

# 故障树分析法在新一代天气雷达故障诊断中的应用

王杰<sup>1</sup> 何建新<sup>2</sup>

## 摘要

故障树分析法直观、形象、灵活、多用,特别适用于复杂大型电子设备的故障诊断,更重要的是它是以国家标准形式推广的故障诊断方法.首先介绍了故障树分析法的基本概念、数学基础;其次介绍了如何进行故障树的定性分析和定量分析,如何确定最小割集重要度;最后,以雷达发射机故障为例详细说明了故障树分析法的计算过程.通过对重要度从大到小的排序,确定底事件对顶事件发生故障的贡献程度,依据排序的先后顺序进行故障检测,查找发生故障的部件.

## 关键词

故障诊断;故障树分析法;重要度;新一代天气雷达

中图分类号 TP273

文献标志码 A

收稿日期 2011-12-29

资助项目 公益性行业(气象)科研专项(GY-HY200906040)

## 作者简介

王杰,男,硕士,研究方向气象雷达信号与信息处理.18930191@qq.com

<sup>1</sup> 四川省大气探测技术中心,成都,610071

<sup>2</sup> 成都信息工程学院 电子工程学院,成都,610225

## 0 引言

目前,我国新一代天气雷达建设进入一个新的发展阶段,已建、在建的新一代天气雷达超过150余部.就在新一代天气雷达网建设的同时,一个重要的问题已经凸显出来,即如何保障雷达的正常运行,确保国家投资几十亿的项目能够在雷达生命周期20年的时间内取得预期的效益.

在参考国内外相关文献的基础上,从众多故障诊断算法(如神经网络、模糊逻辑、多传感器信息融合、D-S证据理论等)中选择故障树分析法作为本文的研究方法.详细介绍了故障树分析法的基本概念、数学基础、定性分析、定量分析和重要度的计算,并以一个故障实例说明故障树分析法的应用过程.故障树分析法直观、形象、灵活、多用,特别适用于复杂大型电子设备的故障诊断,更重要的是它是以国家标准形式推广的故障诊断方法<sup>[1-2]</sup>.

## 1 故障树基本概念

### 1.1 故障树的建立

故障树建立的一般流程为以下4步:

- 1) 通过对建树对象技术资料进行收集、整理、总结和分析得到对象各个零部件的结构逻辑关系和故障知识;
- 2) 确定故障树的顶事件;
- 3) 把导致顶事件发生故障的直接事件放在第2级的原因事件中,并用逻辑符号相连接,依次向下发展,直到最底层事件为止,这样便建立起了一棵故障树;
- 4) 运用逻辑(布尔)运算法则对建好的故障树进行逻辑化简,一般是求出最小积之和.

## 2 数学基础

假设一个系统的各个零部件之间相互独立,并且只有正常和故障2种情况.则有如下定义<sup>[3]</sup>:

- 1) 定义  $x_i (i=1, 2, \dots, n)$  为底事件状态,0表示该底事件正常,1表示该底事件故障;
- 2) 定义  $\Phi$  为顶事件状态,0表示该顶事件正常,1表示该顶事件故障.

$$x_i = \begin{cases} 1, \text{底事件 } i \text{ 发生 (部件或元件故障),} \\ 0, \text{底事件 } i \text{ 不发生 (部件或元件正常),} \end{cases} \quad (1)$$

$$\Phi = \begin{cases} 1, \text{顶事件发生 (设备故障),} \\ 0, \text{顶事件不发生 (设备正常),} \end{cases} \quad (2)$$

$\Phi(x)$  定义为故障树的结构函数.

### 2.1 逻辑与门结构函数

$$\Phi(X) = \bigcap_{i=1}^n x_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

式(3)中  $n$  为底事件数目. 当  $x_i$  仅取 0 或 1 时, 式(3)可改写为

$$\Phi(X) = \prod_{i=1}^n x_i. \quad (4)$$

与门结构函数对应的故障树如图 1 所示. 只有当全部零部件故障时, 顶事件才有故障, 也称之为并联模型.

