

# 基于 SDG 推理规则和定量分析的故障诊断技术

曹文亮, 王兵树, 马良玉, 张 冀

(华北电力大学 控制科学与工程学院, 河北 保定 071003)

**摘 要:** 符号有向图(Signed Directed Graph, SDG)是一种基于定性模型和因果分析的故障诊断方法, 针对最初的算法效率低下, 不适合实际大规模过程的特点, 给出了一个将 SDG 模型转化为一系列规则的方法, 这样不仅可以大幅度地提高诊断的速度和精度, 同时可以同已有的诊断专家系统相结合; 诊断时应用所建立的规则进行比较, 得到故障模式的定性诊断结果。然后对某些定性特征一样而定量值不同的故障模式, 通过结合模糊理论在 SDG 中加入适当定量信息, 并计算和比较被诊断模式对已知故障模式的隶属度来确定系统的故障。案例试验表明本文所给出的方法是可行的。

**关 键 词:** 符号有向图; 故障诊断; 推理规则; 定性模型; 定量知识

中图分类号: TK172; TP277 文献标识码: A

## 1 前 言

符号有向图(Signed Directed Graph, SDG)是一种方便的工具, 它通过将系统变量间的因果关系用图形的方式来表示, 为系统的结构提供了一个直观的描述。其故障诊断本质上去确定过程扰动的根本原因, 采用带符号的有向图描述系统, 结合因果分析法, 利用存储在 SDG 图上的信息搜寻扰动可能的故障源, 从而有效识别系统扰动的原因。此方法的优势在于需要相对较少的信息来构造带符号的有向图及用于诊断。本文通过分别建立系统及其部件的 SDG, 并将此 SDG 对应于需诊断的故障模式进行化简; 同时为了缩短使用 SDG 所需要的计算时间, 将 SDG 写成许多规则的形式, 形成系统的诊断规则库。诊断时通过将系统变量的定量值转换为定性值, 应用所建立的规则进行比较, 得到故障模式的定性诊断结果<sup>[1]</sup>; 然后对不能区分的故障模式采取加入适当定量信息的办法来进行进一步诊断。研究表明, 该方法具有较好的解释性和诊断的快速性。

## 2 SDG 的基本模型和解释

基于 SDG 的故障诊断, 将图 1 中的节点 A、B 对

应部件状态变量或故障根源, 当被测变量正常时, 节点取零, 当被测变量大于上限时, 该节点取“+”, 反之取“-”; 其间的有向边表示节点间的因果关系, 边上的符号  $\text{sign}(A-B)$  代表节点间影响的方向, 当  $\text{sign}(A-B)$  取值为“+”, 表明原因变量与结果变量变化方向相同; 当  $\text{sign}(A-B)$  取值为“-”, 表明原因变量与结果变量变化方向相反。

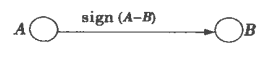


图 1 SDG 示意图

系统 SDG 可根据实际过程数据或人的知识和经验来建立, 或根据描述系统行为的数学方程来建立。根据前者建立的 SDG 比较直观, 所包含的未测量节点比较少, 但有可能将经验上未能预测到的系统故障行为排除在外。根据后者建立的 SDG 能比较全面地反映系统的行为, 但它比较复杂, 所包含的未测量节点比较多, 需要花费一定的功夫去简化。描述系统行为的代数方程一般可写成如下形式:

$$x_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

当  $\partial_i / \partial x_j \neq 0$  时, 那么由节点  $x_j$  到节点  $x_i$  的分支的正负号就是  $\partial_i / \partial x_j$  的正负号, 如果符号随时间而改变, 那么分支的正负号都要考虑。

## 3 SDG 推理规则

### 3.1 SDG 的故障模拟

故障诊断实际上是故障模拟问题的逆过程和对称的命题, 诊断从一系列观察到的症状来推断一个关于过程状态的假设, 而模拟则对于给定的状态预

收稿日期: 2005-01-28; 修订日期: 2005-08-15

基金项目: 华北电力大学博士学位教师科研基金资助项目(20041209)

