

文章编号: 1002-0411(2005)01-0035-05

# 流程工业智能工厂实验系统

冯毅萍, 荣 冈

(浙江大学先进控制研究所工业控制技术国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘 要:** 介绍了流程工业智能工厂实验室的原理结构、功能模块及其应用, 分析了智能工厂实验系统作为科研创新和教学实践的集成平台, 对流程工业综合自动化基础理论研究和应用技术开发的重要作用。

**关键词:** 流程工业; 生产执行系统; 智能工厂; 仿真实验平台; 建模与优化; 应用研究

中图分类号: TP273

文献标识码: B

## Intelligent Plant Experimental System for Process Industry

FENG Yi-ping, RONG Gang

(National Key Laboratory of Industrial Control Technology, Institute of Advanced Process Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The principle structure, functional modules and applications of intelligent plant experimental system for the process industry are introduced, whose significant effects on the foundational theory study of the process industry integrated automation and the development of application technology as an integrated platform of scientific research innovation and teaching practice are also analyzed.

**Keywords:** process industry; manufacturing execution system; intelligent plant; simulation experiment platform; modeling and optimization; application research

### 1 引言 (Introduction)

随着石化工业的发展及市场竞争的日益激烈, 石化企业为了提升整体效益, 不断寻求自动化整体解决方案。以关键流程工艺和核心装置的模拟与优化技术为核心的“智能工厂”技术渐成研究热点, 并形成了以物流、资金流、信息流集成优化为目标, 以企业资源计划系统 (Enterprise Resources Planning, ERP)、生产执行系统 (Manufacturing Execution System, MES) 和生产过程控制系统 (Process Control System, PCS) 三层应用系统紧密结合的流程工业综合自动化整体解决方案<sup>[1]</sup>。国内外软件商已经将“智能工厂”概念与 ERP、MES、PCS 层的应用软件捆绑, 逐步在钢铁、石化企业应用。

著名的软件有 AspenTech 的模块化应用软件和实时数据库、Simulation Science 公司的 PRO-II 软件、Wonderware 的 Plant Intelligence Solution 等, 国内科研院所也陆续开发出了一批过程系统仿真培训软件平台。现有的仿真软件系统主要提供石化企业生

产装置级的动态和稳态模型, 其产品定位针对石化装置的设计、开车运行、日常操作管理及员工培训等<sup>[2]</sup>。而与流程工业综合自动化整体解决方案相对应的企业级的模拟软件系统还没有成熟的应用。同时, 国内外流程工业企业在实践中发现, “智能工厂”综合自动化系统的建设、开发和运行维护, 需要一大批掌握生产工艺技术、控制技术和信息技术的复合型人才, 对人才培养和专业技术人员培训提出了新的要求。目前的生产装置级模型系统和以过程控制系统的模拟为主的仿真培训器已无法满足全部需求。

浙江大学工业控制技术国家重点实验室开发的流程工业智能工厂实验系统, 将仿真培训器的概念全面扩展, 不同于纯数字仿真的模拟系统, 采用物理模拟和数字仿真相结合的形式, 建立了石化工业生产过程模型库、生产实时数据库和生产管理数据库, 构建过程控制系统 (PCS) 和生产执行系统 (MES) 的集成化实验仿真平台。

\* 收稿日期: 2004-06-21

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2003AA412010); 国家 973 计划资助项目 (2002CB312201)

## 2 智能工厂实验室的原理与组成 (Principle and constitution of intelligent plant experimental system)

智能工厂实验室的设计目标在于建设企业级的智能工厂模拟实验系统,模拟实际流程工业企业的生产过程控制和生产管理过程,为综合自动化系统的相关理论研究、关键技术开发和高素质专门人才

培养,提供创新研究平台、软件测试平台和教学实践平台。

智能工厂仿真系统必须具备真实性、精确性、稳定性、多功能性、易操作性和易维护性,其基本组成包括过程模型库、优化算法库、物理实验装置、仿真计算平台、PCS仿真实验平台、数据集成平台和MES系统应用平台,如图1所示。

