

Inferential Control of Propylene Rectify Column in Ethylene Process

Lixin Li Feng Qian Anran Yu Yanqing He

Institute of Automation, East China University of Science & Technology Shanghai 200237

Abstract: Direct the status of Qilu Petrochemical Co.Ltd the propylene rectify system, developed the soft measurement technique based on neural network and implemented the computer online inferential control to control the propane and propylene consistence in the propylene rectify column, gained notable benefit.

Key words: soft measurement; neural network; inferential control; propylene rectify; ethylene process

乙烯装置中丙烯精馏塔的推断控制*

李立新、钱 锋、俞安然、何衍庆

(华东理工大学自动化研究所 200237)

摘要: 针对齐鲁石油化工股份有限公司乙烯装置中丙烯精馏系统的生产操作状况, 研究开发了基于神经网络的精馏过程软测量技术, 实现了丙烯精馏塔塔顶丙烷浓度和塔釜丙烯浓度的计算机在线推断控制, 产生了显著的经济效益。

关键词: 软测量; 神经网络; 推断控制; 丙烯精馏; 乙烯装置

前言

齐鲁石油化工股份有限公司乙烯装置是 70 年代末期引进的美国鲁姆斯公司 (Lummus Co.) 技术, 1998 年该装置的乙烯生产能力改扩建到 45 万吨/年, 改扩建后的丙烯精馏系统由二个精馏塔(DA406 塔和 DA1406 塔)并联, 以及其它一些设备组成。由于该操作单元分离的主要组分丙烯和丙烷沸点较接近、且组分中含有一些易聚合的重碳物质, 而分离的主要产品是聚合级丙烯, 即丙烯纯度必须大于 99.60%, 是一个很复杂的精密精馏过程。因此, 此系统的工艺操作和自动控制技术难度相当大, 一直是国内外乙烯生产过程待解决的难题之一。自乙烯装置 1998 年改造后, 丙烯精馏系统 (DA406 塔和 DA1406 塔) 操作虽然尚平稳, 但有些工艺指标一直尚未能达到设计标准, 尤其是塔釜采出物料中的丙烯浓度高, 丙烯产品损失较大, 塔顶丙烯产品质量亦不稳定。这不仅降低了烯装置的整体效益, 而且还影响到下游的聚丙烯生产。为了进一步优化丙烯精馏系统的生产操作和挖潜增效, 同时也为了充分发挥乙烯装置中 DCS 系统的潜力, 对该系统实施计算机先进控制技术 (APC) 是一个投资少见效快的有效手段。

在许多工业过程控制中, 需要对与产品质量密切相关的重要过程变量进行控制。然而, 由于在线测量仪表 (传感器) 不仅价格比较昂贵, 而且对一些工业生产场合还非常不适应, 使得生产过程中的一些主要变量很难或者根本无法由在线分析仪表直接得到, 即使有些变量虽然能由在线分析仪表检测, 但由于在线分析仪表分析周期长, 滞后较大, 最终将导致控制系统的性能下降。就本文研究的精馏系统而言, 虽然 DA406、DA1406 塔顶各有一台在线丙烷浓度在线分析仪, 但该在线分析仪的分析周期为 15 分钟, 尤其是自动分析仪的分析值与人工分析数据具有很大的偏差 (工业装置的操作通常取信于人工分析), 且偏差无规律; 而丙烯精馏塔塔釜则缺乏在线丙烯分析仪, 仅仅依赖一天一次的人工分析。因此, 及时准确地测量塔顶丙烷浓度和塔釜丙烯浓度, 是研究开发丙烯精馏单元先进控制策略的关键, 为了解决这一关键技术, 必须开发丙烯精馏塔塔顶丙烷浓度和塔釜丙烯浓度的软测量技术。

1. 丙烯精馏系统工艺简介

丙烯精馏系统的工艺流程见图 1 (因 DA406 塔和 DA1406 塔控制方案控制方案完全一致, 以下叙述只以 DA406 塔为例)。来自甲烷汽提塔 (DA407) 塔釜的碳三馏份, 进入丙烯精馏系统 DA406 塔的第 76 块塔板。经高回流精馏后, 塔顶产出聚合级高纯

*基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60074027), 上海市教育发展基金会曙光计划项目 (2000SG18); 国家“十五”863 计划 CIMS 技术主题项目 (2001AA411230)