作者简介: 曹文亮(1977-), 男, 山西朔州人, 华北电力大学博士研究生。

测过程的响应, 这是个相对较简单的过程。因而我们可以从较为简单的模拟问题上来进一步分析较复杂的诊断问题。单故障源假设下的故障诊断问题可以描述成: 给定一个 SDG, 列举所有故障模式, 搜索其故障模式对应的故障源<sup>3</sup>。

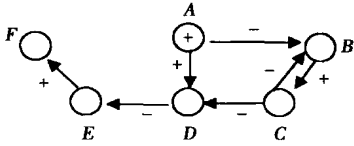


图 2 A 作为故障源的 SDG 模型

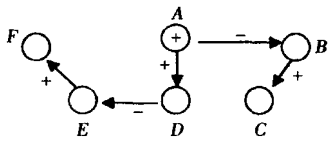


图 3 A 出现正偏差时的解释 I

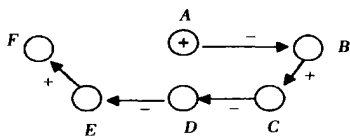


图 4 A 出现正偏差时的解释 II

表 1 对于 A 故障源两种解释的所有故障模式

解释 I					解释 II				
B	C	D	E	F	B	C	D	E	F
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-	0	0	0	0	-	0	0	0	0
-	-	0	0	0	-	-	0	0	0
0	0	+	0	0	-	-	+	0	0
0	0	+	-	0	-	-	+	+	0
0	0	+	-	-	-	-	+	+	+
-	0	+	0	0					
-	-	+	0	0					
-	0	+	-	0					
-	-	+	-	0					
-	0	+	-	-					
-	-	+	-	-					

生成一个有向子图, 我们称为模拟树或解释, 它表示故障传播的路径并产生路径上每个节点故障事件和偏差方向的信息。对于一个给定的 SDG 和根节点, 可能有多个传播解释, 但其中只有一个是反映过程的真实行为。

简单举例说明, 图 2 是一个简化的 SDG (节点全部可测), 假设 A 出现正偏差, 则可通过传播产生如图 3 和图 4 所示的两种解释, 它们产生的各检测点的故障模式分别如表 1 中的解释 I 和解释 II 所示。

当实际在线检测到的故障模式同表 1 中的某一行的故障模式匹配时, 就可以认为故障源就是节点 A 发生正偏差。将所有节点出现故障后的故障模式离线储存, 并在出现故障后进行匹配类似于故障词典诊断法。但对于大规模过程对于每个故障源会有大量的故障模式与之对应, 这样显然是不科学的, 下面介绍如何将 SDG 模型转化生成每个故障源的单一规则。

首先, 为了方便地在线检验一条边是否为一致边, 这里采用逻辑符号来记录, 定义  $p$ 、 $m$ 、为边符号“+”“-”的逻辑函数形式, 其静态真值见表 2; 另外我们定义节点  $A < 0 \leftrightarrow A.lt.0$ ;  $A = 0 \leftrightarrow A.eq.0$ ;  $A > 0 \leftrightarrow A.ht.0$ 。

表 2 真值表

A	$A \xrightarrow{+} B \leftrightarrow (pAB)$			$A \xrightarrow{-} B \leftrightarrow (mAB)$		
	B			B		
	+	0	-	+	0	-
+	T	T	F	F	T	T
0	F	T	F	F	T	F
-	F	T	T	T	T	F

图 3 中 A 故障源的解释可以用其隐含的逻辑关系来表示:

$$A > 0 \leftrightarrow A.lt.0; A \rightarrow B \leftrightarrow (mAB); B \rightarrow C \leftrightarrow (pBC); A \rightarrow D \leftrightarrow (pAD); D \rightarrow E \leftrightarrow (mDE); E \rightarrow F \leftrightarrow (mEF);$$

图 4 中 A 故障源的解释也可以用其隐含的逻辑关系来表示:

$$A > 0 \leftrightarrow A.lt.0; A \rightarrow B \leftrightarrow (mAB); B \rightarrow C \leftrightarrow (pBC); C \rightarrow D \leftrightarrow (pCD); D \rightarrow E \leftrightarrow (mDE); E \rightarrow F \leftrightarrow (mEF);$$

