

面向化工过程安全运行的 信息物理融合系统

许亮^{1*}, 刘兰英¹, 李秀喜²

(1. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006;
2. 华南理工大学化学与化工学院, 广东 广州 516040)

摘要:将信息物理融合系统(cyber-physical system, CPS)概念和感知控制论(perceptual control theory, PCT)相结合提出 PC-CPS 模型, 再与化工过程特点相结合, 构建具有环境监测、信息共享、故障预测、故障诊断和基于知识操作建议的化工过程安全运行信息物理融合系统模型。在相关研究基础上, 以环己烷无催化氧化过程 PCCPS 监控系统为例, 阐述模型的应用, 为进一步研究提供借鉴。化工过程安全运行物理信息融合系统的实现将提高化工过程连续、高效和安全运行。

关键词:物理信息融合系统; 化工过程; 环境监测; 故障预测; 故障诊断

中图分类号: TP235.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2016)03-0169-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.03.043

Cyber-physical system for safe operation of chemical processes

XU Liang^{1*}, LIU Lan-ying¹, LI Xu-xi²

(1. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. School of Chemistry and Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: APCCPS model is proposed by integrating Cyber-Physical System(CPS) concepts with characteristics of Perceptual Control Theory(PCT). It is then combined with the characteristics of chemical processes to establish a Cyber-Physical System for the safe operation of chemical processes based on the knowledge of operation suggestions, which has the ability of sensing surroundings, faults prediction and faults diagnosis. On the basis of relevant theoretical researches, an un-catalyzed oxidization CPS monitoring system for cyclohexane is analyzed and interpreted. The implementation of this CPS system will improve the continuity, efficiency and safety of the chemical processes.

Key words: cyber-physical system; chemical processes; sensing surroundings; fault prediction; fault diagnosis

随着现代化工发展,生产过程变得日益复杂,设备多样化,控制系统结构也日趋大型化、复杂化。如果各子系统或部件间缺乏实时沟通及协调,当化工过程系统任何一个子系统/部件发生故障,故障都可能传播至整个系统^[1]。而传统化工系统因自身缺乏适应性和主动性,对象间缺乏信息共享,所以不能满足当前化工过程安全运行需求。化工过程安全运行关键问题是能够通过有效信息提取、信息共享、故障预测与诊断等,其中涉及到复杂非线性行为,而传统解决方法不适应化工过程的随机性和不确定性。

信息物理融合系统(cyber-physical system, CPS)是建立在嵌入式系统、无线传感器网络、计算机网络、控制理论等基础上的下一代智能系统。CPS在物理实体中深度嵌入网络、计算、控制单元,实现计算进程与物理进程之间的交互,在网络空间中以远程、可靠、实时、安全、协作方式对物理实体进行操作,实现各层面通讯、计算、控制功能^[1]。基于

CPS的建模和方法,兼顾信息与物理空间、连续与离散,对象间信息共享,建立面向复杂化工过程安全运行的信息物理融合系统,可以预测故障并自主修复,提高化工过程安全性。

本文中提出 PC-CPS(perceptual control cyber-physical system)模型,结合化工安全运行特征,构建化工过程安全运行的信息物理融合系统,对化工生产过程进行实时监测、故障预测,并通过系统反馈回路,使计算进程能够对物理实体进行实时、精确、可靠控制,最大限度协调各子系统,从而达到数据融合、信息共享、预警预测、故障自愈,提高化工生产过程安全性。

1 相关研究工作

保证化工过程安全运行关键是异常工况预测和故障诊断。化工过程的预测和故障诊断理论主要有基于数据、模型和知识3类方法。基于数据的方法

收稿日期:2015-09-02

基金项目:国家自然科学基金(21176089,21376091)

作者简介:许亮(1971-),男,博士,高级工程师,研究方向为无线传感器网络、CPS以及化工过程故障诊断,通讯联系人,020-31140867,celian-gxu@gdut.edu.cn。

有主元分析(PCA)、独立元分析(ICA)、神经网络方法(ANN)、支持向量机(SVM)及改进算法^[2-5];基于模型的方法有向图(SDG)^[6];基于知识的方法有专家系统等^[7]。