度丙烯产品 (>99.60), 从 65 块塔板侧线采出化学级丙烯 (>95%), 同时将绝大多数丙烯产品回流到主塔内, 进行精馏; 塔釜再沸器由 88℃ 左右的急冷水加热, 塔釜采出作为丙烷裂解炉原料。DA406 塔为浮阀塔盘, 共有 154 块塔板, 塔径为 3.8 米, 该精馏系统工艺操作技术和自动控制技术具有相当大的难度。

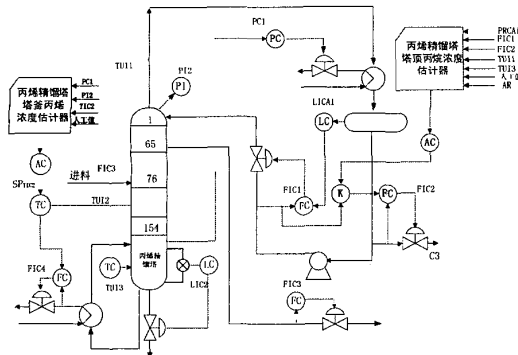


图 1 丙烯精馏塔工艺流程图

2. 塔顶丙烷浓度和塔釜丙烯浓度软测量模型

所谓软测量技术就是把控制理论与工艺知识结合起来, 对一些难于测量或不能测量的变量, 通过另外一些可测量变量来推算和估计, 以软件代替硬件 (传感器) 功能。对于丙烯精馏系统, 必须从生产操作的内在机理出发, 基于工业装置的实时操作数据和 ASPEN PLUS 仿真计算数据, 对丙烯精馏过程作定性分析与定量分析, 找出 DA406 塔顶丙烷浓度和塔釜丙烯浓度与有关工艺操作参数的内在关系, 来建立软测量模型。

针对丙烯精馏操作过程中干扰因素多、非线性时变等特点, 本文应用多层前向型神经网络方法, 采用新开发的快速递推学习算法, 建立了 DA406 塔顶丙烷浓度和塔釜丙烯浓度的神经网络软测量模型。由于神经网络是根据丙烯精馏生产操作过程中的输入-输出信息不断对网络参数进行学习, 以实现丙烯精馏生产过程的输入操作参数到 DA406 塔顶丙烷浓度和塔釜丙烯浓度输出参数的非线性映射, 因此, 所建立的神经网络软测量模型具有很强的适应功能, 能适应操作工况的不断变化, 充分反映了 DA406 塔顶丙烷浓度和塔釜丙烯浓度的操作特性。

2.1 神经网络训练样本集的获取

神经网络软测量模型的“外推”能力和“可信度”必须建筑在具有一定正交性和完备性的网络训

练样本集基础上, 对于工业生产实时使用的神经网络模型, 除了需要开发一些学习速度快、鲁棒性强的网络结构和学习算法外, 还必须正确选择网络训练的样本数据, 使所建的神经网络模型具有很好的“平滑”和“推广”能力。在应用神经网络解决实际工业过程模型化时, 目前一般的方法是直接从工业现场采集样本, 但对于丙烯精馏系统而言, 由于它在乙烯生产装置中的重要性, 若对它进行工业试验 (改变工艺操作条件) 产生样本是绝对不可能的, 而生产现场操作又比较平稳 (工艺操作条件基本不变), 即使出现一些干扰, 也是一些不确定性的扰动 (即输入模式未知), 由此得到的样本数据变化量很小, 这样的数据集正交性和完备性都很差, 若以此来训练网络, 一方面易造成训练过程的“饱和现象”和局部最小点, 不能得到正确描述 DA406 塔顶丙烷浓度和塔釜丙烯浓度操作特性的网络模型; 另一方面, 即使能完成训练过程, 但由此产生的神经网络模型, 局限性很大, 只适用于描述丙烯精馏单元工作点周围很小“区域”的操作特性, 当操作条件改变时, 模型的“外推”性和“可信度”很差, 不可能据此模型精确地预测和控制新的操作工况下 DA406 塔顶丙烷浓度和塔釜丙烯浓度的生产特性。

为了解决上述问题, 在本文研制中, 我们根据 ASPEN Plus 软件模拟计算丙烯精馏系统, 从生产过程的内在机理出发, 应用正交设计方法, 在多组相互正交的操作条件下, 模拟丙烯精馏单元的实际生产操作过程, 使工业装置的操作特性得到充分“激励”, 并产生一些正交性好, 且工作点变化范围较大的丙烯精馏生产过程操作信息, 将这些样本数据与工业生产现场采集到的实时数据结合起来, 构成 DA406 塔顶丙烷浓度和塔釜丙烯浓度神经网络软测量模型的训练样本模式, 这既保证了样本空间的正交性, 又使样本空间的完备性得到充实。