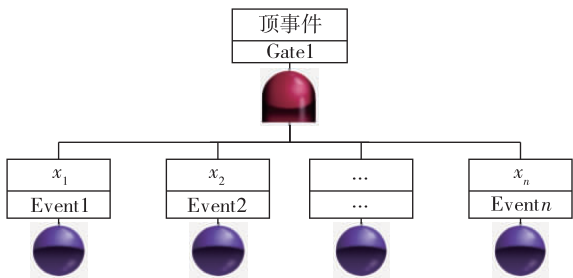


图 1 逻辑与门故障树结构

Fig. 1 A logic and gate fault tree structure

### 2.2 逻辑或门结构函数

$$\Phi(X) = \bigcup_{i=1}^n x_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

当  $x_i$  仅取 0 或 1 时, 式(5)可以改写为

$$\Phi(X) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - x_i), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

或门结构函数对应的故障树如图 2 所示. 只要一个零部件故障, 顶事件就发生故障, 也称之为串联模型.

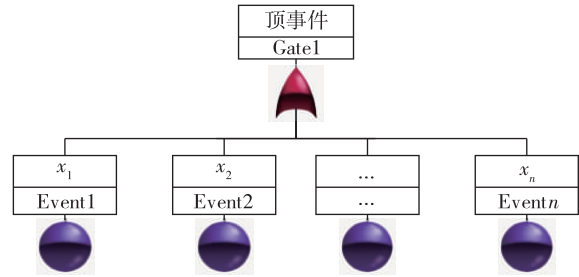


图 2 逻辑或门故障树结构

Fig. 2 Logic OR gate fault tree structure

### 3 故障树的定性分析

故障树的定性分析是定量分析的基础, 它的目的是要找出导致顶事件发生故障的全部原因或原因集合. 这些原因或原因集合也称之为最小割集<sup>[4]</sup>.

以一棵故障树为例(图 3), 具体介绍求解过程(表 1).

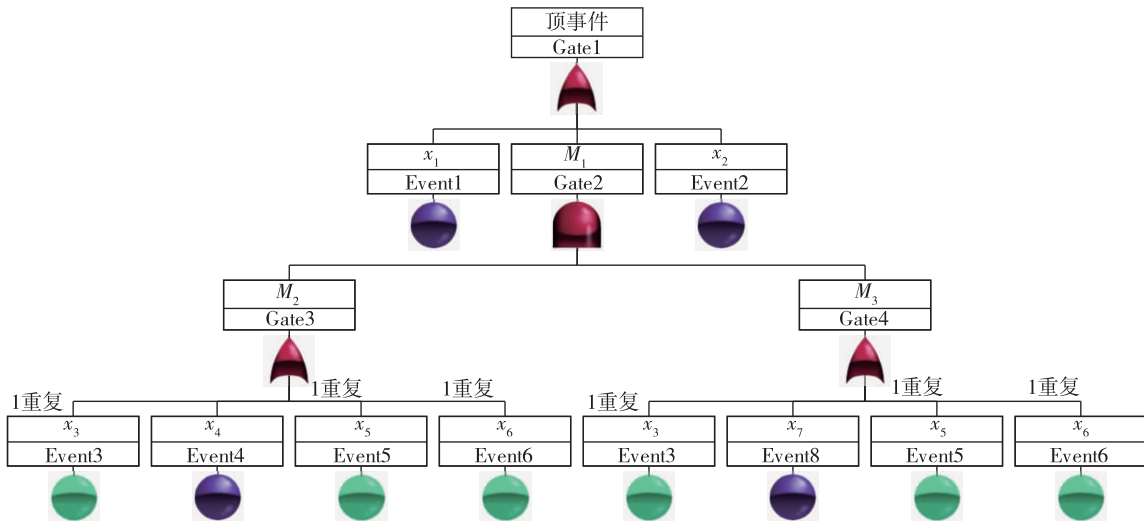


图 3 故障树

Fig. 3 Fault tree structure

表1 下行法求解过程

Table 1 Downstream method process

步骤1	步骤2	步骤3	步骤4	步骤5	步骤6
$x_1$	$x_1$	$x_1$	$x_1$	$x_1$	$x_1$
$M_1$	$M_2, M_3$	$x_3, M_3$	$x_3, x_3$ $x_3, x_7$ $x_3, x_5$ $x_3, x_6$	$x_3$	$x_3$
		$x_4, M_3$	$x_4, x_3$ $x_4, x_7$ $x_4, x_5$ $x_4, x_6$	$x_4, x_3$ $x_4, x_7$ $x_4, x_5$ $x_4, x_6$	$x_4, x_7$
		$x_5, M_3$	$x_5, x_3$ $x_5, x_7$ $x_5, x_5$ $x_5, x_6$	$x_5$	$x_5$
		$x_6, M_3$	$x_6, x_3$ $x_6, x_7$ $x_6, x_5$ $x_6, x_6$	$x_6$	$x_6$
$x_2$	$x_2$	$x_2$	$x_2$	$x_2$	$x_2$

计算出最小割集为

$$\{x_3, x_5, x_6, x_1, x_2, (x_4, x_7)\}.$$

由于故障树中的事件之间都有很强的逻辑关系,使用从上而下、从左到右的逻辑检测方法,仍然可以对系统进行故障诊断.图4所示为实现的逻辑推理诊断过程<sup>[5-6]</sup>.

