

化工过程安全运行技术研究进展

李秀喜 钱 宇

(华南理工大学化工学院, 广东 广州 510640)

摘要:结合华南理工大学过程系统工程研究中心在化工过程安全运行方向多年的研究成果,讨论了过程安全运行中的过程监测与故障诊断技术的研究进展。根据化工生产的特点,介绍了化工过程安全运行智能辅助支持系统的结构、功能以及其中的关键技术。最后讨论了基于网络的远程监测与诊断技术。

关键词:过程监测;故障诊断;安全运行;化工过程系统

中图分类号:TP277;TP39;TP182

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2004)S2-0105-06

Advances in safety operation technique of chemical processes

LI Xiu-xi, QIAN Yu

(School of Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Safety is an important problem in chemical engineering processes. The techniques of process monitoring and fault diagnosis were discussed firstly. Then, the structure, function, and some key techniques of intelligent aided support system for process safety operation were introduced according to the characteristic of chemical engineering. Lastly, a distributed framework of remote process monitoring and diagnosis system for chemical engineering based on network was introduced.

Key words: process monitoring; fault diagnosis; operating safety; chemical process systems

随着工业现代化进程的不断推进,过程工业的生产过程越来越复杂,计算机技术、信息技术、自动化等技术的应用越来越普遍。大部分石油化工过程采用了集散控制系统(DCS)、可编程控制器(PLC)等控制系统,有些实施了先进控制系统。当生产过程处于正常状态时,现场操作人员依靠控制系统使生产处于平稳和安全的状态。但是化工过程运行还存在其他多种非正常状态:过渡、异常、事故、灾难等。

一旦生产出现了非正常状态,仅依靠常规的控制系统的无能为力了,必须由现场操作人员根据对过程的了解和生产经验,做出及时的判断,并采取合理的措施,使生产过程重新回到正常状态。对于复杂的过程,常常难以及时做出正确的操作决策,甚至有可能被各种冗杂的数据和信号误导,做出错误的决策。20 世纪 60 年代

以后,故障诊断技术逐渐发展为一门科学。在随后的 30 多年中,针对石化行业生产运行的状态分析、故障诊断、安全预警和事故防范技术的研究与应用得到了普遍重视。

1 化工过程状态监测与故障诊断

化工过程运行的各种状态及所采取的操作策略如图 1 所示。

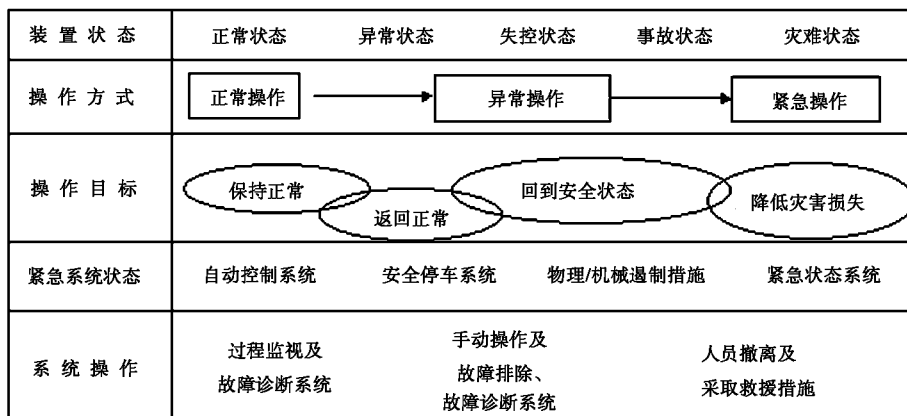


图 1 过程运行的各种状态

基金项目:国家自然科学基金资助项目(20376025);国家杰出青年基金资助项目(202225620);教育部跨世纪人才基金资助项目(322-B70670)

作者简介:李秀喜(1966-),男,硕士,副教授,从事化工过程系统工程研究工作,020-87114947, cexxli@scut.edu.cn;钱宇(1957-),男,博士,教授,博士生导师,从事化工过程系统工程研究工作,通讯联系人,020-87112046, ceyuqian@scut.edu.cn.