故障模拟利用 SDG 从一个给定的根节点出发

这样对于 A 故障源两种解释的所有故障模式,

用 IF-THEN 规则的形式来表述:

IF [ (A. ht. 0) and (mAB) and (pBC) and (mAD) and (mDE) and (mEF) ] or [ (A. ht. 0) and (mAB) and (pBC) and (pCD) and (mDE) and (mEF) ]

THEN A 是可能的故障源。

进一步应用布尔运算分配律化简上式, 得:

[规则 0]: IF (A. ht. 0) and (mAB) and (pBC) and (mDE) and (mEF) and [ (pAD) or (pCD) ]

THEN A 是可能的故障源。

当在线观测数据间的逻辑关系符合上述规则, 认为 A 为故障源, 反之则不是故障源。

### 3.2 SDG 的简化和推理规则

以上分析可以看出: 一种故障源能生成多个解释, 然后组合并简化成一条规则, 但对于实际过程中的大量解释这种方法几乎是不可行的。因而采用如下步骤直接从过程的 SDG 生成规则<sup>[4~5]</sup>:

- (1) 选择一个根节点, 删除那些进入根节点的边;
- (2) 将没有发生故障的传感器节点同其检测的状态变量整合起来;
- (3) 从有向图中删除非测量节点, 形成测量节点间的新分支, 新分支的符号为原来穿过非测量节点分支符号的乘积, 并除去那些根节点无法到达的节点。而对于每个可检测的无法到达的节点, 在规则中添加一条该节点为零的子句;
- (4) 对于每一个可检测节点  $n_i$ , 按下式的形式添加子句:

$$\dots \text{and} [ ( *k_1 n_i ) \text{or} ( *k_2 n_i ) \dots \text{or} ( *k_n n_i ) ]$$

其中:  $k_j - n_i$  的输入节点; \* - 从  $k_j$  到  $n_i$  的逻辑函数  $p(+)$ 、 $m(-)$ ;

- (5) 对于正反馈回路, 根据下式添加子句:

$$\dots \text{and} [ ( *B_1 ) \text{or} ( *B_2 ) \dots \text{or} ( *B_i ) ]$$

其中:  $B_i$  - 正反馈输入节点; \* - 从  $B_i$  的输入到  $B_i$  的边符号  $p(+)$ 、 $m(-)$ 。

## 4 基于 SDG 的故障诊断

### 4.1 基于 SDG 及其规则的定性诊断

以文献[6]的一个冷却水泵与热交换器对象为例, 其 SDG 模型如图 5 所示。此过程中进行的是一个不可逆转的放热反应。通过调整冷却水流量控制器的设定来控制热交换器中流体的出口温度 ( $T$ ), 热交换器的液位  $L$  通过热交换器出口的流程

( $F_2$ ) 的来控制, 控制回路采用的都是 PID 控制器。

文献[6]主要考虑了以下 7 种故障: 进口流体流量变动 ( $F_0$ )、进口流体浓度变动 ( $C_0$ )、冷却水进口温度变动 ( $T_{j0}$ )、交换速率常数预指数因子变动 ( $K_0$ )、交换器出口管道堵塞 ( $F_m$ )、冷却水管道堵塞 ( $F_{jm}$ )和进口流体温度变动 ( $T_0$ )。

要用 SDG 及其规则的定性方法进行故障诊断, 首先, 对 SDG 进行简化, 简化时按上面的步骤, 一般从根节点出发, 沿故障传播方向进行。最终得到简化的只包括可测变量的单故障子 SDG 图; 其次, 建立该故障模式对应的故障诊断规则。如图 6 所示为故障源  $F_m$  对应的子 SDG 图; 规则(1)为其对应的诊断规则。当然利用同样的方法可以得到其它故障模式的诊断规则。