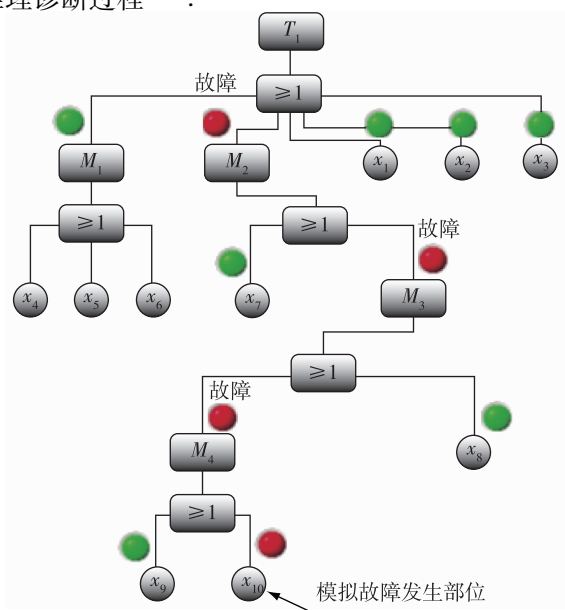


图4 逻辑推理法

Fig. 4 Logical reasoning method

#### 4 故障树的定量分析

在运用故障树分析法进行定量分析之前需要先假设:

- 1) 各底事件之间是相互独立的;
- 2) 顶事件和底事件都只有正常与故障2种状态;
- 3) 故障的分布服从指数分布.

##### 4.1 故障树各事件概率的计算

通过对诊断对象技术资料的收集、整理和分析,依靠专家经验、系统零部件维修资料的统计等得到底事件发生故障的概率.由逻辑关系式(4)和(6)便可以算出故障树顶事件的故障概率<sup>[7-8]</sup>.

使用容斥定理计算顶事件发生概率:

$$T = C_1 + C_2 + \dots + C_n, \quad (7)$$

式(7)中,  $T$  为顶事件,  $C_1, C_2, \dots, C_n$  为故障树的最小割集.

顶事件发生故障的概率为

$$P_T = \sum_{i=1}^n P(C_i) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n P(C_i C_j) + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n [P(C_i C_j C_k) + \dots + (-1)^{n-1} P(C_1 C_2 \dots C_n)]. \quad (8)$$

记

$$P_1 = \sum_{i=1}^n P(C_i), \quad P_2 = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n P(C_i C_j),$$

$$P_3 = \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n P(C_i C_j C_k), \quad (9)$$

则

$$P_T = P_1 - P_2 + P_3 - P_4 + \dots + (-1)^n P_n. \quad (10)$$

$P_1$  是  $P_T$  的上界,  $P_1 - P_2$  是  $P_T$  中的下界.作一级近似,取

$$P_T \approx \sum_{i=1}^n P(C_i). \quad (11)$$

式(11)便是工程技术人员在运用容斥定理计算故障树顶事件发生故障的概率时使用的工程近似公式.

##### 4.2 故障树重要度分析

故障树重要度定义为:系统部件发生故障时或最小割集发生故障时对顶事件发生故障的贡献程度<sup>[9-10]</sup>.故障树的重要度分析作用如下:

- 1) 在系统设计阶段可以确定系统的薄弱环节,改善、优化系统的设计;
- 2) 在系统设备维修阶段可以为维修人员制订出系统故障诊断的检测清单,避免维修人员盲目地

进行故障诊断.

