

# 基于原油快速评价及机理模型 实现原油加工优化

龙有<sup>1</sup>, 蒋宇<sup>2\*</sup>, 林健<sup>1</sup>

(1. 中国石化茂名分公司, 广东 茂名 525000; 2. 南京富岛信息工程有限公司, 江苏 南京 210061)

**摘要:**常减压原油蒸馏是炼化企业的龙头装置,其馏分油性质的稳定是下游二次装置平稳操作的保障。使用流程模拟软件建立了基于标定数据的离线模型与基于快速评价原油性质和仪表数据的实时模型。采用实时模型,以产品质量达标作为优化目标提出参数调整建议。实操结果表明,产品质量可被有效地控制在指标范围内。此外,实时模型还可用于优化经济效益,基于所研究的工况,能够提升经济效益 8.1 元/t。

**关键词:**原油快速评价;流程模拟;质量控制;效益优化

**中图分类号:**TQ018

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2020)S-0260-04

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2020.S.058

## Optimization of crude oil processing technology based on real-time crude oil properties and mechanism models

LONG You<sup>1</sup>, JIANG Yu<sup>2\*</sup>, LIN Jian<sup>1</sup>

(1. Sinopec Maoming Petrochemical Company, Maoming 525000, China;

2. Nanjing Richisland Information Technology Co., Ltd., Nanjing 210061, China)

**Abstract:** The stability of distillate oil from crude oil atmosphere and vacuum distillation unit, which is the leading one in a refining and chemical enterprise, will guarantee the downstream secondary units to operate stably. Both an offline model based on calibration data and a real-time model based on real-time crude oil properties and instrument data are established by process simulation software. Taking the qualified product quality as the optimization objective, some suggestions on parameter adjustment are proposed by means of real-time model. And the practical operation results show that the product quality can be effectively controlled within the eligible range. In addition, the real-time mode based can also be used to optimize economic benefit. Based on the investigated operating conditions, economic benefit can be lifted by RMB 8.1 per ton.

**Key words:** rapid evaluation on crude oil; process simulation; quality control; benefit optimization

常减压装置可以将原油切割成不同馏分,这些馏分油可以直接精制成产品,也是下游诸多二次加工装置优质的原料。在原油发生切换或生产指标发生变更时,为保证侧线产品质量合格,操作人员往往基于历史经验进行操作调整,由于常减压操作参数多、耦合性强,缺少机理分析的操作很难保证多侧线产品的质量合格。越来越多的工艺人员使用流程模拟软件,根据设计值或标定数据搭建离线模型,指导操作和工艺调整<sup>[1]</sup>。在实际生产过程中,由于原油性质的波动以及现场操作工况的变化,离线模型的测算结果往往不准确。近年来,随着油品快速分析技术的发展,为计算机化工过程模拟提供了实时准确的基础物性数据。本文提出基于原油数据和工况数据建立模型,对工况进行测算,能够更精确地指导当前操作。

## 1 原油快速评价技术

在实时模型的建立过程中,能够快速、准确地感知原油性质至关重要。传统分析周期长、成本高,难以满足建模要求。原油快速评价技术基于现代仪器分析和数据库,能够快速得到原油评价,可为实时模型提供及时准确的原油性质数据。目前国内外大型石化企业主要使用的分析手段有色谱-质谱联用、核磁共振和近红外光谱<sup>[2-3]</sup>,其中近红外光谱具有测量方便、速度快、成本低的特点,得到了广泛应用<sup>[4]</sup>。通过近红外分析仪扫描获得原油光谱数据,使用 PT5 建模软件,再基于拓扑学原理和偏最小二乘法,并结合原油光谱库和原油数据库,预测原油的性质。该技术主要用于原油调合,以保证加工原料的稳定。相较于原油传统评价,原油快速评价所需时间短,预测的性质齐全,可以保证物性数据的实时性<sup>[5]</sup>。

收稿日期:2020-01-06;修回日期:2020-04-23

作者简介:龙有(1975-),男,硕士,高级工程师,主要从事炼油新技术研究与应用;蒋宇(1992-),男,硕士,研究方向为炼油装置的建模与优化,通讯联系人,025-86925666,jiangyu60221@163.com。