CPS 是近年提出的新概念,但由于相关研究刚起步,至今对 CPS 研究大部分集中在系统模型、模型验证、网络技术等研究上。在系统模型方面,文献^[8]提出一种 CPS 组成结构,包括物理世界、感知系统、信息处理系统、控制系统及时间约束。王中杰等^[9]从 CPS 抽象结构、物理构成、运行方式和实现架构 4 个方面对 CPS 结构组成进行总结分析,将系统抽象为网络层和物理层,两层间进行信息传递,相互作用。文献^[10]提出利用带标记混合 Petri 网方法对 CPS 进行建模和验证研究,其基本思路是应用 LHPN 转换移除那些与模型描述无关的细节,降低模型复杂性,最终降低状态空间。文献^[11]利用自动机为建模工具,将信息物理融合体系结构中各个组件进行建模,最后运用模型检测工具 UPPAAL 对可达性、安全性、活性和时间约束进行验证。QoS、网络协议和拥塞控制是针对 CPS 相关网络技术的研究^[12-14]。

目前,化工安全运行的研究主要是利用传统控制系统的数据、模型与知识,针对系统运行过程中异常工况早期预警、故障诊断以及决策建议,而尚未有面向化工过程安全运行信息物理融合系统的研究成果。本文中面向化工过程安全运行实际应用,提出建立一个具有信息共享、故障预测和故障自愈的化工过程安全运行信息物理融合系统。

2 PCCPS 模型

CPS 实现计算嵌入物理过程,使“物”具有智能,能实时感知与控制物理过程。威廉·鲍威斯^[15]提出的感知控制论把感知控制过程分为强度、感觉、构型、转换、事件、关系、范畴、序列、程序、原则和系统概念 11 个层次。横向层次每一个模型实际就是一个控制系统,每一个模型控制系统都由输入函数(I)、比较函数(C)、输出函数(O)、基准信号(r)、被控量(p)、偏差(e)组成;而在纵向层次间彼此存在函数关系,形成一个循序渐进多阶函数关系;横向层次内及纵向层次间都具有负反馈。每个层次及层次间都相互紧密联系,达到信息资源共享。可从感知控制论组织结构和思维模式为基础,提出 PC-CPS 模型,如图 1 所示。

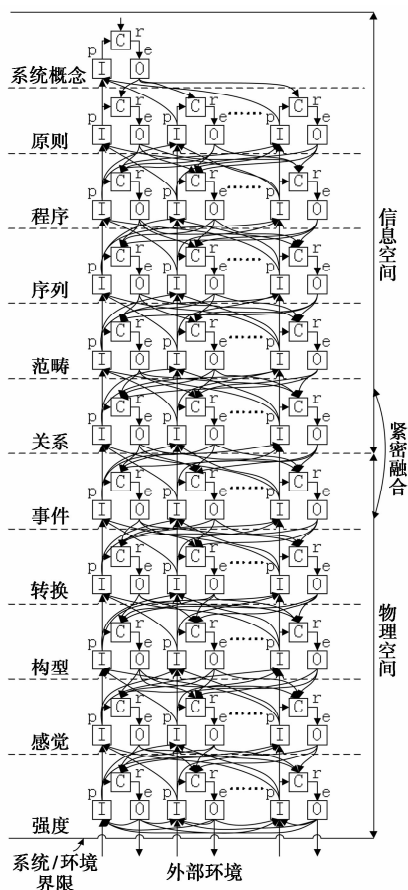


图 1 PCCPS 模型

2.1 物理空间

从强度到事件 5 个层次为物理空间,嵌入大量传感器,主要是客观、实时反映物理世界中相关信息。最底层感知是强度,强度感知仅仅是无量纲信号集合,例如 0-1 脉冲;强度信号作为基本矢量,其加权总和形成一个新向量,即第二层次感知信号“感觉”,例如颜色是由 3 种信号变量函数组成;第三层次感知信号是构型,是一组感觉向量函数,即进入高阶层二阶感知信号在感知计算中心进行信息处理及提炼之后,得到某些稳定构型关系,是一个静态外部世界实体;对实体构型及相关感觉与强度从一种状态变换为另一种状态感知就是转换,它是动态模型;第五个层次事件是一些转换、构型、感觉或强度感知组成系列,这个系列有它开端、中间过程和终结,它作为一个经历一定时间整体被感知和控制,所以称为一个事件感知。总之,物理空间是客观反映外部物理世界。

