Journal of System Simulation

Volume 30 | Issue 1 Article 38

1-2-2019

Application of PWA-Based Safety Diagnosis Method in CSTR System

Yuhong Wang
College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

Yang Pu
College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

Follow this and additional works at: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal

 Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Application of PWA-Based Safety Diagnosis Method in CSTR System

Abstract

Abstract: A safety diagnosis method based on piecewise affine (PWA) model is proposed for ensuring the safety of the petrochemical process. In the method, the petrochemical system is modeled in PWA form which can well describe the nonlinear and hybrid characteristic of the system. *Then a formal verification algorithm based on reachable analysis is used to get reachable sets of system states according to the established model. It can predict whether the system is in danger or not in advance so as to take the corresponding measures to ensure the reliability and safety of the system. The proposed method is applied to continuous stirred tank reactor (CSTR) system and* its effectiveness and practicability is demonstrated by simulation.

Keywords

PWA model, formal verification, safety diagnosis, CSTR

Recommended Citation

Wang Yuhong, YangPu. Application of PWA-Based Safety Diagnosis Method in CSTR System[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(1): 292-297.

This paper is available in Journal of System Simulation: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol30/iss1/38

第 30 卷第 1 期 系统仿真学报© Vol. 30 No. 1
2018 年 1 月 Journal of System Simulation Jan., 2018

基于 PWA 模型的安全诊断方法在 CSTR 系统中的应用

王宇红，杨璞
(中国石油大学(华东)信息与控制工程学院，山东 青岛 266580)

摘要：针对石油化工行业生产过程的安全性问题，提出了一种基于分段仿射(PWA)模型的安全诊断方法。该方法需要先建立石化系统的 PWA 模型，该类模型能够很好的描述石化系统的非线性特性和混杂特性；再采用基于可达性分析的形式验证算法，求取系统状态所有可能的运行轨迹，对系统在运行过程中是否发生危险进行预判，以便及时采取相应的措施，保证系统运行的可靠性和安全性。将该方法应用到连续搅拌反应釜 (CSTR)系统中，仿真结果验证了其有效性和实用性。

关键词：分段仿射模型；安全诊断；形式验证；连续搅拌反应釜
中图分类号：TP29 文献标识码：A 文章编号：1004-731X (2018) 01-0292-06
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201801038

Application of PWA-Based Safety Diagnosis Method in CSTR System

Wang Yuhong, YangPu
(College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract:A safety diagnosis method based on piecewise affine (PWA) model is proposed for ensuring the safety of the petrochemical process. In the method, the petrochemical system is modeled in PWA form which can well describe the nonlinear and hybrid characteristic of the system. *Then a formal verification algorithm based on reachable analysis is used to get reachable sets of system states according to the established model. It can predict whether the system is in danger or not in advance so as to take the corresponding measures to ensure the reliability and safety of the system. The proposed method is applied to continuous stirred tank reactor (CSTR) system and* its effectiveness and practicability is demonstrated by simulation.

Keywords: PWA model; formal verification; safety diagnosis; CSTR

引言

在石油化工生产过程中，使用的原料、辅料、中间产品和产品大都属于危险品，生产装置大多数处于高温、高压的运行状态，生产工艺连续性强、流程控制复杂，这使得其生产过程更加容易发生安全事故，事故危害性也更大，故对石化生产过程的安全性进行诊断是十分必要的。目前，基于故障树[1-2]和事件树[3]的安全诊断方法已经成功的应用于石化行业，但是，该类分析方法对于假设条件限制严格，且随着石化行业的不断发展，生产过程包含装置数量越来越多，规模越来越大，生产工艺也越来越复杂，导致建立的“树”过于庞大，给定性和定量分析都带来了极大的困难；基于贝叶斯网络[4]的安全诊断方法可以对具有不确定性的石化生产过程安全性进行诊断，但使用该方法需要知道确切的样本分布概率，这在石化生产过程中，往往是难以精确获得的。

收稿日期：2015-10-08 修回日期：2015-10-29；
基金项目：山东省自然科学基金(ZR2013FM035)；
作者简介：王宇红(1970-)，男，河北新乐，博士，教授，研究方向为混杂系统、化工自动化；杨璞(1989-)，男，河北涿州，硕士，研究方向为先进控制理论。

