

SDG 建模及其应用的进展

杨帆, 萧德云

(清华大学自动化系, 北京 100084)

摘要: 符号有向图 SDG(signed directed graph)是描述大规模复杂系统的一种有效方式,通过节点和有向支路表示了系统变量或局部之间的因果影响关系.近年来,关于 SDG 的研究已经成为热点并已取得许多成果,特别是在安全分析领域得到了重要的应用.本文在概述了 SDG 方法的产生背景与发展近况的基础上,主要综述了 SDG 研究中的若干重要问题,包括 SDG 模型的数学描述和基于数学模型、流程图和经验知识的三种建模方法,以及 SDG 在安全评价和故障诊断领域研究和应用的相关成果,总结了相关方法的优缺点,其中的核心问题是推理方法及其效率.最后对 SDG 技术的发展方向做出了展望,定量信息引入、推理方法、计算机建模等方面都有待于进一步研究.

关键词: 符号有向图(SDG); 安全评估; 故障诊断; HAZOP

中图分类号: TP391, TP277

文献标识码: A

Review of SDG modeling and its application

YANG Fan, XIAO De-yun

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Signed directed graph (SDG) is an effective description of large-scale complex systems, which can express system variables and their cause-effect relations by nodes and directed branches. In recent years, the research on SDG has been a focus and obtained a lot of achievements, especially in the area of hazard or safety analysis. After reviewing the background and up-to-date developments of SDG approach, a summary is given, including some major problems in SDG study. Firstly, mathematical formulation and three kinds of modeling approaches of SDG (based on mathematical model, flow chart and experiences) are introduced. Then, the main results of the research and applications in hazard assessment and fault diagnosis are presented, and the advantages and limits of several methods are discussed, in which the key problem is inference methods and their efficiency. Finally, the prospects of SDG are proposed that many aspects should be researched in depth such as introduction of quantitative information, the inference method and modeling automatically.

Key words: signed directed graph (SDG); hazard assessment; fault diagnosis; hazard and operability study (HAZOP)

1 引言(Introduction)

SDG 是复杂系统的一种描述方式,它可以清楚地表示系统中各个变量、各个局部之间互相影响的关系,为研究故障和危险的传播规律、及时地发现故障源提供模型依据.

SDG 的思想从 20 世纪 70 年代开始萌芽^[1~3],但从 70 年代末 Iri M 等人^[4,5]给出了 SDG 的数学定义开始,关于 SDG 的理论和应用研究才正式开始.研究工作大致分为两部分:一是建模,二是应用,两方面的研究工作互相促进.SDG 的建模主要靠经验知识、流程图和定量数学模型,要根据 SDG 的用途建立合适的模型.SDG 的应用主要是在工业过程的安全评价和故障诊断上,最初的研究主要是针对故

障诊断,即寻找故障源.在这方面, Iri M, Umeda T, Shiozaki J, Yu C C 等学者在定性、半定量等故障诊断方法方面做出了比较突出的成果.而 SDG 在安全评价方面的应用是 Venkatasubramanian 等近几年开始研究的,现已取得一些成果.近几年 SDG 技术的研究是以计算机、人工智能等技术为基础的,而企业大规模生产又亟需这方面的技术支撑,所以在这方面的研究又掀起了一个新的高潮.

本文从 3 个方面介绍 SDG 的理论与方法,回顾近年来的发展历程和主要成果,并对今后的发展提出展望.第 2 部分介绍 SDG 的概念与建模方法,第 3 部分介绍 SDG 在安全评价中的应用,第 4 部分介绍 SDG 在故障诊断中的应用,第 5 部分总结今后的研究

方向,并进行总结.

2 SDG 及其建模方法(SDG and its modeling approaches)

2.1 SDG 模型(SDG model)

2.1.1 定性 SDG 模型(Qualitative SDG model)

Warfield^[1]在解释复杂结构模型时用可达矩阵表示系统. Andow^[2]等人所用的报警树可以看作 SDG 的雏形. Lapp S A 等人^[3]在研究计算机辅助生成故障树(Fault tree)的方法时,建立了有向图模型,并由此生成故障树.

Iri M 等人^[4,5]给出了 SDG 相关的严格定义,采用样本的概念表示系统状态.文献[6]和文献[7]等对 SDG 的定义表述如下:

定义 1 SDG 模型 γ 是 SDG 有向图 G_0 与函数 φ 的组合 (G_0, φ) , 其中

i) 有向图 G_0 由四部分组成 $(N_0, A_0, \partial^+, \partial^-)$

a) 节点集合 $N_0 = \{n_1, n_2, \dots, n_m\}$;

b) 支路集合 $A_0 = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$;

c) 邻接关联符

$\partial^+ : A_0 \rightarrow N_0$ (支路的起始节点),

$\partial^- : A_0 \rightarrow N_0$ (支路的终止节点).

