

文章编号:1000-8055(2012)11-2539-08

多工况过程动态 SDG 故障诊断

周 虹, 左洪福, 苏 艳, 白 芳

(南京航空航天大学 民航学院, 南京 210016)

摘 要: 通过分析多工况过程的故障动态特性, 在符号有向图(SDG)中引入工况条件, 补充对未测节点的表达, 提出了一种新的定性描述模型——过程动态有向图, 给出了建模方法和基于故障依赖性关系 D 矩阵的诊断流程. 该模型满足了随工况变化调整结构和参数的需求, 诊断算法解决了实际系统部分状态常常因未测量而造成信息缺失的问题. 同时综合不同过程的 SDG 诊断能改善静态 SDG 模型定性推理分辨率. 利用提出的方法建立了某民用飞机发动机引气系统的诊断模型并进行了诊断, 结果表明该模型有效且实用.

关 键 词: 故障诊断; 符号有向图; 动态过程; 未测节点; 相容通路

中图分类号: V245.3; TP277

文献标志码: A

Fault diagnosis for multistage dynamic processes based on signed directed graph

ZHOU Hong, ZUO Hong-fu, SU Yan, BAI Fang

(College of Civil Aviation,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: After analyzing the dynamic characteristics of multistage processes, new qualitative description model—process dynamic signed directed graph (PDSDG) was proposed by introducing the stage conditions to unmeasured nodes in SDG. The modeling method and a D matrix-based diagnosis method were given. The proposed model can meet the demand of adjustment along with the conditions, and the diagnosis method disposed the nodes that were not online observed. PDSDG had better resolution than static SDG by comprehensive consideration of different stage diagnosis results. Finally, the fault diagnosis model of an aircraft engine bleed system was built with the proposed method. The case results proved the effectivity and utility of this model.)

Key words: fault diagnosis; signed directed graph; dynamic path; unmeasured nodes; consistent branch

符号有向图(SDG)是复杂系统的一种定性描述方式, 它描述了系统过程变量间的因果关系和故障传播路径, 不仅能很好地表示故障演化动态, 而且易于构造高效算法揭示系统疑难故障, 从而得到了广泛研究. Venkatasubramanian 等^[1-3]对 SDG 建模作了大量基础工作, Yu、曹文亮等^[4-5]在

定性、定量故障诊断方法方面做出了比较突出的成果. 近年来, SDG 方法在国内航空航天领域也得到不少应用^[6-7]. 目前的 SDG 分析方法大部分假设单一稳态工况, 而飞机很多系统, 运行工况频繁变动, 故障间的联系与故障发生时机具有很大关系^[8]. 系统 SDG 模型应该随着工况的变化调整

收稿日期:2011-09-07

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20121115.1028.021.html>

基金项目: 国家自然科学基金与中国民航联合资助基金重点项目(60939003); 江苏省博士后科研资助计划项目(1002016B)

作者简介: 周虹(1973—), 女, 江西吉安人, 博士生, 主要研究方向为系统建模、故障诊断及维修等.

结构和参数,模型的推理结果也应该能表达各个阶段间的相互影响关系.面对这些实际应用问题,普通的 SDG 建模已经很难达到要求.

飞机实际系统的动态特性描述可以表现为传递时间、增益、过程、概率等多种因素,本文主要分析过程多稳态工况特性,针对多稳态工况过程系统提出一个基于有向图的新的定性诊断模型——过程动态定性模型(PDSDG),并讨论基于该模型的建模和诊断推理方法,最后以民用飞机发动机引气子系统为例,验证该诊断方法的有效性.

1 多工况过程动态特性分析

飞机从滑行开始至着陆,完成一次飞行任务要经过几个阶段.这些阶段中运行工况不断变化,即使在同一个飞行阶段,飞机系统的稳态工况也可能并非单一.这些变工况过程的特点是,系统运行在“稳态 1-过渡-稳态 2”各状态下不断切换,虽然过程输出变量不变,但过程中的变量随工况的变化稳态点会发生变化.如变量均值的变化、变量相关性的变化,此时单一模型在故障条件下的运行逻辑就不能够得到保证.另外,由于技术和经济的原因,变工况过程中许多状态不能测量或不能在线测量,所以诊断时获得的样本往往是部分样本,使得原相容性故障传播通道失效.

根据此特点,将多稳态工况系统的运行过程分解成若干个稳态过程,并为变量间的影响关系设置使能条件.在 SDG 模型中引入工况条件,补充对未测节点的表达,同时解决模型接续性与故障和诊断的覆盖面最大化两方面问题.

