

SDG 故障诊断模型的检验和验证

吴重光¹ 张卫华¹ 夏迎春¹ 纳永良¹ 王春利² 姜巍巍² 李传坤³

(1. 北京化工大学 信息科学与技术学院, 北京 100029; 2. 中国石油化工股份有限公司 青岛安全工程研究院, 山东 青岛 266071; 3. 青岛科技大学 化工学院, 山东 青岛 266042)

摘要: 将定量模型检验和验证的思想应用于符号有向图(SG 或 SDG)定性故障诊断模型, 以使其达到较高的完备性和分辨率。基于 SDG-HAZOP 平台, 提出了针对 SDG 定性模型检验和验证的非正式检验、静态检查、动态试验和诊断结果半定量风险分析的 4 个关键步骤, 给出了静态检查中的操作点非正常原因可达性检验和不利后果可达性检验步骤的具体内容。以加热炉 SDG 故障诊断模型为例, 验证了上述步骤的有效性。

关键词: 符号有向图; 检验; 验证; 模型; 故障诊断

中图分类号: TP391.9

引言

符号有向图(Signed Directed Graph, SDG), 是一种由节点和节点之间有方向的支路构成的网络图, 是定性代数方程组的一种图论表达形式^[1]。SDG 具有揭示潜在危险以及故障在系统中传播规律的特殊作用。随着计算机技术和自动控制技术的突飞猛进, 近年来 SDG 在化学工业, 特别是在安全评价领域中的应用取得了重大进展^[2-4]。

在实际应用中, SDG 模型的质量非常重要, 因为低水平的模型会给出实际过程完全不可能出现的结论, 甚至是完全错误的结论。所以, 应对 SDG 模型进行尽可能严格的检验和验证(Verification & Validation, V&V)才能投入试验性应用, 并且在应用中还需进一步 V&V。数学模型的 V&V 技术目前已经扩展到需要数学模型的多种研究、应用与工业领域, 成为国际标准所规范的系统化技术^[5-10]。“检验”涉及的内容对于数学模型而言, 是有关数学模型的数值精度评价问题。它能确定一个数学模型的执行精度, 代表了开发者对模型的概念描述和模型求解的过程。“验证”所涉及的内容是有关物理模型的精度评价问题, 或者说有关计算机仿真结果与

经验(实测)数据相比较的精度评价问题, 是确定一个数学模型准确表达实际“世界”的程度的过程。

目前, 大多数 SDG 方面的研究集中在如何解决危险识别和故障诊断方面, 而关于如何验证定性 SDG 模型的正确性和模型自身的质量问题的文献较少。因此, 针对 SDG 故障诊断模型开展 V&V 研究, 已经成为一个重要而紧迫的课题。本文将定量模型的 V&V 思想应用于定性 SDG 模型中, 提出了具体应用步骤, 并通过加热炉实例分析了这些步骤的有效性。

1 SDG 故障诊断模型检验和验证的步骤

通过对 SDG 的深入研究, 参照定量数学模型的 V&V 方法体系^[11-12], 提出如下的基于 SDG 定性数学模型的 V&V 步骤。

步骤 1 SDG 故障诊断模型非正式检验: (1) 工艺原理审查; (2) 基于经验的审查; (3) SDG 模型简化。

步骤 2 SDG 故障诊断模型静态检查: (1) 因果关系对检查; (2) 影响方程合理性检查; (3) 基于 SDG-HAZOP 的 SDG 故障诊断模型检验: ① 操作点可达性检验; ② 不利后果(故障)可达性检验; ③ 节点的剧情关联特性检验; ④ 可观测节点优化配置检验。

步骤 3 SDG 故障诊断模型动态试验: (1) 定性影响关系检验; (2) 因果影响定量化灵敏度分析; (3) 偏离阈值的设定和试验; (4) 节点偏离时序测试; (5)

收稿日期: 2009-01-05

基金项目: 国家“863”计划(2003AA412310)

第一作者: 男, 1945 年生, 教授

* 通讯联系人

E-mail: wucg169@163.com

故障诊断案例试验。

步骤4 SDG 故障诊断结果半定量风险分析:

- (1) 基于危险指数的“剧情”不利后果严重度分析;
- (2) 基于 IEC-61508-SIL 的“子剧情”风险概率分析;
- (3) 基于 HAZOP-LOPA 的“全剧情”风险概率分析。

上述步骤中,SDG 故障诊断模型的静态检查(步骤2)最为关键,因为它涉及到模型的全面检查。所以,下面就该步骤进行详细介绍。

2 SDG 故障诊断模型静态检查

SDG 故障诊断模型静态检查的主要目的是检验 SDG 模型结构是否合理。SDG 模型结构合理性的内容包括:节点选定是否合理;因果关系描述是否合理;通过影响方程的数学推演判断 SDG 模型结构的合理性;经 SDG 推理得到相关危险传播的路径后,从推理结果分析 SDG 模型能否达到设计意图等。

2.1 因果关系对检查

通过逐一检验 SDG 模型中的因果关系对,判断所有表达的因果关系是否符合实际。当无法离线判断时,可以采用仿真计算试验,有条件时还可以在线试验,但必须确保不干扰正常生产。检查过程中最好进行非线性特性试验,探明因果关系中是存在非线性影响,是何种非线性影响关系。

2.2 影响方程合理性检查

SDG 模型可以直接映射为影响方程,代数方程组或微分方程也可以转化为定性影响方程,因此可以运用相关的数学方法检查影响方程、代数方程或微分方程的结构合理性,从而推论 SDG 模型结构的合理性。例如定量微分方程可以通过求偏导转化为定性影响方程,逐一检查偏导的正确性,可以保证影响方程的正确性。

2.3 基于 SDG-HAZOP 的 SDG 故障诊断模型检验

SDG-HAZOP 平台是本课题组所开发的基于 SDG 的 HAZOP(Hazard and Operability Study,危险与可操作性分析)自动分析软件系统。SDG 故障诊断所用模型与 SDG HAZOP 分析所用模型本质上是一致的,只是二者推理方向不同,故可采用 SDG-HAZOP 平台对 SDG 故障诊断模型进行检验。由于 SDG 模型所能表达的潜在“危险剧情”可能是天文数字,靠人工检查是有限的,不完备的,甚至是无能为力的。特别是在复杂 SDG 模型的检查中,人工检查会出现大量失误。因此,采用计算机超高速推理

的 SDG-HAZOP 平台,是实施 SDG 模型检验的理想手段。运用 SDG-HAZOP 平台检验 SDG 模型,实质上是检验 SDG 模型能否产生设计者预想的诊断结果。而 SDG-HAZOP 在判断危险传播路径时,不考虑偏离是否超越阈值,而是只要出现偏离就判断是否继续传播,因此可以探索到所有潜在的、可能的“相容通路”。这种推理机制能够保证检查的完备性。

采用 SDG-HAZOP 平台可以对 SDG 模型的静态特性进行以下几种检验。

(1) 操作点可达性检验

该步骤中,由计算机采用逆向推理在 SDG 模型中自动推理检验操作点的偏离。该步骤的目的在于检验 SDG 模型对误操作的识别能力。

(2) 不利后果(故障)可达性检验

该步骤中,由计算机采用正向推理在 SDG 模型中自动推理检验后果是否发生。该步骤的目的在于检验 SDG 模型对故障后果的识别能力。

(3) 节点的剧情关联特性检验

确切的定义应当是中间过程变量节点的危险剧情关联特性检验,即检验各中间过程变量节点可能有多少危险剧情通过。该步骤的目的在于选择最佳 SDG 故障诊断的推理起始点。

(4) 可观测节点优化配置检验

凡是具有强危险剧情关联的中间节点应当设定为可观测节点。采用 SDG 方法进行故障诊断,只有首先解决可观测节点的优化配置问题,才有可能从根本上保证 SDG 故障诊断的完备性和准确性。