2.2 信息空间

信息空间是指从关系到系统概念 6 个层次,把物理空间中感知的信息进行推理、评估、决策和控制。信息空间有清晰的逻辑根据,从低到高、简单到

复杂发展起来。关系是事件之间因果关系;范畴表示某些事物或事件类、类型、范围、命名等,帮助找出有某种特征事物;序列是某种低层感知或认知(如构型、事件、范畴等)时间序,序列控制层次和感知层次;程序是通过试验和决策点将序列联结起来组成结构;原理是一个最基本战略和策略,对相关程序制定、评价、实施都是一些原理;将各种原理组合起来便形成感知的融会贯通种类,这就是信息空间的最后一个层次,即系统概念。特别的是,每一个层次可由上一个层次控制。

2.3 物理信息融合

PCCPS 模型是把 PCT 概念模型与 CPS 相结合,集感知、通信、计算于一体实现信息空间和物理空间相互融合,并由多个负反馈循环组成模型。从抽象角度看,每一个反馈环就是在基准信号与系统输入间加入一个比较器,这个比较器接受基准信号并与系统输入做比较,根据比较结果自动驱动系统重新迭代计算改变其输出,最终使基准信号与系统输出一致达到控制效果。基准信号由上一层次的控制系统的输出来确定;而高阶层次利用低阶层次系统作为控制手段,以达到高阶层次所要达到的目的。这就组成 11 层次感知控制过程,也是 CPS 物理空间与信息空间紧密融合过程。

2.4 PCCPS 系统工作流程

PCCPS 系统包括 5 个主要步骤:①通过强度这个层次,运用嵌入式传感器技术实时检测系统外部环境相关数据;②通过感觉、构型、转换和事件这 4 个层次从所检测到的数据中提取征兆,即信号处理与特征变换,这主要运用到异构数据融合技术和分布式计算技术;③通过关系、范畴 2 个层次,根据征兆和其他诊断信息来识别系统的状态,进行故障预测,并做出诊断决策,得出引起故障的范畴,这主要运用到预测控制技术;④通过序列、程序和原则这 3 个过程,根据诊断结果,按照原则、时间/空间序对系统进行自动干预;⑤当遇到系统不能自动解决故障的时候,发出报警信号,让系统概念层的人员进行人工解除故障,保证系统安全性。

3 化工过程安全运行的 PCCPS 模型

化工生产过程涉及温度、湿度、氧气、CO、甲烷等物理量超过安全范围及设备故障都会对化工安全造成重大影响。然而目前化工生产系统还存在一些局限性:①信息孤岛,对象间缺乏互联互通;②不能及时预知潜在故障;③缺乏负反馈,不能及时自主处

理故障。构建化工过程安全运行的 PCCPS 模型就是为实时监控物理量、信息共享、故障预测与诊断和决策操作,及时解除故障使化工生产过程能安全运行。

3.1 系统框架

化工过程安全运行 PCCPS 系统模型包括物理空间和信息空间 2 部分。为客观实时监测化工过程环境,在物理空间嵌入大量传感器感知化工过程物理信号(如温度、湿度、气压、CO、甲烷、化工设备参数等),及大量执行器对化工生产进行控制(使通风机、风窗、阀门、设备参数等自动调节);对于信息空间,不像物理空间那样分布大量传感器、执行器,而都是无形抽象信息概念,可以对物理空间传来的信息进行智能推理、决策。每一个层次感知的信息都相互共享、相互融合,如图 2 所示。