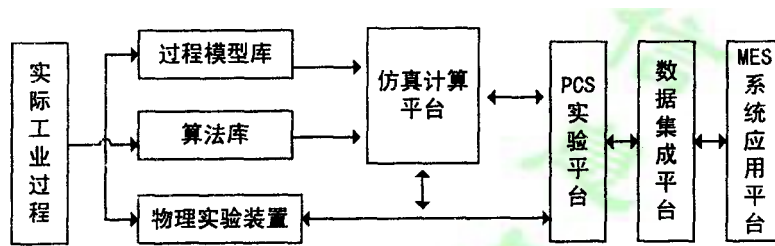


图1 智能工厂实验系统原理结构图

Fig.1 Principle structure of intelligent plant experimental system

首先以实际工业生产过程的工艺机理为原型,建立过程模型库、算法库和部分物理模拟装置,然后以实际工业生产过程的运行数据为初始值和边界条件,仿真计算平台调用模型库和算法库,计算生成生产过程的运行数据,结合物理模拟装置的运行数据,形成实际工业生产过程的动态模拟系统。PCS实验平台、数据集成平台(由实时数据库和关系数据库组成)和MES系统应用平台则以生产过程的动态模拟系统为对象,进行信息集成、过程控制和管理。

智能工厂生产系统的核心和基础。

因此,智能工厂实验室系统是一个集成的、综合的、可模拟运行流程工业生产过程的软件系统,它利用系统建模、仿真和优化技术,在高性能计算机及高速网络通讯的支持下,通过内建的模型和算法来模拟现实流程工业企业产品加工过程和生产经营管理活动,以过程信息模型为核心,连接实时数据库和关系数据库,对生产过程进行实时监控、控制、诊断、过程模拟和参数优化,并在生产执行层进行物料平衡、生产计划、调度排产、生产统计和成本考核等。

## 3 智能工厂实验系统的功能模块 (Functional modules of intelligent plant experimental system)

### 3.1 过程模型库

建立一个包含生产模型、产品模型、工艺模型、材料物性模型的流程工业模型库,如图2所示,它是

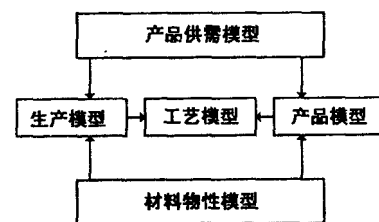


图2 流程工业企业生产过程模型

Fig.2 Manufacturing model of process industry

#### 1) 生产模型

用于描述生产过程的生产能力、生产特性及系统的动态行为和状态,为生产系统的产品设计提供可行的方案,同时在已知系统状态和需求特性的基础上预测产品生产过程。本实验系统建立了炼油企业的物流模型、公用工程模型和主要生产装置的静态投入产出模型,可以在给定的加工方案下计算生产装置的侧线产量、质量和成本消耗。

#### 2) 产品模型

在产品的设计、制造的各个阶段,能够动态地描述产品的属性变化情况,从而将产品在加工过程中的全部活动融为一体。本实验系统建立了基于原油评价数据库的生产计划模型。

#### 3) 工艺模型

将工艺参数与影响生产能力的产品属性联系起来,本实验系统建立了炼油工业的连续重整和精馏

塔等生产装置的动态仿真模型以及压缩机、油品储罐等关键工艺设备的机理仿真模型。

#### 4) 材料物性模型

流程工业的生产加工中大量存在着各种化学和物理的变化,这些变化的机理是与被加工材料的物理化学性质紧密相关的,本系统建立了有炼油企业原油评价数据库和连续重整生产过程相关的物性数据库。

#### 5) 产品供需模型

描述生产企业资源需求和产品销售之间的静态和动态关系。

### 3.2 算法库

由仿真算法库、优化算法库、过程控制算法库、辅助算法库和专家知识库组成,这是关系到智能工厂实验系统性能的重要模块。

#### 1) 仿真算法库

在模型库的基础上,智能工厂实验系统运用计算机仿真算法模拟现实生产运行状况,测试产品设计与生产运行控制方案的可行性和优劣程度。

#### 2) 过程控制算法库

在过程模型算法库和仿真算法库基础上,智能工厂实验系统可从过程控制算法库中选用不同控制算法构成控制方案,分析其对生产过程的稳定性、安全性和效率的影响,从而选出最佳控制方案,主要包括预测控制算法、自适应控制算法、鲁棒控制算法、智能控制算法等。