该“邻接关系”分别表示每一个支路的起始节点 $\partial^+ e_k$ 和终止节点 $\partial^- e_k$.

ii) 函数 $\varphi : A_0 \rightarrow \{+, -\}$, 其中 $\varphi(a_k) (a_k \in A_0)$ 称为支路 a_k 的符号.

SDG 图由若干个节点和若干条支路(即有向边)组成,节点表示变量,支路表示变量之间的关系.若一个变量的偏差会直接引起另一个变量的偏差,则在两个变量对应的节点之间用支路连接起来,由起始节点(原因变量)指向终止节点(结果变量).用“+”和“-”分别表示正作用(增强)和反作用(减弱).每个节点对应的变量取正常值记为“0”,偏大记为“+”,偏小记为“-”.所有节点的符号组成了系统的状态表示,称为样本.

定义 2 SDG 模型 $\gamma = (G_0, \varphi)$ 的样本是节点状态值的一个函数 $\psi : A_0 \rightarrow \{+, 0, -\}$, $\psi(n_k) (n_k \in N_0)$, 称为节点 n_k 的符号.即

$$\psi(n_k) = 0, \text{ 若 } |X_{n_k} - \bar{X}_{n_k}| < \epsilon_{n_k},$$

$$\psi(n_k) = +, \text{ 若 } X_{n_k} - \bar{X}_{n_k} \geq \epsilon_{n_k},$$

$$\psi(n_k) = -, \text{ 若 } \bar{X}_{n_k} - X_{n_k} \geq \epsilon_{n_k}.$$

其中: X_{n_k} 表示节点对应变量的实际值, $\bar{X}_{n_k}$ 表示节点对应变量的正常值, ϵ_{n_k} 代表节点 n_k 处于正常状态

的阈值.

定义 3 具有样本 ψ 的 SDG 模型 $\gamma = (G_0, \varphi)$ 之中,

如果 $\psi(\partial^+ a_k) \varphi(a_k) \psi(\partial^- a_k) = +$, 则该支路 a_k 称为相容;

如果 $\psi(n_k) \neq 0$, 则该节点 n_k 称为有效节点.

定义 4 当一个 SDG 模型 $\gamma = (G_0, \varphi_1, \dots, \varphi_K)$ 的样本 ψ 和一系列的函数 $\varphi_k (k = 1, \dots, K)$ 确定时, 如果 $\psi(\partial^+ a_1) \varphi(a_1) \dots \varphi(a_K) \psi(\partial^- a_k) = +$, 则支路组合亦称为在 ψ 样本下的相容.

由相容支路组成的路径称为相容通路.事故只有通过相容通路才能进行传播.在研究故障诊断的问题中,只有有效节点和相容通路才描述了故障的传递关系,所以研究的范围就是 SDG 图的一个子图——原因-后果图(CEG).

由于技术和经济的原因,不是所有的节点都是可测的,所以获得的样本往往是部分样本.另外,由于实际系统中一般都有控制环节,通常会造成图中的闭环.文献[4,5]考虑了受控节点和不可测节点的问题,扩展了 SDG 的相关定义.

上面的定义一直被沿用,但后来根据具体问题和算法的需要做出了一些变形.对于节点的定义, Umeda T 等人^[6]着眼于系统的动态过程,由系统的代数方程和离散动态方程描述变量之间和变量自身随时间变化的故障传递关系,于是同一变量在不同时刻的状态就构成了不同的节点. Shiozaki J 等人^[8,9]提出了 5 级 SDG 模型的概念,将节点变量的状态更加细化了.

2.1.2 半定量 SDG 模型 (Semi-quantitative SDG model)

SDG 最初的定义是完全定性的,但由于应用中的需要,需要适当引入定量信息,与之相对应,SDG 的模型也需要做出一些修改,这主要体现在支路的定义上.例如增益、延迟、概率等信息都可以在支路上体现出来,而不仅仅是相容和不相容的两个值了.比较典型的例子是 Yu C C 等^[10]通过模糊集理论中的隶属函数(membership functions)将稳态增益的知识引入定性的 SDG 模型.此外, Wilcox^[11]在 SDG 的基础上提出类似的 PCEG (Possible Cause and Effect Graph) 概念.

Yu C C 等利用模糊集合理论,将节点之间的传递关系模糊化为隶属度函数,并把它图形化.如图 1 所示,节点 A, B 之间的稳态增益是 7,但可以认为只要在 5 到 9 之间都是符合的,在 3 以下、11 以上是不

符;图中 μ_{BA} 为从节点A到节点B的支路的梯形隶属度函数.其实根据实际情况可以构造很多种形状的隶属度函数.