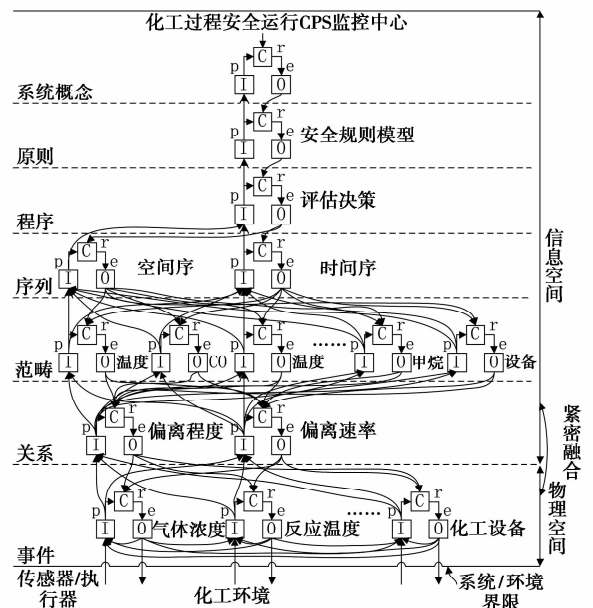


图 2 化工过程安全运行的 PCCPS 模型

化工过程安全运行 PCCPS 系统模型物理空间能快速客观反映外部化工环境相关信息。根据感知控制论,从强度、感觉、构型、转换到事件,最后由事件对应每一个物理实体,如化工设备、气体浓度、反应温度等。信息空间基于信息抽象,实现故障预测的偏离程度、偏离速率因果关系,推理引发故障因素范畴,时间序、空间序控制序列,进行评估决策程序,使化工过程安全运行的规则模型原则及化工过程安全运行。

3.2 系统工作流程

化工过程安全运行 PCCPS 系统把计算、通信、控制深度嵌入化工环境,对物理层每一个事件(如

化工设备、气体浓度、反应温度等)实时监测,并使监测信息互联互通;在信息空间对监测信息进行推理,若气体浓度、反应温度、化工设备参数等偏离安全值或偏离速率较大,则进行相应预警报警,并预测发生偏离类型,通过基于安全规则对系统进行诊断并按照时序对其自主控制。

根据化工过程特点,安全性对化工过程非常重要,因此对一些不确定、偶然的或较复杂情况发生时,紧紧依靠把计算、网络和控制嵌入到物理环境进行信息共享、故障预测、自主控制是不能自行解决故障的。鉴于化工过程对安全性高要求,化工过程安全运行物理信息融合系统模型系统概念层随时由人进行监控,使得不确定突发事件发生时也能及时预测故障、解决故障,保障化工过程安全运行。当遇到更复杂任务无法自适应解决时可直接向系统概念层发出请求指令,并通过监控人员调用数据库、规则等资源对故障进行预测、诊断,得出控制指令反馈到执行器对物理实体进行控制。

4 应用案例

环己烷无催化氧化生成环己酮过程为一个高危生产过程。由于生产装置存有大量环己烷、环己醇、环己酮等易燃易爆物料,若氧气浓度过高,可能形成爆炸气体混合物,若安全措施不到位,可能发生火灾爆炸事故。文献[16]指出,尾氧浓度是环己烷无催化氧化中最重要安全性指标,目前某石化厂尾氧浓度控制上限为3%,超该浓度即发生报警。

基于本文中提出化工过程安全运行物理信息融合模型,构建环己烷无催化氧化过程 PCCPS 监控系统,如图3所示。该系统监控整个环己烷无催化氧化生产过程安全运行,随环境变化进行自主预警控制。结合工业上尾氧浓度必须控制在3%以下的条件,当进料氧气浓度超0.28,进气量超6750 m³/h,反应温度低于430 K中,满足任一个条件就会使尾氧浓度超3%,造成安全问题,因此为保证安全生产,应将这4个参数作为反应过程中重点监控参数。

在环己烷无催化氧化过程 PCCPS 监控系统中,物理空间主要通过传感器客观反映反应釜里面的尾氧浓度、进料氧浓度、进气量、反应温度这4个物理量,当感知尾氧浓度在0~3%,进料氧浓度在0.19~0.28,进气量在4700~6750 m³/h,反应温度在430~451 K,且这4个量都保持稳定时生产照常继续;任何一个量向安全范围两端发生变化,但变化不大时发出预警;当任何一个量向安全范围两端

