

文章编号: 1001-0920(2005)08-0854-06

T-S 模糊故障树分析方法

宋 华, 张洪钺, 王行仁

(北京航空航天大学 自动化学院, 北京 100083)

摘 要: 提出一种新的 T-S 模糊故障树分析方法, 该方法将模糊逻辑和 T-S 模糊模型引入到故障树分析中, 使故障树具有处理模糊信息的能力。T-S 模糊故障树分析中不需要精确了解部件的故障概率, 也不需要精确了解故障的机理, 从而解决了系统的事件和故障机理的不确定性问题。最后给出了 NS/GPS 组合导航系统可靠性分析实例。

关键词: 故障树分析; 模糊逻辑; T-S 模型; 可靠性分析; 导航系统

中图分类号: TP273.4 **文献标识码:** A

Fuzzy Fault Tree Analysis Based on T-S Model

SONG Hua, ZHANG Hong-yue, WANG Xing-ren

(Department of Automatic Control, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China
Correspondent: SONG Hua, E-mail: songhua7421@sohu.com)

Abstract: A new approach of T-S model based fuzzy fault tree is presented. By introducing the fuzzy logic and T-S model, the new fuzzy fault tree analysis is capable of handling the fuzzy information, and dealing with the uncertainty of the event and fault relation without the exact information about the fault probability and failure mechanism. A simulation example of the reliability analysis in NS/GPS navigation system is given for illustration.

Key words: Fault tree analysis; Fuzzy logic; T-S model; Reliability analysis; Navigation system

1 引 言

基于布尔代数和概率论的故障树分析(FTA)理论, 广泛应用于复杂系统的可靠性和安全性计算^[1~7]。这是一种估计故障事件出现概率的逻辑框图方法, 用来描述零部件故障间的联系并观察故障发生的症状, 可用于定量计算, 也可用于定性分析, 是系统故障分析的一种有效的工具。

故障树由“事件”和“门”组成, 事件可用故障概率表示, 门用来描述事件间的联系。传统的故障树分析存在以下不足: 1) 零部件的故障概率(事件)假设为精确已知。这就需要收集足够的故障数据, 但对许多系统来说获取故障数据非常困难, 并且当系统工作环境改变时, 过去的数据也不再适用; 同时随着技术的不断更新, 新的零部件经常应用到系统中, 它们基本没有故障数据。2) 事件间的联系(门)假设为精确已知。在传统的故障树分析中, 常用与门、或门来

描述事件间的联系, 但在实际工程中, 许多情况下系统的故障机理并不清楚, 事件间的联系往往具有不确定性。

故障概率和事件间的联系精确已知的要求, 使故障树的建树变得极为困难。这些不足限制了故障树在实际工程中的应用。模糊技术具有处理模糊和不精确信息的优点。许多文献将模糊技术引入故障树分析, 以弥补传统故障树的不足, 并取得了丰硕的成果^[8~12]。

文献[8~10]用模糊数来描述零部件的故障发生概率。该方法解决了故障发生概率的模糊性和不确定性问题, 减少了获取故障发生概率精确值的难度, 并能结合人的实际经验, 使故障诊断与可靠性分析在一定程度上容忍信息描述的误差, 具有较强的适应性。上述文献在描述事件间的联系时, 仍采用传统故障树中的与门和或门, 但引入了模糊乘、最大/

收稿日期: 2004-09-09; 修回日期: 2004-12-13

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60234010)

作者简介: 宋华(1968—), 男, 江西星子人, 博士后, 从事故障诊断与容错、图像处理等研究; 张洪钺(1936—), 男, 江苏苏州人, 教授, 博士生导师, 从事故障诊断与容错、导航制导与控制等研究。

最小等算子代替传统的与或运算 这种方法在一定程度上考虑了事件间联系的不确定性,但由于与门和或门的存在,使其仍需搞清故障的机理,找到事件间的联系

文献[11]将模糊逻辑引入到门中,用模糊可能性表描述事件的联系,形成了模糊门 模糊可能性表是以事件的{0, 1}逻辑为基础而形成的,即零部件只有故障和正常两种情况 实际上,故障程度的不同往往会带来不同的后果,并且这种方法中模糊门的结构固定,不利于操作经验、专家知识等语言信息的应用