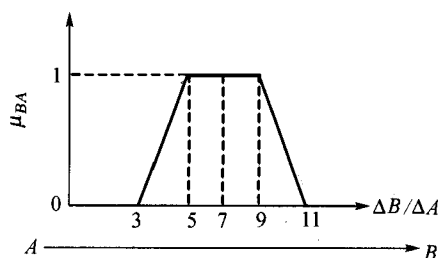


图1 隶属度函数
Fig. 1 Membership function

定性模型中支路的相容性只有“真”和“假”两种,而借助隶属度函数,支路的相容性数值则成为0和1之间的一个连续量,我们称之为相容度.根据各节点的测量值就可以计算出每条支路的增益,然后基于每条支路的隶属度函数计算出每条支路的相容度.

上述模型中相容度的计算依据是增益,所以主要针对的是稳态模型,而且增益的计算必须基于两端节点的值,如果节点不可测则有困难.

2.1.3 SDG模型的简化(Simplification of SDG model)

随着工业过程的复杂,SDG模型的规模越来越大,变量数多,图形复杂,需要简化.

Chang C C^[12,13]在Kramer等人工作的基础上,基于稳态下的故障特点及传递关系较系统地提出了SDG模型简化的方法.其原则是删除不可观测的非潜在根节点、根据系统的状态以及故障传播路径的主导作用等.但是,这种简化方法是基于稳态情形实施的,并不适用于动态的情形.

此外,当SDG规模过大时,可以采用分层的方法,逐层细化,这就不仅需要定义概念节点,还要解决层次之间传递关系的表达问题.

2.2 SDG建模方法(Modeling approaches of SDG)

2.2.1 基于数学模型的方法(Approaches based on mathematical model)

Umeda T和Kuriyama T等人^[6]介绍了基于定量数学模型的方法.系统的定量数学模型一般为微分方程,例如系统共有 n 个状态变量

$$\frac{dX_i(t)}{dt} = f_{i,0}(X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)),$$

$$X_i(t_0) = X_i^0, (i = 1, 2, \dots, n).$$

由微分方程可离散化为差分方程

$$X_i^{m+1} = X_i^m + f_i(X_1^m, X_2^m, \dots, X_n^m),$$

$$X_i(t_m) = X_i^m, \begin{cases} i = 1, 2, \dots, n; \\ m = 1, 2, \dots, M. \end{cases}$$

由差分方程可以直接转化为定性的SDG. SDG的节点对应方程的变量,而节点间的支路符号通过对方程求偏导求得.例如 X_i 和 X_j 在SDG中分别对应 n_i 和 n_j ,那么 n_i 到 n_j 的支路的符号 G_{ij} 由下式确定:

$$G_{ij} = \text{sgn}\left(\frac{\partial X_i}{\partial X_j}\right).$$

该方法易于表达过程变量之间的关系,准确性高,但推导繁琐,而且由于该方法得到的节点都是状态变量,不能表示事件,所以不易表达故障.

定性SDG图的一个优点就是不需要复杂的流程信息,只要根据P&ID图就可以得到.因此,直接通过定性知识建模是SDG建模的主要手段.下面两种方法就是其中的代表.

2.2.2 基于流程图的方法(Approaches based on flow chart)

在基于数学模型的方法中,支路的符号只有“+1”和“-1”,而Lapp S A和Powers G J^[3]提出了基于流程图的方法.作者根据节点间影响关系的幅值大小将支路符号区分为“+1”,“-1”,“+10”,“-10”,这是对原有定义的扩展.

建模的过程主要是通过分解为设备单元,再利用相关分析表建立设备单元的SDG模型,最后组成系统,文献[14]概括了此方法建模的具体步骤和简单实例.此方法直观形象,但建立的模型较复杂.

2.2.3 基于经验知识的方法(Approaches based on experiences)

李安峰等^[14]对此方法做出了总结,并针对安全评价和故障诊断给出了两套建模方法:

1) 用于安全评价的模型建模方法.

安全评价的目的是识别出所有潜在的危险,追求的是揭示故障的完备性.其建模原则是:节点和支路的确定应当有利于全面揭示故障,并且尽可能揭示故障传播途径.其基本方法是先把系统分解为设备单元,然后对每个设备定义变量,考查变量之间的影响关系,建立影响方程组,同时分析设备的非正常原因和不良后果,最后组成系统模型.

2) 用于故障诊断的模型建模方法.