2 PDSDG 模型

2.1 PDSDG 模型的定义

定义 1 过程动态定性模型(PDSDG)表示为一个二元组 (G_0, U) ,其中 $U: \{u_0, u_1, \dots, u_m\} (m \in N)$ 称为模型适用的工况条件.具体工况 S 是 U 的一个子集,即 $S \subset U$. G_0 为有向图,由 4 部分组成 $G_0 = (V, E, \phi, C)$, 4 部分的含义分别是

- 1) 节点集合 $V = V_s \cup V_f$, 其中 V_s 表示系统状态变量节点集合, V_f 表示故障原因节点集合.
- 2) 有向边集合 $E = (V_s \times V_s) \cup (V_s \times V_f)$, 其中 $(V_s \times V_s)$ 表示状态变量间的关联关系、 $(V_s \times V_f)$ 表示状态变量与故障间的关联关系.
- 3) 函数 $C: E \rightarrow U$. 其中 $C(e_k) (e_k \in E)$ 表示有向边 e_k 使能条件,即 e_k 所代表的变量关联关系成立的工况条件.

4) 函数 $\phi: E \rightarrow \{+, -\}$, 其中 $\phi(e_k | S) (e_k \in E)$ 称为在工况 S 下 e_k 支路的符号.用“+”表示正作用(增强)和“-”表示反作用(减弱).

定义 2 符号有向图 G_0 的瞬时样本是指所有节点相同时刻符号的集合,节点符号是一个函数 $\varphi: V_s \rightarrow \{+, 0, -, ?, \varphi(v_k | S) (v_k \in V_s)$ 称为工况 S 下节点 v_k 的符号.即

$$\varphi(v_k | S) = \begin{cases} 0 & |X - \bar{X}| S| < \epsilon \\ + & X - \bar{X} | S \geq \epsilon \\ - & \bar{X} | S - X \geq \epsilon \\ ? & X \text{ 未测量} \end{cases} \quad v_k \in V_s$$

(1)

式中 X 为变量节点 v_k 对应的测试值; $\bar{X} | S$ 为节点变量 v_k 在工况 S 下的期望值; ϵ 为节点 v_k 处于正常状态的阈值.

根据定义 1 和定义 2, G_0 中的节点及有向边都是工况 S 的非线性函数.当运行工况 S 变化时, e_k 使能条件变化, $(V_s \times V_s), (V_s \times V_f), \phi(e_k | S), \varphi(v_k | S)$ 相应变化,适应了模型结构或参数随实际系统运行状态变化调整的需求.

2.2 PDSDG 模型的建模思想

1) 作变量相关分析

透彻分析系统,以功能是否相对独立并能求得技术原理解为依据进行子功能(任务)分解^[9].根据子任务剖面所经历的事件和环境的时序选择影响和体现功能特征变化的变量.按照系统原理,描述变量之间的物理作用或因果关系,同时确定这种变量影响关系的生效条件.例如,一个发动机引气调节子功能相关分析示意如表 1、表 2.

表 1 发动机引气调节子功能的变量分析示意
Table 1 Illustration of variable analysis

变量名	符号	阈值范围
高压活门开度	V_{hvp}	[0, 1]
单向控制活门开度	V_{ipcv}	[0, 1]
调节关断活门开度	V_{prv}	[0, 1]
预冷气出口压力	p_{out}/MPa	[0.179 27, 0.262 01]

表 2 发动机引气调节子功能的变量影响
关系分析示意

子功能描述	变量间影响关系	生效条件
高压引气	$+V_{hvp} \rightarrow +V_{prv} \rightarrow +p_{out}$	发动机慢车状态
中压引气	$+V_{ipcv} \rightarrow +V_{prv} \rightarrow +p_{out}$	发动机巡航及以上状态

2) 建立系统整体 PDSDG 模型

根据相关分析结果将系统整个工作过程各个工况下可能产生联系的所有变量都联系起来,建立一个整体 SDG 模型. 该整体 SDG 模型涵盖系统所有工况下变量相互影响关系的 SDG 模型,其每条支路都设置有使能条件,即变量间影响关系的生效条件. 所有生效条件构成了 PDSDG 工况条件集 U .

