

基于 OmegaLand 的乙烯装置仿真培训系统^①

Operator Training Simulator of Ethylen Plant Based on OmegaLand

马庆春 张来斌 (中国石油大学 机电工程学院 北京 102249)

摘要: 主要介绍了大型乙烯装置计算机仿真培训系统的开发及应用。详细说明了系统建模机理, 硬件结构设计, 软件设计及系统开发等的方法及特点。针对乙烯装置工艺复杂, 涉及组分多的特点, 按照工艺流程划分成不同单元, 建立各单元物料和能量平衡关系、反应动力学关系, 从而建立起乙烯装置严格的机理模型。序贯连接各个单元设备的仿真模块, 构成完整仿真培训系统。还提供了建立汽油加氢机理模型的方法。系统模型测试稳态误差低于 5%。

关键词: 乙烯 仿真培训系统 机理模型 模型测试 稳态误差

计算机仿真培训系统(Operator Training Simulator, 简称 OTS), 是建立在化工工艺、控制技术、计算机软硬件技术等基础上的多学科综合性技术, 也是一种在以计算机为基础的硬件环境上通过建立过程动态数学模型, 再现真实系统特性的软硬件产品, 仿真培训已成为化工生产走向现代化的重要标志之一^[1,2]。

1 前言

针对复杂工艺过程的动态仿真技术受到越来越多的重视, 这种技术可以在工艺设计投入使用之前对工艺过程进行模拟, 对操作人员进行培训, 使其对操作规程、开停工的顺序等非常熟悉, 还可以训练操作员掌握设备的切换步骤, 提高操作人员故障情况下的紧急处理能力, 甚至可以验证工艺设计的合理性等等。

从工业现场的反馈看, 计算机仿真培训系统可以提高培训效率, 大大缩短培训时间, 有利于提高工人的全面素质^[3], 提高工人解决实际问题的能力, 减少停工次数, 避免不必要的损失, 为工厂赢得更大的利润。此外, 对于每年都需要培训大批新员工的大型企业, 仿真培训系统还可以大大减少培训工作量 and 培训时间^[4]。

本文介绍了乙烯装置的全流程实时仿真培训系统, 并提供了建立汽油加氢反应器机理模型的方法。

2 仿真培训系统的概述

仿真培训系统的核心就是建模与仿真。此时不仅是对工艺对象进行仿真, 而且需要对整个工艺链中的各种工艺设备, 监测仪表及控制器, 逻辑电路等进行模拟。

由于大型仿真系统的计算量非常大, 受到计算机速度及容量的限制, 我们将整个培训系统分为七个部分。分别是: 仿真模型运行站; 教练员站; 紧急停车系统站(Emergency Shutdown System, ESD); 现场控制站; 工程师站; OPC(OLE for Process Control); 人机界面工作站。

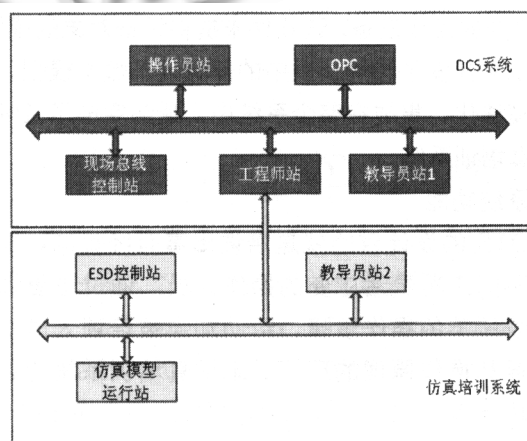


图1 系统结构设计

^① 基金项目: 中国石油科技创新基金(2008D-5006-07-1)