故障诊断是在故障发生的情况下及时寻找到故障源,追求诊断速度和故障分辨率.其建模原则是:节点和支路的确定应当有利于快速精确地定位故障源.其基本步骤是先确定故障节点,再对每个故障节

点做故障树分析,再把故障树进行合并并经过修正调整成为 SDG 图。

文献[15]在此基础上提出了此种方法建模的十条原则并取得了实际的应用,可供参考。

实际的系统往往随着运行状态的变化而发生结构或参数的调整,此时的 SDG 图则必须随之修改,因此通过计算机自动建模的技术则极为需要,这方面的研究尚未取得明显成果。

3 SDG 在安全评价中的应用 (Applications of SDG in hazard assessment)

3.1 SDG 在计算机辅助 HAZOP 技术中的作用 (Function of SDG in computer-aided HAZOP technology)

安全评价是以保障安全为目的,按照科学的程序和方法,从系统的角度对工业生产或工程项目中潜在的危险及危险可能造成的损失进行预先识别、分析和评价,为制定防灾措施和管理决策提供依据^[16]。安全评价的方法很多,危险和可操作性分析 HAZOP (Hazard and Operability Study) 是其中一种重要的方法,且在石化工业中广泛应用。

Venkatasubramanian^[17]充分注意到 SDG 方法完备性好的优点,成功地将 SDG 方法应用于化工过程 HAZOP 分析,这是计算机辅助安全评价技术的一个飞跃。同时,他们又将该技术通过运用 Petri 网的方法推广到间歇过程的安全评价。目前,SDG 方法是完成自动 HAZOP 最有效的方法。

SDG 与现有通行的安全评价方法有着紧密的联系,各主要方法或可直接为 SDG 的建立提供数据,或将成为 SDG 的一个推理结果^[18]。

3.2 基于 SDG 的 HAZOP 方法 (SDG-based HAZOP approach)

Venkatasubramanian^[17]等开发了基于模型智能化安全评价软件系统——HAZOPEXPERT。该系统基于专家系统 G2,其总体上分为两个层次,分别处理过程工业的通用知识(包括设备单元模型)与具体设备的过程特有知识(包括物性数据以及 P&ID 信息),如图 2 所示^[6]。

SDG 模型表现了变量间的影响关系,只要将非正常原因与不利后果的信息添加入 SDG 模型中,经过推理就可以完成 HAZOP。文献[6]直接在 SDG 图中引入两种新的节点——非正常原因节点和不利后

果节点,作为直接原因连接在变量节点上,推理时就从非正常原因节点开始,沿相容通路直到不利后果节点为止,但这种方法冗余通路多,运算量大。文中还给出了改进的方法,先确定关键变量作为原始偏离点,从它们开始分别进行正、反向推理寻找不利后果和它们的非正常原因。

目前,北京化工大学初步开发了一个集成化 SDG 建模、推理与信息处理的软件平台,在 SDG 建模、故障诊断和安全评价方面建造了一个可扩展的平台,并正在开展进一步的研究^[19]。

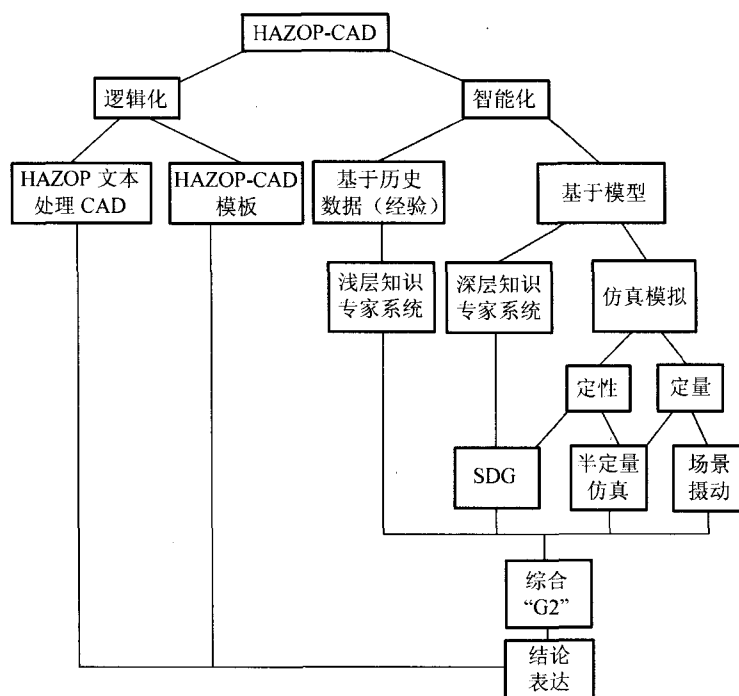


图 2 计算机辅助 HAZOP 方法

Fig. 2 Computer-aided HAZOP approaches

4 SDG 在故障诊断中的应用 (Applications of SDG in fault diagnosis)

4.1 以寻找极大强连通单元为目标的故障诊断方法 (Fault diagnostic method oriented in searching maximum strongly-connected components)

4.1.1 基于完全样本的故障诊断方法 (Fault diagnostic method based on total pattern)

SDG 的思想出现于 70 年代初,并得到了一些应用。例如前面提到的 Warfield^[7]用可达矩阵表示系统,探讨系统分解等问题;Andow 等人^[8]提出了一种由信息流图转化成报警树的方法,这是 SDG 的雏形,还对不可测节点采取了转化消除的策略,即通过转化形成的模型中只含有可测节点;Lapp S A 等人^[3]建立了有向图模型,并由此生成故障树。