3) 建立单工况下的 SDG 模型

工况条件集掌控 PDSDG 的有向支路使能条件. 对于特定的工况 S , 根据 S 中的元素与 $C(e_k)$ 匹配, 触发相应的有向支路的使能条件, 就能在 PDSDG 的基础上获得 S 下相对独立的 SDG 模型 G , 单工况模型 G 是一个普通的 SDG 模型.

3 故障依赖矩阵

SDG 模型把过程变量表示成节点, 用连接节点的支路表示变量之间的因果影响关系^[10]. 局部故障的发生将直接体现在某个或某几个节点的取值偏差上, 并沿着相容支路构成的通路传播开来. 用故障依赖矩阵 D 描述各个故障之间的传播规律. 由于故障之间的联系具有时效性, 故障依赖矩阵与 PDSDG 特定工况下的 SDG 模型相对应.

定义 3 设单工况符号有向图 G 有 n 个状态变量节点, 则 n 阶方阵 $D(G) = (d_{ij})$ 称为 G 的故障依赖矩阵. 其中矩阵中的元素 d_{ij} 定义如下:

$$d_{ij} = \begin{cases} \phi(e_{n_i \rightarrow n_j}) & n_j \in R(n_i) \\ 3 & n_j \notin R(n_i) \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\phi(e_{n_i \rightarrow n_j})$ 表示节点 n_i 到 n_j 的所有支路符号的乘积, $R(n_i)$ 为状态节点 n_i 的可达集.

故障依赖矩阵的含义为: d_{ij} 代表状态变量 n_i 对状态变量 n_j 的影响, 若 n_i 不能影响 n_j 时 d_{ij} 为 3. 矩阵 D 的行描述了该行对应节点状态处于非正常时对其他变量的影响, 矩阵 D 的列则表达了该列对应的变量状态受其他状态的影响, 变量影响方向由符号表示.

作为示例, 图 1 给出了一个 PDSDG 某工况下的有向图 G , 依据式(2)计算得到对应的故障依赖矩阵如表 3, 其中从 n_7 行向量可看出故障由状态变量节点 n_7 开始传播时, n_8 将产生偏差, 且偏差方向与 n_7 相同, 其余变量不受 n_7 影响. 而 n_7 列向量表明 n_4, n_5, n_6 变量反作用于 n_7 , n_7 与其他变量无关.

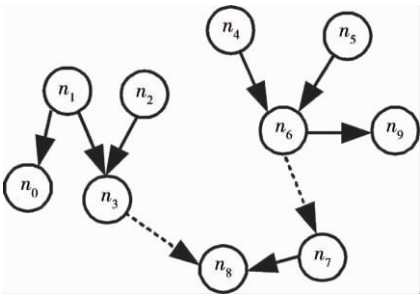


图 1 有向图图形化表示
Fig. 1 Graph figure of SDG

表 3 故障依赖矩阵

Table 3 Failure dependence matrix of Fig. 1

	n_0	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6	n_7	n_8	n_9
n_0	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
n_1	1	1	3	1	3	3	3	3	-1	3
n_2	3	3	1	1	3	3	3	3	-1	3
n_3	3	3	3	1	3	3	3	3	-1	3
n_4	3	3	3	3	1	3	1	-1	-1	1
n_5	3	3	3	3	3	1	1	-1	-1	1
n_6	3	3	3	3	3	3	1	-1	-1	1
n_7	3	3	3	3	3	3	3	1	1	3
n_8	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3
n_9	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1

4 基于 PDSDG 的诊断方法

PDSDG 是整体 SDG 模型, 涵盖了系统所有工况下变量相互影响关系. 基于 PDSDG 的诊断推理首先重构单稳定工况 SDG 模型, 再基于单稳定工况 SDG 进行故障分析, 最后综合多个工况的诊断结果, 减少冗余解, 提高诊断精度.

1) 识别工况, 生成单稳态工况 SDG 模型

根据样本判断当前工况集合 S . 对其中每一个具体工况, 将工况条件与 PDSDG 各支路 $C(e_k)$ 相匹配, 触发相应的有向支路使能条件, 获得当前状态下的独立的单稳态工况 SDG 模型.

2) 工况 SDG 故障分析

设当前工况为 $S_m (m = 1 \sim p, p \text{ 为 } S \text{ 所包含的工况数量})$, 记 V_{s_m} 是 PDSDG 模型的 S_m 状态下节点集合, 节点数为 n . 对单稳态工况 SDG 模型作如下分析.

