

工艺与设备

系统控制信息技术在大型乙烯装置上的应用

何琨^{1,2}, 沈佳妮², 吴德荣¹, 马紫峰²

(1. 中国石化集团上海工程有限公司, 上海 200120; 2. 上海交通大学化学工程系, 上海 200240)

摘要:对石化企业大型乙烯装置广泛应用的集散型控制系统、紧急停车系统、安全仪表系统、现场总线控制系统、先进控制系统、在线分析系统、实验室信息管理系统等控制信息技术进行研究得出:采用系统控制信息技术可进一步提高大型乙烯装置自身稳定性和安全性。以扬子石化、赛科石化、燕山石化、中原石化、齐鲁石化、独山子石化、上海石化等7套乙烯装置为例,采用系统控制信息技术可明显提高大型乙烯装置操作运行管理一体化程度并带来良好的经济效益和社会效益。

关键词:集散型控制系统;紧急停车系统;安全仪表系统;现场总线控制系统;先进控制系统;在线分析系统;实验室信息管理系统

中图分类号:TM921.5;TQ056

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2010)06-0069-05

Application of process control related information technology in large scale ethylene plants

HE Kun^{1,2}, SHEN Jia-ni², WU De-rong¹, MA Zi-feng²

(1. Shanghai Engineering Co., Ltd., SINOPEC, Shanghai 200120, China;

2. Department of Chemical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The process control information technology is studied, which includes distributed control system, emergency shutdown system, safety instrumented system, fieldbus control system, advanced process control system, online analysis system, laboratory information management system, it's widely applied in large-scale ethylene plant of petrochemical corporation. Using these process control information technology can increase large scale ethylene plant for self stabilization and security level. For example, Yangzi Ethylene Plant, SECCO Ethylene Complex, Yanshan Ethylene Plant, Zhongyuan Ethylene Plant, Qilu Ethylene Plant, Dushanzi Ethylene Plant and Shanghai Ethylene Plant, these 7 ethylene plants have increased operational management integrative level obviously and have brought economic benefit and society benefit greatly when these ethylene plants adopted the process control information technology.

Key words: distributed control system; emergency shutdown system; safe instrumented system; fieldbus control system; advanced process control system; online analysis system; laboratory information management system

随着石化企业乙烯装置的科技进步和自主创新,尤其是近10年来系统控制信息技术逐渐实现了数字化、网络化、模型化、智能化、微型化并在乙烯装置上得到广泛应用,使乙烯装置的综合能耗^[1]从生产1t乙烯消耗油809.05kg降到697.12kg。在系统控制信息技术日臻完善的基础上,乙烯装置^[2]进一步向大型化、综合化、集成化的方向发展,同时也提高了乙烯装置自身的稳定性和安全性。以乙烯产能300kt/a装置为例,如果突发故障而紧急停车,不考虑设备抢修费用、有效生产时间浪费等因素,仅停车物料排放损失就达1000万元/次;而产能400kt/a乙烯装置紧急停车的排放损失更高达1500万元/次。故大型乙烯装置采用现代过程控制系统和安全控制系统以提高仪表自动化先进控制和信息管理水,从而增强其市场竞争力^[3]。系统控制信息^[4]技术包括:集散型控制系统DCS、紧急停车系统ESD、安全仪表系统SIS、现场总线控制系统FCS、先进控制