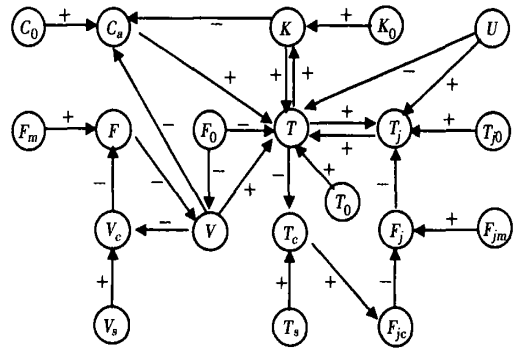


图 5 热交换器 SDG 模型<sup>[6]</sup>

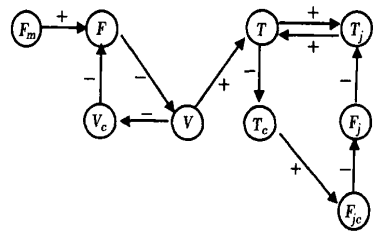


图 6 故障源  $F_m$  对应的子 SDG 模型

规则(1): IF (F. lt. 0) and (T0. eq. 0) and [ (pVT) or (pTjT) ] and (mFV) and (mVc) and (mVcF) and (mTTc) and (TcFjc) and (mFjFj) and [ (pTj) or (mFjTj) ]

对 T 和 Tj 组成的正反馈回路, 增加子句:

and IF [ (pVT) or (mFjTj) ]

THEN 故障源  $F_m$  是一个故障。

表 3 案例分析

故障序号	V	V <sub>c</sub>	F	T	T <sub>j</sub>	T <sub>c</sub>	F <sub>jc</sub>	F <sub>j</sub>	T <sub>0</sub>	诊断结论
1	-	+	-	+	+	-	-	+	0	F <sub>0</sub> 变小
2	0	0	0	+	+	-	-	+	0	C <sub>0</sub> 变大
3	0	0	0	+	+	-	-	+	0	T <sub>j0</sub> 升高
4	0	0	0	+	+	-	-	+	0	K <sub>0</sub> 变大
5	+	-	-	+	+	-	-	+	0	F <sub>m</sub> 堵塞
6	0	0	0	+	+	-	-	-	0	F <sub>jm</sub> 堵塞
7	0	0	0	+	+	-	-	+	+	T <sub>0</sub> 升高

运用以上规则库,在仿真机上进行了案例试验。

从表 3 中可以看出,对故障 1、5、6 和 7 这 4 种故障模式,基于 SDG 及其规则的定性诊断方法能唯一确定它们;而对故障 2、3 和 4 这 3 种故障,基于 SDG 的定性方法不能区分它们。这主要是由于提取故障特征时没有用到定量关系,只提取定性特征,导致这些故障的特征相同。上述诊断结果与文献[6]一致,但方法比其简单得多。

#### 4.2 基于 SDG 定性定量模型的故障诊断

从上例可以看出,文献[6]中的基于主元统计方法以及上述的基于 SDG 及其规则的定性诊断方法并不能将故障 2、3 和 4 区分,因此为了提高诊断的能力与准确性,本文采用结合定量值来做进一步的诊断。

##### 4.2.1 构造定性定量模型(QSDG)

用分支间被影响因素(结果)和影响因素(原因)变化的比率(增益)来代替 SDG 中相应分支上的符号,去构造 QSDG 模型,由于所使用的定量信息是从起始节点通过不同途径到终端节点的净影响,因此在 SDG 基础上形成的 QSDG 模型必须是树状结构。如以图 5 中故障 2、3 和 4 这 3 种故障为例,假定这 3 种故障相应的仿真样本值如表 4 所示(正常值为 100%)。

表 4 故障仿真测量参数结果

测量参数	仿真故障模式		
	故障 2	故障 3	故障 4
T	1.135	1.176	1.153
T <sub>j</sub>	1.175	1.185	1.168
T <sub>c</sub>	0.832	0.795	0.843
F <sub>jc</sub>	0.845	0.825	0.867
F <sub>j</sub>	1.116	1.130	1.101