(1) 简化有向图

复杂系统一般存在反馈控制, SDG 模型中就会出现回路, 即极大强连通单元. 对于单工况零时间系统的 SDG 模型, 反馈回路中的任何一个节点故障同本回路中其它节点故障是不能区分的, 此时单故障诊断的分辨率也就局限在包含故障的强

连通部分^[11]. 因此, 用单独一个节点来表示强连通部分对含有强连通图的 SDG 模型进行简化, 以形成无回路 SDG 模型.

(2) 构造测试状态向量和故障依赖矩阵

根据瞬时样本形成正常节点集合和报警节点集合.

正常节点集合

$$T_n = \{v \mid \varphi(v) \in \{+, -\}, v \in V_{s_m}\}$$

报警节点集合

$$T_a = \{v \mid \varphi(v) \in \{+, -\}, v \in V_{s_m}\}$$

依据瞬时样本构造测试状态向量

$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$$

式中 t_j 表示 V_{s_m} 中第 j 个节点的变量状态值, 约定如下:

$$t_j = \begin{cases} -1 & \varphi(V_{s_m}[j]) = - \\ 0 & \varphi(V_{s_m}[j]) = 0 \\ 1 & \varphi(V_{s_m}[j]) = + \\ 2 & \varphi(V_{s_m}[j]) = ? \end{cases}$$

同时依据定义 3 构造故障依赖矩阵 D .

(3) 计算推算状态矩阵

由测试状态向量 T 和故障依赖矩阵 D 共同得到推算状态矩阵 L . 具体用每一个 t_j 去乘 D 中第 j 列. 计算得到的矩阵元素 l_{ij} 是由第 j 个节点推算出的第 i 个节点状态. 定义元素之间的运算符为 ∞ , 运算规则如下:

$$T \infty D = L$$

$$L = \{l_{ij}\} = \{t_v \infty d_{ij}\}$$

$$a \infty b = a \cdot b \quad (a \neq 2 \text{ and } b = 1, -1) \quad (3)$$

$$2 \infty b = 2 \quad (b = 1, -1)$$

$$a \infty 3 = 3$$

矩阵 L 第 j 列 L_j 表达了引起节点 j 当前实际状态的原因. 例如若 t_j 发生偏差, L_j 中的非 3 值节点即代表可能导致此报警节点异常的节点; 若 t_j 正常, L_j 中的 0 值节点也应该正常; 而 t_j 状态未知则可能是由于 L_j 中的 2 值节点引起的.

(4) 寻找报警节点相容根树的节点集合

故障通过相容通路才能进行传播^[12], 相容通路搜索时也可以按照可达性理论实现. 用 $A(v)$ 表示状态节点 v 的先行集, 根据相容定义可知, $\bigcup_{v \in T_n} A(v)$ 中的节点不可能属于报警节点相容通路上的节点. 另外, T_a 中的节点属于同时报警节点, 由多个报警节点分别计算获得的同一节点的有效推算状态值 (0, 1, -1) 应该一致, 因此认为 L 中同一行有效状态值出现矛盾的节点必定不是所

求的节点. 现利用推理状态矩阵 L 实现这一理论, 寻找与报警节点形成相容通路的节点. 对于每一报警节点 $v \in T_a$, 称 v 及其所有相容通路为 v 的相容根树^[13]. 设 v 是第 j 个变量, 则由该节点推算出第 i 个变量的状态 l_{ij} , 综合考虑其他节点对 i 变量的推算状态后可得到节点 j 和节点 i 之间的相容信息, 记为 $S_j(i)$, 运算符为 λ , 运算规则为

$$S_j(i) = 3 \quad (l_{ij} = 3)$$

$$S_j(i) = (l_{i1})\lambda(l_{i2})\cdots(l_{ij})\cdots\lambda(l_{in}) \quad (l_{ij} \neq 3)$$

$$a\lambda b = b\lambda a$$

$$a\lambda b\lambda c = (a\lambda b)\lambda c = a\lambda (b\lambda c)$$

$$a\lambda 0 = 0 \quad (a = 0, 1, -1, 2, 3)$$

$$a\lambda 2 = a \quad (a = 0, 1, -1, 2)$$

$$a\lambda 3 = a \quad (a = 0, 1, -1, 2, 3)$$

$$a\lambda b = (a + b)/2 \quad (a, b = 1, -1) \quad (4)$$

计算得到 $S_j(i)$ 中各元素的值可能为 0, 1, -1, 2, 3. 其中值为 1, -1, 2 的节点 i 均认为是和 v 相容的节点, 即 v 相容根树中的节点集合 $P(v)$

$$P(v) = \{V_i \mid S_j(i) \neq 0 \text{ and } S_j(i) \neq 3\}.$$

(5) 确定潜在故障源

判断不同报警节点间是否存在相容通道:

相容报警节点存在共同的潜在故障节点集合

$$F_{s_m} = \bigcap_{v \in T_a} P(v)$$

对于不相容报警节点分别在独立的中获取潜在故障集合

$$F_{s_m} = \bigcup_{v \in T_a} P(v)$$

若 F_{s_m} 中含有回路节点, 将回路节点单独展开重复 (2)~(5), 获得回路中可能故障源.

3) 综合验证多个工况的诊断结果

由于可能含有未测试节点, 故基于单工况独立 SDG 的诊断结果分辨低, 往往含有冗余解^[14]. 综合多个工况的诊断结果, 进行冗余检测和矛盾消除等操作, 对于 S_m 工况下的可能故障, 在其他工况中执行一致性验证, S_m 工况下的可能故障最终为

$$F_{s_m} = F_{s_m} \bigcap_{i=1, i \neq m}^p \bigcup_{v \in T_n | s_i} A(v) \quad (5)$$

若 $F = \bigcap_{m=1}^p F_{s_m} \neq \emptyset$, F 为多个工况下共同的可能故障, 否则被诊断系统是多故障问题, 不同工况有各自的可能故障.

5 应用实例

民用飞机引气系统是一个多发性故障系统,

其作用是采用与飞机及动力装置实时状态相适应的方式给飞机提供适当压力和温度的空气,在整个飞行过程工况复杂多变.限于篇幅,不能够做全面的分析示例,本文仅以发动机引气部分为对象,用基于 PDSDG 方法对发动机引气子系统进行描述和故障诊断.

对于发动机引气子系统,当发动机完成慢车-大功率爬升-巡航-进近慢车时,都将发生引气源之间的相互切换^[15].将发动机引气子系统整个工作过程在各个阶段下可能产生联系的所有变量都联系起来,建立一个整体 SDG 模型,如图 2 所示,其各状态节点和故障原因节点的说明如表 4 和表 5.

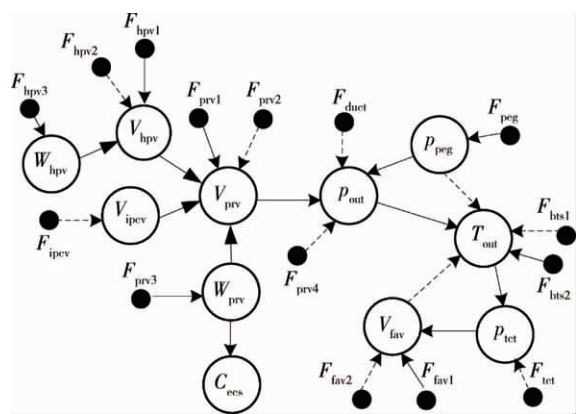


图 2 发动机引气子系统 PDSDG 模型
Fig. 2 PDSDG of engine bleed subsystem

表 4 状态变量节点说明
Table 4 Illustration of state variable nodes

节点	名称
V_{ipcv}	单向控制活门开度
V_{hpv}	高压活门开度
V_{prv}	调节关断活门开度
V_{fav}	风扇空气活门开度
W_{hpv}	高压开关指令
C_{ees}	控制面板信号
p_{out}	预冷气出口压力
T_{out}	预冷气出口温度
p_{tct}	温度控制调温器提供给风扇空气活门压力
W_{prv}	调节关断活门开关指令

通过对该系统进行故障仿真,获得故障瞬时样本.表 6 的故障样本是故障仿真试验中将参数拉偏获得的状态参数进行转化后的定性数据,为

了模拟实际排除故障过程并非所有状态节点信息完整的情况,故障样本只设置部分数据为已测节点,而其余为未测节点.样本 1 是将调节关断活门开度反向拉偏,样本 2 为将高压活门开度反向拉偏后的故障现象.

