

文章编号: 1005- 8893 (2006) 04- 0024- 04

# 扬子化工厂 PTA 三线计算机仿真培训系统开发\*

刘冉冉<sup>1</sup>, 王洪元<sup>1</sup>, 潘操<sup>1</sup>, 高晋树<sup>1</sup>, 林西平<sup>2</sup>

(1. 江苏工业学院 计算机科学与工程系, 江苏 常州 213164; 2. 江苏工业学院)

**摘要:** 介绍扬子化工厂 PTA 三线年产 45 万吨对苯二甲酸全流程仿真培训系统的开发过程。该系统采用微机网络结构模拟了化工过程动态特性和仿 TDC3000 集散控制系统, 并拥有工艺现场模拟站以及教师指令台, 可实现对工艺操作员、仪表技术员和组态工程师的培训, 以提高他们的理论水平和实际操作技能。本文将从该仿真培训系统的总体结构、软硬件设计、系统的特点和功能等方面介绍该系统的设计与实现。

**关键词:** 对苯二甲酸; 计算机模拟; 仿真培训; 数学模型; 集散控制

中图分类号: TP 391. 41 文献标识码: A

## Design and Realization of the Simulation Training System for the PTA

LIU Ran- ran<sup>1</sup>, WANG Hong- yuan<sup>1</sup>, PAN Cao<sup>1</sup>, GAO Jin- shu<sup>1</sup>, LIN Xi- ping<sup>2</sup>

(1. Department of Computer Science and Technology, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213164, China; 2. Jiangsu Polytechnic University)

**Abstract:** This paper introduces dynamic real- time simulation training system for the whole process of the third PTA plant of Yangzi chemical plant with an annual production capacity of 450 kilotons. The simulation system consists of microcomputers which function as simulating TDC3000 Distributed Control System operator stations, process location stations, and the teacher instruction station. This paper introduces the design and realization from the structure of hardware and software, the characteristic and function of the system.

**Key words:** PTA; computer simulation; simulation training; mathematic model; distributed control

由于计算机仿真培训系统能够逼真地模拟真实工厂的开车、停车、正常运行和各种事故状态的现象, 而且无需投料, 没有任何危险性, 操作人员可以在数周内取得现场 2~ 5 年的经验, 较快的提高了操作人员的素质, 使现有设备安、稳、长、优的生产和早日投产新建、改建的设备<sup>[1]</sup>, 因此为配合扬子化工厂年产 45 万吨 PTA 三线建成开车, 研制了“PTA 全流程仿真培训系统”, 供工厂在开车前对操作工培训, 为装置一次开车成功奠定基础。

### 1 对苯二甲酸全流程工艺概述

原料对二甲苯、溶剂醋酸、催化剂醋酸钴、醋酸锰和促进剂四溴乙烷按一定比例进入进料混合罐, 由进料泵加压送至氧化反应器, 在一定温度、压力下, 与压缩空气进行氧化反应。生成的对苯二甲酸 (TA) 浆料从反应器出料中抽出, 进入第一结晶器进行二次氧化和结晶, 然后经过第二和第三结晶器, 最后送至过滤干燥系统得 TA 产品, 过滤母液进入母液罐后返回进料罐。来自氧化工段的

\* 收稿日期: 2006- 05- 31

作者简介: 刘冉冉 (1982- ), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生; 参加本项目的还有: 杨德明、王子喻、陈熠等; 联系人: 王洪元。

TA 产品含有少量杂质, 应将其除去, 即在精制反应器中通过高温高压, 对含氢的 TA 饱和水溶液进行选择催化, 加氢处理来实现。反应后的 PTA 通过结晶, 再经过固/液分离和干燥步骤被回收至料仓中。

## 2 系统结构

如图 1 所示, 工业仿真培训系统整体结构由教师指令台、模型机和操作站通过局域网形式组成, 它们公用同一个实时数据区, 采用 TCP/IP 协议进行通讯。教师指令台的功能是指导和设计相关培训方式, 监控仿真培训系统的运行, 本系统在开发时将模型机和教师机合二为一, 采用改进的工业组态软件和 VC++ 作为开发工具。