2.2 塔顶丙烷浓度神经网络软测量模型

影响 DA406 塔塔顶丙烷浓度操作特性的因素很多, 根据生产现场的工艺操作变量分析以及丙烯精馏系统 ASPEN Plus 仿真计算研究, 在此选择 DA406 塔釜压力 PC1、塔顶回流量 FIC1、塔顶产品采出量 FIC2、进料量 FIC3、塔顶温度 TUI1, 和塔釜温度 TUI3, 作为影响 DA406 塔塔顶丙烷浓度生产运转特性的主要操作变量, 应用上述方法获得神经网络软测量模型的训练样本模式集。

图 2 是 DA406 塔塔顶丙烷浓度神经网络软测量

模型的结构。

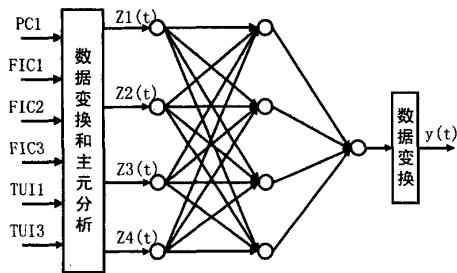


图 2 塔顶丙烷浓度神经网络软测量模型的结构

2.3 塔釜丙烯浓度神经网络软测量模型

影响 DA406 塔釜丙烯浓度操作特性的因素较上述塔顶丙烷浓度的影响因素少，根据工业装置现场操作变量分析以及丙烯精馏系统的工艺机理数学模型的模拟计算，在本文研制中选择 DA406 的塔釜压力 PC1、塔釜温度 TUI3 和塔中温度 TUI2，作为影响 DA406 塔釜丙烯浓度操作特性的主要操作变量。

由于神经网络训练样本数据集较小，且操作变量只有 3 个，因此该模型的建立，可直接应用神经网络技术来模型化 DA406 塔釜丙烯浓度的软测量。选择 1 个 3×3×1 结构的前向 BP 神经网络，其输入节点分别对应着 DA406 的塔釜压力、塔釜温度和塔中温度，而输出节点对应着丙烯浓度。图 3 是 DA406 塔釜丙烯浓度神经网络软测量模型的结构图。

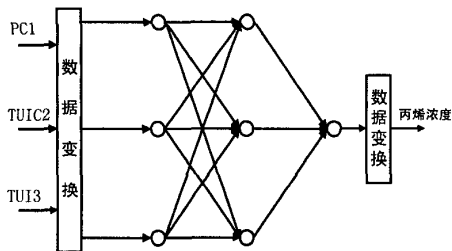


图 3 塔釜丙烯浓度神经网络软测量模型的结构

3. 基于软测量的控制系统投运

3.1 软测量模型在线自校正

将上述建立的 DA406 塔顶丙烷浓度和塔釜丙烯浓度神经网络软测量模型直接应用工业装置的实时预测，不可避免地要产生一定的偏差。在实际生产过程中，丙烯精馏单元的操作工况，诸如：进料组成、进料量、再沸器热水温度以及塔压和塔板分离效率等生产工况和参数，不同程度地发生变化，部会造成软测量模型的预测偏差，因此，必须对上述

所建的软测量模型进行在线校正，使其适应过程操作特性的变化和生产工况的迁移。

3.1.1 塔顶丙烷浓度软测量模型的自动校正

虽然 DA406 塔顶装有一台在线丙烷浓度分析仪，但该分析仪的分析周期为 15 分钟，尤其是自动分析仪的分析值与人工分析数据具有很大的偏差（工业装置的实时操作通常取信于人工分析），且偏差无规律。因此，对于 DA406 塔顶丙烷浓度软测量模型采用了二次自校正技术。第一次校正，人工分析值对在线丙烷浓度分析仪输出值的校正，校正周期是一天，即：24 小时校正一次；第二次校正，根据人工分析值对在线丙烷浓度分析仪输出值校正后的结果，再对软测量模型计算值进行校正，校正周期是 15 分钟。校正模块的计算公式如下：