Iri M 等人^[4,5]给出了 SDG 相关的严格定义,如果把支路的方向理解为序关系,那么,整个非正常样本的原因-结果图(CEG)就可以分解为若干个强连通单元(这里作者把一个节点也看作一个强连通单元),而故障源就位于 CEG 的极大强连通单元中,所以故障诊断问题实质上就是寻找极大强连通单元(maximal strong-connected component)的问题,见图 3 所示的例子.由于同时发生多个故障的概率很小,所以假设某一状态下的故障源唯一,这对于绝大多数情况都是合理的.在此假设下,极大强连通单元是唯一的. Tarjan^[20]的深度优先算法是寻找极大强连通单元的有效方法,文献[15]中给出了算法的软件实现.基本的步骤可以分为分解 SDG 图为强连通单元、确定强连通单元之间的序关系和寻找极大强连通单元 3 步.

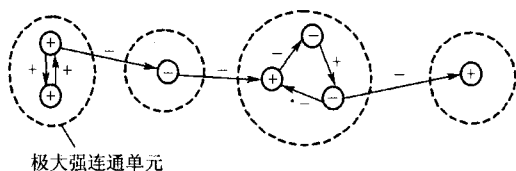


图 3 CEG 图及强连通单元的例子

Fig. 3 Example of CEG graph and strongly-connected components

Umeda T 等人^[6]着眼于系统的动态过程,提出了多阶段 SDG 表达随时间变化的原因及后果关系,以便分析动态过程.此方法虽然对系统动态过程的分析十分细致,然而对于节点、支路数多的大系统则占用容量很大,应用起来过于复杂,故后来未见发展.作者还把对有效节点和相容通路的判断添加到深度优先算法中,给出了将 CEG 图分解为强连通单元和决定强连通单元之间的偏序关系的两个详细算法流程图.

4.1.1 基于部分样本的故障诊断方法(Fault diagnostic method based on partial pattern)

上面的算法只适用于全部变量均可测,即完全样本的情形,而实际中则往往有部分节点不可测,必须研究基于部分样本的故障诊断方法.

最自然的思路是先对不可测节点进行假设,然后按照完全样本的推理方法找到故障源,最后综合各种假设情况的推理结果得出结论.由于每次都要对所有不可测节点进行假设,所以如果不可测节点共有 M 个,则共需 3^M 次尝试,文献[4,5]给出了假设的算法,但这种算法的计算量是很大的.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

$$C = \bigcup_{i=1}^{3^M} C_i.$$

计算量是同样 SDG 在完全样本条件下的 3^M 倍.文献[4,5]给出的算法则是逐个假设不可测节点并进行判断的方法,计算量大为减小.

4.2 以寻找相容根树为目标的故障诊断方法(Fault diagnostic method oriented in searching consistent rooted-trees)

上述基本观点和方法是基于 SDG 的故障诊断方法的基本内涵,从 20 世纪 80 年代中期以来,在此基础上,该方法在多个角度得到了进一步的发展.

首先是 O'Shima E 和 Shiozaki J 等对算法进行了改进,在多个方面取得了成绩.

Shiozaki 等人^[21]在 Iri 的基础上对算法进行改进,着力在不可测节点的符号假设、停止假设的判据和假设符号的修正 3 个问题上提高效率.

Shiozaki J 等人^[8,9]还提出了 5 级 SDG 模型的概念,有利于提高诊断的准确性.作者提出了“相容根树”(consistent rooted-tree)的概念:如果从某一个节点到每个有效节点都存在相容通路,那么这个节点和所有相容通路就组成了“相容根树”.并说明寻找“相容根树”的根节点的方法是与寻找极大强连通单元的方法等价的,同时提出了一种新的故障诊断算法,提高了计算效率.这种算法的基本思路是从每个有效节点出发向前上溯,并将有效节点按照传递关系连接起来,做出标记,直到所有有效节点都被纳入这棵树为止.

作者运用新的算法在一个试验工厂进行了在线故障诊断实验,经验表明,调整阈值(threshold)以及合理配置检测仪表有利于提高诊断的预测性和分辨率.作者还引入了离线样本参与诊断,与在线样本相结合,提高了诊断的速度和准确性,如图 4 所示.文献[22]总结了他们所做的上述工作.