在上述的 SDG 模型静态特性检验步骤中,操作点可达性检验和不利后果(故障)可达性检验最为重要,下面将分别单独介绍。

3 SDG 故障诊断模型的操作点和不利后果可达性检验

3.1 SDG 故障诊断模型的操作点可达性检验

SDG 故障诊断模型的操作点可达性检验,依据国际标准 IEC 61882 “危险与可操作性分析(HAZOP 分析)应用指南”^[13],基于 HAZOP 方法,以误操作点为非正常原因(原始偏离点),从 SDG 模型的中间偏离点逆向推理搜索该操作点进行检验。推理搜索由 SDG-HAZOP 软件自动完成,具体步骤如下:

- (1) 将 SDG 故障诊断主干模型输入 SDG-HAZOP 软件平台;

(2)在 SDG 主干模型的所有与操作点相关的节点上直接附加标有“R”的(方块型)原因节点;

(3)将选择得到的所有关键过程变量节点设置为“原始拉偏点”;

(4)启动全流程自动推理;

(5)记录所有原始拉偏点、各拉偏点对应的误操作原因点;

(6)采用“可能性树”判断推理检验的结果是否合理,如果合理即完成检验;如果不合理,则找出 SDG 模型的缺陷,改进 SDG 模型,返回第(2)步骤。

SDG 故障诊断模型操作点可达性检验步骤如图 1 所示。

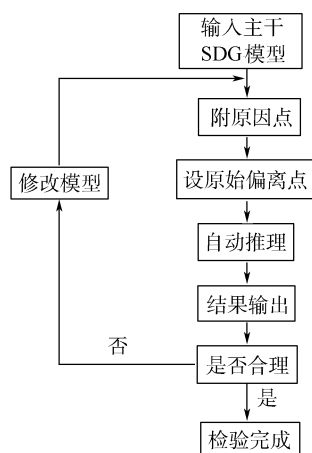


图 1 SDG 模型操作点非正常原因可达性检验步骤

Fig. 1 Operational point reachability verification step of abnormal reason in the SDG model

3.2 SDG 故障诊断模型不利后果可达性检验

SDG 故障诊断模型不利后果可达性检验依据国际标准 IEC-61882^[13],基于 HAZOP 方法,从 SDG 模型的中间偏离点正向推理搜索可能的不利后果(即故障点)进行检验。推理搜索采用 SDG-HAZOP 自动完成,具体步骤如下:

(1)将 SDG 故障诊断主干模型输入 SDG-HAZOP 软件平台;

(2)在 SDG 主干模型的所有与不利后果相关的节点上直接附加标有“C”的(方块型)不利后果节点;

(3)将选择得到的所有关键过程变量节点设置为“原始拉偏点”;

(4)启动全流程自动推理;

(5)记录所有原始拉偏点、各拉偏点对应的不利后果节点;

(6)采用“可能性树”判断推理检验的结果是否合理,如果合理即完成检验;如果不合理,则找出 SDG 模型的缺陷,改进 SDG 模型,返回第(2)步骤。

SDG 故障诊断模型不利后果可达性检验步骤如图 2 所示。

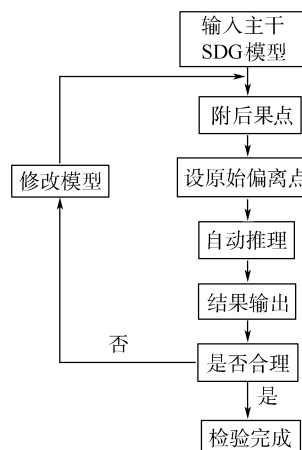


图 2 SDG 模型不利后果可达性检验步骤

Fig. 2 Operational point reachability verification step of adverse consequence the in SDG model

