

研究简报

间歇过程动态 SDG 建模

张贝克, 郑 然, 马 昕, 吴重光

(北京化工大学信息科学与技术学院, 北京 100029)

关键词: 间歇过程; HAZOP; SDG; 飞灰脱除; 建模方法

中图分类号: TP 391.7

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2008) 07-1863-06

Active modeling approach for batch process based on SDG

ZHANG Beike, ZHENG Ran, MA Xin, WU Chongguang

(School of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: At present, the modeling method used in the batch process by signed directed graph (SDG) is oriented to the process in normal running state, which cannot describe the operating logic in abnormal running state, and it is inadequate to cover all faults and hazards. When the SDG model used for computer-aided hazard and operability study (HAZOP) is built for the complex chemical process including the batch process, the model of the batch process cannot always be associated to that of the other continuous systems. In order to meet the demand of computer-aided HAZOP, the paper presents a dynamic SDG modeling method based on the present SDG-HAZOP modeling method to deal with the batch process. The idea and procedures of dynamic modeling were elaborated. A real case about the fly ash removal in a complex process of coal-to-oil was modeled and analyzed by using the proposed method, which can resolve two problems at the same time: the sequential model about the SDG modeling of the batch process and the maximal covering of the faults and hazards.

Key words: batch process; HAZOP; SDG; dry fly ash removal; modeling approach

引 言

符号定向图^[1]是在有向图的基础上, 对节点与支路进行进一步的符号定义所形成的图, 称之为 SDG 图 (signed directed graph), 其本质是通过对 SDG 图中节点和支路进行符号化的定义, 使节点和支路能够代表实际物理意义, 用于表达复杂的因果关系, 并且包容大规模潜在的信息。近年来, SDG 安全评价与故障诊断方法在流程工业安全领

域取得了较好的应用效果, 已成为安全技术领域的核心技术之一^[2]。在模型过于复杂的情况下, 人工对 SDG 模型进行推理也会变得过于复杂, 计算机辅助 HAZOP 成为安全分析领域的研究热点之一^[3], 本文建模思路就是以计算机辅助 HAZOP 思想^[4]为前提建立的, 但面对间歇过程, 普通的 SDG 建模已经很难达到要求。间歇过程每一步的操作失误都可能对后续步骤造成影响, 而每个步骤所对应的 SDG 图是完全不同的, 怎么运用 SDG

2008-04-14 收到初稿, 2008-04-28 收到修改稿。

联系人及第一作者: 张贝克 (1976—), 男, 博士, 副教授。

基金项目: 黑龙江省科技攻关项目 (GB06A106)。

Received date: 2008-04-14.

Corresponding author: ZHANG Beike. E-mail: zhangbk@mail.buct.edu.cn.

Foundation item: supported by the Scientific and Technological Tackling Project of Heilongjiang Province (GB06A106).

建模来描述步骤之间的接续问题,是运用 SDG 对间歇过程建模的关键所在。这就引入了一个动态 SDG 的概念。

针对同样的问题, Venkatasubramanian 等^[5-7]将高级 Petri 网与有向图 (digraph) 相结合^[8-9], 提出了一种专门用于间歇过程 HAZOP 分析^[10-14]的整体知识框架。然而, 由于所建立的有向图模型都是针对单独的子任务, 因此模型的推理结果不能很好地表达各个阶段间的相互影响关系。问题的重点在于故障和危险的覆盖面, Petri 网 SDG 建模理论是正常运行的间歇过程系统的机理模型, 如果想将这个模型应用于计算机辅助 HAZOP 分析, 故障和危险的覆盖面还远远不够。同时, 现在针对包含间歇过程的大化工过程的计算机辅助 HAZOP 建模过程中的间歇过程部分的建模往往无法与其他连续系统有机联系起来, 而采取人工头脑风暴的 HAZOP 分析也就失去了计算机辅助 HAZOP 的优势。本文的建模方式同时解决模型接续性与故障和危险的覆盖面最大化两方面问题。