系统APC、在线质量分析系统OAS、实验室信息管理系统LIMS等。

1 集散型控制系统 DCS

1.1 集散型控制系统简介

典型DCS系统硬件体系结构示意图见图1。

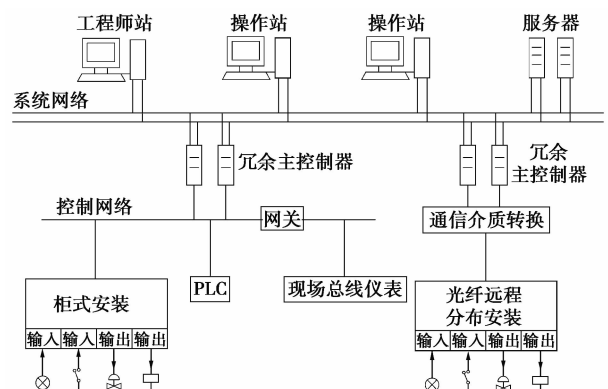


图1 典型DCS系统硬件体系结构示意图

收稿日期:2010-01-21

作者简介:何琨(1963-),男,教授级高级工程师,从事石化系统过程研究开发和工艺设计工作,021-58366600-3189,hekun@ssec.com.cn。

集散型控制系统 DCS 是^[5] 1 个由过程控制级和过程监控级组成的以通信网络为纽带的多级计算机系统,综合计算机、通信、显示和控制^[6] 的 4C 技术,其特点是分散控制、集中操作、分级管理、配置灵活、组态方便。

1.2 新一代集散型控制系统特点

新一代 DCS 特点为:①网络开放结构。采用 Windows NT 标准操作系统,支持 DDE/OPC,既可直接使用 PC 机的 MS-Excel、Visual Basic 编制报表,也可同在 UNIX 上运行的 Oracle 数据库进行数据交换。②高可靠性。控制站采用多 CPU 冗余容错技术,可实现在任何故障及随机错误产生情况下连续不间断控制。③容错以太网。在容错以太网节点间有 4 个通信路径、允许有 1 个通信路径故障、1 s 快速检测和恢复时间、可在线增加和减少节点、对应用 PC 机完全透明、允许正常以太网节点接入、完全分布式结构无主节点、快速 100 Mb/s 性能、传输介质为同轴电缆或光纤。④可扩展性。具有构造大型实时过程信息网的拓扑结构,可构成多工段、多集控单元、全厂综合管理与控制综合信息自动化系统。

2 紧急停车系统 ESD

2.1 紧急停车系统简介

由于乙烯装置规模大、过程复杂、易燃、易爆、有毒、有害,对设备的安全性、可靠性和有效性的要求较高。紧急停车系统 ESD 在避免灾难、减少事故损失起到极其重要^[7] 的作用。计算机技术发展使 ESD 配置也在不断更新换代^[8]:由气动逻辑到继电器逻辑,由简单继电器系统到微处理器系统,由单回路联锁系统到三重模块冗余系统(TMR)。

2.2 TRICON 紧急停车系统

以 TRICONEX 公司 TRICON 系统为例,该 ESD 的主要特点为:①TRICON 系统有 3 个主处理器,每 1 个主处理器技术参数:CPU 32 位、50 MHz, 32 MRAM。其 32 位浮点协处理器的使用得到了 TUV6 级的安全认证。②系统中所有的 I/O 信号都要经过硬件的 2oo3 表决。数字量输入信号在 DI 模块中被分成隔离的 3 路,通过 3 个独立的通道分别被送到 3 个主处理器中进行 2oo3 表决;主处理器输出模拟量信号在 AO 模块的模拟输出选择器中进行选择以确保输出信号的准确。③DI/DO 模块均采用光电隔离方式。AI 模拟量输入卡件每个通道 12 位 A/D 转换器精确度达 0.15% 以上。有支持 TRICON 过程控制和火灾与可燃气体 F&G 功能块图库,包括模

拟输入、指数滤波、PID、超前滞后、积分、中值选择、模拟输出、气体检测器、在线监视、打印及其他 TRICON 功能块等。④提供用户编程语言。功能块图 FBD、梯形图 LD、结构性文本 ST。⑤TRICON 系统具有容错控制能力,可识别控制系统元件故障的同时对故障元件进行在线修复而不中断操作过程。TRICON 系统这种容错功能极大地提高了工艺过程的安全性和可用性。⑥1 套 TRICON 主控制系统最多可连接 14 个扩展或远程机架,最远距离 12 000 m 及 4 500 个 I/O 点数。