概率重要度的定义为

$$\Delta g_i(t) = \frac{\partial g[F(t)]}{\partial F_i(t)} = \frac{\partial F_s(j)}{\partial F_i(j)},$$

$$P(\text{顶事件}) = F_s(t) = g[F(t)]. \quad (12)$$

由全概率公式:

$$P(T) = P(X_i(t) = 1) \times P(T | X_i(t) = 1) + P(X_i(t) = 0) \times P(T | X_i(t) = 0) = F_i(t)g(1_i, F(t)) + (1 - F_i(t))g(0_i, F(t)),$$

代入式(12)得

$$\Delta g_i(t) = g(1_i, F(t)) - g(0_i, F(t)) = E[\Phi(1_i, X(t)) - \Phi(0_i, X(t))] = P\{\Phi(1_i, X(t)) - \Phi(0_i, X(t)) = 1\}. \quad (13)$$

概率重要度是应用比较普遍的重要度,它需要提前知道故障树底事件发生故障的概率. 如果无法获取故障树底事件发生故障的概率,便无法计算出概率重要度.

## 5 故障树分析法在新一代天气雷达故障诊断中的应用

### 5.1 建立故障树

这里仅以雷达发射机为例. 图5为雷达发射机故障树.

### 5.2 故障树分析

#### 5.2.1 定性分析

利用故障树定性分析法中的下行法来求解故障树的最小割集. 求解过程如表2所示.

表2 定性分析求解过程

Table 2 Qualitative analysis of the solving process

步骤1	步骤2	步骤3	步骤4	步骤5	步骤6	步骤7	最小割集
$x_1$	$x_1$	$x_1$	$x_1$	$x_1$	$x_1$	$x_1$	$x_1$
					$x_3$	$x_2$	$x_7$
	$x_3$	$x_3$	$x_3$	$x_3$	$x_2$	$x_3$	$x_3$
$M_1$	$M_4$	$M_4$	$M_4$	$x_2$	$x_7$	$x_7$	$x_9$
	$M_5$	$M_5$	$M_5$	$M_5$	$x_9$	$x_9$	$x_{10}$
					$x_{10}$	$x_{10}$	
$x_2$	$x_2$	$x_2$	$x_2$	$x_2$	$x_2$	$x_2$	$x_2$
						$x_4$	$x_4$
		$x_4$	$x_4$	$x_4$	$x_4$	$x_5$	$x_5$
$M_2$	$M_2$	$x_5$	$x_5$	$x_5$	$x_5$	$x_8$	$x_8$
		$M_6$	$M_6$	$M_6$	$M_6$	$x_4$	
$M_3$	$M_3$	$M_3$	$x_3$	$x_3$	$x_3$	$x_3$	$x_6$
			$x_6$	$x_6$	$x_6$	$x_6$	

经简化、吸收,去掉重复的割集,得到全部10个

最小割集分别为 $\{x_1\}$ 、 $\{x_2\}$ 、 $\{x_3\}$ 、 $\{x_4\}$ 、 $\{x_5\}$ 、 $\{x_6\}$ 、 $\{x_7\}$ 、 $\{x_8\}$ 、 $\{x_9\}$ 、 $\{x_{10}\}$ .

#### 5.2.2 定量分析

这里仅用概率重要度来对图5进行定量分析.

1) 确定底事件的故障概率

底事件发生概率如表3所示.

表3 各底事件发生概率

Table 3 Occurrence probability of end event

符号	底事件	$P(x_i)/10^{-6}$
$x_1$	门开关故障	3.18
$x_2$	电磁滤波器故障	1 000
$x_3$	开关电源故障	12.5
$x_4$	高频激励器故障	20.797 8
$x_5$	充电变压器故障	0.480 90
$x_6$	控制计算机故障	45.359 23
$x_7$	整流组件	38.103 22
$x_8$	高频脉冲形成器故障	0.480 90
$x_9$	调制组件故障	27.189 9
$x_{10}$	电容组件故障	0.480 90

2) 计算顶事件故障发生概率

该故障树的最小割集为

$$K_1 = \{x_1\}, K_2 = \{x_2\}, K_3 = \{x_3\}, K_4 = \{x_4\}, K_5 = \{x_5\}, K_6 = \{x_6\}, K_7 = \{x_7\}, K_8 = \{x_8\}, K_9 = \{x_9\}, K_{10} = \{x_{10}\}.$$