1 间歇过程 SDG 建模的思路

1.1 间歇过程 SDG 建模的思路

1.1.1 建立整体 SDG 模型 将整个间歇过程在各个状态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 模型必须涵盖间歇过程任何一个状态下变量相互影响关系的 SDG 模型, 并为变量间的影响关系 (即有向支路) 设置使能条件。这样一来, 在特定状态下, 通过改变有向支路的使能条件, 就能在整体 SDG 的基础上获得所需的、当前状态下的、相对独立的 SDG 模型。

1.1.2 建立状态顺序图 将间歇过程分解成若干个连续过程, 抽象成若干个步骤, 并按步骤建立间歇过程的状态顺序图。状态顺序图结构建立在整体 SDG 的上层, 掌控总体 SDG 的有向支路使能条件。运用顺序状态图来描述间歇过程的状态改变, 确切地说, 就是运用状态顺序图, 将整体 SDG 步骤化。

1.1.3 建立状态顺序列表 建立关联链表, 将阀门信息 (含人工误操作)、设备失效与整体 SDG 中的相应节点关联起来。将每个步骤的标准状态列表, 在推理过程中, 将该步骤的系统状态与预设标

准状态相比较, 若无差异, 系统进入下一步骤; 若有差异, 根据链表信息, 拉偏相应的 SDG 节点, 触发 SDG 的推理。分析间歇过程并找出部分关键节点, 将系统状态的切换与关键节点的状态关联起来, 由关键节点的状态来决定系统状态。

1.2 带来的问题及相应对策

问题 1: 严谨的步骤划分将否定一些其他的正确步骤。将间歇过程用严谨的步骤加以分解, 这样的直接后果就是否定了间歇过程中除了预设状态以外的任何正确的可能。而在实际工业中, 有相当一部分的间歇过程并非仅有一种运行步骤。例如当一个阀门只要在第 3 步~第 7 步之间开启便不会影响整个系统正常运行时, 如何严格地将该阀门信息写入标准状态表呢?

解决方式: 将间歇过程的步骤划分模糊化、多种标准并存。当一个阀门只要在第 3 步~第 7 步之间开启便不会影响整个系统正常运行时, 那么该阀门只要在第 3 步~第 7 步之间开启, 便不会引入偏差。当一个储罐只需要在下次灌注液体前放空时, 无论下次灌注液体前的哪一步骤放空, 都不会引入偏差。简单的标准状态列表已经无法符合要求, 所以将步骤划分模糊化、多种标准并存。模糊化是指在状态列表中添加规则, 即在表中支持填写类似“某种条件达成的情况前阀门需要关闭”这样的信息。多种标准并存是指同时存在多个标准状态表, 当前系统只需要遵循其中任何一种都不会引发偏差和推理。当然, 这种更加开阔的建模方式需要建模人员更加了解间歇过程的机理, 加大了建模的难度, 但却能够建立更真实的模型。

问题 2: 依次拉偏前一步骤的节点将带来节点冲突的问题。获得了动态的 SDG 推理, 却没有在步骤之间建立联系, 还仍然不能解决故障在步骤之间传递的问题。但毋庸置疑的是, 目前的建模方式能够在故障出现伊始将故障引入当前步骤的 SDG 进行推理, 在这个基础上, 将该步骤的推理结果全部引入下一步骤, 在下一步骤的 SDG 中拉偏。由于 SDG 无法处理并发推理情况, 于是只能每次拉偏一个节点, 再将所有节点的拉偏后果叠加。这就再次引入了一个亟须解决的问题, 即节点的冲突。

解决方式: 罗列所有的可能性。由于定性讨论本身就具有一定局限性, 所以无法处理在节点叠加时出现冲突的情况, 即由于两种或以上的错误引发推理时, 可能会对于同一个 SDG 节点存在着相反

的影响, 这时该节点的状态就无法确定。对于这种情况, 解决方式就是两种情况并存, 同时作为结果输出。定性建模推理的目的本身就是提供可能性的推理, 所以多种可能结果并存是可以接受的结果。当然出现这种情况的可能性很小, 在建模过程中可以做一些工作来减少这种情况发生的可能性, 但是, 在实际化工过程中, 操作顺序颠倒是一个不能忽视的问题, 而带来的直接问题必然会导致节点叠加时出现冲突。