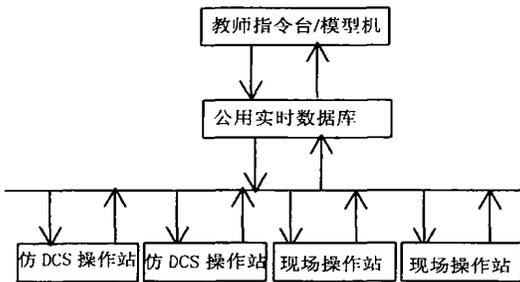


图 1 计算机仿真培训系统结构

Fig. 1 The structure of simulation training system

### 2.1 教师指令台

教师机负责与各个操作站和现场站的通讯、与化工模型的连接、PID 调节规律和无扰动切换的实现、以及仿真培训教师机的一些功能。各个操作站、现场站数据都汇总到实时数据库。教师机程序是通过调用化工模型的动态连接库 (DLL) 进行化工模型的运算, 然后再将运算结果通过数据库传送到各操作站和现场站。仿真培训时一些功能如状态的切换, 事故的选择等通过设置不同的参数来完成, 化工模型根据这些参数的不同采用了不同的算法。教师机软件系统采用多线程技术完成, 其总体结构见图 2。

### 2.2 学员操作站

操作站是仿真培训系统的操作员界面。本系统中操作站采用随时通讯方式, 有 DCS 操作站和现场操作站两种: DCS 操作站是完全逼真的仿 TDC3000 的操作员站, 实现真实 DCS 的所有功能, 如组态、显示、操作模式等内容。现场操作站

用于模拟位于现场的各种阀门、泵和开关的操作, 配合仿 DCS 操作站进行开、停车和事故处理操作。操作站除了具有数据显示, 工艺操作的功能外, 还能实现 TDC3000 的所有控制功能。

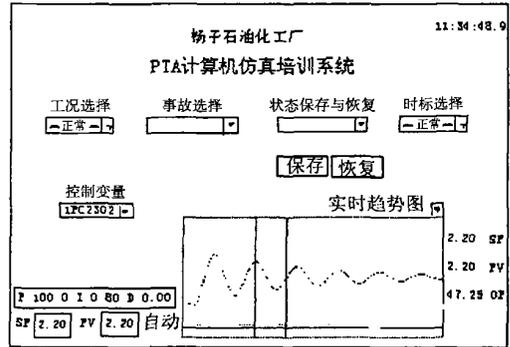


图 2 教师机操作画面

Fig. 2 The operation interface of teacher instruction station

### 2.3 网络通讯系统

在本系统中, 网络通讯采用基于 TCP/IP 协议的局域网形式, 数据通讯是联系整个界面, 数据库和模型的关键。本系统设计的实时数据库、HMI、I/O 服务器、数据服务器等几个主要组件分布式地运行在不同的计算机内, 通过网络等方式实现组件间的通信。

组件间实现通信过程时, 主要包括两种方式: 本地方式和远程方式。实现本地通信时, 在底层上要解决的本质问题是进程间的通信。远程通信完全建立在本地通信的基础之上。但要增加两个专用于网络通信服务的组件: NetClient 和 NetServer, 它们负责网络连接的建立、报文的传输、网络通信故障时的数据缓存与恢复等。本系统中, 教师机采用本地方式进行通讯, 而各学员机采用远程方式通过 IP 地址访问实时数据库所运行的服务器, 实现数据通讯。该通讯方式具有实现简单、实时性高、移植好、可靠性强等优点。

## 3 仿真培训软件的设计

仿真培训软件按功能分为系统支持软件和系统功能软件。系统支持软件是指上位机和下位机的网络通讯。而系统功能软件可分为教师指令台软件、学员操作站软件和数学模型软件 3 部分。

