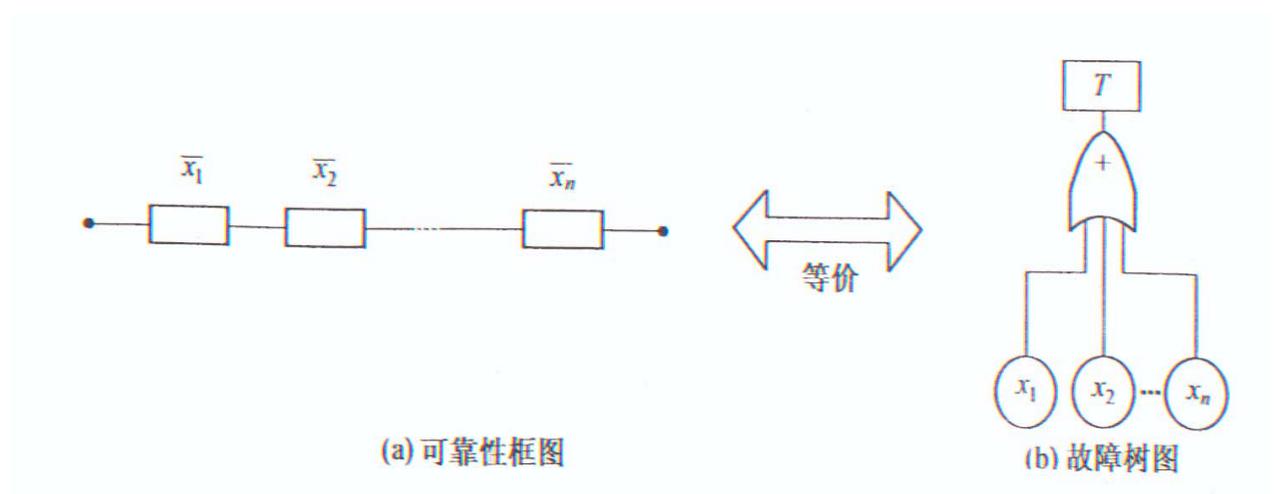


图 2-13 串联系统等价的故障树图

注：图中  $\bar{x} = x'$ 。

## 2. 可靠性并联系统

可靠性并联系统的结构函数为

$$T' = x'_1 \cup x'_2 \cup \cdots \cup x'_n \quad (5-7)$$

$$\begin{aligned} T &= (T')' = (x'_1 \cup x'_2 \cup \cdots \cup x'_n)' \\ &= x_1 \cap x_2 \cap \cdots \cap x_n = \bigcap_{i=1}^n x_i \end{aligned}$$

因而可靠性并联系统与故障树与门系统是等价的，如图5-14所示。

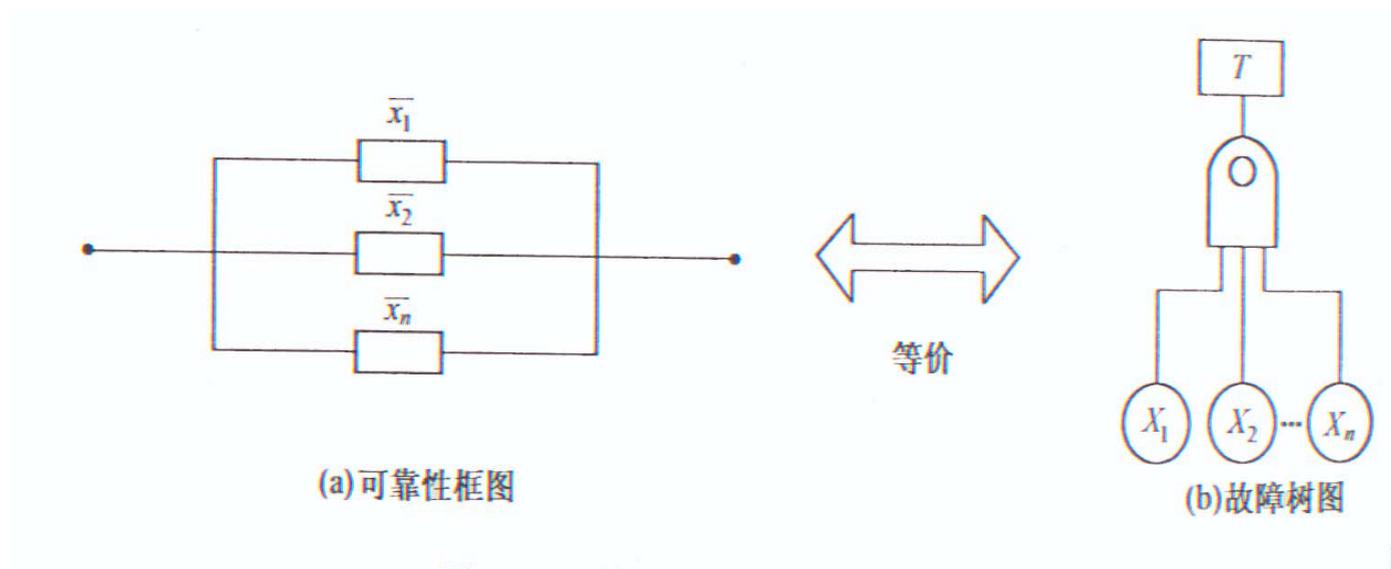


图 2-13 并联系统等价的故障树图



中国可靠性网

<http://www.kekaoxing.com>

感谢 [kingdoodoo](#) 分享