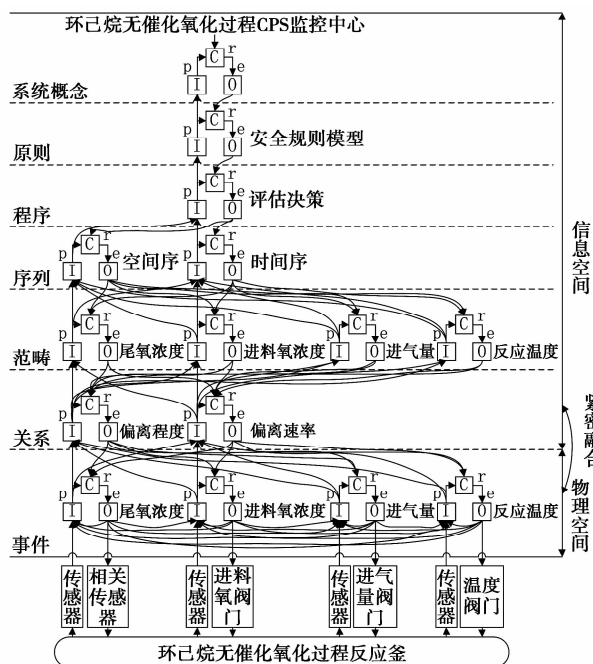


图3 环己烷无催化氧化过程 PCCPS 监控系统

发生明显变化时发出预警,且系统对对应阀门(进料氧阀门/进气量阀门/温度阀门)自主调节,确保其值在安全范围。当感知尾氧浓度高于3%,通过信息共享,感知进料氧浓度、进气量、反应温度均在安全值时,通过通信网络向系统概念层请求支援,将相关数据传输到系统概念层,由监控人员推理出导致尾氧浓度高于3%因素,根据安全规则模型产生处理任务方案,发出控制指令并通过网络将执行任务反馈给执行器控制。环己烷无催化氧化过程 PC-CPS 监控系统通过将计算、通信、控制深度嵌入到物理空间进行实时监测、信息共享、故障预测、故障自愈方法可改变现有化工过程监控不足,充分考虑 CPS 的异构性和跨层性,实现对环己烷无催化氧化过程重大危险源的实时监测、故障预测和故障自愈,从而全面、快速、准确避免异常工况的发生以及传播。

5 结语

根据化工过程特点,提出 PCCPS 模型并将其应用在化工过程安全运行过程。将 PCCPS 系统应用在环己烷无催化氧化过程 PCCPS 监控系统实例上,并探讨了应用中模型能够适应化工过程环境变化的情况,对异常工况进行快速响应,实现系统感、联、知、控一体化,是对 PCCPS 应用于化工过程安全运行的有益探索。本系统还没能够优化解决化工过程安全运行环节具体问题,需要制定相应安全规则,应用方法还有待进一步深入研究和探索。

(下转第174页)

底流出经节流、闪蒸和升温后进入再生塔,解吸出 H₂S 和 CO₂,实现醇胺溶液的再生。酸气由塔顶排出,塔底流出的贫胺液经降温、加压后,一部分贫液进入闪蒸罐脱除闪蒸气中的酸性气体,剩余贫液则返回吸收塔,完成溶液的循环^[6]。

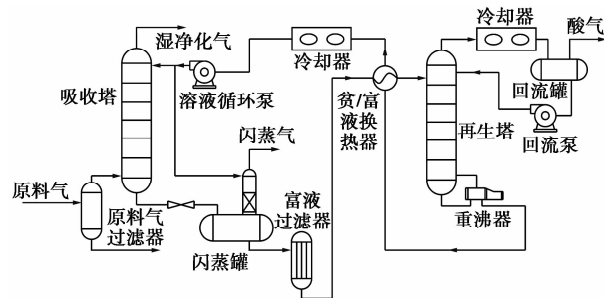


图 1 某天然气脱硫装置流程示意图

1.2 天然气脱硫模型参数设置

该天然气净化厂原料气组成如表 1^[7]所示。

表 1 某天然气净化厂原料气成分 %

组分	H ₂ S	CO ₂	CH ₄	H ₂ O	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	N ₂
摩尔分数	1.271	2.221	95.724	0.062	0.230	0.010	0.482