影响因素变化的比率,最后根据仿真故障数据,分别计算增益。例如在“故障 2”的树状 SDG 上  $\Delta T_c / \Delta T = 1.24$

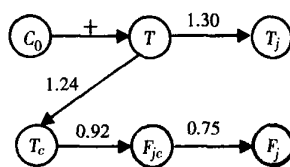


图 7 故障 2 的 QSDG 模型

替代原先分支上的符号“+”(从根故障节点出来的分支仍然保留原符号),形成含有定量信息的 QSDG (见图 7),采用同样方法可得到图 8 和图 9。

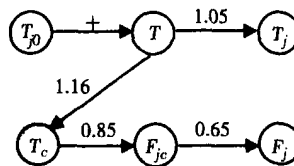


图 8 故障 3 的 QSDG 模型

##### 4.2.2 隶属函数的构造及应用范围

(1)从根故障节点到与其直接相连的节点的隶属函数<sup>[7-8]</sup>:

$$\mu(g) = \begin{cases} 1 & g > 0 \\ 0 & g \leq 0 \end{cases} \quad \text{分支符号为正}$$

$$\mu(g) = \begin{cases} 0 & g \geq 1 \\ 1 & g < 0 \end{cases} \quad \text{分支符号为负}$$

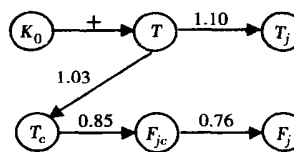


图 9 故障 4 的 QSDG 模型

(2)其它节点间定量关系的隶属函数。令相对变化比  $a = (g - g^*) / g^*$ , 其中  $g^*$  为已知故障类型的模式被影响参数与影响参数变化的比率(增益),  $g$  表示待诊断模式相应节点值变化的比值。如以图 5 中故障 2、3 和 4 这 3 种故障为例,构造隶属函数,其数学表达式如下<sup>[7-8]</sup>:

$$\mu(g) = \begin{cases} 0 & a > 0.26 \\ 1.3 - 5a & 0.06 < a \leq 0.26 \\ 1 & -0.06 \leq a \leq 0.06 \\ 1.5 + 5a & -0.26 \leq a < -0.06 \\ 0 & a < -0.26 \end{cases}$$

值得注意的是,在一般情况下,隶属函数的形状取决于定量信息的准确性以及系统过程的非线性。

##### 4.2.3 诊断方法和结果

根据最大隶属度原则来确定该模式的故障类型。计算被诊断模式对每个已知故障模式的隶属度公式<sup>[8]</sup>:

$$\mu_i = \min[\mu(g_{i1}), \mu(g_{i2}), \dots, \mu(g_{ij})]$$

算出  $\mu_i$ , 取最大的  $\mu_i$  所对应的故障类型  $i$  为诊断结果。式中  $i$  为已知故障模式 ( $i = 1, 2, \dots, n$ );  $n$  为已知故障种类;  $j$  为该模式的分支 ( $j = 1, 2, \dots, j$ );

利用仿真故障参数计算各个分支被影响因素和

$g_j$  为第  $i$  种故障模式的 QSDG 模型中对应分支  $j$  的被影响因素和影响因素变化的比值。

从表 5 中可看出,  $C_0$  变大、 $T_{j0}$  升高、 $K_0$  变大这 3 种故障模式对与它们故障类型相同的已知模式的隶属度最大, 其值为 1.0, 而对与它们故障类型不相同模式的隶属度较小, 因此通过计算隶属度, 这 3 种故障模式得到了有效的区分, 极大地改进了文献[6]的方法, 因而诊断是成功的。

表 5 仿真故障模式对已知故障模式隶属度

已知故障模式	仿真故障模式		
	故障 2	故障 3	故障 4
故障 2	1.00	0.66	0.45
故障 3	0.11	1.00	0.46
故障 4	0.28	0.57	1.00

## 5 结 论

对给定的 SDG 和给定的故障源, 由于 SDG 在预测故障传播途径时的不确定, 存在故障传播的多种解释, 实际诊断中相当的耗时, 无法满足实际生产中的实时性要求。从系统的故障模式出发, 通过建立对应的子 SDG 和诊断规则极大地提高了诊断地速