#### 3) 优化算法库

智能工厂实验系统运用优化算法库,产生流程工业企业在产品开发—工程设计—生产制造各个阶段的操作和运行优化决策,主要包括产品设计的优化、工艺设计及工程设计的优化、生产流程的优化、生产计划优化、生产调度优化和生产过程优化控制等优化命题及其对应的求解算法。

#### 4) 辅助算法库

辅助算法库提供智能工厂生产系统运行所需的各种通用算法,如数据挖掘、随机过程分析、数据可视化等。

#### 5) 专家知识库

专家知识库采用知识工程方法对大量的工程与管理经验和知识加以有效整理和组织,这些经验和知识主要包括:产品设计知识、工艺设计及工程设计知识、生产流程知识、生产运行控制及管理知识等。

### 3.3 物理实验装置

生产装置的物理模拟具有很强的直观性和写实

性,是实验平台的重要组成部分。在本实验系统中设计的实验装置提取了流程工业中典型物流储存和输送装置的特性,采取开放式的软硬件设计理念,通过阀门和信号切换可以方便地组成多种生产流程模型,便于灵活构建多种实验方案。

### 3.4 仿真计算平台

通过网络化的人机交互,仿真计算平台可以对模型库和算法库的资源进行组态,将工厂的实际运行状态设置为仿真计算的初始和边界条件,然后,调用模型库、仿真算法库、优化算法库和物理实验装置的采样数据,进行协同计算,真实地再现工厂实际生产过程运行状况,为 PCS 实验平台产生工厂运行数据,并实时响应 PCS 实验平台发出的控制信号。

### 3.5 PCS 实验平台

采用真实的仪表、数据采集系统、PLC 和 DCS (集散控制系统)构建控制系统,对混合仿真模拟系统进行测量、控制和数据采集,真实地再现工厂实际过程控制系统的配置和操作。

1) 仪表测量过程:对仿真计算输出值的仪表测量采用计算机模拟方法,每个测量点均需定义仪表,设置仪表精度,自动产生带仪表测量误差的仪表测量值。

2) 数据采集系统:选择性地采用 OPC、DDE、OLE、TCP/IP、IPS/SPX 等多种网络和数据通讯协议接口设备,实现企业实际数据集成环境的物理模拟。

3) DCS 系统:DCS 上的 AD/DA 卡可以与物理液位系统的流量、液位变送器和执行机构等相连,实现液位系统的常规控制和先进控制;计算机模拟的仪表测量值,本系统提供了两种方案,可以通过 DA 卡输入 DCS,也可以通过网络通讯方式输入 DCS。

4) 先进控制服务器:商业化的先进控制软件一般在先进控制服务器上运行,本系统设计了多种工程实践中常见的先进控制服务器接口工作方式,是 PCS 实验平台重要组成部分。

### 3.6 数据集成平台

智能工厂实验系统的数据集成平台是一个建立在网络环境下的数据库集成环境,一个包括实时数据库、关系数据库和两级数据库系统数据的 Web 应用开发工具。

#### 1) 实时数据库系统平台

实时数据库系统可根据需要组态生成各种实时数据源,提供各种实时数据采集、监测、控制软件及硬件系统接口的测试环境,提供数据库的数据集成、组态测试环境,提供各种实时数据库应用软件的仿

真和测试环境.目前实时数据库监控软件平台已成为MES层和PCS层接口与信息界面事实上的标准配置,实时数据库监控软件平台可以实现企业网络环境下的实时数据采集、实时流程查看、实时趋势浏览、报警记录与查看、开关量变化记录与查看、报表数据存贮、历史趋势存贮与查看、生产过程报表生成、生产统计报表生成、标准 ODBC/SQL 过程数据接口等功能,从而实现企业过程控制系统与信息系统的网络集成、综合管理.

### 2) 综合集成软件平台(关系数据库)

综合集成软件平台通过对模拟生产过程数据的集成、加工处理,提炼出真正对经营决策有用的数据.