收稿时间: 2009-01-14

2.1 系统硬件构成

系统的硬件网络结构如图 1 所示。采用 DELL AW380 作教师指令台, Pentium 4 处理器, 800 Mhz front side bus & 1M 的高速缓存, 80GB 硬盘, 1024 MB 内存, 10/100/1000 MB Base-T, 采用 Window XP Professional 操作系统。(亦称上位机), 运行工艺模型, 模拟现场设备的运转和生产的进行, 相当于实际生产现场。仿 DCS (Distributer Control System, 集散控制系统) 操作站作为学员操作站(亦称下位机)。上、下位机通过网络通讯联接。

2.2 系统软件构成

仿真培训软件是仿真培训系统的核心和关键部分^[5,6], 直接关系到培训的质量和效果。同时, 也是技术开发中最复杂, 工作量最大, 占用人力最多的部分。由于这种软件是对工艺装置动态特性的综合描述, 因此要求系统开发人员具有较高开发技巧并对现场工艺有深入的了解。

OmegaLand 是一种 Omega 公司推出的仿真平台, 其基本原理就是利用对过程对象的丰富经验^[7], 基于机理的方法对流程中的每一类型设备建立单元模型, 然后根据全流程水平上的信息, 利用序贯模块法将单元模型组合成整体模型, 成为一个具有通用意义的模块。即按实际流程的顺序安排模型的运算顺序, 组成全流程的数学模型, 最终实现与现场管道及仪表流程图(Piping&Instrument Diagram, 简称 P&ID 图) 完全一致的工艺流程, 并能实时运行。但针对现场一些特殊、复杂的工艺设备, 该软件未提供设备对象的模块, 所以本文开发了乙烯装置中的部分设备数学模型, 并将其模块化, 集成在整个系统中, 最终完成了乙烯装置仿真培训系统。

2.3 系统功能

OTS 的设计目的就是培训出富有经验的, 能够根据不同工况灵活应变的操作人员。通过重复训练不同阶段下的操作步骤, 帮助加强被培训人员对工艺过程和操作原理的理解。本仿真培训系统达到的主要功能有:

- ① 正常工况下操作流程的培训;
- ② 开、停工, 紧急停车系统等特殊工况下的操作培训;
- ③ 故障发生时的处理方法如扰动的处理和设备故障情况下的操作培训。

例如, 当泵发生故障时, 泵出口流量变化, 操作工接到报警信号后, 须切断工作泵, 启用备用泵, 如图 2。通过此类故障训练, 可以使操作工学习泵的启停顺序, 掌握故障处理方法, 提高应急操作能力。

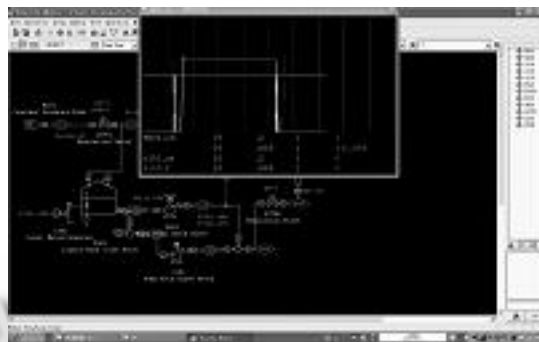


图 2 泵的故障切换及流量趋势变化

除了以上的培训功能外, OTS 还可以对工厂操作管理起到一些辅助作用, 例如: 控制逻辑的验证, 开工顺序的确认和复习, 新故障的检验等。

另外, 在本培训系统中还单独设立指导教师工作站来控制培训流程并对培训情况进行管理。控制培训功能包括:

- ① 初始条件的选择(包括开工条件, 正常操作条件, 任何保存过的初始条件)
- ② 故障的选择(由教师指定特定的设备故障)
- ③ 操作模式的改变(启/停)
- ④ 时间标尺的选择(指导教师可以任意改变仿真模拟的时间速率, 如以真实时间的 1/8, 1/4, 1/2, 1, 2, 4, 8 倍来运行该培训系统)
- ⑤ 利用“snapshot”功能对操作员的练习状态进行保存, 任意保存的状态都可以用“stepback”功能进行恢复。