Published by Journal of System Simulation, 2018

Journal of System Simulation, Vol. 30 [2018], Iss. 1, Art. 38

本文将形式验证理论与安全诊断思想相结合，通过穷尽在给定条件下系统状态的演变轨迹，可以准确预测出系统运行过程中是否发生危险。我们首先介绍 PWA 模型，然后分别对基于向前和向后可达性分析的形式验证算法进行了详细的研究，最后，提出了一种基于 PWA 模型的安全诊断方法，并将该方法应用到 CSTR 系统中。

1 PWA 模型

石油化工装置往往具有非线性和混杂特性，PWA 模型能够很好的描述这类特性。它的特点是包含有限个连续变量动态子系统，随着系统状态的不断演化，系统根据切换律在子系统之间进行切换，其表达式为：

$$\begin{aligned}&x(k+1)=f_{PWA}\left(x(k),u(k)\right)=A_i x(k)+B_i u(k)+f_i\\&y(k)=C_i x(k)+D_i u(k)+g_i\\&\text{满足}\begin{bmatrix}x(k)\\u(k)\end{bmatrix}\in\Omega_i\quad i=1,\cdots,s\end{aligned}\tag{1}$$

其中，$k\geqslant 0$，$x\in R^{n_c}$ 是系统状态，$u\in R^{m_c}$ $y\in R^{p_c}$ 分别是系统的输入和输出，$\{\Omega_i\}_{i=1}^{s}\triangleq\left\{\begin{bmatrix}x\\u\end{bmatrix}: H_{ix}x+H_{iu}u\leqslant K_i\right\}, i=1,\cdots,s$ 是系统在状态与输入空间 R^{n+m} 划分的多面体集。

2 基于可达性分析的形式验证

基于可达性分析的形式验证是指系统状态从给定初始集出发，求取在给定时间内、给定输入作用下系统状态的可达集，通过对可达集进行分析，验证系统是否可能发生危险。它分为基于向前可达性分析和基于向后可达性分析的两种验证模式。下面先介绍几个定义：

定义 1 已知多面体集 $P=\left\{x\in\mathbb{R}^n\mid P^x x\leq P^c\right\}$，$P^x\in R^{n_p\times n}$，仿射映射函数 $f(z)=Az+b$，$z\in R^m, A\in R^{m_A\times m}, b\in R^{m_A}$，当 $m_A=n$ 时，定义 $P\circ f=\left\{z\in\mathbb{R}^m\middle| P^x f(z)\leqslant P^c\right\}$；当 $m=n$ 时，定义 $f\circ P=\left\{y\in\mathbb{R}^{m_A}:\exists x\in P, y=Ax+b\right\}$。

定义 2 已知多面体集 $P=\left\{p\in R^n\mid P^x p\leqslant P^c\right\}$ 和 $Q=\{q\in R^n\mid Q^x q\leqslant Q^c\}$，定义它们的闵可斯基和为 $P\oplus Q=\left\{p+q\in R^n\mid p\in P, q\in Q\right\}$。

定义 3 已知多面体集 $P=\left\{x\in R^n\mid P^x x\leqslant P^c\right\}$，它可以用顶点组合的形式等价表示为 $P=\left\{X\in R^n\mid x=\sum_{i=1}^{v_P}\alpha_i V_P^{(i)}, 0\leqslant\alpha_i\leqslant 1, \sum_{i=1}^{v_P}\alpha_i=1\right\}$，$V_P^{(i)}$ 代表 P 的第 i 个顶点，v_P 代表 P 的顶点总数。

2.1 基于向前可达性分析的形式验证

基于向前可达性分析的形式验证是指系统从给定的初始状态集出发，验证集合内所有状态演变轨迹是否满足系统的安全规范，即验证是否不可达不安全状态。针对 PWA 模型的向前可达性分析的形式验证算法如下所示：