### 3.1 教师指令台软件

教师指令台软件是工业过程仿真培训软件的运行平台, 包括教师指令台界面, 数学模型接口等部

分。主要功能是启动仿真器处于工作状态，管理模块运算，设置培训项目，设置初始条件、故障等。是实现对学员操作的监视和评价功能，并对整个系统的运转进行控制。

### 3.2 学员操作站软件

操作站软件运行操作站功能及组态，提供给操作员完成各种日常监视和操作手段，切换回路的控制状态、改变调节器的给定值、调节阀位、机泵状态和开关位置、启动、恢复连锁等

### 3.3 数学模型软件

数学模型软件是实时仿真系统的核心部分，包括 DCS 控制单元算法及工艺数学模型两大部分。

#### 3.3.1 系统控制回路单元

控制回路的 PID 调节采用改进的增量式算法，经过实际应用证明，此算法经参数整定后，系统能够在二个振荡周期内达到稳定。即：

$$\Delta u(n) = Ae(n) + Be(n-1) + Ce(n-2) \tag{1}$$

其中， $A = K_p(1 + T/T_i + T_d/T)$ ； $B = -K_p(1 + 2T_d/T)$ ； $C = K_p T_d/T$ 。 $K_p$  为比例增益， $T_i$  为积分时间， $T_d$  为微分时间， $u$  为控制量， $e$  为被控量  $y$  与给定值  $r$  的偏差。

控制单元算法中包含了简单控制、分程控制、选择控制、串级控制、比值控制及多种复杂控制的交叉控制等共 236 套控制回路，并有手动/自动的无扰动切换功能。

在本系统控制回路中，难点是精制单元反应器压力与液位、氢气流量间的串级交叉控制的实现。在工艺流程中，反应器液位与氢气，蒸汽加入量组成串级调节系统，反应器压力控制出料量，从而组成反应器的交叉控制，以解决开车时压力干扰和氢气流不稳定时氢气流速波动较大的问题，维持反应器的液位。在控制算法中，本系统加入前馈控制，控制结果符合实际生产情况，抗干扰性好。

#### 3.3.2 工艺数学模型

工艺模型包括所有原料罐、反应器、压缩机、过滤机等设备的动态数学模型<sup>[2]</sup>。仿真正式开始后，在每个仿真周期该模块从内部公用数据库取出数据进行相关运算后返回，刷新数据库，完成全流程的开车、停车、正常、事故处理等操作。

本系统模型采用集中参数模型，并以机理为主，用生产数据或设计数据修正，建立模型，采用

回归方程和经验公式，适当加以动态补偿，最终能够准确预测变量的稳态值，逼真地模拟各种操作状况下的动态响应<sup>[3]</sup>。主要设备的实际运行数据与仿真数据相吻合，模型实时性、准确性、逼真性与连续性符合仿真要求（稳态误差 < 3%，动态误差 < 10%）。

现对本流程中的主要工艺参数模型的建立介绍如下：

#### (1) 反应器及主要罐体的液位模型

由质量守恒定律得

$$\frac{d\rho AZ}{dt} = \rho F_1 - \rho F_2 \tag{2}$$

式中  $\rho$ 、 $A$ 、 $F_1$  及  $F_2$  分别为罐内流体密度、罐的横截面面积、进料流量及出料流量。式 (2) 可简化为

$$\frac{A dZ}{dt} = F_1 - F_2 \tag{3}$$

#### (2) 压力模型

由物料平衡、流体力学原理，并经数学方法处理后得出的压力的数学模型为

$$\frac{A dp}{dt} + p = p_1 - p_2 \tag{4}$$

式中  $A$ 、 $p$ 、 $p_1$  及  $p_2$  分别为集总参数、容器内压力、气源压力及出口气源压力。

#### (3) 温度模型

同压力模型的求取，容器温度或容器内气体温度的数学模型如下：

$$\int dT = \lambda \cdot \int dP$$

其中  $\lambda$  为集总参数，与罐的物理尺寸有关。

上述模型中的未知参数根据现场数据求得。

### 3.4 数学模型与组态软件的接口

设备接口位于实时数据库与各种 I/O 设备（对于仿真系统来说，则是软设备）之间，其主要负责完成与各种 I/O 设备进行数据交换。

在设计接口时，考虑到设备接口的一般通用性，采用了开放式的体系结构来设计接口，其主要涉及 3 部分：<sup>①</sup> Iodevdfg，负责 I/O 设备的描述。