本文讨论一种新的模糊故障树分析方法,用模糊可能性描述零部件的故障概率,解决了故障概率的不确定性问题;用模糊数描述故障的程度,考虑故障程度对系统的影响;构造 T-S 模糊门,用 T-S 模糊模型描述事件间的联系,解决事件联系的不确定性 模糊数和 T-S 模糊门的采用,使故障树的建立不再依赖于大量的故障数据,也不再依赖于对故障机理的深入研究 这种方法可以方便地应用语言信息

2 T-S 模糊故障树

考虑故障概率及事件间联系的不确定性,用模糊数描述故障概率及故障程度,用 T-S 模糊模型构造模糊门,描述事件间的联系,从而构造一种新的故障树——T-S 模糊门故障树(TS-FTA). 图1是一个典型的 T-S 模糊门故障树 其中 1, 2, 3 为基本事件,门 a 和门 b 为 T-S 模糊门 顶事件的可能性可由底事件的可能性得到

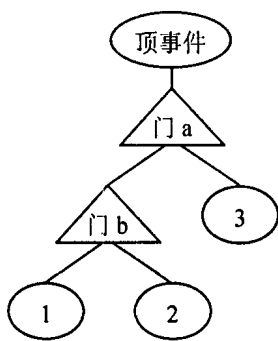


图 1 T-S 模糊门故障树

2.1 事件描述

零部件的故障概率一般根据历史数据得到,但由于历史数据的缺乏以及系统环境的变化,零部件的故障概率具有不确定性 本文引入模糊逻辑,将故障概率的不确定性考虑到模糊可能性中,即将由历史经验得到的故障概率用模糊数表示为模糊可能性 同时,由于对故障程度的描述也具有不确定性,故采用模糊数来描述故障的程度

可将模糊数的隶属函数描述为四边形隶属函数 为了使用方便并不失一般性,将四边形隶属函数 F 表示为

$$F (F_0, s_l, m_l, s_r, m_r). \quad (1)$$

其中: F_0 为模糊数支撑集的中心, s_l 和 s_r 为左右支撑半径, m_l 和 m_r 为左右模糊区 由隶属函数 F 描述的模糊数称为模糊数 F_0 , 如图 2 所示

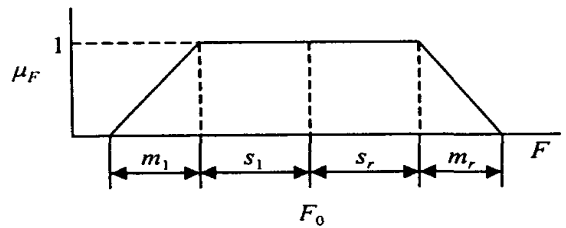


图 2 模糊数的隶属函数

由图 2 可知

$$\mu_F = \begin{cases} 0, & 0 \leq F < F_0 - s_l - m_l; \\ \frac{F - (F_0 - s_l - m_l)}{m_l}, & F_0 - s_l - m_l \leq F < F_0 - s_l; \\ 1, & F_0 - s_l \leq F < F_0 + s_r; \\ \frac{F_0 + s_r + m_r - F}{m_r}, & F_0 + s_r \leq F < F_0 + s_r + m_r; \\ 0, & F_0 + s_r + m_r \leq F \end{cases} \quad (2)$$

当 $s_l = s_r = 0$ 时, 四边形隶属函数变为三角形函数; 当支撑半径为 0 且左右模糊区为 0 时, 模糊数变为确定数

假设得到第 i 个部件的概率为 P_i , 则认为其模糊可能性为模糊数 P_i 若第 i 个部件的历史数据丰富, 则可认为其故障概率是确定的, 并令模糊可能性中的支撑半径为 0, 且模糊区为 0

按照实际应用, 故障的程度可在 0~ 1 间选取模糊数来描述 若实际某部件的故障程度可分为大、中、小, 则可采用模糊数 0, 0.5, 1 来描述 一般可认为模糊数的隶属函数左右对称, 即有 $s_l = s_r, m_l = m_r$