3 安全仪表系统 SIS

3.1 安全仪表系统简介

为确保乙烯装置人员和设备安全、保证装置在事故情况下的安全联锁和紧急停车、避免灾难性事故发生,故采用安全仪表 SIS 系统对整个装置^[9] 进行保护。整体安全水平 SIL 与目标平均失效概率 PFD 和仪表危险失效概率 SIF 对应关系,见表 1。

表 1 整体安全分级一览表

整体安全等级	目标平均失效概率	仪表危险失效概率
SIL = 1	$10^{-2} \leq \text{PFD} < 10^{-1}$	$10^{-6} \leq \text{SIF} < 10^{-5}$
SIL = 2	$10^{-3} \leq \text{PFD} < 10^{-2}$	$10^{-7} \leq \text{SIF} < 10^{-6}$
SIL = 3	$10^{-4} \leq \text{PFD} < 10^{-3}$	$10^{-8} \leq \text{SIF} < 10^{-7}$
SIL = 4	$10^{-5} \leq \text{PFD} < 10^{-4}$	$10^{-9} \leq \text{SIF} < 10^{-8}$

大型乙烯装置要求 SIS 系统的可靠性必须达到 SIL 3 级的整体安全水平,停车失效等级 PFD 为 2.7×10^{-4} 。在对 SIS 进行设计时,可采用 IEC61508、IEC61511 标准和 ISA84.01 标准。

3.2 扬子乙烯安全仪表系统

以中国石化扬子石化公司产能 650 kt/a 乙烯装置为例,其 SIL 3 级回路配置为:①现场检测器。采用 3 个现场变送器信号接至 ESD-PLC 内进行模拟量 2oo3 表决;其他现场相关一次仪表亦采用 3 个检测元件以实现 2oo3 表决。②执行器。SIL 3 级回路的输出信号,须通过获得 SIL 3 级认证的卡板直接驱动现场电磁阀,中间不可接输出继电器和保险丝。采用 1 台现场联锁调节阀配置 2 套串联电磁阀的方式,电磁阀常磁常通,失电排气,2 套串联电磁阀。为及时获得该阀门的故障信息,通过采用 HART 信号转换器与智能定位器配合,将阀位信号通过 HART 信号转换器转换成 DCS 信号使功能得以实现。调节阀异常和故障诊断报警在 DCS 内实现。③逻辑解算器。采用 ESD-PLC 系统来实现逻辑

解算器功能,该系统须获得满足 IEC 要求的 SIL 3 级认证并确保采用的系统每块卡板亦有相应的证书。系统配置为三重冗余 TMR,即:三冗余 CPU、三冗余系统内部通讯、三冗余输入卡和输出卡等。采用 3 个表决通道的主 CPU 系统,2oo3 表决输出,一旦 1 个表决通道的元件发生故障,转为 1oo2 表决模式。④输入卡板。对所有联锁输入信号,其卡板为三重化形式。⑤输出卡板。停车回路输出全部用三重化卡板,SIL 3 级回路配有热备卡板,输出直接驱动电磁阀。输出至报警灯点,选用普通继电器卡板。⑥远程扩展卡板。全部选用三重化卡板。对 2oo3 输入表决联锁,3 个输入点分配在不同输入卡板内。

4 现场总线控制系统 FCS

4.1 现场总线控制系统简介

具有开放性、互操作性和全数字化的现场总线控制系统 FCS 已成为乙烯装置控制系统发展方向之一。现场总线仪表从只能由调节器或 DCS 完成的控制算法改进为一台植入 PID 模块的智能化变送器或执行器与仪表一起,在现场实现自主调节以实现控制的彻底分散,减轻 DCS 主机负担并及时调节,从而提高整个系统的可靠性。典型现场总线控制系统结构见图 2。