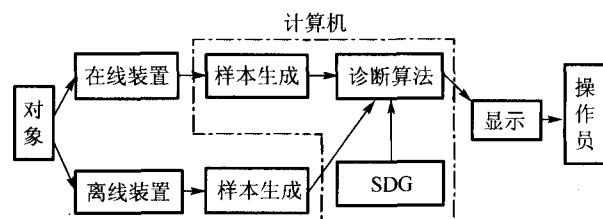


图 4 在线和离线相结合的诊断系统

Fig. 4 Diagnosis system combined with online and offline parts

4 年之后, Shiozaki J 等人^[23]又提出了运用瞬态信息即故障显现时间(fault revealing time)来改进 SDG 故障诊断方法,提高了诊断的准确性.本方法

比传统 SDG 方法的诊断结果的分辨精度高,而存储量和计算速度几乎相同。

4.3 半定量故障诊断方法(Semi-quantitative fault diagnostic method)

由于 SDG 的推理方法是一种定性化的方法,最大的缺点就是冗余多,如果通过引入一些定量的知识,使算法的准确率提高。另外,定性推理经常会造成一些自相矛盾的情况——同一节点在不同的相容通路中得到的结果可能是不同的,以及由于阈值的选择造成的一些遗漏和误判。为了解决此类问题,模糊集合理论(fuzzy set theory)被引入 SDG 方法。

Yu C C 等^[10]用隶属函数将稳态增益的知识引入定性的 SDG 模型。在节点可测的前提下,可以计算出相容通路的相容度(degree of consistency),即实际增益与理论增益的一致性。某一故障源的相容度就是其 SDG 图上所有支路中最小的相容性数值。所有可能的故障源中,具有相容度数值最高的那个故障源就可以被判定为最有可能发生故障的故障源。依此类推,可以得到故障源按照可能性的排序。这明显比定性推理进了一步,给出的结果不是罗列,而是排序。根据这个思想,作者提出了一个算法,这个算法是基于定性 SDG 的算法的推广。作者还提出了将此方法扩展到多故障源情形的思路。文献[24,25]中将该方法应用到了液体火箭上。

Han C C 等^[26], Wang X Z^[27], Tarifa E E^[28,29]等也在 SDG 的模糊化方面做了不少工作。

另外,SDG 方法与其他方法的结合也是目前研究的一个方向。例如 Vedom^[30]提出 SDG 与主成分分析相结合的方法, Tsuge^[31]提出 SDG 与小波分析相结合的方法,为基于 SDG 的故障诊断赋予了新的生命。

对于多故障源假设的情况,文献[32]和文献[33]等文献进行了初步的研究。

4.4 SDG 在故障诊断上的应用情况(Applications of SDG in fault diagnosis)

在理论研究的基础上, Kramer M A 等人^[34,35]运用了专家系统来解决基于 SDG 的故障诊断问题,这样问题就转化为如何由 SDG 模型建立推理规则的问题,其核心就归结为 SDG 模型的质量。Kramer 给出了由 SDG 建立规则的一般方法,并考虑控制回路、反馈回路、条件支路和不可观测节点的删减等深层问题。以前利用专家系统进行推理主要是利用浅

层经验知识,这显然对于分析系统内部故障源是不够的,而基于 SDG 的推理则利用了深层知识。用规则推理的方法解决故障源搜索问题的思路给后面的研究指引了方向, Chang C C 称这一算法为基于 SDG 的故障诊断方法的现代版本^[12]。

前面几个阶段的研究主要集中在理论和仿真实验阶段,近 10 年来,美国普渡大学以 Venkatasubramanian 等人对 SDG 方法的完善和工业化应用做出了显著成绩。他们开发的实时故障诊断系统 Dkit,是在实时专家系统 G2 环境中运行的,并采用了多种故障诊断方法^[36,37]。1997 年开始,由美国多家联合研究开发了“新一代过程控制系统,非正常事件指导和信息系统 AEGIS(Abnormal Events Guidance and Information Systems)”,成为国际上第一个实时和大型工业过程的诊断系统。此外, Vanderbilt 大学的 Padalkar^[38]和大阪石油公司开发的 IPCS、麻省理工大学的 Oyeleye^[39]等开发的 MIDAS 系统等也是实用的故障诊断系统。

5 总结和展望(Conclusions and prospects)

对于 SDG 方法的研究历史,文献[40,7]作了概括性的回顾,文献[41,42]对 SDG 方法的算法、控制回路和流程图分析等问题进行了总结。

故障诊断是在现场完成,故要求准确、实时;而安全评价是在系统运行之前,故要求完备、详细。这就要求我们的研究工作要各有侧重。对于安全评价,现有的方法还不够细致,需要进一步分析系统内部的故障传播和影响关系,包括传播瓶颈等问题;对于故障诊断,需要更加快速、可靠的深层知识推理算法,并将算法用计算机软件实现,开发出高效、开放的推理引擎。不可测的节点越多,算法复杂度越高,呈指数爆炸关系,而多故障源的诊断问题尤为明显。因此,不可测节点的假设方法和定量信息的合理利用是故障诊断问题的主要难点。

关于 SDG 的研究尚有很多工作要做,主要可以概括为 3 个方面:

1) 模型和推理的定量化研究:定量化是提高分辨率的必由之路,也是与传统的诊断方法的结合点,可以弥补定性方法的不足。

2) 推理方法的研究:提高推理算法的效率是 SDG 方法投入实际应用的核心问题,需要探讨新的改进方法。

3) 计算机建模:随着工作状况的变化,模型也

要随时进行调整,必须依靠计算机建模技术.