2.2 T-S 模糊门

T-S 模型由一系列 IF-THEN 模糊规则组成, 是一种万能逼近器, 可用来描述事件间的联系, 从而构成 T-S 模糊门 T-S 模型可表述如下:

已知规则 $l (l = 1, 2, \dots, m)$;

如果 z_1 为 S_{1l} 且 z_2 为 S_{2l} 且 ..., 则 Y 为 Y_l 其中: $z = [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_p]^T$ 为前件变量, S_{ij} 为模糊集 设模糊集的隶属函数为 $\mu_{S_{ij}}(z_j)$, 则 T-S 模型的输出为

$$Y = \sum_{l=1}^m \beta_l^*(z) Y_l, \quad (3)$$

其中 $\beta_l^*(z)$ 满足

$$\beta_l^*(z) = \begin{cases} 1, & l = 1, 2, \dots, m, \\ 0 & \beta_l^*(z) & 1 \end{cases} \quad (4)$$

可用如下公式计算:

$$\beta_l^*(z) = \beta_l(z) \prod_{l=1}^m \beta_l(z). \quad (5)$$

其中 $\beta_l(z)$ 为模糊规则 l 的执行度, 计算如下:

$$\beta_l(z) = \prod_{j=1}^p \mu_{s_{lj}}(z_j). \quad (6)$$

设基本事件 x_1, x_2, \dots, x_n 的上级事件为 Y , 则它们间的联系可由图 3 描述

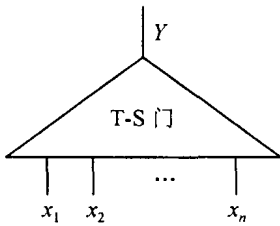


图3 T-S模糊门

假设基本事件 x_1, x_2, \dots, x_n 和上级事件 Y 的故障程度分别描述为模糊数 $(x_1^1, x_2^1, \dots, x_n^1), \dots, (x_1^m, x_2^m, \dots, x_n^m)$ 和 $(y^1, y^2, \dots, y^{k_y})$, 其中

$$\begin{cases} 0 & x_1^1 < x_2^1 < \dots < x_n^1 & 1, \\ 0 & x_1^2 < x_2^2 < \dots < x_n^2 & 1, \\ & \vdots & \\ 0 & x_1^m < x_2^m < \dots < x_n^m & 1, \\ 0 & y^1 < y^2 < \dots < y^{k_y} & 1. \end{cases} \quad (7)$$

则 T-S 模糊门可表示为下列模糊规则:

已知规则 $l(l = 1, 2, \dots, m)$;

如果 x_1 为 $x_1^{i_1}$ 且...且 x_n 为 $x_n^{i_n}$, 则 Y 为 y^1 的可能性为 $P^1(y^1), \dots, y^{k_y}$ 的可能性为 $P^l(y^{k_y})$. 其中: $i_1 = 1, 2, \dots, k_1, \dots, i_n = 1, 2, \dots, k_n, m$ 为规则总数, 满足 $m = k_1 k_2 \dots k_n$

记 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. 若已知基本事件的故障程度为 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 则由 T-S 模型可估计出上级事件故障程度的模糊可能性

$$\begin{cases} P(y^1) = \prod_{l=1}^m \beta_l^*(x) P^l(y^1), \\ P(y^2) = \prod_{l=1}^m \beta_l^*(x) P^l(y^2), \\ \vdots \\ P(y^n) = \prod_{l=1}^m \beta_l^*(x) P^l(y^n). \end{cases} \quad (8)$$

其中

$$\beta_l^*(x) = \prod_{j=1}^n \mu_{s_{lj}}(x_j) \prod_{l=1}^m \mu_{s_{lj}}(x_j). \quad (9)$$