在企业信息系统综合集成中,对各类信息系统中永久数据的操纵与维护,称为系统数据管理.系统中每个信息系统都有其自身的数据管理模块,它们可以看作是系统数据管理的子集,同时要提供与永久数据集之间的接口.系统数据管理可在各类信息系统内完成永久数据的创立、更新和查询等系统操作,也可以完成数据访问权限、完整性约束规则的建立和维护等.为了使信息资源共享、信息交换具有良好的操纵性,对系统数据采用标准化管理,包括系统数据参考模型、接口标准以及远程访问标准等.

### 3.7 MES系统应用平台

根据图1,在数据集成平台的支持下,智能工厂企业级模型及其运行数据的集成环境已经具备,可以为全厂级的优化运行提供研究、仿真和测试平台.具体包括:

1) 优化计划:根据原料、产品的价格因素以及装置的处理能力,合理安排年处理量、月处理量.同时,考虑原料的特性和全厂装置的情况,安排优化、

合理的原料处理方案.在智能工厂的支持下,可以预先比较不同的生产方案的产出、效益情况,从而进行不同生产方案的比较.更进一步,在原料属性数据库以及产品市场信息的支撑下,智能工厂将支持生产方案的优化,即在全厂生产模拟的基础上,优化选取各个装置的原料处理方案.

2) 优化调度:指改变各装置间的物流分配和生产装置的工作点来实现主产品、副产品、废品、成品、半成品和回流物等的调度.在智能工厂提供的装置动态模型以及模型间详细的连接信息的支持下,可以实现调度方案的优化选择.

3) 数据协调:通过对原料进厂、物料流动、库存容量、产品出厂等过程进行连续的跟踪记录,找出并解决此过程中物料、能耗不平衡的问题,实现全厂生产过程的物料平衡.

4) 优化采购、销售:通过智能工厂可以准确预知给定时间段后的原料以及产品的库存情况,从而有效地对采购和销售进行指导.

本平台还可以支持储运、库存、销售的实时计量和质量监测管理系统、设备故障诊断系统等研究与软件的开发和测试.

## 4 智能工厂实验系统的应用 (Applications of intelligent plant experimental system)

智能工厂实验室具有强大的应用功能,如图3所示,其中的教学实践平台,将面向研究生和本科生开放实验,提供自然直观的系统仿真实验框架,并充分利用多媒体技术,实现可视化仿真,创造人机和谐的仿真环境,最终达到网络开放实验和资源共享.同时也可与相关自动化企业联合进行产业化方面的合作研究.

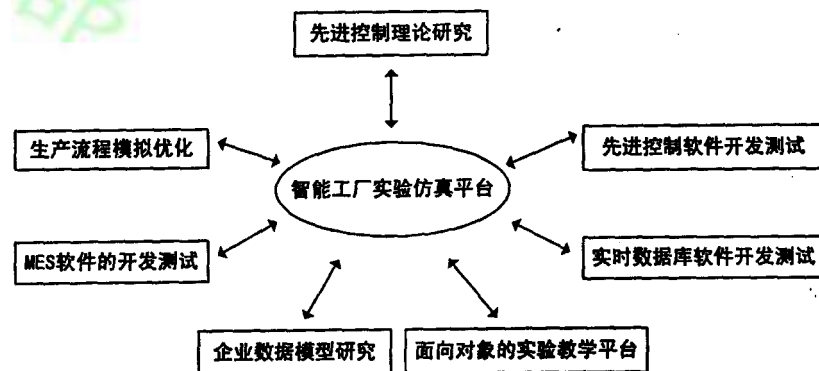


图3 智能工厂实验系统的应用功能

Fig. 3 Applications of intelligent plant experimental system

#### 4.1 教学实践功能

由于流程工业过程的高度非线性、过程强耦合性、固有的大时滞性及操作的连续安全性要求,利用生产过程的仿真平台进行实践教学研究是一种非常有效的手段。学生可以在仿真实验平台上随时进行工厂生产系统的仿真操作,并且可以根据自己的需要更改生产流程和操作参数,进行各种生产操作环境的模拟研究,满足高层次人才培养的实践教学需求。