针对表 1 所述原料气,利用 Hysys 模拟流程,选择 Amine 物性包中 K-E 模型计算物系的平衡特性^[8]。模拟数据与工厂数据对比如表 2 所示。

表 2 现场及模拟工艺数据

工艺参数	工厂数据 ^[7]	模拟数据
原料气处理量/(万 m ³ ·d ⁻¹)	201.51	201.51
原料气入口温度/℃	25	25
原料气含硫量/(g·m ⁻³)	19.554	19.554
吸收塔顶压力/MPa	4.71	4.71
贫液胺质量分数/%	45	45
贫液入塔温度/℃	≤40	40
吸收塔塔板数/块	16	16
溶液循环量/(t·h ⁻¹)	54	54
净化气含硫量/(mg·m ⁻³)	8.36	8.51

由表 2 可知,模拟数据与工厂数据的产品气含硫量误差 1.8%,吻合度较好,所建 Hysys 模型可靠性良好。

2 BP 神经网络模型的建立

BP 神经网络由输入层、隐层、输出层及各层之间的节点连接构成,如图 2 所示,其信号向前传递,并根据预测误差调整网络权值和阈值,从而使网络预测输出不断逼近期望输出。三层 BP 网络可以在任意精度内逼近任意函数^[9]。

(上接第 172 页)

参考文献

[1] Edward A Lee. Cyber-physical systems-are computing foundations adequate[C]. Position Paper for NSF Workshop on Cyber-Physical System; Research Motivation, Techniques and Roadmap, 2006: 6-14.

[2] 王培良,夏春江. PCA-PDBNs 的故障检测与自学习辨识[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(5): 1148-1154.

[3] 田学民,蔡连芳. 一种基于 KICA-GMM 的过程故障检测方法[J]. 化工学报, 2015, 63(9): 2859-2863.

[4] 宋欣,黄道. 改进的 ANNFIS 方法在化工过程故障诊断中的应用[J]. 华东理工大学学报: 自然科学版, 2006, 32(8): 985-988.

[5] 王鲜芳,王岁花,杜昊泽,等. 基于模糊粗糙集和支持向量机的化工过程故障诊断[J]. 控制与决策, 2015, 30(2): 353-356.

[6] 李秀喜,吉世明. 基于半定量 SDG 模型的化工过程故障诊断[J]. 清华大学学报, 2012, 52(8): 1112-1115.

[7] Qian Yu, Xu Liang, Li Xiuxi, et al. LUBRES: An expert system development and implementation for real-time fault diagnosis of a lubricating oil refining process[J]. Expert System With Application, 2008, 35(3): 1252-1266.

[8] 刘明星,马武彬,邓苏,等. 面向服务的信息物理融合系统建模

与验证[J]. 计算机应用, 2014, 34(6): 1770-1773.

[9] 王中杰,谢璐璐. 信息物理融合系统研究综述[J]. 自动化学报, 2011, 37(10): 1157-1166.

[10] 丘威. 一种基于 LHPN 的信息物理融合系统模型验证方法[J]. 计算机科学, 2014, 41(6A): 64-66.

[11] 陈志辉. 基于时间自动机的信息物理融合系统建模与验证[J]. 计算机与现代化, 2012, (10): 125-130.

[12] Dong-Hoon Shin, Shibo He, Junshan Zhang. Robust, secure, and cost-effective design for cyber-physical systems[J]. Proc IEEE, 2014, 29(1): 66-69.

[13] 谭朋柳,舒坚,吴振华. 一种信息-物理融合系统体系结构[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(s2): 312-316.

[14] Li Ke-wei, Liu Qing-wei, Wang Fu-rong, et al. Joint optimal congestion control and channel assignment for multi-radio multi channel wireless networks in cyber-physical systems[C]//UICAT2009-Symposia and Workshops on Ubiquitous, Autonomic Trusted Computing in Conjunction with the UIC'09 and ATC'09 Conference, 2009: 456-460.

[15] 威廉·鲍威尔. 感知控制论[M]. 张华夏,译. 广州: 广东高等教育出版, 2004.

[16] 王兴. 环己烷无催化氧化反应过程模拟与关键参数分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2013: 5-72. ■