式中 $\mu_{s_{lj}}(x_j)$ 表示第 l 条规则中 x_j 对相应模糊集的隶属度

假设基本事件各种故障程度的模糊可能性为 $P(x_1^{i_1}) (i_1 = 1, 2, \dots, k_1), \dots, P(x_n^{i_n}) (i_n = 1, 2, \dots, k_n)$, 则规则 $l(l = 1, 2, \dots, m)$ 执行的可能性为

$$P_0^l = P(x_1^{i_1}) P(x_2^{i_2}) \dots P(x_n^{i_n}). \quad (10)$$

因此上级事件的模糊可能性为

$$\begin{cases} P(y^1) = \prod_{l=1}^m P_0^l P^l(y^1), \\ P(y^2) = \prod_{l=1}^m P_0^l P^l(y^2), \\ \vdots \\ P(y^n) = \prod_{l=1}^m P_0^l P^l(y^n). \end{cases} \quad (11)$$

由下级事件的模糊可能性并据 T-S 模糊门, 用式(11)可得出上级事件的各种模糊可能性; 由下级事件的当前状态并据 T-S 模糊门, 用式(8)可估计出上级事件的模糊可能性

3 组合导航系统可靠性分析

以组合导航系统为例, 讨论 T-S 模糊故障树分析方法在导航制导系统可靠性分析中的应用

组合导航系统是利用两种或两种以上的导航设备(或传感器)组合起来, 借助于计算机把多种导航信息进行综合处理, 输出导航所需的各种参数. 由于组合了多种导航设备, 使系统的导航定位精度提高, 并且具有冗余的导航信息, 可用于提高系统的可靠性. 组合导航系统根据不同的导航需要可有不同的组合方案, NS/GPS 组合导航系统就是其中的一种. 该系统的原理如图 4 所示

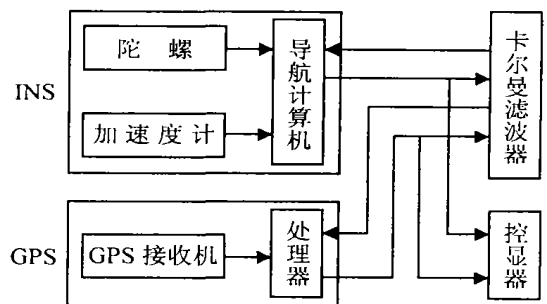


图4 INS/GPS组合导航系统原理

由图4可以看出组合导航系统由4部分组成: 电源、组合传感器、Kalman 滤波器、控制显示器. 其中组合传感器由NS和GPS组成, NS由陀螺、加速度计和导航计算机组成, GPS由GPS接收机和处理器组成

组合导航系统中的一个或多个部件发生故障时, 随着各个部件的故障程度的不同, 组合导航系统

发生故障的可能性具有不确定性: 可能发生故障也可能不发生, 可能发生严重故障也可能只是发生轻微故障 可以选择系统故障作为顶事件, 采用 T-S 模糊故障树来分析该组合导航系统的可靠性 建立以系统故障为顶事件的 T-S 模糊故障树如图 5 所示, 其中门 1~ 门 4 均为 T-S 模糊门

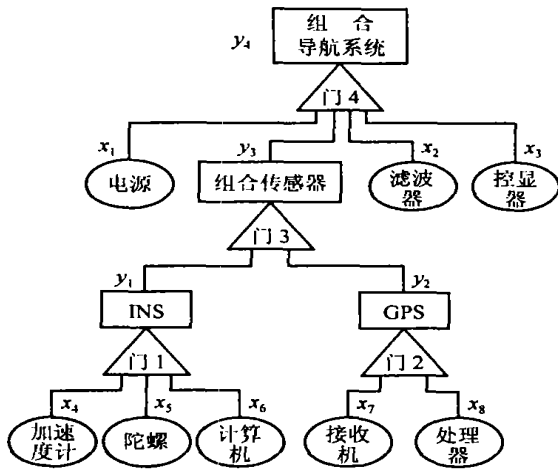


图 5 组合导航系统故障树

令 $X = (x_1, x_2, \dots, x_8)$, 其中 x_1, x_2, \dots, x_8 分别对应系统中的电源、滤波器、控制显示器、加速度计、陀螺、INS 计算机、GPS 接收机和 GPS 处理器 令 y_1, y_2, y_3 和 y_4 分别代表 INS、GPS、组合传感器和组合导航系统(分别为 T-S 模糊门 1~ 4 的输出). 假设 x_2, x_4, \dots, x_8 和 y_1, y_2, y_3, y_4 的常见故障程度为 $(0, 0.5, 1)$, 隶属函数选为 $s_l = s_r = 0.1, m_l = m_r = 0.3$ x_1 和 x_3 的常见故障程度为 $(0, 1)$, 隶属函数选为 $s_l = s_r = 0.25, m_l = m_r = 0.5$ 根据经验和专家数据可得到 T-S 模糊门如表 1~ 表 4 所示