利用近似计算的方法来求顶事件发生的概率,按式(11)得

$$P(T) \approx \sum_{i=1}^{10} P(K_i) = P(K_1) + P(K_2) + P(K_3) + P(K_4) + P(K_5) + P(K_6) + P(K_7) + P(K_8) + P(K_9) + P(K_{10}) = P(x_1) + P(x_2) + P(x_3) + P(x_4) + P(x_5) + P(x_6) + P(x_7) + P(x_8) + P(x_9) + P(x_{10}) = 3.18 \times 10^{-6} + 1\,000 \times 10^{-6} + 12.5 \times 10^{-6} + 20.797\,8 \times 10^{-6} + 0.480\,90 \times 10^{-6} + 45.359\,23 \times 10^{-6} + 38.103\,22 \times 10^{-6} + 0.480\,90 \times 10^{-6} + 27.189\,9 \times 10^{-6} + 0.480\,90 \times 10^{-6} = 1.148 \times 10^{-3}.$$

3) 求底事件的概率重要度

设在 $[0, t]$ 时刻第 $i$ 个部件的可靠度 $R_i(t)$ 的计算公式为 $R_i(t) = e^{-\lambda_i t}$ ,则第 $i$ 个部件的不可靠度 $F_i(t)$ 为 $F_i(t) = 1 - R_i(t) = 1 - e^{-\lambda_i t}$ .其中 $\lambda_i$ 为各底事件的发生概率,即 $P(x_i)$ .

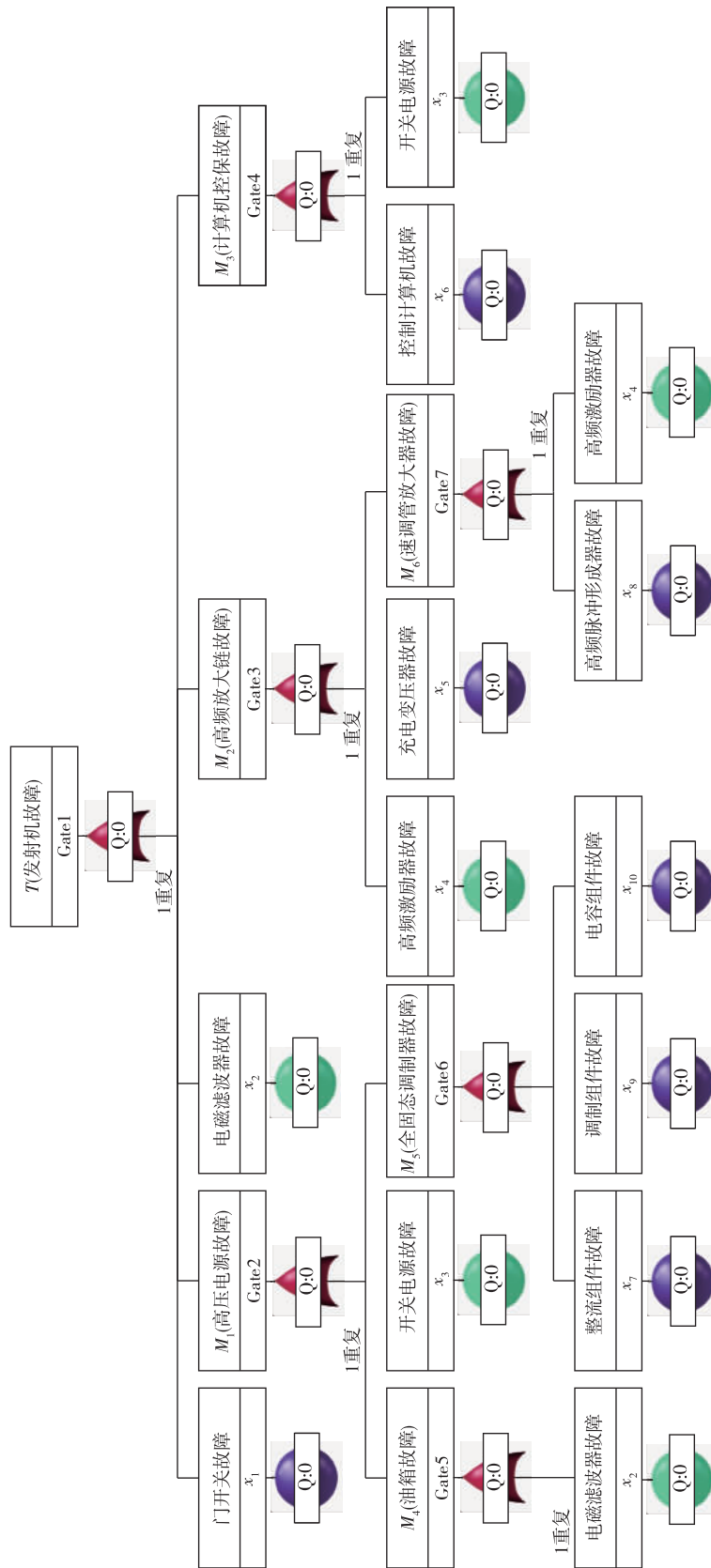


图5 雷达发射机故障树  
Fig.5 Fault tree for radar transmitter

设  $t = 1\ 000\ h$ , 则各底事件发生概率及其重要度值如表 4 所示.