问题 3: 系统状态依赖于关键节点导致关键节点的特殊性问题。推理的程序是优先判定系统状态, 然后再判定节点状态。这就直接导致一个问题, 如果系统状态出现故障, 那么推理过程就不能等同于节点状态出现故障。这与普通的 SDG 推理又有所不同。

解决方式: 推理过程中关键节点需要区别于普通节点。正推过程是预测, 关键节点的状态能够确定, 不会受到影响, 而反推过程必须确定系统状态是否正确, 尤其当判别状态的关键节点状态是由仪表来检测的时候, 需要优先考虑到仪表可能会出现错误, 然后在此基础上同时推理两种情况。若其中一种情况与系统真实状态大相径庭, 可以否掉; 若两种情况都基本符合系统真实状态, 则都作为可能性加以保留。

2 实际案例分析

由于篇幅所限, 不能够做全面的分析示例, 下面对某公司煤制油流程的干灰脱除工序进行建模, 以某阀门误操作为例, 通过正推过程分析, 预测该阀门误操作可能造成的不利后果。

2.1 工艺流程

该过程的工艺流程简图如图 1 所示。自煤气化工序来的合成气 (340℃, 3.96 MPa) 进入 HPHT 飞灰过滤器 (S1), 99% 左右的粉尘被除去, 脱除飞灰后的合成气送湿洗流程做进一步处理。积存在 HPHT 飞灰收集器 (V1) 底部的飞灰间断送至飞灰排放罐 (V2) 缓冲, 闪蒸出飞灰中的部分燃料气送火炬燃烧。飞灰排放罐内的飞灰再间断送至下一设备。该过程中的两个主要设备 V1 为半间歇操作 (连续进料, 间歇出料), V2 为间歇操作 (间歇进料, 间歇出料)。具体间歇操作方式如下。

初始状态: XV-2/5 关闭, XV-1/3 打开。LS-04 为 H, 进入步骤 (1)。

(1) 关闭 XV-1/3, 打开卸压管线为 V2。

(2) 当 PIS-01 为 LLL 时, 开 XV-2, 将 V2 中的飞灰输送到 V1 下一个设备。

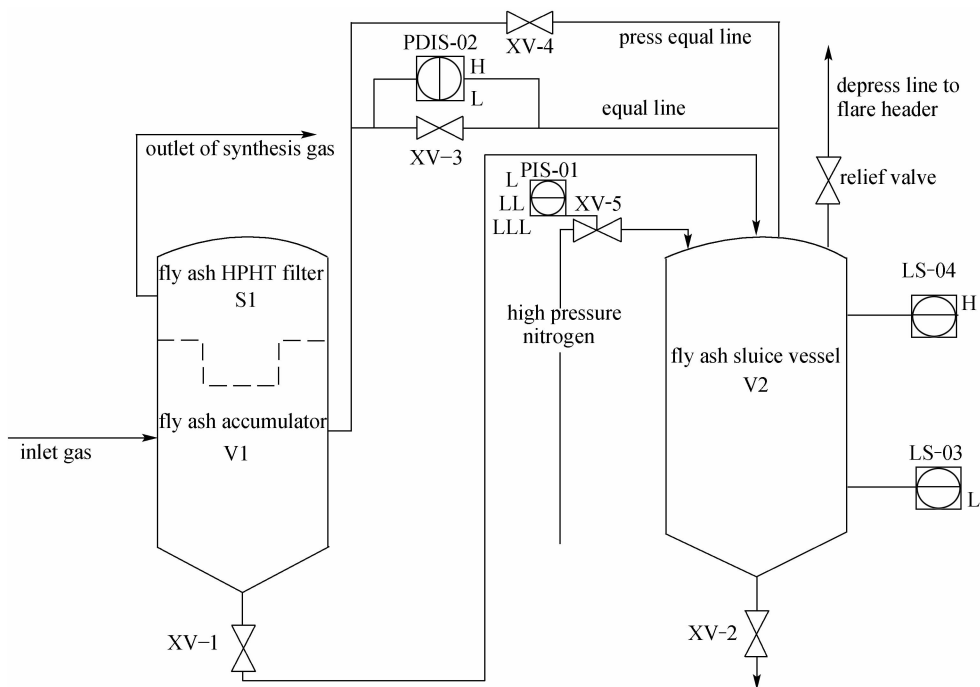


图 1 飞灰脱除简图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of fly ash removal flow