系统发生故障是指其运行行为偏离了正常状态或预定义的操作策略,如设备故障、传感器漂移、设定点改变、干扰等。过程监测与故障诊断的任务就是尽可能及时地发现并处理生产过程中出现的异常情况,使得生产回到正常的状态。一般说来,它包括如下 4 个过程:

①故障检测。通过观察过程变量的变化或用户定义的指标确定是否有故障发生。

②故障识别。分析与故障相关的观测变量,进一步确定是否有故障发生。

③故障诊断。对故障类型、位置、原因、大小、时间等进行分析 and 确定。

④过程恢复。消除故障的影响,使生产回到正常状态,或采取优化措施减少生产损失。

故障诊断技术发展至今,已提出了大量的方法。德国的 Frank 教授^[1]将故障诊断方法划分成 3 种:基于知识的方法、基于解析模型的方法、基于信号处理的方法。美国 Purdu 大学的 Venkatasubramanian 教授^[2-4]将故障诊断方法分为定量模型方法、定性模型方法和过程历史方法。还有的学者将故障诊断方法分为过程模型方法和数据驱动方法^[5]。

基于解析模型的方法是在有准确的对象数学模型的情况下,按一定的数学方法对被测信息进行处理诊断,它又可分为参数估计法、状态估计法和等价空间法。目前这种方法得到了深入的研究,但在实际情况中,往往难以获得对象的精确数学模型,从而大大限制了基于解析模型诊断方法的使用范围和效果。基于信号处理的方法通常是利用信号模型,如 FFT 变换方法、小波变换方法、谱分析方法、相关分析方法等,直接分析可测信号,提取诸如方差、幅值、频率等特征值,从而检测出故障。基于知识的方法是应用最为广泛的一种故障诊断方法,此类方法由于不需要对象的精确数学模型,而且具有某些智能特性,因此是一种很有生命力的方法。基于知识的故障诊断方法主要可以分为专家系统方法、模糊故障诊断方法、模式识别方法、神经网络方法以及定性的观测、仿真方法等,其中运用最广泛的是专家系统。

2 化工过程安全运行智能辅助支持系统

近几年来,在“信息化推动产业技术进步”政策的推动下,我国石化企业相继建立了数据平台。然而,平台产生的经济效益远没有得到充分发挥,原因在于没有将这些数据变成有价值的信息来指导生

产。因此,出现了“数据富裕,信息不足”的现象。另一方面,化工是一个传统工业,操作人员长期的生产实践积累了大量的经验。许多常规的经验被写进“操作手册”,对指导生产、培训新手起到了很好的作用,但还有许多非常规的但又很实用的经验,尤其是非正常工况时的处理经验,没有被很好地收集整理,随着人员的调离、退休而丢失。

针对化工过程的这些特点,华南理工大学过程系统工程研究中心提出了化工过程安全运行智能辅助支持系统的理论框架,对其关键技术进行了深入的研究,并依据这一理论框架开发出了化工过程安全运行智能辅助支持原型系统。系统的结构包含过程模型、多元统计分析、神经网络模型、专家系统以及协调机构等模块,如图 2 所示。系统的推理过程如图 3 所示。

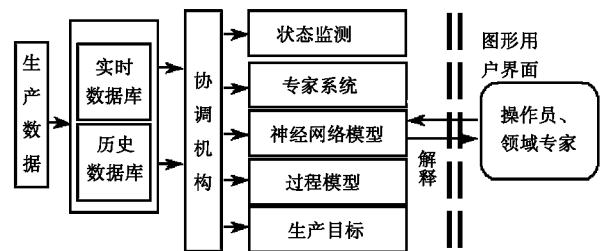


图 2 过程安全运行智能辅助支持系统结构

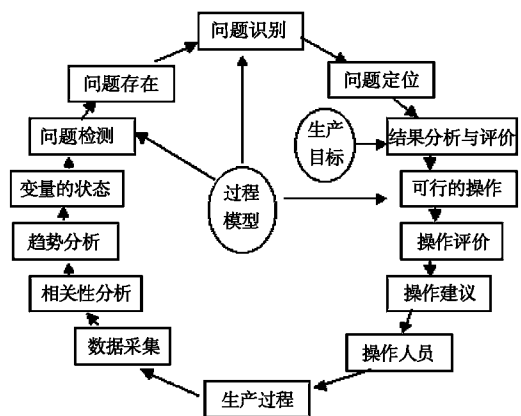


图 3 过程安全运行智能辅助支持系统的推理过程

过程安全运行智能辅助支持系统的核心技术是从生产数据到操作知识一系列的变换技术。生产过程的数据经过特征提取后得到过程趋势信息,即从数据空间映射到信息空间的过程。信息经过特征分类后获得过程的运行状态,即从信息空间映射到状态空间。状态空间经特征映射后获得知识,如图 4 所示。在这个过程中,涉及不同的数据库、知识库以