已知系统的 PWA 模型如式(1)所示，初始状态集为 $X_0=\{x\in\mathbb{R}^n\mid H_{x_0}x\leqslant K_{x_0}\}$，$H_{x_0}\in\mathbb{R}^{n_x\times n}$，$K_{x_0}\in\mathbb{R}^{n_x\times 1}$，给定输入为 $U=\{u\in\mathbb{R}^n\mid H_u u\leqslant K_u\}$，$H_u\in\mathbb{R}^{n_u\times n}$，$K_u\in\mathbb{R}^{n_u\times 1}$，它们是多面体集，求取 X_0 与 PWA 模型分区 $\Omega_i, i=1,\cdots,s$ 的交集为 $X_0\cap\Omega_i=$，$\phi_i, i=1,\cdots,l$ 得到如下形式 PWA 模型为

$$\begin{aligned}&x(k+1)=f_{PWA}\left(x(k),u(k)\right)=A_i x(k)+B_i u(k)+f_i\\&y(k)=C_i x(k)+D_i u(k)+g_i\\&\text{满足}\begin{bmatrix}x(k)\\u(k)\end{bmatrix}\in\phi_i\quad i=1,\cdots,l\end{aligned}$$

对于每一个 ϕ_i，一步可达集可以表示为

$$\begin{aligned}&\mathrm{Re}\,ach(\phi_i)=\{x(k+1)\in\mathbb{R}^n\mid\exists x(0)\in\phi_i, u(0)\in U\\&s.t.\ \ x(k+1)=A_i x(k)+f_i+B_i u(k)\}=\\&\qquad\left\{X(k)+B_i u(k)\in\mathbb{R}^n\middle|\begin{matrix}X(k)\in X\circ\phi_i,\\u(k)\in U\end{matrix}\right\}=\\&\qquad(X\circ\phi_i)\oplus(B_i\circ U)\end{aligned}$$

如果将 ϕ_i 用顶点组合的形式表示为

$$\phi_i=\left\{x\in R^n\middle| x=\sum_{i=1}^{v_{\phi_i}}\alpha_i V_{\phi_i}^{(i)}, 0\leqslant\alpha_i\leqslant 1, \sum_{i=1}^{v_{\phi_i}}\alpha_i=1\right\},$$

将 U 用顶点组合的形式表示为

$$U=\left\{u\in R^n\middle| u=\sum_{i=1}^{v_U}\alpha_i V_U^{(i)}, 0\leqslant\alpha_i\leqslant 1, \sum_{i=1}^{v_U}\alpha_i=1\right\},$$

那么，$\mathrm{Re}\,ach(\phi_i)=(\{A_i V_{\phi_i}{}^1+f_i,\cdots,A_i V_{\phi_i}{}^{v_{\phi_i}}+f_i\})\oplus(\{B_i V_U{}^1,\cdots,B_i V_U{}^{v_U}\})$。依次对每一个 ϕ_i 求取一步可

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol30/iss1/38
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201801038

第 30 卷第 1 期 系统仿真学报 Vol. 30 No. 1
2018 年 1 月 Journal of System Simulation Jan., 2018

达集，则系统的一步可达集为 $\mathrm{Re}ach(X_0)=\bigcup_{i=1}^{l}\mathrm{Re}ach(\phi_i)$，以此类推，系统的 N 步可达集 $\mathrm{R}_N(X_0)$= 可通过 $\mathrm{R}_{i+1}(X_0)=\mathrm{Re}ach(\mathrm{R}_i(X_0))$, $\mathrm{R}_0(X_0)=X_0, i=0,\cdots,N-1$ 得到。假设不安全状态集为 X_f，要验证系统在有限步长 $N\leqslant N_{\max}$ 内，是否可达 X_f，其实只需要验证 $\mathrm{R}_N(X_0)$ 与 X_f 是否有交集，当 $\mathrm{R}_N(X_0)\cap X_f\neq\varnothing$ 时，说明系统可达不安全状态集 X_f，否则，不可达。当初始状态为具体点时，同理可得到验证结果。

2.2 基于向后可达性分析的形式验证

基于向后可达性分析的形式验证是指系统从已知的不安全状态集出发，在给定时间内，求取可达该集合的所有状态点，验证初始状态点是否包含在所求状态点中，即验证是否可达初始状态集。针对 PWA 模型的向后可达性分析的形式验证算法如下所示：

已知系统的 PWA 模型如式(1)所示，不安全状态集为 $X_f=\{x\in\mathbb{R}^n\,|\,H_f x\leqslant K_f\}$，$H_f\in\mathbb{R}^{n_x\times n}$，$K_f\in\mathbb{R}^{n_x\times 1}$，给定输入为 $U=\{u\in\mathbb{R}^n$，$H_u\in\mathbb{R}^{n_u\times n}$，$K_u\in\mathbb{R}^{n_u\times 1}\}$，它们是多面体集，求取 X_f 与 PWA 模型分区 $\Omega_i, i=1,\cdots,s$ 的交集为 $X_f\cap\Omega_i=\phi_i$, $i=1,\cdots,l$，得到如下形式 PWA 模型为

$$x(k+1)=f_{PWA}\left(x(k),u(k)\right)=A_i x(k)+B_i u(k)+f_i$$
$$y(k)=C_i x(k)+D_i u(k)+g_i$$