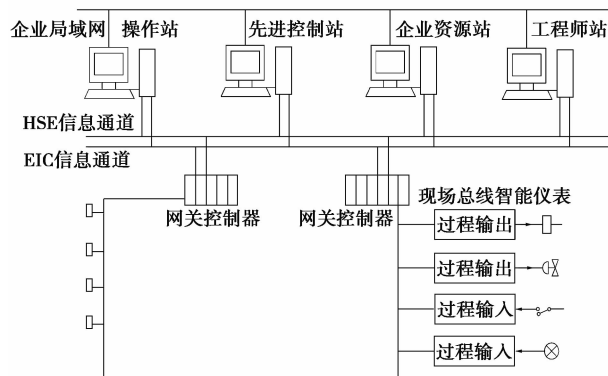


图 2 典型现场总线控制系统结构图

FCS 特点为:①开放式系统。现场总线工作站同时挂在现场总线和局域网 2 层网络,后者可与其他计算机系统或网络进行高速信息交换以实现资源共享。采用的标准是对所有制造商和用户公开以实现技术共享。②全数字化通信。FCS 智能型现场仪表传感器及其 A/D 转换器其数字信号在传送出仪表之前可得到补偿以提高系统测量和控制的精度。由于采用双向数字通信,不仅系统可靠性高,而且系统组态和调试也很方便。③可互操作性。现场总线智能仪表按统一技术标准,不同厂家产品可互连互

换、统一组态、即插即用以便设备更新或系统扩展。④控制分散度高。现场总线智能仪表除具有的基本功能外,还有控制和运算等功能可实现分散控制。每条总线连接多台现场仪表可节省电缆并节省大量系统安装、调试和维修的费用。

4.2 赛科乙烯现场总线控制系统

典型采用 FCS 进行生产过程控制^[10]的是上海赛科石油化工有限公司(简称赛科)产能 900 kt/a 乙烯裂解装置,该乙烯联合装置是当时世界范围内生产规模最大、工艺技术最新、自动化系统集成度最高的联合工厂,其现场总线系统是国内外最大的 FCS。赛科乙烯基金会现场总线 FF 是现场总线控制系统由美国 Emerson 公司主导的 Foundation Fieldbus 现场总线。该系统包括 9 套生产装置和公用工程及辅助设施,由 1 个中心控制室集中控制,含 16.8 万个位号、4.7 万个控制回路、4.0 万台仪表、1.3 万台智能设备、6.6 万根电缆、5 000 个现场接线箱和 10 套自动化控制系统。还设有 15 个控制系统外站,最远外站到中央控制室的距离约 2 500 m,各控制外站到中央控制室的各种信号全部采用双冗余光纤电缆通信方式传输。上海赛科除部分仪表出现通信故障外,总线仪表运行基本正常,总线的优越性正在逐渐发挥作用。其成功应用总线技术的经验是:①现场总线控制技术的进一步成熟;②严格的现场总线设计统一规定;③比较合理完善的安装调试方法;④各承包商和设备供应商通力合作,严格执行设计统一规定;⑤现场总线供应商的丰富经验和它的全球支持能力等。现场总线是并不昂贵的高新技术,其优越性不仅仅是节省电缆,而精髓在于全部信息化和智能化的性能提高,而且贯穿整个生命周期。

5 先进控制系统 APC

5.1 先进控制系统简介

目前已成熟的先进控制^[11]的特点为:①先进控制基于模型的控制策略;基于智能控制和模糊控制正成为先进控制的一个重要发展方向。②先进控制通常用于处理复杂的多变量过程控制问题;先进控制是建立在常规单回路控制上的动态协调约束控制,可使控制系统适应实际生产过程动态特性和操作要求。③先进控制的实现需要足够的计算能力作为支持平台可在上位机或 DCS/FCS 中实现。

5.2 先进控制网络系统

APC 网络又称先进控制优化网络,是在具有 APC 先进控制的装置里,DCS 控制网上有 1 个 APC

应用工作站,可采集 DCS 的有关数据。乙烯装置的 APC 先进控制服务器通过 OPC 网络与对应的 APC 应用工作站连接。先进控制 APC 服务器中的计算结果,控制数据和 DCS 的过程实时数据是通过 APC 网络相互传送,可实时处理各种设定点及其他控制参数。APC 应用工作站的主要功能是起 OPC 通信作用以及放置某些 DCS 中没有的“中间计算”功能模块;另外,APC 网络是冗余的。