表 5 故障原因节点说明
Table 5 Illustration of failure nodes

节点	名称
F_{ipcv}	单向控制活门卡在关位
F_{hpv1}	高压活门卡在开位
F_{hpv2}	高压活门卡在关位
F_{hpv3}	高压活门失去关闭命令
F_{fav1}	风扇空气活门卡在开位
F_{duct}	导管损坏松动
F_{bts1}	引气温度传感器探测偏小
F_{tct}	温度控制调温器失灵
F_{fav2}	风扇空气活门卡在关位
F_{prv1}	调节关断活门卡在开位
F_{prv2}	调节关断活门卡在关位
F_{prv3}	调节关断活门失去关闭命令
F_{prv4}	调节关断活门调节压力偏低
F_{peg}	预冷气性能降低
F_{bts2}	引气温度传感器探测偏大

表 6 故障样本
Table 6 Fault samples

	故障发生阶段	V_{ipcv}	C_{ees}	p_{out}	T_{out}
样本 1	中压级引气	0	0		
	高压级引气	0	0		
样本 2	中压级引气	0	0	0	0
	高压级引气	0	0		

用基于 PDSDG 模型方法进行诊断.从故障样本看,发生故障的工况包括中压级引气和高压级引气.当发动机转速 $N1>50\%$ 时,采用中压级引气,激活 PDSDG 中满足条件 $N1>50\%$ 时的支路,形成相应的 SDG 模型如图 3.而发动机在进近,慢车状态,转速 $N1<50\%$,飞机使用高压级引气,激活 PDSDG 中满足条件 $N1<50\%$ 时的 SDG 模型如图 4 所示.

将引气子系统中的温度控制环路抽象为 T_{out}

节点. 2 个单工况 SDG 对应的故障矩阵分别为表 7 和表 8.

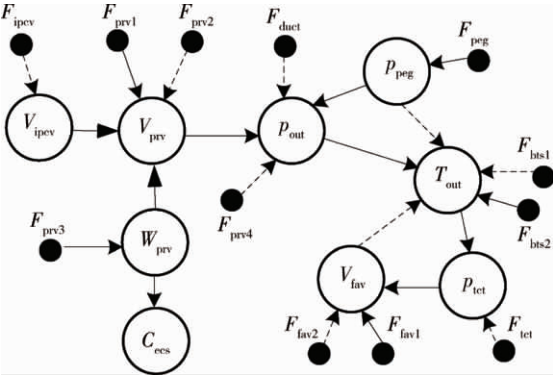


图 3 发动机中压级引气 SDG
Fig. 3 SDG of medium pressure bleed of engine

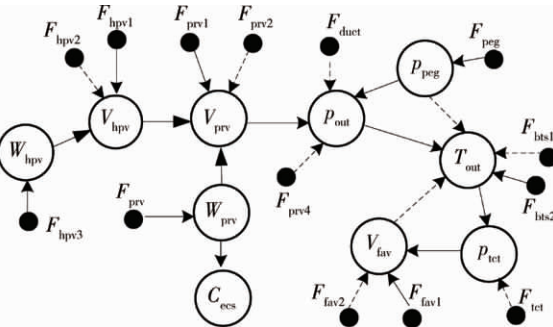


图 4 发动机高压级引气 SDG
Fig. 4 SDG of high pressure bleed of engine

表 7 中压级引气时故障依赖矩阵
Table 7 Failure dependence matrix of medium-pressure-bleed stage

	V_{ipev}	W_{prv}	C_{ecs}	V_{prv}	p_{peg}	p_{out}	T_{out}
$D_1 =$	1	3	3	1	3	1	1
	3	1	1	1	3	1	1
	3	3	1	3	3	3	3
	3	3	3	1	3	1	1
	3	3	3	3	1	1	-1
	3	3	3	3	3	1	1
	3	3	3	3	3	3	1

首先参考图 3, 对于样本 1, $T_a = \{p_{out}, T_{out}\}$, $T_n = \{V_{ipev}, C_{ecs}\}$. 中压级引气测试状态向量为 $T_1 = \{0, 2, 0, 2, 2, -1, -1\}$. 由 T_1 和 D_1 根据式(3) 计算得到中压级引气阶段状态推算矩阵 L 如表 9.

由 L 矩阵根据式(4) 计算得出 p_{out} 与其他节点相容信息向量 $S_{p_{out}} = (0, 0, 3, -1, 0, -1, 3)$, 其中非 0 非 3 值构成 p_{out} 相容根树节点集合 P

$(V_{prv}) = \{V_{prv}, p_{out}\}$. 同时 T_{out} 与其他节点相容信息向量 $S_{T_{out}} = (0, 0, 3, -1, 0, -1, -1)$, T_{out} 相容根树节点集合 $P(T_{out}) = \{V_{prv}, p_{out}, T_{out}\}$.