表 1 T-S 模糊门 1

序号	x_4	x_5	x_6	y_1		
				0	0.5	1
1	0	0	0	1	0	0
2	0	0	0.5	0.3	0.4	0.3
3	0	0	1	0	0	1
4	0	0.5	0	0.1	0.5	0.4
5	0	0.5	0.5	0.1	0.4	0.5
6	0	0.5	1	0	0	1
7	0	1	0	0	0	1
8	0	1	0.5	0	0	1
9	0	1	1	0	0	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
27	1	1	1	0	0	1

表 2 T-S 模糊门 2

序号	x_7	x_8	y_2		
			0	0.5	1
1	0	0	1	0	0
2	0	0.5	0.2	0.5	0.3
3	0	1	0	0	1
4	0.5	0	0.2	0.4	0.4
5	0.5	0.5	0.1	0.3	0.6
6	0.5	1	0	0	1
7	1	0	0	0	1
8	1	0.5	0	0	1
9	1	1	0	0	1

表 3 T-S 模糊门 3

序号	y_1	y_2	y_3		
			0	0.5	1
1	0	0	1	0	0
2	0	0.5	1	0	0
3	0	1	1	0	0
4	0.5	0	1	0	0
5	0.5	0.5	0.5	0.3	0.2
6	0.5	1	0.2	0.4	0.4
7	1	0	1	0	0
8	1	0.5	0.2	0.4	0.4
9	1	1	0	0	1

表 4 T-S 模糊门 4

序号	x_1	x_2	x_3	y_3	y_4		
					0	0.5	1
1	0	0	0	0	1	0	0
2	0	0	0	0.5	0.5	0.3	0.2
3	0	0	0	1	0	0	1
4	0	0	1	0	0.1	0.5	0.4
5	0	0	1	0.5	0.1	0.2	0.7
6	0	0	1	1	0	0	1
7	0	0.5	0	0	0.4	0.3	0.3
8	0	0.5	0	0.5	0.1	0.4	0.5
9	0	0.5	0	1	0	0	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
36	1	1	1	1	0	0	1

表 1~ 表 4 中的每一行代表一条模糊规则 例如表 1 的第 1 行代表的规则为:

规则 1: 如果 x_4 为 0, x_5 为 0, x_6 为 0, 则 y_1 为 0 的可能性为 1, 为 0.5 的可能性为 0, 为 1 的可能性为 0

根据上述描述的模糊故障树,可由已知各部件故障的模糊可能性计算出系统的故障模糊可能性,也可根据各个部件的故障状态计算出系统各种故障程度出现的模糊可能性

3.1 已知部件故障模糊可能性,计算系统故障的模糊可能性

组合导航系统各部件的可靠性数据如表5所示

表5 组合导航系统各部件的可靠性数据

部 件	故障率 (10^{-6})	部 件	故障率 (10^{-6})
x_1 (电源)	1.9	x_5 (陀螺)	4.2
x_2 (滤波器)	1.0	x_6 (NS 计算机)	3.2
x_3 (控制显示器)	2	x_7 (GPS 接收机)	66.7
x_4 (加速度计)	2.6	x_8 (GPS 处理器)	8.0