5.3 5套典型乙烯装置 APC 系统

中国石化燕山石化公司(简称燕山石化)^[12]裂解、急冷、压缩、深冷和碳三分离等采用 DMC PLUS 多变量模型预估控制技术为核心的 APC 技术以实现卡边操作、稳定运行、优化生产的目标。扬子石化裂解炉投用 APC 系统后各参数变化:①炉出口温度 COT 波动在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 内,各组炉管 COT 偏差也在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 内;②炉子总原料进料和总热负荷变化在 $\pm 0.25\%$ 内;③乙烯、丙烯收率平均提高 0.50% 以上。中原石化公司投用 APC 运行 1 个多月后,裂解炉 COT 温度波动幅度由投用前的 5.0°C 降为 1.5°C ,各炉管偏差由投用前的 4.0°C 降为 1.0°C ,且总热负荷波动幅度小于 2.5%,达到预期指标并大大降低操作人员的工作强度。乙烯精馏塔、丙烯精馏塔塔顶烷烃浓度控制平稳度有很大提高并增加精馏塔的操作弹性。齐鲁石化投用 APC 后,裂解炉内各参数变化:①先进控制 APC 显示值与在线分析 OAS 测量值误差在 $\pm 1.04\%$ 内;②裂解深度实际值与设定值偏差 $\pm 2.50\%$ 内;③乙烯收率提高 0.51%,丙烯收率提高 0.25% 以上。独山子石化将现场仪表、分析仪表、DCS 作为支柱,采用 ABB Lummus 裂解炉模型,实行裂解深度控制使乙烯收率提高 0.59% 以上^[13]。上述 5 套乙烯装置裂解炉 APC 应用效果汇总见表 2。

表 2 裂解炉 APC 应用效果汇总表

装置	APC 名称	COT 偏差/ $^\circ\text{C}$	乙烯收率/ %	丙烯收率/ %
燕山石化	DMC PLUS	—	—	—
扬子石化	APC	± 1.0	+0.50	+0.50
中原石化	APC	± 1.5	—	—
齐鲁石化	APC + OAS	—	+0.51	+0.25
独山子石化	ABB Lummus	—	+0.59	—

6 在线分析仪系统 OAS

6.1 在线分析仪系统简介

随着分析仪器水平的提高,越来越多的在线分析仪在乙烯装置上使用。

在线质量分析仪中的微量水分分析仪监测乙烯装置裂解干燥气体的水分以提高产品质量,但在线质量分析仪纯滞后时间较长,目前正在研制快速型在线质量分析仪。在线多路近红外光谱分析 NIR 仪测量石脑油的密度、分子质量、结焦指数等。在线色谱质谱 GC-MS 联用^[14]是将常规 GC 分析与最新 MS 分析联合,发挥 GC 分析快速、精确、可靠的特点和 MS 分析具有同时测量多组分的优点,帮助乙烯装置更便于操作和维护以节约生产成本。

在线环保分析仪在乙烯装置使用的,包括在线烟道气分析仪、水质分析仪、在线 COD 分析仪、DO 分析仪及 pH 分析仪等。

在线气相色谱分析 GC 仪贯穿在生产全过程中,其控制器安放在控制外站内,除通过双冗余 Modbus 串行链接与 DCS 通信外,还通过仪表局域网连接到设置在中央控制室内的 GC 工程师站,使得组态设计功能可在工程师站内执行并能访问 GC 网络上所有气相色谱仪用于数据的采集、诊断、校准等。

6.2 齐鲁乙烯在线气相色谱仪

以中国石化齐鲁石化公司(简称齐鲁石化)产能 800 kt/a 乙烯装置为例,选择在线色谱仪分析裂解气组成时,采用 Py-GAS3000 型^[15]裂解气取样预处理^[16]系统,其流程见图 3。

