

# 用矩阵算法分析联合站仪器仪表失效

张琳<sup>1</sup>, 唐伟力<sup>2</sup>, 李长俊<sup>1</sup>

(1. 西南石油学院, 四川 成都 610500; 2 四川大学, 四川 成都 610065)

**摘要:** 综合分析了影响联合站仪器仪表可靠性的主要因素, 建立了联合站仪器仪表失效故障树, 并运用矩阵算法求出了故障树的最小割集, 确定了主要失效形式, 并提出了提高联合站仪器仪表可靠性的措施。

**关键词:** 联合站; 失效; 可靠性; 矩阵算法; 故障树分析

**文章编号:** 1006-5539(2006)01-0056-04 **文献标识码:** B

仪器仪表是联合站内的主要设备之一, 装置的运行是否正常是通过相关仪表的读数显示出来。因此, 正确使用和维护仪器仪表, 对保证联合站内各装置的正常运行有着十分重要的意义。预防事故发生, 提高可靠性, 对确保安全生产有着十分重要的意义。故障树分析作为工程系统可靠性分析与评价的有效方法, 为仪器仪表失效分析提供了有效手段。故障树分析方法是分析失效因果关系中的顶部事件开始直到底部事件, 由果到因、自上而下地进行分析。该方法具有简明、直观、灵活的特点, 是工程系统可靠性分析与评价的有效方法。

## 1 故障树的建立

故障树分析方法 (FTA; Fault Tree Analysis) 是一种评价复杂系统可靠性与安全性的方法。它对系统故障形成的原因采用从整体至局部按树枝状逐渐细化分析的方法。它可以分析系统中的薄弱环节, 实现对系统故障的预测和诊断, 完成系统的最优化。故障树分析法是一种图形演绎法, 因而需要一些专门的表示逻辑关系的门符号、事件符号以及基本术语, 来表示事件之间的逻辑关系和因果关系, 简要介绍如下<sup>[1]</sup>:

**顶事件:** 所谓顶事件就是系统不希望发生的事件, 也就是要研究的事件。通常选设备最不希望出现的故障为顶事件, 它位于故障树的顶端, 即“树

根”。

**中间事件:** 又称故障事件, 它位于顶事件和底事件之间, 用矩形符号表示, 并紧跟一个逻辑门表示, 即“树枝”。

**底事件:** 位于树的底部, 可分为基本事件 (符号为圆形) 和菱形事件 (符号为菱形), 即“树叶”。

**逻辑门:** 它描述事件之间的逻辑因果关系, 它包括与门、或门、非门、表决门和一些特殊的门构成。

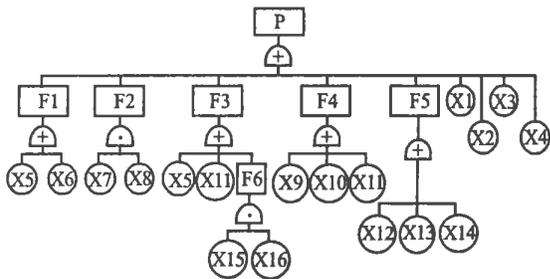


图1 联合站仪器仪表失效故障树

联合站仪器仪表失效故障树的建立, 首先根据顶事件确定原则, 选取“联合站仪器仪表失效”作为顶事件<sup>[2]</sup>。引起联合站仪器仪表失效的最直接而必要的原因主要是人为损坏仪表、转动部分失灵开裂、仪表漏气影响真空度、误操作、工作条件不达标、焊点老化、超过使用年限、无日常维护等因素引起的。任一因素的出现都将导致联合站仪器仪表失效。然后以其为次顶事件, 对相应的原因进行分析, 建立以逻辑门符号表示的联合站仪器仪表失效故障

收稿日期: 2005-06-16

基金项目: 四川省重点学科建设项目资助(SZD0416)

作者简介: 张琳(1981-), 女, 四川营山人, 在读研究生, 主要从事天然气储运研究与设计工作。电话: (028)

67300830。

©1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

树,共考虑了 16 个不同的底事件,图 1 中各符号代表的事件如表 1 所示。

表 1 联合站仪器仪表失效基本事件表

符号	事件	符号	事件
P	联合站仪器仪表失效	X6	碰撞
F1	人为损坏仪表	X7	氧化腐蚀
F2	转动部分失灵	X8	镀层磨损
F3	仪表漏气影响真空度	X9	未按操作规程
F4	误操作	X10	非专业人员操作
F5	工作条件不达标	X11	无防错措施
F6	外腐蚀	X12	环境温度过高
X1	电器元件老化	X13	输入电源不匹配
X2	焊点老化	X14	测量参数超过规定值
X3	超过使用年限	X15	大气条件恶劣
X4	无日常维护	X16	外防腐失效
X5	跌落		