表 8 高压级引气时故障依赖矩阵
Table 8 Failure dependence matrix of high-pressure-bleed stage

	W_{hpv}	V_{hpv}	W_{prv}	V_{prv}	C_{ecs}	p_{peg}	p_{out}	T_{out}
$D_2 =$	1	1	3	1	3	3	1	1
	3	1	3	1	3	3	1	1
	3	3	1	1	1	3	1	1
	3	3	3	1	3	3	1	1
	3	3	3	3	1	3	3	3
	3	3	3	3	3	1	1	-1
	3	3	3	3	3	3	1	1
	3	3	3	3	3	3	3	1

表 9 中压级引气阶段推算矩阵 L
Table 9 Inference matrix of medium-pressure-bleed stage

	V_{ipev}	W_{prv}	C_{ecs}	V_{prv}	p_{peg}	p_{out}	T_{out}
$L =$	0	3	3	2	3	-1	-1
	3	2	0	2	3	-1	-1
	3	3	0	3	3	3	3
	3	3	3	2	3	-1	-1
	3	3	3	3	2	-1	1
	3	3	3	3	3	-1	-1
	3	3	3	3	3	3	-1

由于 p_{out} 和 p_{out} 同时报警, 并且 $\varphi(p_{out})\phi(e_{p_{out} \rightarrow T_{out}})\varphi(T_{out}) = +$, 两节点间支路相容, 即两节点间可传播故障. 故得到中压引气阶段潜在故障节点为 $\bigcap_{v \in T_a} P(v) = \{V_{prv}, p_{out}\}$. 同理参考图 4, 高压级引气测试状态向量为 $T_2 = \{2, 2, 2, 2, 0, 2, -1, -1\}$. 利用 D_2 与 T_2 计算得到高压引气阶段潜在故障节点为 $\{V_{hpv}, W_{hpv}, V_{prv}, p_{out}\}$. 具体单工况诊断结果如表 10.

综合中压级引气、高压级引气两个阶段的诊断结果. 样本 1 中压级引气和高压级引气两个阶段具有相同的故障现象, 从表 10 看出, 两个阶段同时发生故障的可能的部位是调节关断活门及导管. 而对于样本 2, 高压级引气阶段故障现象如样本 1, 中压级引气阶段并未出现异常. 高压引气阶段有 4 个可能故障原因. 但从整个飞行所反映的故障情况看出引气压力偏低仅发生于高压级引气阶段, 如果是调节关断活门及其管道故障, 则会导致在所有发动机工作状态下引气不正常, 而中压

级引气过程中无异常,所以排除调节关断活门故障及其管道故障,只有高压活门故障是可能的故障.

表 10 单工况诊断结果
Table 10 Diagnosis results of each stage

工况	相容通路	故障原因
高压引气阶段 ($N1<50\%$)	p_{out}	F_{duct}
		F_{prv4}
	$p_{out} \rightarrow V_{prv}$	F_{prv2}
	$p_{out} \rightarrow V_{prv} \rightarrow V_{hvp}$	F_{hvp2}
中压引气阶段 ($N1>50\%$)	p_{out}	F_{duct}
		F_{prv4}
	$p_{out} \rightarrow V_{prv}$	F_{prv2}

综上所述,样本 1 最终可能故障原因是调节关断活门卡在关位 F_{prv2} 、调节关断活门调节压力偏小 F_{prv4} 及导管损坏松动 F_{duct} , 样本 2 最终故障原因包括高压活门卡在关位 F_{hvp2} . 可以看出,用基于 PDS DG 模型的方法推理结果涵盖了先前仿真预设故障,而且还包括了实际中可能同时发生的其他故障.

对于本案例故障样本,共含有 5 个不可测节点,如果采用传统含未测节点的诊断算法,由于每次都要对所有不可测节点进行假设,则共需 3^5 次尝试,并且设每次尝试的推理结果是 C_i ,则最终找到的可能的故障源集合则是 $C = \bigcup_{i=1}^{3^5} C_i$,得到的故障源集合要比本文大得多.可见,相比较于传统含未测节点的诊断算法,本文引入故障依赖矩阵,用可达性理论和相容性原理计算可能的故障源集合,计算无须猜测未测节点的符号,避免了未测节点的符号假设、停止假设的判断和修正假设符号的过程,大大提高了诊断的效率和诊断结果的准确性.