满足 $\begin{bmatrix}x(k)\\u(k)\end{bmatrix}\in\phi_i \quad i=1,\cdots,l$。

对于每一个 ϕ_i，一步可达集可以表示为

$$\mathrm{Re}ach(\phi_i)=$$
$$\{x(k)\in\mathbb{R}^n\,|\,\exists u(0)\in U \quad s.t. \quad x(k+1)=$$
$$A_i x(k)+f_i+B_i u(k)\in\phi_i\}=$$
$$\{x(k)\in\mathbb{R}^n\,|\,A_i x(k)=x(k+1)+(-B_i u(k)-f_i),$$
$$x(k+1)\in\phi_i, u(k)\in U\}=$$
$$(\phi_i\oplus(-g_i)\circ U)\circ A_i$$

依次对每一个 ϕ_i 求取一步可达集，则系统的一步可达集为 $\mathrm{Re}ach(X_f)=\bigcup_{i=1}^{l}\mathrm{Re}ach(\phi_i)$，以此类推，系统的 N 步可达集 $\mathrm{R}_N(X_0)$ 可通过 $\mathrm{R}_{i+1}(X_f)=\mathrm{Re}ach(\mathrm{R}_i(X_f))$, $\mathrm{R}_0(X_f)=X_0, i=0,\cdots,N-1$ 得到。假设初始状态集为 X_0，要验证系统在有限步长 $N\leqslant N_{\max}$ 内，是否可达 X_f，其实只需要验证 $\mathrm{R}_N(X_f)$ 与 X_0 是否有交集，当 $\mathrm{R}_N(X_f)\cap X_0\neq\varnothing$ 时，说明系统可达不安全状态集 X_f，否则，不可达。

3 基于 PWA 模型的安全诊断

将形式验证理论与安全诊断思想相结合，可以对系统运行状态的安全性进行预测。安全诊断的具体过程如下：

(1) 建立系统的 PWA 模型，根据系统的实际要求，定义系统状态的初始集为 X_0，它由 N_{X_0} 个集合组成；不安全集为 X_{unsafe}，它由 $N_{X_{unsafe}}$ 个集合组成。

(2) 对系统进行形式验证，在有限时间 $K\leqslant K_{\max}$ 内，验证初始集中的状态是否可达不安全集，为了减小形式验证所需的计算量和节约生产时间，当 $N_{X_0}\geqslant N_{X_{unsafe}}$ 时，采用基于向前可达性分析的形式验证算法；当 $N_{X_0}<N_{X_{unsafe}}$，采用基于向后可达性分析的形式验证算法。

(3) 若验证结果为不可达，则说明安全。

(4) 若验证结果为可达，则需要针对具体情况，验证具体初始状态点是否可达不安全集，若不可达，则说明安全；若可达，则说明可能发生危险，需要实时监控，以便及时采取措施使系统运行过程避开不安全集。

4 仿真实例

4.1 CSTR 的 PWA 模型

CSTR 是化工生产过程中常见的一种装置，其操作状况的好坏直接影响产品的质量和数量。由于它具有高度非线性、多操作变量和工作范围广的特性，采用简单的单一线性模型往往难以反映其真实工作状态，故本文采用 PWA 模型对 CSTR 系统进行建模。一个标准的两状态 CSTR 如图 1 所示。

Published by Journal of System Simulation, 2018

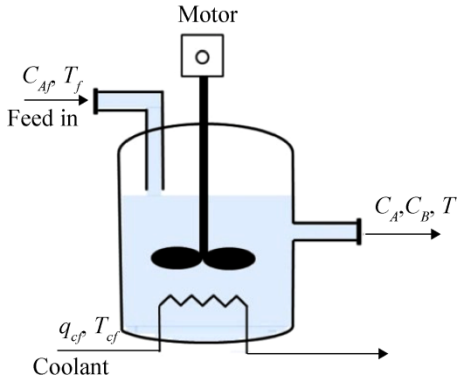

图 1 连续搅拌反应釜(CSTR)
Fig. 1 Diagram of continuous stirred tankreactor

假设反应釜中发生的化学反应为单一的不可逆的放热反应 $A \to B$，其中，C_A 为产物浓度，T 为反应釜内温度，q_c、T_{cf} 分别为冷却剂流量和温度。根据文献[7]取 C_A 和 T 分别为系统的状态变量 x_1, x_2，T_{cf} 为系统的输入 u，C_A 为系统的输出 y，则 CSTR 系统的机理模型如下：