$$T_AC4055(t) = AR4051P(t) + ALPHA1 * [S475(t-DELTA1) - AR4051P(t-DELTA1)]$$

$$TAC4055C(t) = AC4055C(t) + BETA * [T_AC4055(t-DELTA2) - AC4055C(t-DELTA2)]$$

其中：

AR4051P: DA406 塔顶丙烷浓度在线自动分析仪输出值；

AC4055C: DA406 塔顶丙烷浓度神经网络软测量模型输出值；

S475: DA406 塔顶丙烷浓度人工分析值；

T_AC4055: 人工分析对自动分析仪校正后输出值；

TAC4055C: T_AC4055 对软测量模型计算值校正后的输出值。

DELTA1 是人工分析滞后时间，DELTA1 = 24 hour；

DELTA2 是在线自动分析仪的分析滞后时间，

DELTA2 = 15 分钟；ALPHA1 和 BETA 分别取

0~1 值，它们分别为第一次校正和第二次校正的校正速率参数，该参数决定了上述二个校正过程的快慢，参数越大，则校正过程越快，易造成校正过程

振荡，因此，先选择初始值为 0.2，然后，视校正效果，

逐渐增减校正速率参数。

3.1.2 塔釜丙烯浓度软测量模型的自动校正

DA406 塔釜丙烯浓度软测量模型的校正，与上述 DA406 塔顶丙烷浓度软测量模型的校正类似，只是在此仅需要一次校正，即采用人工分析值对软测量模型计算值进行校正，校正周期是一天，即：24 小时校正一次。

校正模块的计算公式如下：

$$TAC406C(t) = AC406C(t) + ALPHA * [S474(t-DELTA)]$$

-AC406C(t-DELTA)]

其中:

AC406C: DA406 塔釜丙烯浓度神经网络软测量模型输出值;

S474: DA406 塔釜丙烯浓度人工分析值;

TAC406C: 人工分析值对软测量模型输出值的校正。

DELTA 是人工分析滞后时间, DELTA=24 小时;

ALPHA 校正速率参数。该参数的选择方法与上述 ALPHA1 和 BETA 参数选取过程一样。

3.2. 基于神经网络软测量的推断控制系统结构

3.2.1 丙烯精馏塔塔顶丙烷浓度推断控制技术

基于上述 DA406 塔顶丙烷浓度的软测量技术, 我们研制开发了 DA406 塔顶丙烷浓度推断控制系统, 该控制系统根据塔顶产品采出料中丙烷浓度的估计值, 实时推断控制塔顶回流比, 使塔顶采出料中丙烷的浓度为最佳值, 保证了操作单元能最大限度地采出合格的聚合级丙烯产品, 达到“卡边”操作之目的。控制框图如下:

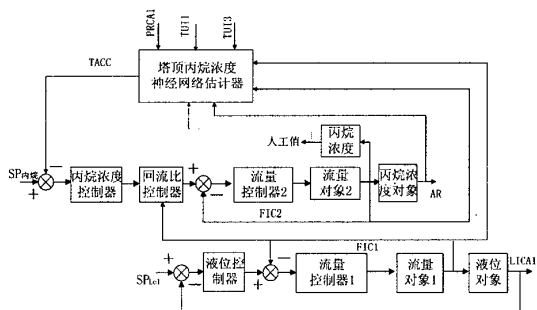


图 4 塔顶丙烷浓度控制框图

3.2.2 DA406 塔釜丙烯浓度推断控制技术

为了最大限度地及时采出 DA406 塔釜中重碳组分, 同时保证采出的塔釜产品中损失的丙烯浓度最小, 本文基于 DA406 塔釜丙烯浓度软测量技术, 研制开发了 DA406 塔釜丙烯浓度推断控制技术, 根据塔釜丙烯浓度的实时估计值, 推断控制 DA406 塔中间温度控制器的设定值, 使塔釜采出料中丙烯的浓度为最佳值。控制框图如下:

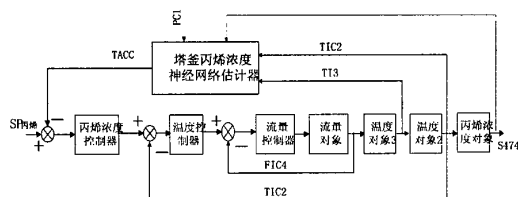


图 5 塔釜丙烯浓度控制框图

4 投运效果

工业装置在 2000 年 7 月实时运行以来, 两个丙烯精馏塔塔顶丙烷浓度推断控制系统和塔釜丙烯浓度控制系统的控制效果十分明显, 改变了以往塔顶丙烯浓度一直过高的情况, 使塔顶丙烯浓度稳定在 99.65% 左右, 同时保证了塔釜丙烯含量低于 5%。很显然, 塔顶丙烷浓度和塔釜丙烯浓度的控制结果是令人满意的, 完全达到了预期的经济和技术指标。