表 4 各底事件发生概率及其重要度分析值

Table 4 Occurrence probability of end event and its reliability, significance

符号	底事件	$P(x_i)/10^{-6}$	$R_i(t)$	$g_i(t)$
$x_1$	门开关故障	3.18	0.996 825	0.318 099
$x_2$	电磁滤波器故障	1 000	0.367 879	0.861 939
$x_3$	开关电源故障	12.500 0	0.987 578	0.321 078
$x_4$	高频激励器故障	20.797 8	0.979 418	0.323 753
$x_5$	充电变压器故障	0.480 90	0.999 520	0.317 242
$x_6$	控制计算机故障	45.359 23	0.955 654	0.331 804
$x_7$	整流组件	38.103 22	0.962 614	0.329 405
$x_8$	高频脉冲形成器故障	0.480 90	0.999 520	0.317 242
$x_9$	调制组件故障	27.189 9	0.973 177	0.325 829
$x_{10}$	电容组件故障	0.480 90	0.999 520	0.317 242

在进行故障诊断时,技术人员只需依据概率重要度从大到小排序结果依次进行检测,底事件重要度越大说明越容易引发顶事件故障.在面对不同的故障现象时,只需依据经验或统计数据改变底事件发生故障的概率,便能得出在不同故障现象发生时,相对应的故障诊断结果.如图 6 所示为软件实现的最小割集诊断法.

### 6 结论

本文介绍了故障树分析法的基本概念、数学基础,还介绍了如何进行故障树的定性分析和定量分析,如何确定最小割集重要度,最后,以雷达发射机故障为例详细介绍了故障树分析法的计算过程,并以从大到小的顺序对计算出的重要度进行排序,依据排序的先后结果对部件进行检测,直至找到发生故障的部件.