参考文献(References):

- [1] WARFIELD J N. Toward interpretation of complex structural models [J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics*, 1974, 4(5): 405 - 417.
- [2] ANDOW P K, LEES F P. Process computer alarm analysis: Outline of a method based on list processing [J]. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 1975, 53(3): 195 - 208.
- [3] LAPP S A, POWERS G J. Computer-aided synthesis of fault-trees [J]. *IEEE Trans on Reliability*, 1977, 26(2): 2 - 12.
- [4] IRI M, AOKI K, O' SHIMA E, et al. An algorithm for diagnosis of system failures in the chemical process [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1979, 3(1 - 4): 489 - 493.
- [5] IRI M, AOKI K, O' SHIMA E, et al. A Graphical approach to the problem of locating the origin of the system failure [J]. *J of the Operations Research*, 1980, 23(4): 295 - 311.
- [6] UMEDA T, KURUYAMA T. A graphical approach to cause and effect analysis of chemical processing systems [J]. *Chemical Engineering Science*, 1980, 35(12): 2379 - 2388.
- [7] 吴重光, 夏涛, 张贝克. 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.
(WU Chongguang, XIA Tao, ZHANG Beike. The qualitative simulation based on deep knowledge model of signed directed graph [J]. *Journal of System Simulation*, 2003, 15(10): 1351 - 1355.)
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] YU C C, LEE C. Fault diagnosis based on qualitative/quantitative process knowledge [J]. *AIChE Journal*, 1991, 37(4): 617 - 628.
- [11] WILCOX N A, HIMMELBLAU D M. The possible cause and effect graphs(PCEG) model for fault diagnosis-I. Methodology [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1994, 18(2): 103 - 116.
- [12] CHANG C C, YU C C. On-line fault diagnosis using the signed directed graph [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 1990, 29(7): 1290 - 1299.
- [13] CHANG C C. *On-line fault diagnosis using improved SDG* [D]. Taiwan: National Taiwan Institute of Technology, ROC, 1988.
- [14] 李安峰, 夏涛, 张贝克, 等. 化工过程 SDG 建模方法[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(10): 1364 - 1368.
(LI Anfeng, XIA Tao, ZHANG Beike, et al. SDG modeling approach for chemical engineering process [J]. *Journal of System Simulation*, 2003, 15(10): 1364 - 1368.)
- [15] 张贝克. SDG(符号有向图)实时推理机制、图形化软件平台及安全工程应用研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2003.
(ZHANG Beike. *Study with SDG (Signed Directed Graph) on its real-time deduction mechanism, graphic software platform and application in safety engineering* [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2003.)
- [16] 吴重光, 夏涛, 张海峰, 等. 过程工业计算机辅助安全评价技术的进展[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(5): 609 - 613, 636.
(WU Chongguang, XIA Tao, ZHANG Haifeng, et al. The progress of computer supported hazard assessment in process industry [J]. *Journal of System Simulation*, 2003, 15(5): 609 - 613, 636.)
- [17] VENKATASUBRAMANIAN V, ZHAO J, VISWANATHAN S. Intelligent system for HAZOP analysis of complex process plants [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2000, 24 (9/10): 2291 - 2302.
- [18] 牟善军, 姜春明, 吴重光. SDG方法与过程安全分析的关系[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(10): 1381 - 1384.
(MOU Shanjun, JIANG Chunming, WU Chongguang. The interrelationships between SDG and process hazard analysis [J]. *Journal of System Simulation*, 2003, 15(10): 1381 - 1384.)
- [19] 张贝克, 夏涛, 吴重光. 集成化 SDG 建模、推理与信息处理软件平台[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(10): 1360 - 1363.
(ZHANG Beike, XIA Tao, WU Chongguang. Integrated SDG modeling, inference and post-processing software platform [J]. *Journal of System Simulation*, 2003, 15(10): 1360 - 1363.)
- [20] TARIAN R E. Depth-first search and linear graph algorithm [J]. *SIAM Journal on Computing*, 1972, 1(2): 146 - 160.
- [21] 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.
- [22] TSUGE Y, SHIOZAKI J, MATSUYAMA H, et al. Fault diagnosis algorithms based on the signed directed graph and its modifications [C] // *Process Systems Engineering: The Use of Computers in Chemical Engineering*. Rugby: The Institution of Chemical Engineers, 1985, 92: 133 - 144.
- [23] SHIOZAKI J, SHIBATA B, MATSUYAMA H, et al. Fault diagnosis of chemical processes utilizing signed directed graphs - improvement by using temporal information [J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 1989, 36(4): 469 - 474.
- [24] 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, 331.
(HUANG Weidong, WANG Kechang. Liquid rocket engine fault diagnosis based on qualitative/quantitative model [J]. *Journal of Aerospace Power*, 1996, 11(3): 281 - 284, 331.)
- [25] 黄卫东, 王克昌. 基于定性模型的液体火箭发动机故障诊断[J]. 推进技术, 1996, 17(4): 5 - 9.
(HUANG Weidong, WANG Kechang. Fault diagnosis of liquid rocket engine based on qualitative model [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1996, 17(4): 5 - 9.)
- [26] HAN C C, SHIH R F, LEE L S. Quantifying signed directed graphs with the fuzzy set for fault diagnosis resolution improvement [J].