基于丙烯精馏塔塔顶丙烷浓度和塔釜丙烯浓度软测量的推断控制系统的投运效果主要表现在以下两个方面, 塔釜投用效果见图 6, 图 7:

1. 在乙烯装置正常运行工况下 (装置异常操作或故障状态除外), 不仅确保了丙烯精馏塔塔顶稳定地采出浓度大于 99.60% 的丙烯产品, 而且保证了塔釜出料中损失的丙烯浓度小于 5%, 一般控制在 2~3% (原该塔塔釜丙烯年平均浓度为 15.6% 左右)。
2. 两个浓度控制系统的投运大大降低了操作工的劳动强度, 受到操作工的欢迎。

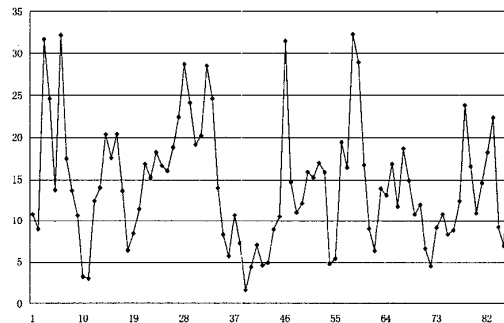


图 6 未投运控制系统塔釜丙烯浓度人工分析值曲线 (2000 年 4~6 月)

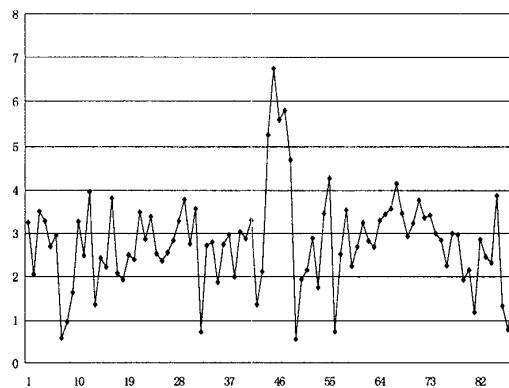


图 7 投运控制系统塔釜丙烯浓度人工分析值曲线 (2001 年 2~4 月)

5. 结束语

由于乙烯装置中的丙烯精馏是一个复杂的精密精馏过程，塔顶丙烷浓度和塔釜丙烯浓度的实时在线测量是“硬”测量技术难以胜任的，因此，在丙烯精馏系统先进控制的实施过程中，软测量技术的成功开发对实现卡边操作、降低丙烯损失提供了十分可靠的保障。

本文所开发软测量技术的主要成功之处在于，一、利用主元分析技术对样本数据进行预处理，解决了丙烯精馏塔塔顶丙烷浓度建模样本空间数据过“散”的问题；二、采用多层前向型神经网络建模，并且改进了网络学习算法；三、应用实时操作信息，结合模拟计算软件 ASPEN PLUS 产生的数据来训练神经网络模型，增强了神经网络学习数据集的正交性和完备性，提高了软测量模型的外推能力和可信度。因此，所建的基于神经网络的软测量模型具有很强的适应功能，能适应操作工况的不断变化，充分反映了丙烯精馏塔塔顶丙烷浓度和塔釜丙烯浓度的操作特性。

参考文献

- [1] 邓修, 吴俊生. 化工分离工程. 北京: 科学出版社, 2000
- [2] 王松汉等. 乙烯装置技术. 北京: 中国石化出版社, 1994
- [3] 刘增良. 模糊技术与神经网络技术选编. 北京: 北京航空航天大学出版社
- [4] Detlef Nauck, Frank Klawonn, Rudolf Kruse, Foundations Of Neuro-Fuzzy Systems. New York: John Wiley & Sons, 1997
- [5] Pierucci, S., et al., "A project for On-line reconciliation and optimization of an olefin plant", Computer & Chemical Engineering, Vol.18, suppl., 1994, pp.: s241-s246.
- [6] 王耀南. 智能控制系统. 长沙: 湖南大学出版社, 1996
- [7] 荣冈, 金晓明, 王树青. 软测量技术及其在应用. 化工自动化及仪表. 1999, 26 (4): 70-72
- [8] 俞金寿, 刘爱伦, 张克进. 软测量技术及其在石油化工中的应用. 北京: 化学工业出版社, 2000