4 加热炉实例分析

4.1 加热炉 SDG 故障诊断模型的操作点可达性检验

将某加热炉的 SDG 故障诊断主干模型输入 SDG-HAZOP 软件平台,如图 3 所示。将选择得到的所有关键过程变量节点设置为“原始拉偏点”,共计设定 11 个节点,如图 4 所示。设置拉偏模式有两种,其一是正拉偏,其二是负拉偏。对于有些变量正拉偏或负拉偏不会导致故障,可以设定为“无”。例如炉膛压力 PI-01 为负压是正常状态,可以设定为“无”。此外,“正”与“负”是两个相对的状态(包括“正=偏高”,“负=偏低”,“正=先”,“负=后”,“正=早”,“负=晚”等),在 SDG-HAZOP 软件平台中通过填写“属性”加以定义。例如,对于温度变量,“正拉偏”可依据 SDG 模型所描述的具体状态,在输入 SDG 主干模型时就定义为“温度超高”、“温度定性增加”或“温度定量增加”等。通过这种预先填写“属性”的方法可以具体地表达绝大多数“偏离引导词”。而个别的特殊引导词,例如“否定”、“方向相反”,是与 SDG 模型结构相关的引导词,应当通过增加条件约束或改变 SDG 模型结构来定义。

启动全流程自动推理后,SDG-HAZOP 软件平

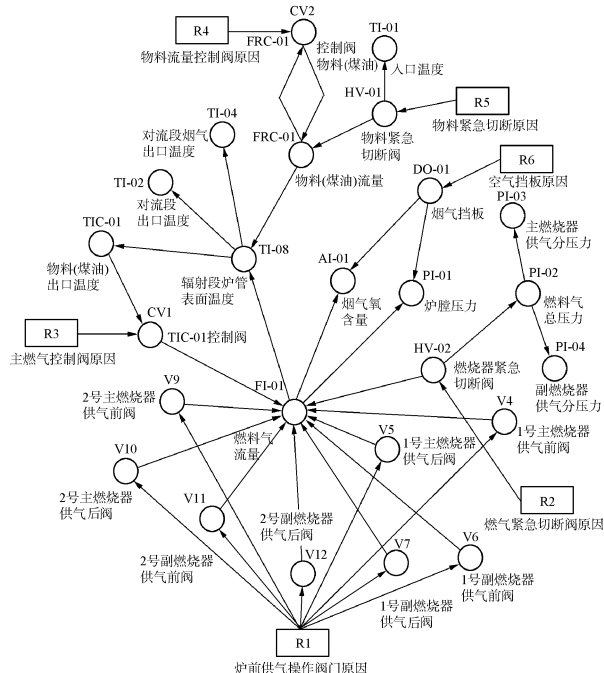


图3 标有“R”原因节点的加热炉 SDG 模型

Fig.3 SDG model of heating furnace with reason nodes marked by “R”

节点ID	位号	名称	状态	拉偏点	无正偏差	无负偏差	利
1	TIC-01	物料(煤油)出口温度	超高	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2	FRC-01	物料(煤油)流量	超高	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3	FI-01	燃料气流量	超低	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4	PI-01	炉膛压力	超高	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5	PI-02	燃料气总压力	超低	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	PI-03	主燃烧器供气分压力	超低	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
7	PI-04	副燃烧器供气分压力	超低	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
8	AI-01	烟气氧含量	超低	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
9	TI-01	物料(煤油)入口温度	超低	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
10	TI-02	对流段出口温度	超低	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
11	TI-03	辐射段炉管表面温度	超低	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
12	TI-04	对流段烟气出口温度	超低	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
13	CV1	TIC-01控制阀	超低	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
14	CV2	FRC-01控制阀	超低	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

图4 原始拉偏点设置

Fig.4 Settings of original deviation nodes in SDG the model

台自动记录全部推理结果,物料出口温度调节表 TIC-01 负偏离的结果如图 5 所示。图 5 中左部加深的变量是偏离节点,右部是自动推理得到的所有操作点。选中一个非正常原因节点,下部自动显示推理得到的危险传播通路(相容通路)。结果表中注明了拉偏类型(“正偏离”或“负偏离”)选定按钮。符号“(+)”表示正偏离,符号“(−)”表示负偏离,符号“>>”表示偏离传播方向。当文字解释为红色时,节点为正偏离状态。文字解释为蓝色时,节点为负偏离状态。