度, 并针对不能区分的故障模式采取加入适当定量信息的办法来进一步诊断, 案例研究表明, 相比文献[6], QSDG 模型可以进行有效的诊断。

## 参考文献:

- [1] 刘洪刚, 吴建军, 陈小前, 等. 基于 SDG 的智能故障诊断方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(1): 103-104.
- [2] 吴重光, 张贝克, 夏 涛. 基于符号定向图(SDG)深层知识模型的定性仿真[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(10): 1351-1355.
- [3] 王勉宇. 基于图论的过程故障诊断研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [4] SHIOZAKI J, MATSUYAMA H, TANO K, *et al.* Fault diagnosis of chemical processes by the use of signed, directed graphs, extension to five-range patterns of abnormality[J]. *International Chemical Engineering* 1985, 25(4): 651-659.
- [5] KRAMER M A, PALOWITZ J B L. A rule-based approach to fault diagnosis using the signed directed graph [J]. *AIChE J*, 1987, 33(7): 1067-1078.
- [6] 王晓初. 多元统计法在故障诊断中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [7] YU CHENG CHING, LEE CHYUAN. Fault diagnosis based on qualitative/quantitative process knowledge[J]. *AIChE J* 1991, 37(4): 617-628.
- [8] 黄卫东, 王克昌. 基于定性和定量关系的液体火箭发动机故障诊断[J]. 航空动力学报, 1996 11(3): 281-284.

(何静芳 编辑)

## 试验研究

### 叶片相对高度对涡轮喷嘴叶栅内损失的影响

据《Теплоэнергетика》2005 年 6 月号报道, 大量试验结果表明, 叶栅内气流的转折角、槽道的气动力收敛度、叶型的安装角、叶栅的相对高度以及叶型和叶片间槽道的形状对端部损失具有明显的影响。

针对 3 种典型的亚音速叶型: C9015A 标准叶型、C9015A<sub>ВЛ</sub> 湿蒸气叶型和 C9015A<sub>Д</sub> 海豚形叶型给出了平面喷嘴叶栅的高度对端部损失和总损失影响的研究成果。

在分析喷嘴叶栅高度对损失的影响时, 特别注意在它上面产生两次流动与迎面叶栅端壁相互作用的叶片区段。

研究是在叶栅风洞中静止条件下利用空气进行的。试验的平面叶栅由沿叶高等叶型的 7 个叶片组成。

试验表明, C9015A<sub>Д</sub> 海豚形叶型叶栅内的总损失在所有相对高度范围内有着比 C9015A 和 C9015A<sub>ВЛ</sub> 叶型叶栅内损失更小的值, 并且在相对高度  $b/L=2.0\sim 2.5$  和  $b/L>5.5$  时得到的增益超过 1%。

(吉桂明 供稿)

丝网直径对网垫级阻力性能的影响分析 = **An Analysis of the Influence of Wire Mesh Diameter on the Resistance Performance of a Mesh Pad Grid** [刊, 汉] / SUN Tao, WANG Song, SUN Hai-ou (Institute of Power & Nuclear Energy Engineering under the Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(6). — 611 ~ 614

To study the impact of wire mesh diameter in a marine inlet-air filtration device on the resistance performance of a mesh pad grid, a simplified two-dimensional wire mesh model was utilized and cyclic boundary conditions were introduced to control the relative dimensions in a computation domain. A numerical simulation was conducted of the mesh pad grid featuring two kinds of wire mesh diameter. After the computation simulation of several operating conditions obtained were the resistance characteristic curves of corresponding models. The resistance characteristic tests of two kinds of mesh pad grid were carried out on a dedicated small-size wind-tunnel test rig. A comparison of the test results with those of numerical simulation has demonstrated the high precision specific to the numerical simulation, thus providing a valuable reference basis for predicting the resistance characteristics of the mesh pad grid and enriching the content of its numerical simulation. **Key words:** mesh pad grid, wire mesh diameter, resistance characteristics, numerical simulation, experimental investigation

流化床内非等密度双组分颗粒流动特性的研究 = **A Study of the Flow Characteristics of Non-isodensity and Dual-component Particulates in a Fluidized Bed** [刊, 汉] / LIU Yang, LIU Wen-tie, HE Yu-rong, et al (College of Energy Source Sciences and Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(6). — 615 ~ 618