在此实验平台上可以进行基础控制理论的仿真研究,先进控制软件的开发和测试评估,实时数据集成和实时数据库的测试评估,企业物流、能量流和设备状态数据模型的建模开发等实验。具体可以进行以下实验内容:

1) 在物理实验装置上模拟“液位—流量”多变量系统的各个干扰通道和调节通道特性。模拟液位、流量控制,进行液位单回路控制、液位串级控制、流量单回路控制和液位双输入双输出解耦控制等控制工程实验。

2) 在物理实验装置上模拟流程工业企业液体物料的储存和输送过程,与仿真模型库结合,可以建立炼油厂油罐区油品移动混合模拟系统,支持罐区管理系统和生产调度系统仿真实验。

3) 与仿真模型库结合,将物理实验装置上各水槽定义为炼油厂储存不同油品的储油罐,可以建立炼油厂油品调合模拟系统,进行油品在线调合过程控制实验。

4) 与仿真模型库结合,可以建立多精馏塔系的动态混合模拟系统,开展各种多变量先进控制算法的实验研究,如预测控制、模糊控制、鲁棒控制、无模型神经控制等复杂控制的算法、系统设计、参数整定与仿真等。

#### 4.2 科研创新功能

如图 3 所示,智能工厂实验系统可以为促进科研和技术创新提供先进的研究和测试平台,支持企业级生产操作模拟,先进控制软件、MES 应用软件的研究、开发和测试。

1) 利用智能工厂模拟生产系统,在产品开发阶段可以减少中试层次及试验量,加速产品上市过程;在工程设计阶段可加速筛选各种替代流程方案,迅速确定物料及能量衡算;在生产中可模拟诊断生产装置不正常运行工况,优化操作参数,合理配置生产资源,节能降耗;也可以标定生产流程各部位的能

力,找出“瓶颈”位置及提出增产方案。

2) 提供 MES 应用软件的开发生、测试平台,支持包括物料平衡、能量平衡的数据校正系统,企业计量管理系统,储运库存销售的实时计量监测系统,质量监测管理系统及设备故障诊断系统等研究、软件开发和软件测试。

3) 提供实时数据集成和实时数据库软件的测试平台,根据需要组态生成各种实时数据源,提供各种实时数据采集、监测、控制软件及硬件系统接口的测试环境,提供数据库的数据集成、组态测试环境,提供各种实时数据库应用软件的仿真和测试环境。

4) 利用关键工艺过程仿真模型,组态构成 DCS 闭环控制系统、仪表控制系统、远程网络控制系统,模拟各种不同的工艺操作条件和数据集成环境,为先进控制软件提供逼近工程实际的测试环境。对各种优化控制策略的性能进行评估和比较,全面考察上游装置发生各种扰动以及装置参数发生变化后单个回路或多个回路的控制器是否稳定,性能是否恶化,从而指导控制器的设计和综合。

## 5 结论 (Conclusion)

智能工厂实验室建设以炼油工业为切入点,以流程工业综合自动化整体解决方案关键技术的科研和教学实际需要为出发点,建立实验平台。利用这个平台可以展开一系列的相关研究和教学培训活动,这对提高流程工业综合自动化系统科研和教学水平,促进学科建设,紧跟国际先进制造及自动化技术领域的最前沿技术将起到十分重要的作用。

## 参 考 文 献 (References)

- [1] 柴天佑,等. 基于三层结构的流程工业现代集成制造系统 [J]. 控制工程, 2002, 9(3): 1~6.
- [2] 许正宇. 我国化工仿真培训器的发展历史和展望 [J]. 化工进展, 2001, 20(10): 9~12.
- [3] 陈宗海. 过程系统建模与仿真 [M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 1997.
- [4] Gutierrez J, Elopriaga J A, Fernandez-Castro I, et al. Intelligent tutoring systems for training of operators for thermal power plants [J]. Artificial Intelligence in Engineering, 1998, 12(3): 205~212.
- [5] Frasson C, Aimeur E. Designing a multi-strategic intelligent tutoring system for training in industry [J]. Computers in Industry, 1998, 37(2): 153~167.

(下转第 43 页)