$$\frac{dx_1}{dt} = -\theta x_1 \kappa(x_2) + q(x_{1f} - x_1)$$
$$\frac{dx_2}{dt} = \beta\theta x_1 \kappa(x_2) - (q+\delta)x_2 + \delta u + q x_{2f}$$
$$y = x_1$$

其中 $\kappa(x_2) = \exp(\frac{x_2}{1 + x_2/\lambda})$，变量的取值范围是 $x \in [0,1]\times[0,6]$，$x = [x_1, x_2]^T$；$u \in [-2,2]$。模型参数的具体值见表 1。

表 1 模型参数值
Tab. 1 Parameters of CSTR Model

序号	主要参数	参数值
1	λ	20
2	θ	0.072
3	q	1.0
4	β	8.0
5	δ	0.3
6	x_{1f}	1.0
7	x_{2f}	0

根据 CSTR 系统的机理模型，可以得到系统平衡点与输入的关系如图 2 所示。

从图 2 中可以看到，在不同的输入下，系统的平衡点与输入呈现明显的分段仿射非线性特征，并且在额定工作条件 $(u=0)$ 下，CSTR 系统有三个稳定工作点：$x_{s_1} = (0.856, 0.886)^T, x_{s_2} = (0.5528, 2.7517)^T$，$x_{s_3} = (0.2353, 4.7050)^T$，通过在稳定工作点处对系统进行线性化和离散化，可以建立 CSTR 系统的 PWA 模型为：

$$x(k+1) = \begin{cases} \begin{bmatrix} 0.8889 & -0.0123 \\ 0.1254 & 0.9751 \end{bmatrix} x(k) + \\ \begin{bmatrix} -0.0002 \\ 0.0296 \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} 0.1060 \\ -0.0852 \end{bmatrix}, x \in \Omega_1 \\ \begin{bmatrix} 0.8241 & -0.0340 \\ 0.6365 & 1.1460 \end{bmatrix} x(k) + \\ \begin{bmatrix} -0.0005 \\ 0.0322 \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} 0.1907 \\ -0.7537 \end{bmatrix}, x \in \Omega_2 \\ \begin{bmatrix} 0.6002 & -0.0463 \\ 2.4016 & 1.2430 \end{bmatrix} x(k) + \\ \begin{bmatrix} -0.0007 \\ 0.0338 \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} 0.3119 \\ -1.7083 \end{bmatrix}, x \in \Omega_3 \end{cases}$$
$$y(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} x(k)$$

其中，$\{\Omega_i\}_{i=1}^3 \triangleq \left\{ \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} : H_{ix} x + H_{iu} u \leqslant K_i \right\}, i = 1,2,3$，$H_{ix}, H_{iu}, K_i$，$i = 1,2,3$ 分别为 6×2 维、6×1 维、6×1 维的矩阵。

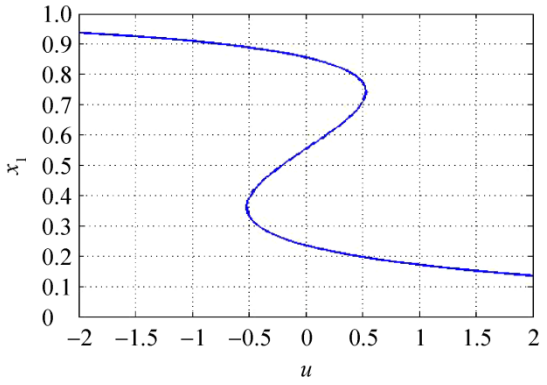

图 2 平衡点与输入的关系
Fig. 2 Relationship between the equilibrium point and the control input