及一些非结构化和不确定性的信息。

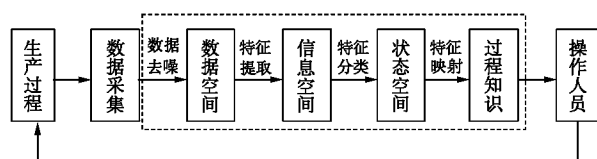


图4 从数据到操作知识的过程

2.1 特征提取

特征提取是状态识别的第一步,它的主要任务是对测量的变量信息进行分解,找出过程变化的趋势。理想状态下,人们希望通过分析获得干净(无噪声污染)、清晰的变化趋势曲线,并找出过程出现的异常现象。

近年来,基于多变量统计的主元分析(principal component analysis, PCA)^[6-7]、独立成分分析(independent component analysis, ICA)^[8],基于多尺度分解的小波分析(wavelet analysis)^[5,9]、小波包分析(wavelet packet analysis)等广泛应用于过程特征分析,在一些特定领域取得了很好的效果。然而,这些方法在化工过程运行状态识别方面仍然存在许多问题。我们在详细分析了这些方法的基础上,提出了非线性动态主元分析(non-linear dynamic PCA)和小波包主元分析(wavelet packet PCA)^[10],并将独立成分分析(ICA)应用于过程趋势分析^[11]。

2.2 特征分类

特征分类是状态识别的第二步,它的主要功能是将通过特征提取后的信息与特定的过程状态对应起来,从而实现从信息空间到状态空间的转换,它实际上是一个模式分类问题。通过这个步骤,识别出当前运行所处的状态(正常、异常、故障、事故、灾难等)。我们提出了多尺度自适应谐振理论^[12],并将其应用于过程故障诊断。

2.3 面向对象的专家知识库

为了有效地组织专家知识,我们采用面向对象的知识库结构^[13]。这种结构能有效地解决故障传播问题。在面向对象的故障诊断专家系统里,故障对象由基本信息、激活策略、规则、推理策略调用接口以及诊断结果输出等部分组成。

(1)基本信息。包括故障对象的标识(ID)、名称以及相关设备。

(2)激活策略。有2种方法可以激活一个故障对象:一种是根据设定的关键变量值来激活。对关键变量是实时监控的,一旦发现它异常,就立刻激活

相应的故障对象进行诊断。通过设定的关键前提进行模糊判断,或通过过程监测的结果来判断关键变量是否异常;另一种方法是由其他故障对象直接激活。直接激活策略是故障传播的一部分。