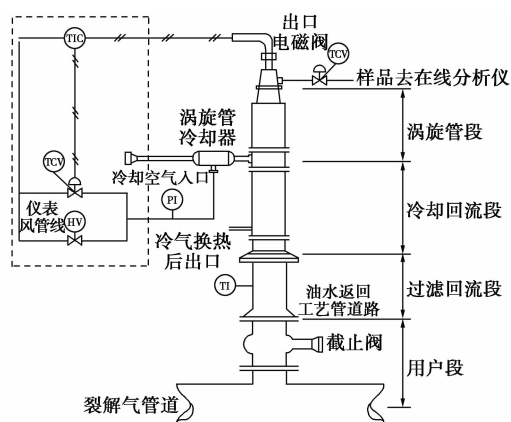


图 3 Py-Gas 取样预处理系统示意图

7 实验室信息管理系统 LIMS

7.1 分析室 LIMS 简介

实验室信息管理 LIMS 系统是^[17]乙烯装置分析化验室一种使用数据库技术和信息管理技术的化验室自动化新概念^[18],也是现代综合管理的一种理念、技术、方法、产品和整体解决方案。LIMS 系统网络拓扑见图 4。

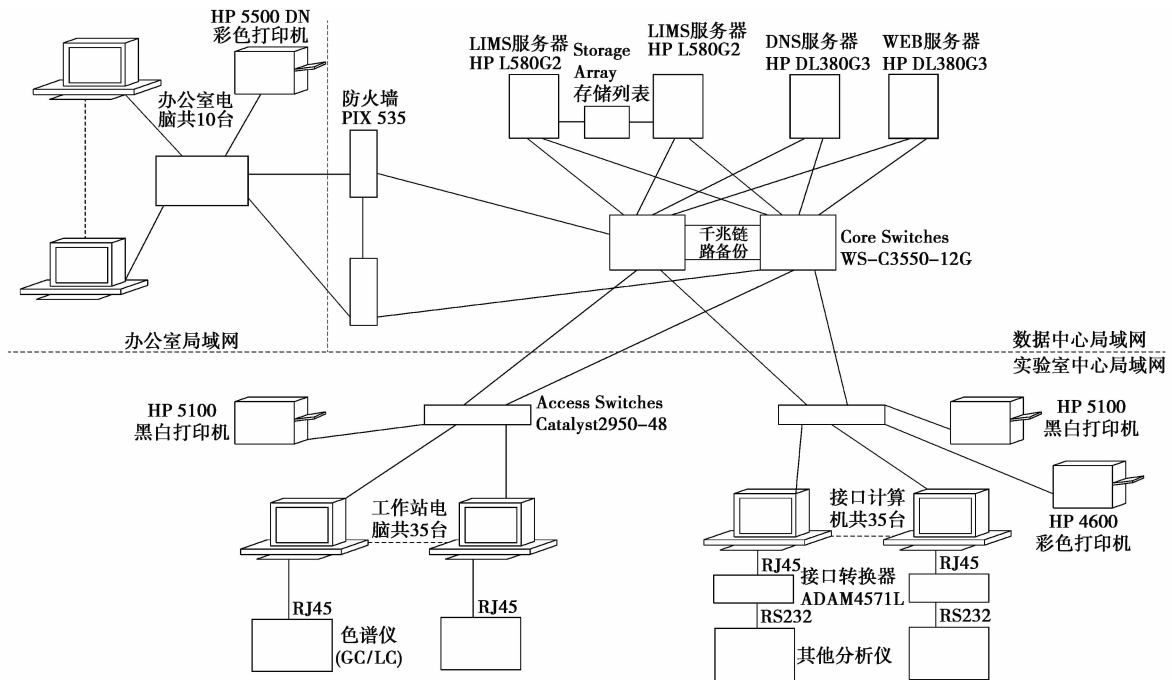


图4 LIMS系统网络拓扑图

LIMS系统的目标是减少重复分析化验的次数、增加分析检测信息的资源共享,使客户满意度最大化。实验室使用LIMS后,能使分析工作按流程进行,不但使分析处理过程大大缩短,结果更加科学准确,而且有效地提高了生产的平稳率和产品的合格率,取得较为显著的经济效益。