- Industrial and Engineering Chemistry Research*, 1994, 33(8): 1943 – 1954.
- [27] WANG X Z, YANG S A, YANG S H, et al. The application of fuzzy qualitative simulation in safety and operability assessment of process plants [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1996, 20(S1): S671 – S676.
- [28] TARIFA E E, SCENNA N J. Fault Diagnosis, Direct Graphs, and Fuzzy Logic [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1997, 21 (Suppl): 649 – 654.
- [29] TARIFA E E, SCENNA N J. Fault diagnosis for a MSF using SDG and fuzzy logic [J]. *Desalination*, 2002, 152(1–3): 207 – 214.
- [30] VEDAM H, VENKATASUBRAMANIAN V. PCA-SDG based process monitoring and fault diagnosis [J]. *Control Engineering Practice*, 1999, 7(7): 903 – 917.
- [31] TSUGE Y, HIRATSUKA K, TAKEDA K, et al. A fault detection and diagnosis for the continuous process with load-fluctuations using orthogonal wavelets [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2000, 24(2–7): 761 – 767.
- [32] VEDAM H, VENKATASUBRAMANIAN V. Signed digraph based multiple fault diagnosis [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1997, 21(6): 655 – 660.
- [33] 刘洪刚, 吴建军, 陈小前. 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, 109.
(LIU Honggang, WU Jianjun, CHEN Xiaoqian. Study on the SDG-based intelligent fault diagnosis method [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2002, 24(1): 103 – 104, 109.)
- [34] OYELEYE O O, KRAMER M A. Qualitative simulation of chemical process systems: Steady-state analysis [J]. *AIChE Journal*, 1988, 34 (9): 1441.
- [35] KRAMER M A, PALOWITCH B L. A rule-based approach to fault diagnosis using the signed directed graph [J]. *AIChE Journal*, 1987, 33(7): 1607 – 1078.
- [36] MYLARASWAMY D, VENKATASUBRAMANIAN V. A hybrid framework for large scale process fault diagnosis [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1997, 21(9): 935 – 940.
- [37] DASH S, VENKATASUBRAMANIAN V. Challenges in the industrial applications of fault diagnostic systems [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2000, 24(2–7): 785 – 791.
- [38] PADALKAR S, SZTIPAN OVITS J, KARSAI G. Real-time fault diagnostics with multiple aspect models [C]. // *Proc of the 1991 IEEE Int Conf on Robotics and Automation*. Sacramento, CA: IEEE Press, 1991: 803 – 808.
- [39] OYELEYE O O, FINCH F E. Qualitative modeling and fault diagnosis of dynamic processes by MIDAS [J]. *Chemical Engineering Communications*, 1990, 96: 205 – 228.
- [40] 吴军强, 梁军. 基于图论的故障诊断技术及其发展 [J]. 机电工程, 2003, 20(5): 188 – 190.
(WU Junqiang, LIANG Jun. Technology and development of fault diagnosis based on graph theory [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Magazine*, 2003, 20(5): 188 – 190.)
- [41] MAURYA M R, RENGASWAMY R, VENKATASUBRAMANIAN V. A systematic framework for the development and analysis of signed digraphs for chemical processes 1: Algorithms and analysis [J]. *Ind Eng Chem Res*, 2003, 42(20): 4789 – 4810.
- [42] MAURYA M R, RENGASWAMY R, VENKATASUBRAMANIAN V. A systematic framework for the development and analysis of signed digraphs for chemical processes 2: Control loops and flow-sheet analysis [J]. *Ind Eng Chem Res*, 2003, 42(20): 4811 – 4827.

作者简介:

杨帆 (1980—), 男, 博士研究生, 主要从事安全评估、故障诊断研究, E-mail: yangfan65@tsinghua.org.cn;

萧德云 (1945—), 男, 清华大学教授、博士生导师, 主要从事辨识建模、故障诊断、混合动态系统、多传感器融合、大型连续过程工业 CIMS 等领域的教学和科研工作, E-mail: xiaody@mail.tsinghua.edu.cn.