(3)规则。故障对象包含有完整的规则,用于进行推理诊断。规则存放在知识库中,在开始运行的时候从知识库读入故障对象中。

(4)推理策略调用接口。故障对象的推理过程是通过接口调用推理机来完成的。由于通过接口可以调用不同类型的推理机,因此每个对象的推理策略可以不同。

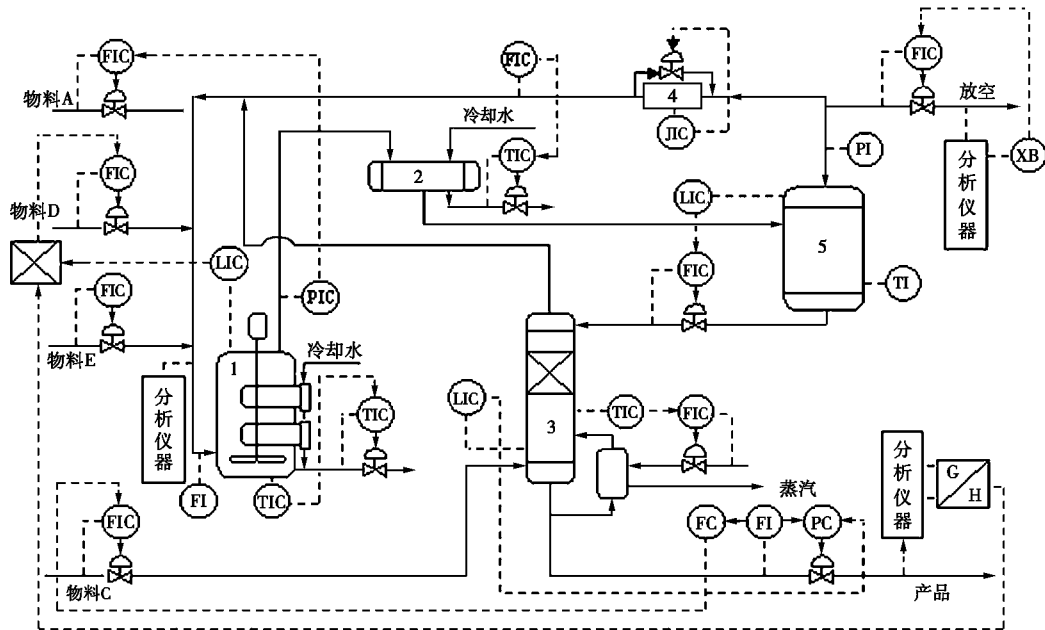
2.4 模糊诊断专家系统

本系统采用模糊知识表示和模糊推理策略^[14]。模糊知识表示使用置信度算法,即区间的上、下界和线性边缘函数斜率的绝对值等3个参数来计算模糊前提的置信度。模糊知识表达使得知识随着数据的变化是渐变而不是突变,比较符合工业实际情况,也避免了阈值设定偏差造成的推理失误。推理策略采用加权模糊推理,即通过引入权重因子来确定前提对结论的重要程度,据此计算出各个推理节点的置信度,并选择对根节点的置信度贡献最大的节点进行求证,从而加快搜索速度,提高搜索效率。

2.5 Tennessee Eastman 过程案例

根据上述的系统框架,我们开发出了化工过程安全运行智能辅助支持原型系统。该原型系统由离线组态环境、数据库和知识库、在线运行环境三大部分组成。离线组态环境主要完成系统关键变量的设定、数据源的确定、消噪算法的选取、过程监测模型的建立、报警/动作控制限的确定、各种监测画面大小与分布的设置、在线运行时各种关键参数的判定、知识库的维护等。数据库和知识库包括实时数据库、历史数据库、组态数据库、专家知识库、历史故障库等。在线运行环境主要根据离线组态环境确定组态数据,从组态数据库中读取模型数据,对实时数据库中的实时数据进行在线监测。若系统检测到故障,则进一步通过模糊专家系统进行诊断,最后给出操作建议。

Tennessee Eastman(TE)过程是美国 Eastman 化学公司的 Downs 和 Vogel 在 1993 年提出的一个基于实际工业过程的过程控制案例。TE 过程有 8 种组分、4 个反应、2 种产物、1 种副产物和 1 种惰性物。TE 过程包括 5 个主要的单元操作:反应器、冷凝器、闪蒸器、循环压缩机和汽提塔。TE 过程的流程如图 5 所示。



1—反应器;2—冷凝器;3—汽提塔;4—压缩机;5—闪蒸器;FIC—流量控制仪;LIC—液位控制仪;PIC—压力控制仪;TIC—温度控制仪;FI—流量显示仪;PI—压力显示仪;TI—温度显示仪

图 5 Tennessee Eastman 过程流程图

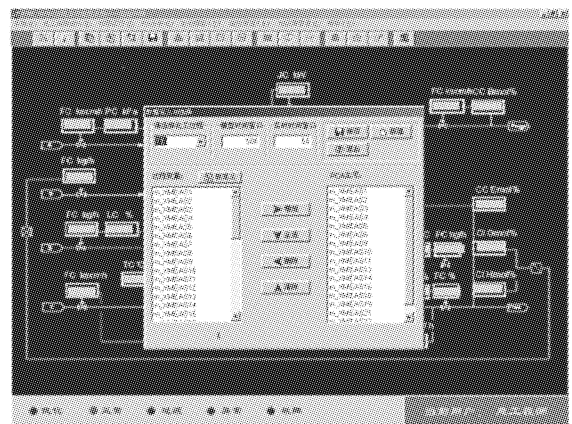
为了便于对故障诊断算法进行检验与评价,可以通过改变过程的设定点来进行,也可以通过改变负载扰动来检验故障诊断算法的性能。为了对装置进行保护,避免出现灾难性事故,TE 过程提供了一些特殊的操作约束条件,其中最高和最低停机极限是过程连锁策略的一部分,具体见表 1。