本培训系统可以用于不同水平的工艺人员进行技术培训(初级培训、中级培训、高级培训); 技术人员也可利用该系统进行各种操作和控制方案的实验和研究。

3 仿真系统的建模与求解策略

本套乙烯装置仿真培训系统属于全流程仿真, 涉及的设备众多, 包括不同类型的分馏塔, 反应器, 换热器, 泵等现场设备, 循环回路多, 工艺流程极其复杂, 且其中涉及到乙炔加氢反应, 丙炔加氢反应, 汽

油加氢反应等众多反应过程,导致整个体系的化学,热力学及物料关系更加复杂。仿真过程既要考虑模拟的准确性,又要考虑到计算的实时性,这些要求无疑都大大增加了建模、求解、程序设计和调试的难度。

利用 VC++ 编程语言对设备数学模型进行编辑,利用软件平台提供的打包工具,生成设备模块。根据 P&ID 图设计顺序将不同设备模块顺序连接。在可视化模型 VM(Visual Module)运行环境中,用户看到的培训界面与 DCS 相同。工程师可以在 VM 中运行该模型,以测试模型的精度。测试界面如图 3 所示。

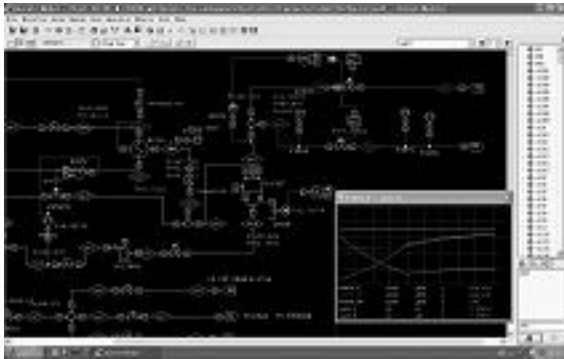


图 3 仿真模型运行界面

乙烯装置中最重要的装置是反应器。下面本文将就如何建立反应器数学模型进行进一步介绍。

3.1 加氢单元流程简介

乙烯生产工艺分为三个部分:裂解区,原料裂解;冷区,换热制冷及加压的单元;热区,乙炔加氢生成乙烯,丙炔加氢生产丙烯并分离,汽油加氢并分离。该装置的 DCS 系统采用的是横河 TDC3000 CENTUM 控制系统。

3.2 加氢模型建立

乙烯生产的核心设备是加氢单元,包括乙炔加氢,丙炔加氢和汽油加氢。加氢反应器的动态数学模型由以下方程组成:反应动力学模型;物料平衡方程;能量平衡方程;组分归一化方程。基于以上理论,我们以汽油加氢反应器为例,介绍如何建立动态模型。

汽油加氢反应器,是绝热固定床加氢反应器,反应器是一个典型的分布参数系统。为了简化计算,我们建立一个一维分布参数动态数学模型。以单个反应器为研究对象。

3.2.1 假设条件

为方便建立反应器的数学模型,根据工业反应器

的实际情况,本文做出如下假设:

- 1) 反应器属于定常态操作,即反应器中任何位置上的物料各项物性参数不随时间改变,但随管长改变;
- 2) 反应过程中物料保持连续稳定流动;
- 3) 物料在反应器中沿运动方向平行的向前移动,沿半径方向流速处处相等,即假设反应器为平推流反应器;
- 4) 所有物料在反应器中停留时间相同;
- 5) 相对于化学反应速度,催化剂的失活可以认为是缓慢的,假定,在某一稳定状态下,反应器每段内催化剂活性是一定的;
- 6) 催化剂和流体主体之间存在温度梯度,而催化剂内部温度与催化剂表面温度相同,即传热只发生在催化剂主体和流体主体之间。

基于以上假设,建立加氢反应器数学模型如下。

反应速率方程

$$r_j = A_j \exp\left(-\frac{E_j}{RT}\right) C_j^a C_{H_2}^b \quad (1)$$

这里, r_j ——反应速率; A_j ——频率因子;