## 2 故障树的定性分析方法研究

对故障树进行定性分析即找出导致顶事件发生的所有可能的故障模式以便进行故障诊断,发现系统的最薄弱环节,其任务是寻找故障树的全部最小割集。其中某些事件所组成的集合中全部基本事件都发生时,顶事件必然发生,则称这个集合为故障树的一个割集。一棵故障树的全部割集的完整集合代表了顶事件发生的所有可能性,即给定系统的全部故障原因组合形式。导致顶事件发生的必要而充分的底事件集合称为最小割集。仅当最小割集所包含的底事件都同时存在时,顶事件才发生。

### 2.1 最小割集算法有以下三种<sup>[3~5]</sup>

#### 2.1.1 Semanders 算法

其原理是对给定的故障树,从最下级底事件开始,顺次向上,直至顶事件,运算才终止。按上行原理列出故障树结构函数,并应用逻辑代数规则加以简化,便得到最小割集。使用该算法编制程序的缺点是计算机中利用素数的乘积可能会很快地超出计算机所能表示的数字范围而造成“溢出”,使分析失败。

#### 2.1.2 Fussell 算法

即从顶事件开始,由上而下进行,与门仅增加割集的阶数,或门增加割集的数量。其基本步骤是从顶事件开始,由上到下,顺次把上一级事件置换为下一级事件:凡遇到与门将输入事件排在同一行,凡遇到或门将输入事件各自排成一行,直到完全变成由底事件的集合所组成的一列,它的每行即一个集合

代表一个割集,整个列代表了故障树的全部割集。若得到的割集不是最小的,尚需再利用逻辑代数运算规则进行简化、吸收,求得最小割集。如果要确定复杂系统故障树的最小割集,计算量很大,手工计算,是难以胜任的,甚至是不可能的。因此,需要采取新的算法,编制计算机程序,依靠计算机来求最小割集。

#### 2.1.3 矩阵算法

由于故障树主要是通过“与”门和“或”门等逻辑门将故障事件根据系统的功能和结构按一定的逻辑关系组合而成,假设故障事件或者发生为“1”,或者不发生为“0”,因此它必与由“0”,“1”元素组成的二值矩阵存在着其内在的联系,如果将故障树的定性分析化为故障矩阵运算,就可以避开树的遍历和树状结构存储带来的困难。

### 2.2 故障树的矩阵化转化规则

a. 故障树的逻辑门结点,有“与门”、“或门”两种,因而可转化为相应的与(或)门下的两种矩阵。

b. 故障树的矩阵化由上向下逐层进行。每个逻辑门下的子树都应转化为矩阵形式。

c. 同一故障树的各层矩阵无论与门和或门,其列数均等于全体底事件的个数。

d. 基层或门下矩阵的行数为其输入底事件的个数之和;非基层或门矩阵的行数为其输入各矩阵行数总和。

e. 基层与门下矩阵行数为 1;非基层与门下矩阵的行数为其输入各矩阵的行数连乘积。

### 2.3 故障矩阵的基本运算

按上述规则确定的矩阵称为故障矩阵,而故障矩阵中的元素取值由故障矩阵的算法确定。

故障矩阵的基本运算包括求和、求积、连加、连乘,其算法如下:

先定义  $M_1, M_2$ :

$$M_1 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \circ & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \circ & a_{2n} \\ \circ & \circ & \circ & \circ \\ a_{k1} & a_{k2} & \circ & a_{kn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \circ & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \circ & b_{2n} \\ \circ & \circ & \circ & \circ \\ b_{l1} & b_{l2} & \circ & b_{ln} \end{bmatrix}$$

#### 2.3.1 故障矩阵 $M_1, M_2$ 的和

$$M_1 + M_2 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \circ & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \circ & a_{2n} \\ \circ & \circ & \circ & \circ \\ a_{k1} & a_{k2} & \circ & a_{kn} \\ b_{11} & b_{12} & \circ & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \circ & b_{2n} \\ \circ & \circ & \circ & \circ \\ b_{l1} & b_{l2} & \circ & b_{ln} \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.3.2 故障矩阵  $M_1, M_2$  的积