表 1 过程操作约束条件

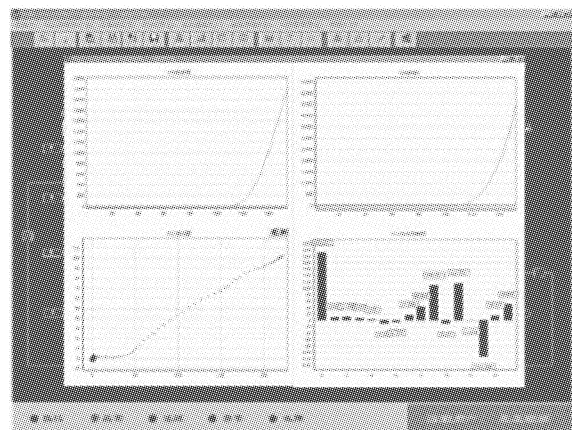
| 操作变量 | 低低限 (停车) | 低限 | 高限 | 高高限 (停车) |
|----------------------|-------------|-----------|------------|-------------|
| 反应器压力/MPa | | | 2.895 | 3.000 |
| 反应器液位/m ³ | 2.0 | 11.8(50%) | 21.3(100%) | 24.0 |
| 反应器温度/℃ | | | 150 | 175 |
| 闪蒸器液位/m ³ | 1.0 | 3.3(30%) | 9.0(100%) | 12.0 |
| 汽提塔液位/m ³ | 1.0 | 3.5(30%) | 6.6(60%) | 8.0 |

为了测试原型系统的性能,用C++ Builder 开发了 TE 过程仿真器^[15],其运行界面如图 6 所示,其中图(a)为干扰加载界面,图(b)为实时趋势显示界面。

首先,在原型系统的组态环境下建立过程正常运行的监测模型,并确定出控制限,其组态环境如图 7 所示。在组态环境中,实现监测与诊断对象选择、变量选择、监测模型建立、数据消噪算法选择等功能。在仿真器中加载干扰(B 组分恒定,A/C 组分比例扰动)后的监测结果如图 8 所示。



(a) 干扰加载界面



(b) 实时趋势显示界面

图 6 Tennessee Eastman 过程仿真器运行界面

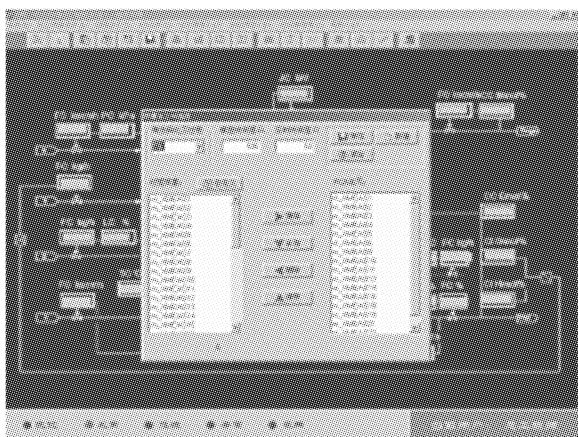


图 7 原型系统组态环境界面

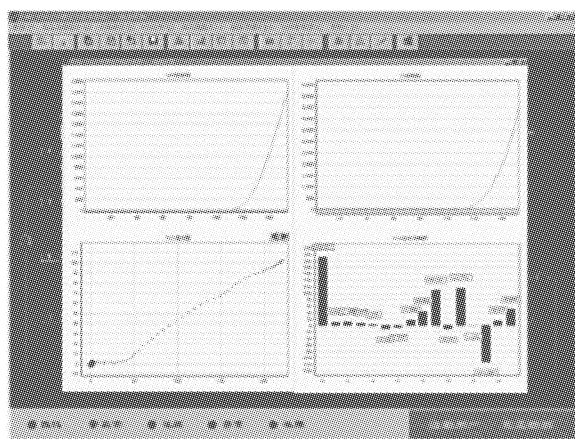


图 8 原型系统监测界面

3 化工过程远程监测与故障诊断系统

一般说来,石油化工过程有多套大型装置,如一个炼油厂含有多套常减压、催化裂化等装置,每套装置还配有各自的机电设备。这些装置、设备分布在炼油厂的各个生产车间。由此,一些学者提出了基于 Internet/Intranet 的远程监控系统、故障诊断系统框架结构。这些结构均为集中监控或集中诊断,当装置或设备数量不多时,这些系统的结构是合理的。但是,随着装置和设备数量的增加,或测量变量数目较多时,系统的实时性要求将得不到保证。鉴于此,