表5中的数据为各部件故障程度为1时的模糊可能性。若 x_2, x_4, \dots, x_8 的故障程度为0.5的概率数据与为1的概率数据相同,则可根据表1~表3得到NS(y_1),GPS(y_2)和组合传感器 y_3 的模糊可能性

$$P(y_1 = 0.5) =$$

$$P_0^1 P^1(y_1 = 0.5) = 4.680\,013 \times 10^{-6},$$

$$P(y_1 = 1) =$$

$$P_0^1 P^1(y_1 = 1) = 13.680\,114 \times 10^{-6},$$

$$P(y_2 = 0.5) =$$

$$P_0^1 P^1(y_2 = 0.5) = 30.680\,160 \times 10^{-6},$$

$$P(y_2 = 1) =$$

$$P_0^1 P^1(y_2 = 1) = 103.781\,921 \times 10^{-6},$$

$$P(y_3 = 0.5) =$$

$$P_0^1 P^1(y_3 = 0.5) = 405.238\,595 \times 10^{-12},$$

$$P(y_3 = 1) =$$

$$P_0^1 P^1(y_3 = 1) = 1.810\,628\,750 \times 10^{-12}.$$

由表4以及上述数据可以得到组合导航系统 y_4 的故障模糊可能性

$$P(y_4 = 0.5) =$$

$$P_0^1 P^1(y_4 = 0.5) = 1.300\,122 \times 10^{-6},$$

$$P(y_4 = 1) =$$

$$P_0^1 P^1(y_4 = 1) = 4.001\,902 \times 10^{-6}.$$

上述结果说明,系统的故障模糊可能性与部件

的模糊可能性为一个数量级,且系统出现故障程度为1的模糊可能性大于电源、滤波器、控制显示器和组合传感器的故障模糊可能性,这与实际情况是一致的。如果不考虑故障程度的影响,则图5中的门4往往可用传统故障树中的或门来描述。在本文的分析中,考虑到显示器故障时,导航系统仍可给出导航信息,因此系统的故障模糊可能性小于电源、滤波器、控制显示器及组合传感器之和

3.2 已知部件故障状态,计算系统故障的模糊可能性

假设已知各部件的故障状态为: $x_1 = 0, x_2 = 0.8, x_3 = 0, x_4 = 0.1, x_5 = 0, x_6 = 0.3, x_7 = 0.2, x_8 = 0.1$ 。根据式(8)可计算出NS和GPS的故障概率

$$P(y_1 = 0) = 0.531, P(y_1 = 0.5) = 0.268,$$

$$P(y_1 = 1) = 0.201, P(y_2 = 0) = 0.736,$$

$$P(y_2 = 0.5) = 0.132, P(y_2 = 1) = 0.132$$

利用式(11)计算组合传感器 y_3 。由表3和上述数据可得各规则执行的模糊可能性

$$P_0^1 = 0.531 \times 0.736 = 0.390\,816,$$

$$P_0^2 = 0.531 \times 0.132 = 0.070\,092,$$

$$P_0^3 = 0.531 \times 0.132 = 0.070\,092,$$

$$P_0^4 = 0.268 \times 0.736 = 0.197\,248,$$

$$P_0^5 = 0.268 \times 0.132 = 0.035\,376,$$

$$P_0^6 = 0.268 \times 0.132 = 0.035\,376,$$

$$P_0^7 = 0.201 \times 0.736 = 0.147\,936,$$

$$P_0^8 = 0.201 \times 0.132 = 0.026\,532,$$

$$P_0^9 = 0.201 \times 0.132 = 0.026\,532$$

因此可得 y_3 的故障概率为: $P(y_3 = 0) = 0.906\,254, P(y_3 = 0.5) = 0.035\,376, P(y_3 = 1) = 0.058\,370$

计算组合导航系统 y_4 时,用 y_3 的模糊可能性代替其隶属度进行计算,得到各规则的执行度

$$\beta_7 = 0.906\,254 \times 1/3 = 0.302\,085,$$

$$\beta_8 = 0.035\,376 \times 1/3 = 0.011\,792,$$

$$\beta_9 = 0.058\,370 \times 1/3 = 0.019\,457,$$

$$\beta_{13} = 0.906\,254 \times 2/3 = 0.604\,170,$$

$$\beta_{14} = 0.035\,376 \times 2/3 = 0.023\,584,$$

$$\beta_{15} = 0.058\,370 \times 2/3 = 0.038\,914$$

其余规则的执行度为零。因此可得系统的故障概率

$$P(y_4 = 0) =$$

$$\beta_7 \times 0.4 + \beta_8 \times 0.1 = 0.122\,013\,2,$$

$$P(y_4 = 0.5) =$$

$$\beta_7 \times 0.3 + \beta_8 \times 0.4 = 0.095\,342\,3,$$

$$P(y_4 = 1) =$$

$$\beta_7 \times 0.3 + \beta_8 \times 0.5 + \beta_9 + \beta_{13} + \beta_{14} + \beta_{15} = 0.7826465$$