$$M_1 \times M_2 = \begin{bmatrix} a_{11} \wedge b_{11} & a_{12} \wedge b_{12} & \circ & a_{1n} \wedge b_{1n} \\ a_{11} \wedge b_{21} & a_{12} \wedge b_{22} & \circ & a_{1n} \wedge b_{2n} \\ \circ & \circ & \circ & \circ \\ a_{11} \wedge b_{l1} & a_{12} \wedge b_{l2} & \circ & a_{1n} \wedge b_{ln} \\ a_{21} \wedge b_{11} & a_{22} \wedge b_{12} & \circ & a_{2n} \wedge b_{1n} \\ a_{21} \wedge b_{21} & a_{22} \wedge b_{22} & \circ & a_{2n} \wedge b_{2n} \\ \circ & \circ & \circ & \circ \\ a_{21} \wedge b_{l1} & a_{22} \wedge b_{l2} & \circ & a_{2n} \wedge b_{ln} \\ \circ & \circ & \circ & \circ \\ a_{k1} \wedge b_{11} & a_{k2} \wedge b_{12} & \circ & a_{kn} \wedge b_{1n} \\ a_{k1} \wedge b_{21} & a_{k2} \wedge b_{22} & \circ & a_{kn} \wedge b_{2n} \\ \circ & \circ & \circ & \circ \\ a_{k1} \wedge b_{l1} & a_{k2} \wedge b_{l2} & \circ & a_{kn} \wedge b_{ln} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中,  $\wedge$  为布尔和, 即当  $a_{ij}b_{nk}$  同时为 0 时, 其值为 0, 否则为 1。

2.3.3 故障矩阵的连加和连乘计算

设有  $s$  个故障矩阵  $M_1, M_2 \dots M_s$ , 则它们的连加和如下:

$$\begin{aligned} \text{令 } M_2' &= M_1 + M_2 \\ \text{则 } M_3' &= M_2' + M_3 \\ &\dots \\ M_s' &= M_{s-1}' + M_s = M_1 + M_2 + \Delta M_{s-1} + M_s \end{aligned} \quad (4)$$

同理,  $s$  个故障矩阵  $M_1, M_2 \dots M_s$ , 则它们的连乘积如下:

$$\begin{aligned} \text{令 } M_2' &= M_1 \times M_2 \\ \text{则 } M_3' &= M_2' \times M_3 \\ &\dots \\ M_s' &= M_{s-1}' \times M_s = M_1 \times M_2 \times \Delta M_{s-1} \times M_s \end{aligned} \quad (5)$$

以上构成了故障矩阵的基本运算。

在故障树中, 门的编号是按层次自左至右编制的, 所以在逐一计算每个门的故障矩阵时, 要从编号最大的门开始计算, 一直计算到根结点, 便计算了整个故障树的故障矩阵, 故障树的最简故障矩阵就是故障树所有的最小割集。为此, 设立三种表格: 门的特征表、门与事件的关系表、门与门的关系表。各表格见表 2~4。在关系表中可以查询出每个门端接的门号和事件号。在表 2 中, 与门为 1, 或门为 0,  $K$  值为门的故障矩阵行数。在表 3 中, 设定故障树有  $n$  个门,  $m$  个底事件, 相关为 1, 无关为 0。在表 4 中, 第  $i$  个门与第  $i$  个门之间无关, 若第  $t$  个门与第  $j$  个门有关, 则对应项为 1, 否则为 0。

2.4 故障树故障矩阵的计算流程

首先将故障树符号化, 从顶至下对每个层次的底事件从左至右按图 2①, ②, ③, ④, ..., 给以定义, 逻辑门按正整数 1, 2, 3... $n$  也分别编号。按编号数最大的门起始计算该门的故障矩阵, 然后按门的编号递降顺序逐次计算, 一直计算到根结点, 即编号为 1 的顶事件, 便可得到整个故障树的故障矩阵。每个门的计算方法是相同的, 查得该门的性质是与门还是或门, 然后输入计算机, 分别转入各自的计算; 若是或门, 则只须将与该或门连接的各个门故障矩阵作叠加运算。然后对应于每个端接的事件构成一个向量, 并再次做叠加运算; 若是与门, 则首先对端接于该门的各个部门的故障矩阵作连积运算, 然后对应于端接的所有事件构成一个向量, 并再次做积运算。

限于篇幅原因, 下面以一个简单的故障树模型为例见图 2, 具体介绍最小割集的求解过程。

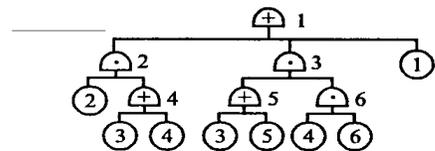


图 2 某仪表故障树模型

表 2 某仪表故障树门的特征

门编号	门性质	端接事件数	端接门数	$K$ 值
1	1	1	2	6
2	0	1	1	1
3	0	0	2	3
4	1	2	0	1
5	1	2	0	1
6	0	2	0	2