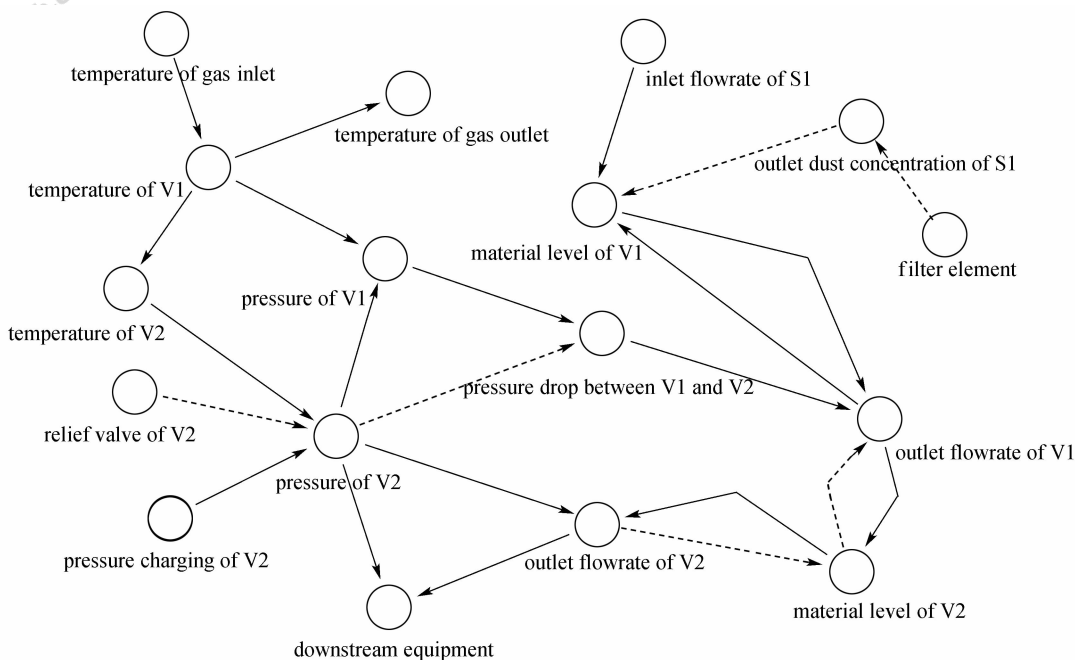


图 2 整体 SDG 模型
Fig. 2 Integral SDG model

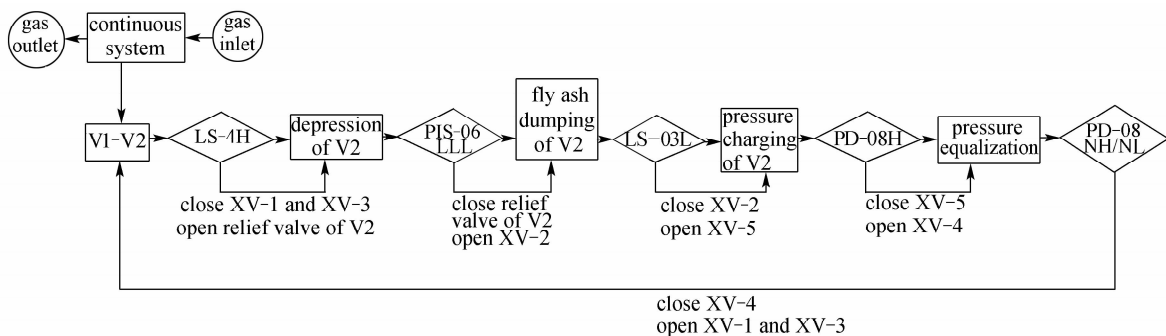


图 3 系统状态转移图
Fig. 3 Transform diagram of system status

(3) 当 LS-03 为 L 时, 关 XV-2, 开 XV-5, 用高压氮气为 V2 充压。

(4) 当 PDIS-02 为 H 时 (即 V2 压力稍高于 V1), 关 XV-5, 打开 XV-4, 为 V2、V1 均压。

(5) 当 PDSH-02 为 NH, PDSL-02 为 NL 时 (此时 V2 与 V1 压力基本相同), 开 XV-1, 10 s 后开 XV-3, 系统回到初始状态。