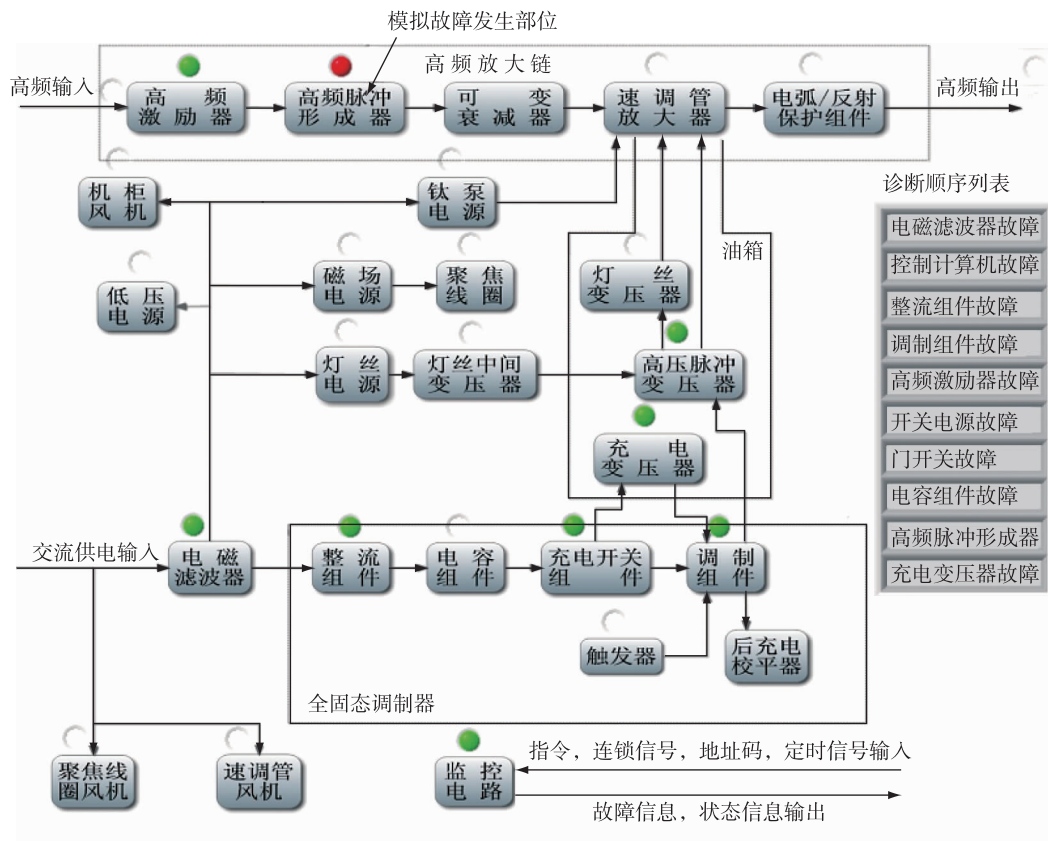


图 6 最小割集诊断法

Fig. 6 Minimal cut set diagnosis

## 参考文献

### References

- [ 1 ] Vemuri K K, Dugan J B, Sullivan K J. Automatic synthesis of fault trees for computer-based systems [ J ]. IEEE Transactions on Reliability, 1999, 48(4) : 394-402
- [ 2 ] Fussel J B, Vesely W E. A new methodology for obtaining cut sets for fault trees [ J ]. Trans Amer Nucl Soc, 1972, 15(1) : 262-263
- [ 3 ] Ren Y S, Dugan J B. Design of reliable systems using static & dynamic fault tree [ J ]. IEEE Transactions on Reliability, 1998, 47(3) : 234-244
- [ 4 ] Carrasco J A, Sune V. An algorithm to find minimal cuts of coherent fault-trees with event-classes [ J ]. IEEE Transactions on Reliability, 1999, 48(1) : 31-41
- [ 5 ] 王巍, 崔海英, 黄文虎. 基于故障树最小割集和最小路集的诊断方法研究 [ J ]. 数据采集与处理, 1999, 14(1) : 26-29  
WANG Wei, CUI Haiying, HUANG Wenhui. Diagnostic methods based on minimal cut sets and minimal path sets [ J ]. Journal of Data Acquisition & Processing, 1999, 14(1) : 26-29
- [ 6 ] 朱继洲. 故障树原理和应用 [ M ]. 西安: 西安交通大学出版社, 1989  
ZHU Jizhou. Fault tree theory and application [ M ]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1989
- [ 7 ] 陆廷孝, 郑鹏洲. 可靠性设计与分析 [ M ]. 北京: 国防工业出版社, 2002  
LU Tingxiao, ZHENG Pengzhou. Reliability design and analysis [ M ]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002
- [ 8 ] 朱大奇. 电子设备故障诊断原理与实践 [ M ]. 北京: 电子工业出版社, 2004  
ZHU Daqi. Electronic equipment fault diagnosis principles and practices [ M ]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004
- [ 9 ] 邝朴生, 徐福章, 刘玉琴. 现代机器故障诊断学 [ M ]. 北京: 农业出版社, 1997  
KUANG Pusheng, XU Fuzhang, LIU Yuqin. Modern machinery fault diagnosis [ M ]. Beijing: China Agriculture Press, 1997
- [ 10 ] 吴今培. 智能故障诊断与专家系统 [ M ]. 北京: 科学出版社, 1999  
WU Jinpei. Intelligent fault diagnosis expert system [ M ]. Beijing: Science Press, 1999

## Application of fault tree analysis in CINRAD fault diagnosis

WANG Jie<sup>1</sup> HE Jianxin<sup>2</sup>

1 Technical Center for Atmospheric Sounding of Sichuan Province, Chengdu 610071

2 Electronic Engineering College, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

**Abstract** As a nationally standard fault diagnosis method, the fault tree analysis is easy to implement and has found wide applications, especially in fault diagnosis of large-scale and complicated electronic devices. The basic concepts and mathematical foundations of fault tree analysis are introduced in this paper. The qualitative analysis and quantitative analysis processes, as well as the determination of the minimal cut set significance are elaborated. Then a CINRAD fault is taken as an example to describe the calculation process of fault tree analysis in detail. Through the significance sorting in descending order, the contribution of end event to the occurrence of top event is determined, which is sorted for fault diagnosis.

**Key words** fault diagnosis; fault tree analysis; significance; CINRAD