表 3 某仪表故障树门与事件关系

门编号	底事件					
	1	2	3	4	5	6
1		0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	1	1	0	0
5	0	0	1	0	1	0
6	0	0	0	1	0	1

表 4 某仪表故障树门与门的关系

门编号	1	2	3	4	5	6
1	0	1	1	0	0	0
2	0	0	0	1	0	0
3	0	0	0	0	1	1
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0

对表 2 进行分析可得各个门的故障矩阵为:

$$M_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

求出故障树根结点的门矩阵后,就可以求出故障树的最小割集。由于故障树中有重复事件,可能有超集存在。为此,需要进行割集最小化,以求得最小割集。

在故障矩阵  $M_1$  中,从第一行开始逐行检查消除与该行相关的行,剩下非相关的行组成一个矩阵  $M^*$ ,而  $M^*$  的行数就是故障树最小割集的个数,每

行中值为 1 所对应的列,组成一个最小割集,如在  $M_1$  中消除相关行后,该故障树的最小割集为  $\{1, 2, 4\}, \{1, 2, 6\}, \{1, 2, 3, 5\}, \{1, 3, 4\}$ 。

运用矩阵算法对联合站仪器仪表失效故障树进行定性分析,通过计算机计算,得到的最小割集为:  $\{X_1\}, \{X_2\}, \{X_3\}, \{X_4\}, \{X_5\}, \{X_6\}, \{X_9\}, \{X_{10}\}, \{X_{11}\}, \{X_{12}\}, \{X_{13}\}, \{X_{14}\}, \{X_{7X8}\}, \{X_{15X16}\}$ 。12 个一阶最小割集直接影响着系统的可靠性,为系统中的薄弱环节。

### 3 结论

a. 故障树分析法具有简明、直观、易懂、灵活的特点。是工程系统可靠性与安全性分析及评价常用的有效方法。

b. 以“联合站仪器仪表失效”为顶事件建立了仪器仪表的故障树,该故障树共考虑了 16 个不同的基本事件。

c. 将故障门的三个关系表合成建立一个数据库,在一个库内查找三种参数,可减少调用库的个数,保证各种参数的准确性和可靠性。

d. 故障树分析中运用矩阵算法求出了一阶最小割集 12 个,二阶 2 个。实践证明运用矩阵算法进行定性分析,具有易于编程、简单清晰、工作量较小的优点,特别适用于复杂工程系统的可靠性分析。

e. 进一步分析确定联合站仪器仪表的主要失效原因是误操作、人为损坏、工作条件不达标、外腐蚀、转动失灵,主要的解决途径是加强操作工的技能培养,防止误操作的现象发生,严格按照操作规程进行操作,注意设备的日常维护保养。

参考文献:

[1] 林锦国. 过程控制系统仪表装置[M]. 南京: 东南大学出版社, 2001.

[2] 蒋宏业, 姚安林, 郑兴华, 等. 天然气球罐失效故障树分析[J]. 天然气工业, 2003; 23(6): 143-145.

[3] 黄祥瑞. 可靠性工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.

[4] 杨世凤. 机电设备故障诊断树理论及方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 1998.

[5] 郭永基. 可靠性工程原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

# SELECTED ABSTRACTS

## NATURAL GAS AND OIL

(BIMONTHLY)

Vol. 24 No. 1 Feb. 2006

**ABSTRACT:** In view of the problem of the min. mixed oil volume, analyzed is the technology of liquid partition on the batch transportation and influence of different length liquid partition mixed oil volume. Calculated is the optimum length of the liquid partition using numerical value method and prepared is a program for calculating the optimum length of the liquid partition. The result of example shows that the mixed oil volume is less when using the liquid partition and the mixed oil volume is least under the optimum length of the liquid partition. A credible method is available to seek the optimum length of the liquid partition.