为了分析 SDG-HAZOP 的推理结果,可以将所有过程变量的正、负拉偏节点分别作为顶部事件,经

SDG-HAZOP 推理得到的所有操作点偏离导致的故障传播路径(相容通路)都会指向某一顶部事件,这样可以对应画出许多具有一个顶点的多叉树,此种树形图称为“可能性树”或“定性行为树”。图 6 给出了 TIC-01 正拉偏得到的“可能性树”。从图 6 可以看出,加热炉 SDG 故障诊断模型的操作点可达性是完全的,因为 TIC-01 正偏离可能涉及到的操作点,在可能性树中都能推理达到。对于加热炉而言,SDG 模型比较简单,结论直接凭经验和观察有可能得到。但是,当 SDG 模型复杂程度高时仅靠人工判断是不现实的,所以自动推理检验方法可以超高速找到所有独立的且完备的“可能性树”,其优势是十分明显的。



图5 负偏离时的推理结果

Fig.5 Reasoning results of TIC-01 having minus deviation

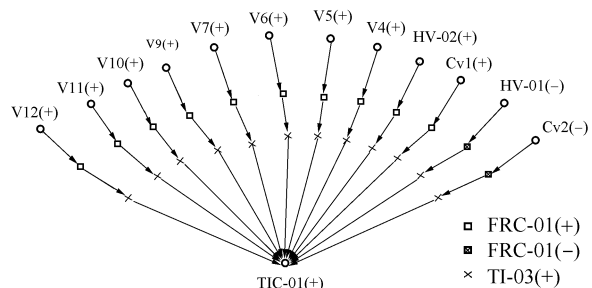


图6 推理结果“可能性树”

Fig.6 Probability tree of reasoning results

4.2 加热炉 SDG 故障诊断模型不利后果可达性检验

将 SDG 故障诊断主干模型输入 SDG-HAZOP 软件平台,并在 SDG 主干模型的所有与不利后果相关的节点上直接附加标有“C”的(方块型)不利后果节点,如图 7 所示。将选择得到的所有关键过程变量节点设置为“原始拉偏点”,共计 11 个节点,如图 4 所示。

启动全流程自动推理。SDG-HAZOP 软件平台

自动记录的燃料气流量表 FI-01 的正偏离结果如图 8 所示。经检验所有设定不利后果都有可达性,并且传播路径合理。

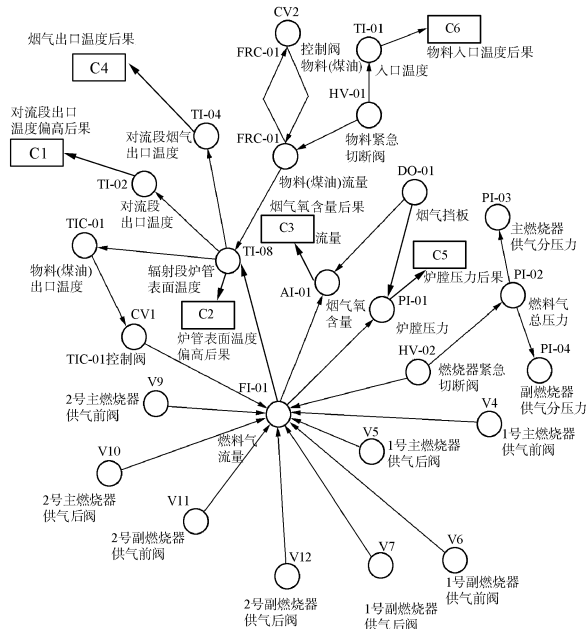


图 7 标有“C”不利后果节点的加热炉 SDG 模型

Fig. 7 SDG model of heating furnace with consequence node marked by “C”

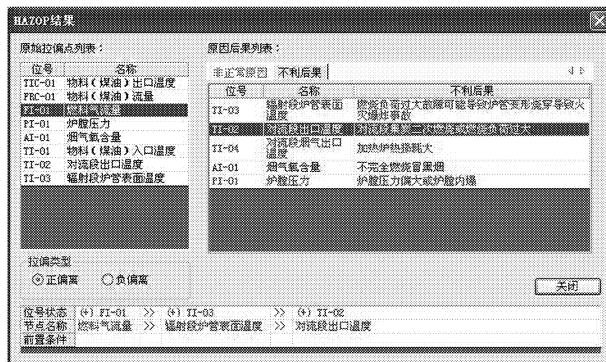


图 8 FI-01 正偏离时的推理结果

Fig. 8 Reasoning results of FI-01 having positive deviation

5 结论

在 SDG 故障诊断系统应用之前中引入 V&V, 对于确保诊断结果的正确性是十分必要的。静态检查中的操作点可达性检验和不利后果可达性检验, 是 SDG 故障诊断模型 V&V 的主要步骤。加热炉参数偏离实例证明, SDG-HAZOP 是实现 SDG 模型 V&V 过程中高速、自动运行的重要工具, 在 V&V 后能够较好地提高 SDG 模型信息的完备性和和分