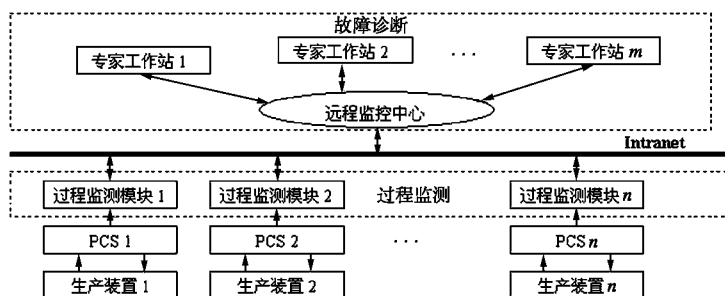


图 9 过程远程监测与故障诊断系统结构框架

我们提出“分布监测、集中诊断”的化工过程远程监测与故障诊断结构,其结构图如图 9 所示。

在本系统中,过程监测部分放在生产现场,即车间控制室来完成。若监测模块发现过程运行出现异常,则将监测结果送至远程监控中心进行诊断,再将诊断结果和操作建议返回给现场操作站。这样大大减少了在网上传输的数据量,以满足实时性要求。

在远程监测与故障诊断系统中,由于有多个装置、设备对象和诊断专家。因此,为了使系统能高效、有序地工作,本系统中包含协调各项工作和信息的模块,即协调模块或协调层,其功能是处理各子系统之间的关系,使不同子系统之间进行必要的合作、协调和交流。这一层设计的关键是实现不同子系统之间的融合,达到柔性协作的目的。协调层的主要功能有:①负责解释并执行界面层传来的消息;②根据历史数据库及树型搜索规则,使子系统层各系统协调工作,完成用户所要求的功能;③不仅要满足现有系统层的需要,同时还能灵活满足系统层增加新子系统的需要;④使协调层与各子系统之间具有清晰的层次关系。

信息共享与交互是本系统的基础。对于大型石油化工厂来说,涉及的装置种类和数量繁多、数据量大。远程监控系统包含有各种数据库、模型库、知识库等。CORBA 中间件技术为各模块的信息共享提供了良好的支持^[16],各监测与诊断模块通过 CORBA 平台访问所需的信息资源,其结构如图 10 所示。

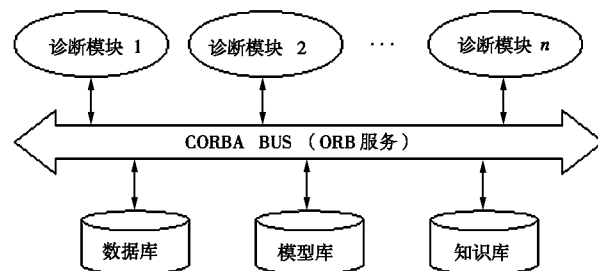


图 10 远程监控的信息共享结构图

与传统的设备监测与故障诊断系统相比,基于网络的远程监测与诊断具有如下的优势:①不再是独立分散的单个系统,而是将分布在全厂范围内的设备监控系统、诊断系统及研究者、使用者联系起来,形成集成的、能快速传递处理设备状况和诊断决策信息的系统,从而提高系统的整体诊断能力;②可以借助于网络技术,大范围地搜集故障样本,丰富诊断经验和知识,从而进一步提高系统的

智能;③生产运行的状况对于生产管理和计划调度来说是极为重要的信息,远程监控系统有利于对整个企业的设备运行状况信息进行集中管理,作为企业生产计划调度的依据,进而支持企业信息综合集成。