4.2 仿真结果与分析

假设CSTR系统的初始状态集分别为X_{01}={(x_1, x_2)|0≤x_1≤0.3, 4≤x_2≤5}、X_{02}={(x_1, x_2)|0.1≤x_1≤0.3, 1≤x_2≤2}，X_{03}={(x_1, x_2)|0.9≤x_1≤1, 3≤x_2≤4}，

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol30/iss1/38
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201801038

危险状态集为 $X_{unsafe}=\{(x_1,x_2)|0.5\leqslant x_1\leqslant 0.6,\ 2.5\leqslant x_2\leqslant 3.5\}$。由于系统状态空间存在危险状态集，在运行过程中可能发生危险，故在系统运行前，需要先对系统进行安全诊断，检验系统在一次运行时间内(假设 $K_{max}=30$)，在给定输入 $U=\{u|-2\leqslant u\leqslant 2\}$下，系统初始状态集中的状态是否可达危险状态集。本例中初始状态集的数量大于危险状态集的数量，选择基于向后可达性分析的形式验证算法，验证结果如图 3 所示。

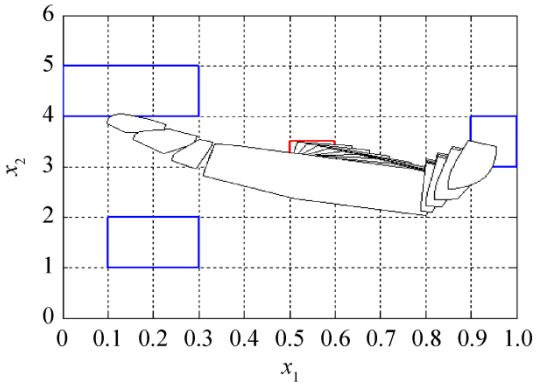

图 3 CSTR 系统的形式验证
Fig. 3 Verification of CSTR system

图 3 中，蓝色边框围成的区域代表初始状态集，红色边框围成的区域代表危险状态集，黑色边框围成的区域代表系统状态的可达集。可以看到，X_{02} 中的状态不可达 X_{unsafe}，X_{01} 和 X_{03} 中有状态可达 X_{unsafe}。若系统运行以 X_{02} 中的状态为初始点，则不需要采取措施避开危险状态集；若系统运行以 X_{01} 或 X_{03} 中的状态为初始点，则需要根据具体情况再进行验证。

假设系统运行的初始状态点分别为 x_{01}=[0.1 4.5]、x_{03}=[0.95 3.8]，它们分别属于 X_{01}、X_{03} 区域，需要分别对点 x_{01}、x_{03} 进行形式验证，验证结果如图 4 和图 5 所示。

图 4 中，x_{01} 可达危险状态集，故在系统运行过程中可能进入危险状态集，需要实时监控，以便及时采取措施使系统运行状态避开危险状态集；图 5 中，在有限时间内，x_{03} 不可达危险状态集，故在系统运行过程中仍然不需要采取措施。

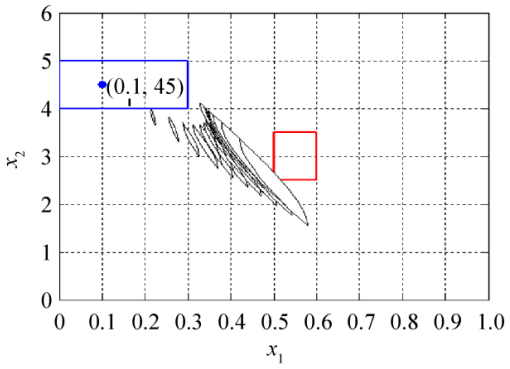

图 4 x_{01} 点的形式验证
Fig. 4 Verification of point x_{01}

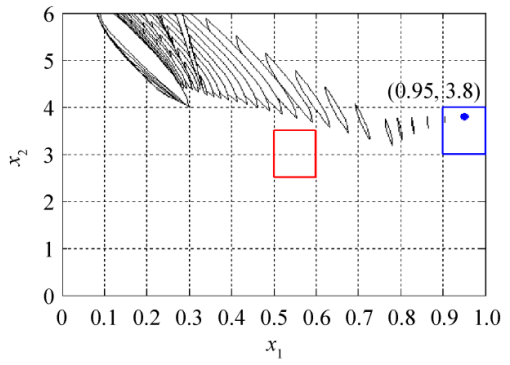

图 5 x_{03} 点的形式验证
Fig. 5 Verification of point x_{03}

为了对该安全诊断方法的准确性进行验证，选择 x_{03} 为系统初始状态点，采用模型预测控制方法，使其能够达到稳定的工作点 x_f=[0.235 3 4.705 0]。系统状态演化的相平面图如图 6 所示。