辨率。

参考文献:

- [1] Iri M, Aoki K, O'shima E, et al. An algorithm for diagnosis of system failures in the chemical process[J]. Computers & Chemical Engineering, 1979, 3: 489 - 493.
- [2] 吴重光, 夏涛, 张贝. 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] Wu C G, Xia T, Zhang B K. The qualitative simulation based on deep knowledge model of signed directed graph [J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(10): 1351 - 1355. (in Chinese)
- [4] 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.
- [5] Cao W L, Wang B S, Ma L Y, et al. Fault diagnosis approach based on the integration of qualitative model and quantitative knowledge of signed directed graph[C] // Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, August 18 - 21, 2005, Guangzhou, China: IEEE, 2005: 2251 - 2256.
- [6] Harmelen F V, Aben M. Structure-preserving specification languages for knowledge-based systems[J]. International Journal of Human Computer Studies, 1996, 44 (2): 187 - 212.
- [7] Roache P J. Verification of codes and calculations[J]. AIAA Journal, 1998, 36(5): 696 - 702.
- [8] Nelson S, Pecheur C. Survey of NASA V&V processes/methods[R]. NASA ARC, 2001.
- [9] Al-Asaad H S. Lifetime validation of digital systems via fault modeling and test generation[D]. Lansing, USA: University of Michigan, 1998.
- [10] Jacklin S, Schumann J, Gupta P, et al. Verification, validation, and certification challenges for adaptive flight-critical control system software[C] // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, August 16 - 19, 2004, Providence, Rhode Island, USA: AIAA, 2004.
- [11] Rodriguez E A, Pepin J E, Riha D S, et al. Validation and verification of a penetration model for the design of a blast containment vessel part II: Model validation[C] // The 1st Non-Deterministic Approaches (NDA) Conference, The 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Struc-

- tures, Structural Dynamics, and Materials Conference, May 1 – 4, 2006, Newport, Rhode Island, USA: AIAA, 2006.
- [11] Oberkampf W L, Trucano T G, Hirsch C. Verification, validation, and predictive capability in computational engineering and physics[J]. Applied Mechanics Reviews, 2004, 57:345 – 384.
- [12] Schmitz W, Hoffman J, Sithole H, et al. Validation and verification of CFD computer codes and the pbmr air ingress model [C] // The Third International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, October 1 – 4, 2006, Johannesburg, South Africa: Proceedings HTR2006, 2006.
- [13] International Electrotechnical Commission. IEC 61882, Hazard and operability studies (HAZOP studies) Application guide[S]. Geneva: Switzerland, 2001.

Verification and validation of SDG fault diagnosis model

WU ChongGuang¹ ZHANG WeiHua² XIA YingChun² NA YongLiang²
WANG ChunLi² JIANG WeiWei² LI ChuanKun³

(1. College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

2. China Petroleum & Chemical Corporation Qingdao Safety Engineering Institute, Qingdao Shandong 266071;

3. College of Chemical Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao Shandong 266042, China)

Abstract: In order to achieve a better completeness and identification performance, the verification and validation (V&V) technique for qualitative models is applied to the signed graph (SG or SDG) quantitative fault diagnosis model. Based on the SDG-HAZOP platform, four key V&V steps are proposed: informal verification, static check, dynamic test, and semi-quantitative risk analysis of diagnosis results. Two steps in the static check procedure, operational point reachability verification of abnormal reason and adverse consequence, are described in detail. Finally, application of these two steps is demonstrated using a heating furnace as an example.

Key words: signed graph; verification; validation; model; fault diagnosis