6 结 论

本文针对多稳态工况过程系统,提出了 PDS-DG 以及相应故障诊断策略和方法,并将该方法应用于某飞机发动机引气子系统故障诊断.诊断的仿真结果表明该方法可以应用于多工况过程系统的动态 SDG 建模与故障诊断,并具有实际应用价值.

参考文献:

[1] Maurya M R, Rengaswamy R, Venkatasubramanian V. A signed directed graph based systematic framework for steady state malfunction diagnosis inside control loops[J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(6): 1790-1810.

[2] Maurya M R, Rengaswamy R, Venkatasubramanian V. Application of signed digraphs based analysis for fault diagnosis of chemical process flowsheets [J]. Engineering Applications Artificial Intelligence, 2004, 17(5): 501-518.

[3] Mc Coy S A, Zhou D F, Chung P W H. State based modeling in hazard identification[J]. Applied Intelligence, 2006, 24(3): 263-279.

[4] YU C C, LEE C. Fault diagnosis based on qualitative/quantitative process knowledge[J]. AIChE Journal, 1991, 37(4): 617-628.

[5] 曹文亮,王兵树,马进,等. 基于符号有向图节点量化模型的故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 67-71.

[6] CAO Wenliang, WANG Bingshu, MA Jin, et al. Research on fault diagnosis approach using quantitative knowledge of the node of signed directed graph[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(7): 67-71. (in Chinese)

[7] 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.

[8] HUANG Weidong, WANG Kechang. Liquid rocket engine fault diagnosis based on qualitative/quantitative model[J]. Journal of Aerospace Power, 1996, 11(3): 281-284. (in Chinese)

[9] 宋其江,徐敏强,王日新. 基于分层有向图的航天器故障诊断[J]. 航空学报, 2009, 30(6): 1058-1062.

[10] SONG Qijiang, XU Minqiang, WANG Rixin. Spacecraft fault diagnosis based on hierarchical digraphs [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(6): 1058-1062. (in Chinese)

[11] 王伟,于达仁,赵辉,等. 基于符号有向图模型的故障诊断方法[J]. 动力工程, 2007, 27(5): 736-741.

[12] WANG Wei, YU Daren, ZHAO Hu, et al. Fault diagnosis method based on sign directed graph models[J]. Journal of Power Engineering, 2007, 27(5): 736-741. (in Chinese)

[13] 周虹,左洪福. 基于功能结构树的复杂系统 SDG 自动建模研究[J]. 中国机械工程, 2011, 22(5): 566-570.

[14] ZHOU Hong, ZUO Hongfu. Research on SDG model automatic construction based on function structure tree[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(5): 566-570. (in Chinese)

[15] Iri M, Aoki K, O'shima E, et al. A Graphical approach to the problem of locating the origin of the system failure[J]. Journal of the Operations Research, 1980, 23(4): 295-311.

[16] 于达仁,王伟,胡清华,等. 除氧器故障诊断的含未测节点的符号有向图方法[J]. 汽轮机技术, 2008, 50(1): 39-42.

[17] YU Daren, WANG Wei, HU Qinghua, et al. Algorithms of SDG based fault diagnosis with unmeasured nodes for de-aerator[J]. Turbine Technology, 2008, 50(1): 39-42. (in Chinese)

[18] Shiozaki J, Matsuyama H, O'shima E, et al. An improved

algorithm for diagnosis of system failures in the chemical process[J]. Computers and Chemical Engineering, 1985, 9 (3): 285-293.

[13] 杨帆, 萧德云. SDG 建模及其应用的进展[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(5): 767-774.

YANG Fan, XIAO Deyun. Review of SDG modeling and its application[J]. Control Theory & Applications, 2005, 22(5): 767-774.

[14] 吕宁, 熊智华, 王雄. 综合性 SDG 故障诊断架构[J]. 计算机与应用化学, 2010, 27(1): 11-16.

LÜ Ning, XIONG Zhihua, WANG Xiong. An integrative framework for SDG based fault diagnosis[J]. Computers and Applied Chemistry, 2010, 27(1): 11-16. (in Chinese)

[15] 宋静波. CFM56-3 发动机引气系统低压故障分析[J]. 中国民航飞行学院学报, 2001, 12(4): 46-48. (in Chinese)

SONG Jingbo. Low pressure fault analysis of bleed air for CFM56-3 engine[J]. Journal of China Civil Aviation Flying College, 2001, 12(4): 46-48. (in Chinese)