7.2 上海乙烯LIMS的应用

中国石化上海石化公司(简称上海石化)包含产能150 kt/a乙烯装置和700 kt/a乙烯装置2套生产装置,其质检中心担负着乙烯装置等9套工艺装置生产过程中分析取样点、半成品、成品、原辅料及产品出厂分析的质量检验,涉及420多名员工、近千台分析仪器设备,每月产生近20万个分析数据。2000年4月该中心采用LIMS来管理整个企业的质量数据和实验室日常任务,已连续正常运行多年,取得了良好的经济效益和社会效益。

LIMS系统应用实效:①利用数据查询中趋势图对各分析取样点的质量数据跟踪可及时提醒装置调整工艺操作条件,保证乙烯装置的安稳高效运行。②在LIMS中自动生成的分析台帐、检验报告单等和文件以及质检通讯等均在网上传阅,为质检中心管理无纸化创造了条件,每年可节约办公费用近20万元。③充分利用试剂材料管理软件、降低库存和分析成本。由于在试剂材料管理软件中设置库存的上下限警报,可通过合理库存量的设置,提出合理的购买数以减少库存量。LIMS系统开通后,质检中心

内部库房之间物品调拨高达100多件,库存金额下降50多万元。④通过LIMS的运用,根据故障频度的分析,从而对仪器报废更新的提出更有科学性。在产能700 kt/a乙烯改造项目中,通过对现有8台分析仪器的整合,节约费用50多万元。

8 结论

由于过程控制信息系统是大型乙烯工艺生产装置的“中枢神经”,系统控制信息技术的应用可提高乙烯装置的平稳性和安全性。当采用最新系统控制信息技术时,可进一步提高乙烯的收率和质量、提升装置操作运行管理一体化程度、增加原料处理量 and 产品生产量、降低运行费用和操作成本,由此带来明显的经济效益和社会效益。

参考文献

- [1] 王基铭. 过程系统工程技术与中国石化可持续发展[J]. 化工学报, 2007, 58(10): 2421-2426.
- [2] 王松汉. 乙烯装置技术与运行[M]. 北京: 中国石化出版社, 2009.
- [3] 解怀仁. 石化仪表与控制系统[M]. 北京: 中国石化出版社, 2009.
- [4] 何琨. 现代仪表控制系统在大型石化生产装置上应用的初探[A]//2009中国过程系统工程年会(PSE2009)暨2009中国MES年会(MES2009)论文集[C]. 杭州: 中国系统工程学会, 2009: 519-523.

(下转第75页)

2 m,塔径为 30 mm,塔内装 θ 环填料,填料高度 1.9 m(据厂家提供的数据,每米 θ 环填料约为 10 块理论板,因此本文中的玻璃精馏塔约为 20 块理论板)。采用连续精馏方式进行,塔体抽真空,并在塔体外裹 1 层石棉以达保温绝热的目的。塔釜为三口瓶,由调温电热器加热,用调压器调节釜温和汽化速率,以稳压器稳压。塔顶为循环式冷凝冷却器,塔顶蒸汽经冷凝器冷凝后部分回流,采用回流比控制器控制回流比。

1.3 实验步骤

将一定比例的乙醇和水的混合物加入原料储罐中,控制活塞开度保持一定的滴液速度,开启循环冷却水,然后启动调温电热器和真空泵,调节至一定的加热电压和真空度。待操作稳定后采出塔顶馏出物和塔釜残液。不同浓度的酒精溶液对应不同的密度,用密度仪测定其浓度。

2 结果与讨论

2.1 减压精馏实验结果

乙醇质量分数分别为 94.348%、96.213%、97.075%、98.020%、98.747%、99.260% 的酒精溶液在真空度为 -0.092 MPa(即压力为 9.3 kPa)下进行减压精馏,回流比为 4,在第 15 块塔板进料,分别得到不同浓度的塔顶馏出物,结果见表 1。