E_j ——反应活化能; C_j ——摩尔浓度

T ——反应温度

$J=1, 2, \dots$ 分别对应不同的反应方程;

a, b ——反应级数

物料平衡方程

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -u \frac{\partial C_i}{\partial z} + \sum_{j=1}^7 v_{i,j} r_j \quad (2)$$

这里, C_i ——摩尔浓度; t ——时间;

r_j ——反应速率

能量平衡方程

$$\rho_s c_{ps} \frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = -\rho_l c_{pl} \frac{\partial T}{\partial z} + \sum_{j=1}^7 (v_{i,j} r_j) (-\Delta H_j) \quad (3)$$

这里, C_{pl} ——液体比热; C_{ps} ——催化剂比热;

ρ_l ——液体密度; ρ_s ——催化剂密度;

T ——操作温度; $(-\Delta H_j)$ ——第 j 反应的反应热

除此之外,还需考虑催化床层的热平衡方程,管壁的热平衡方程,管壁与床层之间的热传递模型,共同构建出反应器动态数学模型。

将仿真培训系统运行至稳态,将所有工段的仿真计算结果与设计数据进行了对比。在此仅给出了汽油加氢反应器的仿真计算结果与工艺计算结果对比,如表 1 所示。

表1 汽油加氢反应器仿真计算结果与生产数据对比

	温度 /°C	组成 mol%						
		H ₂	C ₁	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	C ₆ H ₁₄
入口现场数据	60	20.1	1.49	5.28	17.25	2.10	0.55	4.14
1.66	28.23	5.14	1.62	0.54	0.63			
出口现场数据	120	6.41	1.70	0	21.05	3.04	0	5.05
2.41	33.21	6.04	2.45	0.04	0.94			
仿真结果	121	7.03	1.70	0.05	20.49	3.16	0.11	4.84
2.30	34.58	6.42	2.33	0.03	0.91			

4 结语

本套乙烯装置全流程仿真培训系统,能较好地模拟整个流程的操作状况。乙烯装置仿 DCS 系统与厂方实际使用的 DCS 系统在画面和操作手法一致,具有控制组、趋势组、报警等画面。同时能够实现故障诊断,设备切换等操作。控制仪表无论从量程、正反作用以及控制方案都与实际系统完全一致。

该系统能够帮助外操人员、内操人员以及技术人员较快地掌握工艺流程和设备操作技能,能进行的正常的开停车以及事故处理培训^[8]。同时还可以在该系统上进行优化控制算法调试,控制逻辑等的实验。经模型测试表明,稳态误差小于设计值±5%,动态误差小于±10%,系统可连续稳定运行几百小时,在精度和实时性上都满足国际化仿真培训系统的要求。

参考文献

- 1 Ra'ul AS, Julio ENR, Alejandro MG, eds. Distributed continuous process simulation: An Industrial case study. Computers and Chemical Engineering, 2008, 32:1195-1205.
- 2 Gebel J, Yüce S. A new approach to meet the growing demand of professional training for the operating and management staff of desalination plants. Desalination, 2008,220:150-164.
- 3 吴重光.过程系统仿真技术.北京:中国石化出版社,1998:10-11.
- 4 陶风云,姚飞,夏迎春,等.醋酸装置全流程仿真培训系统,北京化工大学学报,2003,30(4):29-32.
- 5 张福清,张贝克,吴重光,等.苯乙烯装置仿真培训系统的开发.中国科技信息,2007,16(1):50-54.
- 6 傅烈勇,朱丹绯,顾钟文.聚丙烯装置计算机仿真培训系统的开发.机电工程,1999,5(3):192-193.
- 7 Omega Simulation Co.,Ltd.(2005). Visual Modeler plant modeling first step guide.
- 8 Ma QC, Zhang LB, Fan JC. Operator training simulator of olefins plant for process safety management. Beyond Regulatory Compliance: Making Safety Second Nature. Texas: the Texas A&M University System, 2008:733-739.