On the basis of particulate dynamics and gas-solid two-phase hydrodynamics set up was a movement-collision decoupled model for the dense gas-solid two-phase and non-isodensity dual-component particulates in a fluidized bed. By using a hard sphere simulation method the collision among particulates was studied with a large eddy simulation method being employed to study gas-phase turbulent flows. A single-particulate movement equation was established based on Newton's second law. Newton's third law was applied to determine the two-way coupling resulting from the interaction of particulate phase and gas phase. A numerical simulation was performed for the gas-solid two-phase flow of the non-isodensity dual-component particulates in a two-dimensional bubbling fluidized bed. The calculation results indicate that the recovery factor of particulate elasticity may have an impact on laminar flow characteristics. **Key words:** non-isodensity dual-component particulate, fluidized bed, hard sphere model, large eddy simulation, laminar flow

基于SDG推理规则和定量分析的故障诊断技术 = **Fault Diagnosis Technology Based On the Reasoning Rules of SDG (Sign Directed Graph) and a Quantitative Analysis** [刊, 汉] / CAO Wen-liang, WANG Bing-shu, MA Liang-yu, et al (Institute of Control Science & Engineering under the North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(6). — 619 ~ 623

SDG (Sign Directed Graph) is a kind of fault diagnosis method based on a qualitative model and cause-and-effect analysis. As the low efficiency of an initial algorithm is unfit for a practical large-scale process, the authors have put forward a method for transforming a SDG model into a series of rules. Thus, it is possible not only to greatly enhance diagnosis speed and precision, but also to combine with an existing diagnosis expert system. During a diagnostic process a qualita-

tive diagnosis result can be obtained through a comparison with the established rules. Then, with respect to the fault modes with the same qualitative features but different quantitative values appropriate quantitative information can be fed into the SDG in connection with a fuzzy theory. By calculating and comparing the subordination degree of the mode being diagnosed to a known fault mode a system fault can be determined. The test results of several case studies indicate that the method devised by the authors is feasible. **Key words:** sign directed graph, fault diagnosis, reasoning rules, qualitative model, quantitative analysis

不同材质花瓣形扁通道内翅换热管的实验研究 = **Experimental Study of Internally Finned Heat Exchange Tubes Made of Different Materials and with Petal-shaped Flat Channels** [刊, 汉] / LI Zhi (Institute of Civil & Refrigeration Engineering under the Harbin University of Commerce, Harbin, China, Post Code: 150028) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(6). — 624 ~ 627

Through an experimental method studied was the convective heat exchange and resistance-characteristics of internally finned heat-exchange tubes with petal-shaped flat channels. A fitting of the experimental correlation of convective heat exchange and resistance within the range of measured Reynolds number was carried out. Moreover, by employing the three criteria of equal mass flow rate, equal pump power and equal resistance compared was the heat transfer effectiveness of finned tubes and ordinary bare tubes when different materials were used. It has been found that the material used for the fins has a relatively great influence on heat-exchange intensification effectiveness. However, irrespective of the kinds of materials used, internally finned tubes with petal-shaped channels enjoy relatively high heat exchange effectiveness. The intensification effectiveness is especially conspicuous under the condition of a low Reynolds number. **Key words:** internally finned tube, experimental study, intensified heat transfer, fully developed zone

基于天然气管网压力能回收的联合循环构思 = **Combined Cycle System Concept for the Recovery of Pressure Energy of a Natural-gas Pipe Network** [刊, 汉] / WANG Song-ling, LUN Li-yong, XIE Ying-bai (Department of Power Engineering, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003), CUI Hong-gang (Wenzhou Power Generation Co. Ltd., Wenzhou, China, Post Code: 325602) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(6). — 628 ~ 631

With the widespread application of natural gas and the incessant development of related technologies the transmission pressure of natural-gas pipe networks is becoming higher and higher, resulting in the accumulation of tremendous pressure energy. The authors have come up with a gas and steam combined cycle system for recovering the pressure energy of a natural-gas pipe network. Through the expansion of high-pressure natural gas in an expansion engine some portion of the energy is recovered to make up for a portion of the consumed work of a compressor. The low-pressure natural gas after expansion is used to cool consecutively the compressor inlet air and steam turbine exhaust steam followed by the recovery of some portion of the flue-gas waste heat. A qualitative analysis of the economic benefit created by the relevant portion of the system flow path for the combined cycle was conducted, exhibiting the high potential of enhancing the combined cycle efficiency and of utilizing energy in a comprehensive way. **Key words:** natural-gas pipe network, pressure energy, gas and steam combined cycle, expansion engine