上述结果说明,当滤波器出现较严重的故障时,系统出现严重故障的可能性较大,这与实际情况是相符的。所以若已知各部件的故障状态,应用模糊故障树可以计算出系统的故障模糊可能性。

4 结 论

本文用模糊可能性代替故障概率,用模糊数描述事件的故障程度。T-S 模糊门代替故障树中传统的与、或、非门,以描述复杂系统中无法找到部件之间的精确联系,从而得到一种新的故障树分析方法。

引入模糊可能性和 T-S 模糊门构造 T-S 模糊故障树,解决了零部件故障概率和系统故障机理的不确定性问题。在对故障的描述中,引入了故障程度的概念,使故障树与实际情况更加吻合。模糊逻辑的引入也为语言等模糊信息的充分应用创造了条件。由于 T-S 模糊故障树不需要大量的故障历史数据来获得零部件精确的故障概率,也不需要掌握精确的故障机理,使故障树建立的难度大大下降。本文方法可以大大拓宽故障树分析的应用范围。

参考文献(References)

- [1] Burdick G R, Fussel J B, Rasmuson D M, et al. Phased Mission Analysis: A Review of New Developments and an Application[J]. *IEEE Trans Reliability*, 1977, 26(1): 43-49.
- [2] Cepin M, Mavko B. Probabilistic Safety Assessment Improves Surveillance Requirements in Technical Specification[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 1997, 56(1): 69-77.
- [3] Marko C, Borut M. A Dynamic Fault Tree[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2002, 75(1): 83-91.
- [4] Vaurio J K. Common Cause Failure Probabilities in Stand by Safety System Fault Tree Analysis with Testing-scheme and Timing Dependencies[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2003, 79(1): 43-57.
- [5] Alireza E, Seyed G M. FPGA-based Monte Carlo Simulation for Fault Tree Analysis[J]. *Microelectronics Reliability*, 2004, 44(6): 1017-1028.
- [6] Huang H Z, Tong X, Zuo M J. Posbist Fault Tree Analysis of Coherent Systems[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2004, 84(2): 141-148.
- [7] Sohn S D, Seong P H. Quantitative Evaluation of Safety Critical Software Testability Based on Fault Tree Analysis and Entropy[J]. *J of Systems and Software*, 2004, 73(2): 351-360.
- [8] Chanda R S, Bhattacharjee P K. A Reliability Approach to Transmission Expansion Planning Using Fuzzy Fault-tree Model[J]. *Electric Power Systems Research*, 1998, 45(2): 101-108.
- [9] Antonio C F, Nelson F F. Fuzzy FTA: A Fuzzy Fault Tree System for Uncertainty Analysis[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 1999, 26(6): 523-532.
- [10] Athanassios B, Fragiskos B. Fuzzy Fault Tree Analysis as a Mechanism for Technical Support to Small/Medium Electrolaters on a Quasi Online/Real-time Basis[A]. *IEEE ICIT 2003 [C]*. Maribor, 2003: 36-41.
- [11] Lin C T, Wang M J. Hybrid Fault Tree Analysis Using Fuzzy Sets[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 1997, 58(3): 205-213.
- [12] Fragiskos B, Christina G. Investigating the Cause of Biosensor SNR Decrease by Means of Fault Tree Analysis[A]. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf [C]*. Como, 2004: 1465-1470.
- [17] Ding F, Chen T W. Hierarchical Gradient-based Identification of Multivariable Discrete-time Systems[J]. *Automatica*, 2005, 41(2): 315-325.
- [18] Ding F, Chen T W. Iterative Least Squares Solutions of Coupled Sylvester Matrix Equations[J]. *Systems and Control Letters*, 2005, 54(2): 95-107.
- [19] 谢新民, 丁锋. *自适应控制系统*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
(Xie X M, Ding F. *Adaptive Control Systems*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.)

(上接第 853 页)