2.2 飞灰脱除过程动态 SDG 建模

(1) 将整个间歇过程在各个状态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。整体 SDG 模型如图 2 所示。

(2) 将飞灰脱除过程分解成 V1 卸灰、V2 卸压、V2 卸灰、V2 充压和均压过程, 并按步骤建立系统状态顺序图和系统状态列表。系统

状态转移图如图 3 所示, 间歇过程系统状态如表 1 所示。

(3) 建立关联链表, 将阀门信息 (含人工误操作)、设备失效与整体 SDG 中的相应节点关联起来。间歇过程变量关联关系如表 2 所示。

2.3 HAZOP 推理示例 (以阀门 XV-1 误开为例)

(1) V2 卸压时阀门 XV-1 误开
V2 压力偏低 → V1 压力偏低 → 不利后果 (V1 罐进气量增大、出气量减小, 滤芯效率降低, V1 物位增长缓慢等)。

产生严重后果, 间歇过程无法继续。
(2) V2 卸灰时阀门 XV-1 误开
V2 压力偏高 → 下游设备压力偏高 → 不利后果 (由下游设备的 SDG 建模来填写)。

表 1 间歇过程系统状态列表

Table 1 List of system status about batch process

| Step | XV-1 | XV-5 | XV-2 | XV-3 | XV-4 | V2 pressure relief valve | Transition conditions |
|-------------------------|------|------|------|------|------|--------------------------|-----------------------|
| fly ash dumping of V1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | LS-04 H |
| depression of V2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | PIS-01 LLL |
| fly ash dumping of V2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | LS-03 L |
| pressure charging of V2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | PD-02 H |
| pressure equalization | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | PD-02 NH NL |

表 2 间歇过程变量关联关系列表

Table 2 List of variable's associated relations about batch process

| Item | Associated relation |
|------------------------------|--|
| XV-1 | outlet flowrate of V1 |
| XV-2 | outlet flowrate of V2 |
| XV-3 | pressure drop between V1 and V2 set to 0 |
| XV-4 | pressure drop between V1 and V2 set to 0 |
| XV-5 | pressure of V2 increase |
| relief valve of V2 | pressure of V2 decrease |
| efficiency of filter element | filter element |
| inlet leakage | inlet flowrate decrease |
| leakage of V1 | material level of V1 decrease |

V2 压力偏高→V2 出口流量偏高→下游设备入口流量偏高→不利后果（由下游设备的 SDG 建模来填写）。

V1 压力偏低→不利后果（V1 罐进气量增大、出气量减小，滤芯效率降低，V1 物位增长缓慢等）。

产生严重后果，间歇过程无法继续。

(3) V2 充压时阀门 XV-1 误开

V1 压力偏低→不利后果（V1 罐进气量增大、出气量减小，滤芯效率降低，V1 物位增长缓慢等）。

产生严重后果，间歇过程无法继续。

(4) 均压时阀门 XV-1 误开

V1V2 压差偏大→V1 出口流量偏大→V2 物位偏高。

未产生严重后果，系统进入下一步骤 V1 卸灰过程。

V1V2 压差正常，V1 出口流量正常。

V2 物位偏高（这里要说明一下，由于控制系统的作用，所以 V2 物位并非物理量数值上的偏高，而是在单位时间内总量累积上的偏高）→未产生严重后果，系统进入下一步骤 V2 卸压过程。

V2 物位偏高→未产生严重后果，系统进入下一步骤 V2 卸灰过程。

V2 物位偏高→V2 出口流量偏高→下游设备入口流量偏高→不利后果（由下游设备的 SDG 建模来填写）。

若产生严重后果，间歇过程无法继续；若下游设备未产生严重后果，间歇过程继续，并且 V2 物位偏高的偏差被修正。

3 结 论

可以看出，以上的建模方式能够较好地解决如何对间歇过程进行 SDG 建模的问题，同时解决了连续过程和间歇过程的关联建模问题。建模思路相对清晰，条理步骤明确，推理过程简洁无冲突，能够在较大程度上满足化工 HAZOP 的需求。