4 结语

结合过去几年的研究工作,全面分析了化工过程安全生产技术中的过程监测、故障诊断等技术的研究进展。介绍了化工安全运行智能辅助支持系统的功能、结构以及关键技术。虽然,安全生产得到了政府、企业、研究机构的高度重视,有了许多的研究成果和工业应用,但这一领域还有以下问题没有得到解决:①过程运行故障传播模型化问题。化工过程的故障往往是相互关联的,一旦发生某种故障,往往会引起系统的相关设备或上下游工艺状态发生变化,即过程的故障具有传播性。如何通过事故在过程系统中的扩散方式建立故障传播模型是一项非常有意义的工作。②运行状态的转移问题。化工过程的故障或事故有一个从正常、过渡、异常、故障到事故的变迁过程,研究这些状态的转移征兆对正确识别过程的运行状态非常重要。③提高故障诊断系统的准确率,尽量降低系统的误报、漏报,提高诊断系统的准确率是工业应用的关键问题。

参考文献

- [1] Frank P M. [J]. *European Journal of Control*, 1999, 5(2): 6 - 28.
- [2] Venkatasubramanian V, Rengaswamy R, Yin K. [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2003, 27(3): 293 - 311.
- [3] Venkatasubramanian V, Rengaswamy R, Yin K. [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2003, 27(3): 313 - 326.
- [4] Venkatasubramanian V, Rengaswamy R, Yin K. [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2003, 27(3): 327 - 346.
- [5] Wang X Z, Chen B H, Yang S H, *et al.* [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1999, 23(7): 945 - 954.
- [6] Bakshi B R. [J]. *AIChE J*, 1998, 44(7): 1596 - 1610.
- [7] Russell E L, Chang L H, Braatz R D. [J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2000, 51(1): 81 - 93.
- [8] Li R F, Wang X Z. [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2002, 26(3): 467 - 473.
- [9] Bakshi B R, Stephanopoulos G. [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1994, 18(4): 267 - 302.
- [10] Li X X, Qian Y, Wang J F. Process monitoring based on wavelet packet principal component analysis [A]. In: Kraslawski A, Turunen I. *European Symposium on Computer Aided Process Engineering - 13* [C]. Amsterdam: Elsevier, 2003. 455 - 460.
- [11] 姚志湘, 钱宇, 李秀喜. [J]. *高校化学工程学报*, 2004, 18(1): 73 - 78.
- [12] Li X X, Qian Y, Huang Q M, *et al.* Multi-scale ART2 for state identification of process operation systems [A]. In: Chen Bingzhen, Westerberg A W. *Computer-Aided Chemical Engineering-15* [C]. Amsterdam: Elsevier, 2004. 523 - 529.
- [13] 李秀喜, 钱宇, 温艳芹. [J]. *计算机与应用化学*, 2004, 21(1): 115 - 118.
- [14] Qian Yu, Li X X, Jiang Y R. [J]. *Expert Systems with Applications*, 2003, 24(4): 425 - 432.
- [15] 李秀喜, 钱宇, 江燕斌. [J]. *计算机工程*, 2003, 29(19): 60 - 62.
- [16] 钱宇, 李秀喜, 程华农, 等. [J]. *化工学报*, 2003, 54(4): 557 - 563.
- [1] Frank P M. [J]. *European Journal of Control*, 1999, 5(2): 6 - 28.
- (上接第 104 页)
- 入环境目标考虑,建立了过程经济和环境简捷多目标混合整数非线性规划模型。组合应用组合加权法和外逼近等式松弛法实现模型求解。应用 GAMS 能够有效地处理 MO-MINLP 问题。
- 参考文献
- [1] 郑世清. 基于模块化环境的多目标过程系统综合的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2001.
- [2] Shi Lei, Shi Hanchang, Qian Yi. Cleaner Production Framework Based on Multi-objective Evolutionary Algorithm [A]. in: *International Conference on Cleaner Production* [C]. Beijing, 2001. 281 - 289.
- [3] Cabezas H, Bare C J, Mallick S K. [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1997, (21): S305 - 310.
- [4] US EPA Green Engineering Workshop. *Pollution Prevention and Risk Reduction for Chemical Processes* [Z]. 1999.
- [5] Jia Xiaoping, Han Fangyu. Integrated Environmental Performance Assessment of Chemical Process by Means of Analytic Hierarchy Process [A]. in: *Proceedings of PSE ASIA 2002, International Symposium on Design, Operation and Control of Chemical Plants* [C]. Taipei, Taiwan, 2002. 177 - 182.
- [6] Kocis G R, Grossmann I E. [J]. *Ind Eng Chem Res*, 1987, 26: 1869 - 1880.
- [7] Yan Fu, Diwekar U M, Young D, *et al.* [J]. *Clean Products and Processes*, 2002, (2): 92 - 107. ■