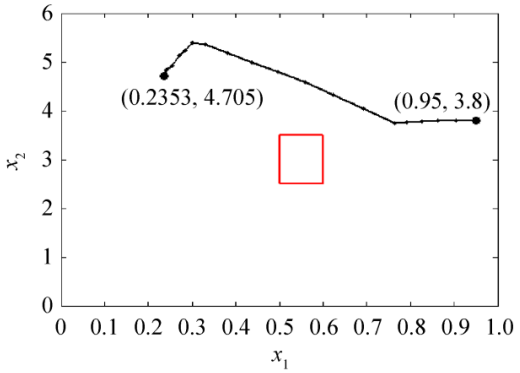

图 6 CSTR 系统状态演化的相平面图
Fig. 6 Phase plane diagram of state evolution of CSTR system

图 6 中，系统运行过程中没有进入不安全状态集，与安全诊断结果一致。

Journal of System Simulation, Vol. 30 [2018], Iss. 1, Art. 38

5 结论

本文分别对基于 PWA 模型的向前和向后可达性分析的形式验证算法进行了深入的研究，在该算法的基础上，提出了基于 PWA 模型的安全诊断方法。将该技术应用到 CSTR 系统中，仿真结果表明，该方法能够准确的验证系统初始状态集中的状态是否可达不安全状态集，这对于石化安全生产具有十分重要的意义。

参考文献:

[1] 魏选平, 卞树檀. 故障树分析法及其应用[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2004, 6(3): 43-45.
Wei Xuan-ping, Bian Shu-tan. Theory and Application of Fault Tree Analysis [J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2004, 6(3): 43-45.

[2] Cong G, Gao J, Yang J, et al. Risk Assessment Based on Fault Tree Analysis for Damaged Pipe Repair During Operation in Petrochemical Plant [J]. Transactions of Tianjin University (S1006-4982), 2013, 19(1): 70-78.

[3] 张钊谦, 夏涛, 张贝克, 等. 事件树建模及其在石化安全评估软件中的应用[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(10): 1374-1380.
Zhang Zhaoqian, Xia Tao, Zhang Beike, et al. Event Tree Modeling and Its Application in Petrochemical Hazard Assessing Software [J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(10): 1374-1380.

[4] 马欣, 刘兴华, 胡博, 等. 基于贝叶斯网络的常减压装置塔体安全性预测[J]. 化工装备技术, 2013, 34(1): 27-31.
Ma Xin, Liu Xinghua, Hu Bo, et al. Security Forecast of Crude Oil Unit Tower Body Based on Bayesian Networks[J]. Chemical Equipment Technology, 2013, 34(1): 27-31.

[5] 佟慧艳. 基于PWA模型的混杂系统优化控制[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(22): 5536-5538.
Tong Hui-yan. Predictive Control for Hybrid Systems Modeled in HYSDEL[J]. Science Technologyand Engineering, 2010, 10(22): 5536-5538.

[6] Bemporad A, Torrisi F D, Morari M. Discrete-time Hybrid Modeling and Verification of the Batch Evaporator Process Benchmark [J]. European Journal of Control (S0947-3580), 2001, 7(4): 382-399.

[7] Du J, Song C, Ping L. Application of Gap Metric to Model Bank Determination in Multilinear Model Approach [J]. Journal of Process Control (S0959-1524), 2009, 19(2): 231-240.

[8] 史运涛, 杨震安, 李志军, 等. 基于数据驱动的混杂系统建模与优化控制研究[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(11): 2709-2716.
Shi Yuntao, Yang Zhen'an, Li Zhijun, et al. Method of Hybrid System Modeling and Optimizing Control Based on Data-driven[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(11): 2709-2716.

[9] Zhan N, Wang S, Zhao H. Formal modeling, analysis and verification of hybrid systems [M]. Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2013: 207-281.

[10] 卜磊, 解定宝. 混成系统形式化验证[J]. 软件学报, 2014, 25(2): 219-233.
Bu L, Xie D B. Formal verification of hybrid system. Ruan Jian Xue Bao[J]. 2014, 25(2): 219-233.

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol30/iss1/38
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201801038