**KEY WORDS:** Pipeline; Batch transportation; Liquid partition; Optimum length; Numerical value calculation

### Economic Evaluation Analysis on Failure of Pipeline

Li Shuang, Chen Liqiong, Zhang Peng(Southwest Oil College, Chengdu, 610500, Sichuan, China)

Li Miao(Kehong Gas Transportation Branch Co., Chengdu, 610215, Sichuan, China)

Zeng Yongjie(Sichuan Petroleum Administration Gas Transportation Branch Co., Chengdu, 610213, Sichuan, China) **NGO**, 2006, 24 (1): 36-39

**ABSTRACT:** Failures of oil and gas pipeline will result in serious personnel death and injury, property loses and damage to environment. Aiming at pipeline failure sequent, correspondent effective maintenance measures may be adopted to reduce loss. However, a conclusion is not easy to be made due to non-consistency of measurement methods of direct economic loss, life loss and environment damage. A currency quantization method is put forward for dealing with non-consistency of measurement methods. This method is beneficial to pipeline operators for accident management.

**KEY WORDS:** Oil and gas pipeline; Failure sequent; Personnel injury and death; Economical loss; Currency quantization method

## OIL & GAS TREATING AND PROCESSING

### New Development of SDP Sulfur Recovery and Tail Gas Treatment

Pu Yuanang, Zhu Lin et al. (Southwest Oil College, Chengdu, 610500, Sichuan, China) **NGO**, 2006, 24 (1): 42-46

**ABSTRACT:** The SDP technology plays an important role in sulfur recovery and tail gas treatment. Summarized is recent development of sulfur recovery and tail gas treatment techniquess, especially described are technical characteristics, application and development of Clauspo, Clinsulf-SDP and MCRC techniques and discussed is the development trend of the SDP technology.

**KEY WORDS:** SDP technology; LT Claus; Sulfur recovery; Tail gas treatment; Process; Development trend

### Development Trend of Domestic Gasoline and Engine Oil for Motorcycle

Wang Enyang, Sun Zongli, Zhang Ning et al. (Nanyang Paraffin Refining Plant, Nanyang, 473132, Henan, China) **NGO**, 2006, 24 (1): 47-49

**ABSTRACT:** Along with improvement of people's living conditions continuously, China has the largest motorcycle productivity and consumption in the world, which has resulted in serious environment pollution due to tail gas. For purpose of protecting environment, motorcycles in China are gradually turned to 4-stroke from 2-stroke. High quality engine oil is required for special work environment of motorcycle engine.

**KEY WORDS:** Motorcycle; Gasoline and engine oil; Environmental protection; 2-stroke; 4-stroke

### Technical Innovation on Delayed Coking Unit

Yuan Cunyu(General Petrochemical Plant of Shengli Oil field Co., Ltd. Dongying, 257000, Shandong, China)

Guo Aijun(College of Chemistry and Chemical Engineering, Petroleum University, Dongying, 257061, Shangdong, China) **NGO**, 2006, 24 (1): 50-52

**ABSTRACT:** Described are the technical characteristics of tunable recycle ratio adopted in the industrial delayed coking unit and technical innovation on process flow of furnace pipe. The practical application in the process is then further analyzed. The technique innovation has resulted in recycle ratio reduction of 0.12, enlargement of the coking unit capacity, improvement of product distribution, liquid product increment of 2.10%, furnace pipe coking period prolongation of 1 multiple and large reduction of synthetic energy consumption. Some suggestions are put forward on future technical innovation of the unit. The experience in the technical innovation is beneficial to similar unit reformation.

**KEY WORDS:** Delayed coking; Technical innovation; Recycle ratio; Furnace; Industrial unit

## INSTRUMENTATION AND AUTOMATATION

### Application of Matrix Algorithm to Analysis on Failure of Instrumentation at Combined station

Zhang Lin, Li Changjun(Southwest Oil College, Chengdu, 610500, Sichuan, China)

Tang Weili(Sichuan University, Chengdu, 610065, Sichuan, China) **NGO**, 2006, 24 (1): 56-59

**ABSTRACT:** Major factors affecting reliability of instrumentation in the combined station are analyzed synthetically. The fault tree is put forward. The min. cut sets and main failure types are obtained. Presented are some measures of improving reliability of the instrumentation.

**KEY WORDS:** Combined station; Failure; Reliability; Matrix algorithm; Fault tree analysis

## MACHINERY AND EQUIPMENT

### Selection of Calculation Method for Wall Thickness of Cylinder Body in Pressure Equipment

Zhang Chunyan(China Petroleum Engineering Co., Ltd. Southwest Company, Chengdu, 610017, Sichuan, China) **NGO**, 2006, 24 (1): 60-62

**ABSTRACT:** Calculate methods for wall thickness of the pressed cylinder in different operating conditions are different. Based on basic theory of strength design, common methods are analyzed and compared, formulas are selected to calculate the cylinder wall thickness to ensure that the pressed cylinder operate safely and reliably.

**KEY WORDS:** Cylinder; Thickness; Strength; Calculation method