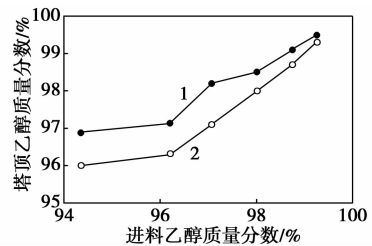
表 1 减压精馏实验结果

序号	1	2	3	4	5	6
操作条件						
真空度/MPa	-0.092	-0.092	-0.092	-0.092	-0.092	-0.092
回流比	4	4	4	4	4	4
进料板	15	15	15	15	15	15

进料						
温度/°C	23	24	24	24	25	25
密度/g·cm ⁻³	0.80599	0.80066	0.79813	0.79532	0.79312	0.79156
乙醇质量分数/%	94.348	96.213	97.075	98.020	98.747	99.260
出料						
温度/°C	16	16	16	17	17	17
密度/g·cm ⁻³	0.79869	0.79797	0.79479	0.79395	0.79204	0.79007
乙醇质量分数/%	96.888	97.133	98.200	98.500	99.100	99.500

2.2 减压精馏模拟计算值与实验值对比

对上述的实验过程进行模拟,采用 ASPEN PLUS 11.1 软件和 NRTL 热力学物性方程。将模拟计算值与实验值进行对比,结果见图 2。



1—实验值;2—模拟计算值

图 2 减压精馏模拟计算值与实验值的对比

由图 2 可以看出,采用减压精馏时,在进料质量分数小于 97% 时,出料浓度和模拟计算值偏差较大;当进料质量分数大于 97% 时,塔顶乙醇浓度模拟计算值反倒与进料浓度基本一致(即没有分离效果),这些都是与实验结果不相吻合的。可见在

(上接第 73 页)

[5] 孙灵革,吕满金. 浅谈 DCS 系统发展趋势[J]. 黑龙江电力, 2004,26(3):229-234.
 [6] 鲁明休,罗安. 化工过程控制系统[M]. 北京:中国石化出版社,2006.
 [7] 秦仲雄. 石油化工装置应用 ESD 浅见[J]. 石油化工自动化, 2002(6):14-19.
 [8] 朱小本,孟祥生. 紧急停车及安全联锁系统设计[J]. 石油规划设计,2006,17(1):44-46.
 [9] 缪煜新. 石油化工装置中 SIS 的安全功能[J]. 石油化工自动化,2004(3):10-20.
 [10] 饶洪凌,张红梅,冯仁铭. SIS 在赛科项目中的应用[J]. 石油化工自动化,2006(3):1-4.
 [11] 张勇. 烯烃技术进展[M]. 北京:中国石化出版社,2008.

[12] 金宗贤. 先进控制在燕化乙烯装置上的全面实施[J]. 乙烯工业,2008,19(增刊):485-492.
 [13] 韩启策,王建军. 先进控制在裂解炉上的应用[J]. 数字石油和化工,2009(7):9-12.
 [14] 厉峥嵘,何琨,肖励雄,等. 气相色谱分析和工业质谱分析技术在乙烯装置裂解炉中的应用与比较[J]. 石油化工,2008,37(增刊):108-110.
 [15] 曲卫方. 在线色谱仪在乙烯装置裂解炉上的应用[J]. 乙烯工业,2008,19(增刊):334-339.
 [16] 涂丽蓉,王建军,马亚军. PY-GAS3000 型裂解气取样器在北方寒冷地区的应用[J]. 乙烯工业,2007,19(2):25-27.
 [17] 张志橦. 实验室信息管理系统在石化行业的应用及进展[J]. 数字石油和化工,2006(8):2-10.
 [18] 张志橦,王群,王海芹. 化工实验室信息管理系统 LIMS[M]. 北京:化学工业出版社,2006. ■