目前基于 Petri 网的间歇过程建模都是针对正常运行的系统建立的，也能够很好地描述正常系统的行为，但面对化工过程中纷繁复杂的故障源，模型在故障条件下的运行逻辑就不能够得到保证。而本文所提出的理论是针对故障和误操作的机理模型，在简化 Petri 建模过程的基础上，极大地扩展了故障和危险的覆盖面，而且完全能够满足多偏差传播、偏差在多步骤间传递等要求，同时还解决了连续系统和间歇系统间偏差传递的问题，让包含间歇过程的大化工过程的计算机辅助 HAZOP 建模成为一个有机的整体。

目前国内涉及化工过程开停车的计算机辅助 HAZOP 分析的研究还比较少，本文提出的建模理论同样可以应用于化工过程开停车的动态 SDG 建模，并具有实际应用价值。

References

- [1] Liu Yuhui (刘宇慧), Xia Tao (夏涛), Zhang Beike (张贝克), Wu Chongguang (吴重光). A method of unit

- modeling oriented HAZOP analysis based on SDG. *Computer Simulation* (计算机仿真), 2004, **21** (12): 193-195
- [2] Wu Chongguang (吴重光), Xia Tao (夏涛), Zhang Beike (张贝 克). The qualitative simulation based on deep knowledge model of signed directed graph. *China-Simulation* (系统仿真学报), 2003, **15** (10): 1351-1355
- [3] Yang Fan (杨帆), Xiao Deyun (萧德云). Review of SDG modeling and its application. *Journal of Control Theory and Applications* (控制理论与应用), 2005, **22** (5): 767-774
- [4] Li Anfeng (李安峰), Xia Tao (夏涛), Zhang Beike (张贝 克), Zhang Zhaoqian (张钊谦), Wu Chongguang (吴重光). Computer aided HAZOP analysis based on SDG. *China-Simulation* (系统仿真学报), 2003, **15** (10): 1394-1397
- [5] Srinivasan R, Venkatasubramanian V. Automating HAZOP analysis of batch chemical plants (I): The knowledge representation framework. *Computers and Chemical Engineering*, 1998, **22** (9): 1345-1356
- [6] Zhao J, Viswanathan S, Venkatasubramanian V. Industrial applications of operating procedure synthesis and process hazards analysis for batch plants. *Computer Aided Chem. Eng.*, 2000, **8**: 787-792
- [7] Srinivasan R, Venkatasubramanian V. Automating HAZOP analysis of batch chemical plants (II): Algorithms and application. *Computers and Chemical Engineering*, 1998, **22** (9): 1357-1370
- [8] Wang Yifeng, Wu Jeryu, Chang Chueitin. Automatic hazard analysis of batch operations with Petri nets. *Reliability Engineering and System Safety*, 2002 (76): 91-104
- [9] Wang Yifeng, Chang Chueitin. A hierarchical approach to construct Petri nets for modeling the fault propagation mechanisms in sequential operations. *Computers and Chemical Engineering*, 2003 (27): 259-280
- [10] Bartolozzi V, Castiglione L, Picciotto A, Galluzzo M. Qualitative models of equipment units and their use in automatic HAZOP analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 2000 (70): 49-57
- [11] Holger Graf, Henner Schmidt-Traub. An integrated approach to early process hazard identification of continuous and batch plants with statechart modeling and simulation. *Computers and Chemical Engineering*, 2001 (25): 61-72
- [12] Mushtaq F, Chung P W H. A systematic Hazop procedure for batch processes, and its application to pipeless plants. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2000 (3): 41-48
- [13] Venkatasubramanian V, Zhao J, Viswanathan S. Intelligent system for HAZOP analysis of complex process plants. *Computers and Chemical Engineering*, 2000, **24**: 2291-2302
- [14] Zhang Beike (张贝 克), Wu Chongguang (吴重光). Novel qualitative simulation technology based on SDG for hazard analysis. *China-Simulation* (系统仿真学报), 2005, **17** (6): 1339-1342