<sup>②</sup> Ioitemui，负责管理数据连接组态过程。<sup>③</sup> Ioapi，负责完成与 I/O 设备间的数据交换。

#### 3.4.1 数据连接的组态

这部分主要负责把数据库中的点参数与相关 I/O 设备的具体信道建立连接。由于不同的 I/O 设备，其信道的形式和内容可能完全不同，因此必须

针对不同的 I/O 设备, 设计相应的数据连接形式, 保存各种参数信息。

其主要完成的功能包括两部分: 一是为用户进行数据连接组态时提供一个界面; 二是将用户组态的设备参数信息用某种格式保存起来, 以便在开发 Ioapi 部分时使用。

### 3.4.2 数据交换的实现

这一部分是整个接口设计的核心, 其包括了一组 API 函数和一些 C# 类库。其中的一组 API 函数规定了名称、参数及返回值。而 C# 类库则主要负责各种获取 I/O 设备组态信息、参数设置信息以及与数据库 DB 进行数据交换等数据处理。

数据交换过程主要涉及两个函数:

<sup>1</sup> 循环读取请求函数。其主要负责不断把从 I/O 设备采集到的数据发送给数据库, 函数形式如下:

```
INT OnReadData (CPacket* pPacket, LPTSRT szCommand, INT& nCmdLen);
```

<sup>④</sup>数据下置函数。其主要负责把数据库中的下置数据发送给 I/O 设备, 函数形式如下:

```
INT OnWriteData (CItem* pItem, LPCTSTR szWriteData, LPTSTR szCommand, INT& nCmdLen)。
```

## 4 计算机仿真培训系统的功能

### 4.1 教师指令台功能

教师指令台是实现对学员操作的监视和评价功能, 并对整个系统的运转进行控制, 是一个多功能的智能专家系统。在教师指令机上, 主要包括工况选择、事故设定、改变时标及状态的保存和恢复几种功能<sup>[4]</sup>。

#### 4.1.1 工况选择及事故设定

本系统共设置了正常、开工、停工和事故 4 种工况, 根据培训内容的不同选择不同的工况。在化工模型的 DLL 程序中设置一个变量来记录当前的运行状态, 根据此变量的不同值, 模型调用不同的初始数据, 实现各种运行状态的切换。

#### 4.1.2 状态的保存和恢复

在培训过程中, 教师可以保存一个状态, 通过恢复状态后, 能重现保存时刻的全部数据, 以帮助教师指正学员操作。教师机程序中的状态保存是将保存时刻程序运行的全部数据 (包括中间临时变

量) 保存到数据文件中, 并备份到指定的目录。恢复程序执行时, 程序根据要恢复的哪个状态, 找到相应目录中的相应数据文件后, 将其替换当前的数据文件, 并根据替换后的数据向各个站发送更新数据和同步标志。

#### 4.1.3 时标改变

在教师机程序中化工模型初始运行速度为正常的仿真速度, 我们可以通过设置的一个时间变量实现在线时标变化功能。

此外, 还可以在指令台上对控制仪表进行监视、操作和观察变化趋势, 并可以修改调节器的 PID 参数、设定值和某些预定的重要工艺参数。

### 4.2 其他功能

本系统在开车操作中可以对学员的操作水平 (操作质量、操作步骤、报警次数等) 从宏观和微观上给予评判, 并建有学员培训档案。并将连锁和操作相结合, 要求受训学员必须在领会工艺指标的基础上进行正确操作, 并可根据不同工况与状态解除连锁。

## 5 结 论

本系统培训内容丰富, 不仅有教师指令台, 仿 DCS 操作站还有仿现场站, 能对操作员、工程师及仪表工等不同对象进行培训。模型的稳定精度、动态变化趋势及操作图形界面均有较高地的逼真度, 能很好地满足培训要求。目前, 厂方正组织员工在仿真培训系统上进行开车、停车、正常操作、各种干扰和事故处理的反复训练, 提高操作水平和处理事故的应变能力, 为一次开车成功奠定基础。

### 参考文献:

- [1] 张云华. 集成化工过程仿真培训系统 [J]. 系统仿真学报, 1999, 11 (1): 63-66.
- [2] Masuda Y, Suzuki A, Ikushima Y. Calculation Method of Heat and Fluid Flow in a Microreactor for Supercritical Water and its Solution [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2006, 33 (1): 419-425.
- [3] Fagley J C, Carnahan B. The Sequential-clustered Method for Dynamic Chemical Plant Simulation [J]. Computers in Chemical Engineering, 1990, 14 (2): 161-177.
- [4] 王洪元, 赵涤之, 林西平. 石油化工过程智能仿真培训 [J]. 石油化工高等学校学报, 1995, 8 (4): 59-63.