## 2 离线模型与实时模型对比

在对装置进行计算机模拟时,通常先根据标定

数据建立离线模型,研究其规律。本文以某公司500万t/a常减压装置为例建立离线模型,主要的“三塔两炉”工艺流程如图1所示。

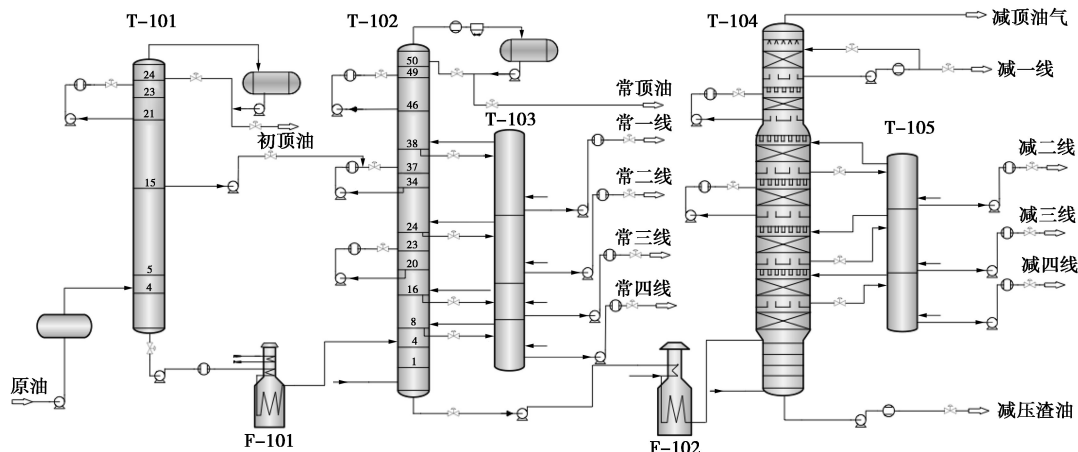


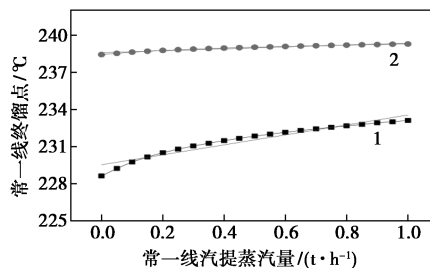
图1 常减压工艺流程图

工厂进行标定时加工沙轻原油,使用其实沸点蒸馏数据输入模型。根据工艺流程,使用现场控制点作为模型的输入项,显示仪表作为模型输出项。选用 Braun K10 物性计算方法,建立初馏塔、常压塔和减压塔模型<sup>[6]</sup>。

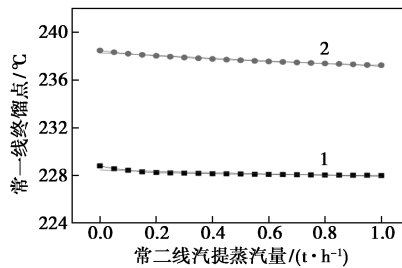
该石化公司拥有原油快速评价系统和原油调合系统,能够快速获得常减压进料的密度、馏程、酸值、冰点曲线等数据。公司每12h对侧线产品进行采样分析,并录入实验室数据管理系统(LIMS)。同时,该公司建设有实时数据库(RTDB),用于存储仪表数据,这为实时模型提供了良好的基础条件。该常减压当前加工为阿曼原油。从上述系统中获取原油、仪表以及产品质量数据通过接口传入模型,建立与工况匹配的实时模型。

在常减压流程中,影响产品质量的因素有很多,以常一线为例,考察常一线流量、常一线汽提蒸汽量和常二线汽提蒸汽量对常一线终馏点的影响,分别对两个模型进行灵敏度分析,结果见图2。

从图2可以看出,在小范围变化时,上述变量的变化与常一线的终馏点基本呈线性关系,拟合的



(b) 常一线汽提蒸汽量



(c) 常二线汽提蒸汽量

1—标定模型;2—实时模型

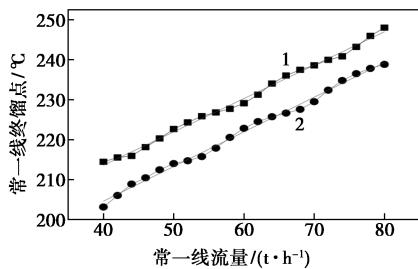
图2 操作参数对常一线产品质量的影响

斜率见表1。

表1 各操作参数对常一线终馏点影响斜率拟合结果

模型	常一线抽出量	常一线汽提蒸汽量	常二线汽提蒸汽量
标定工况/(t·h <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	0.83	4.01	-0.56
实时工况/(t·h <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	0.87	0.78	-1.14

表1中的数据表明,两个模型灵敏度规律存在差异,离线模型中常一线汽提蒸汽量对常一线终馏点的影响比较大,而实时模型中常二线汽提蒸汽量



(a) 常一线抽出温度

对常一线终馏点的影响比较大。因此,在实际生产过程中,若要增产常一线航煤应当首先考虑增加常二线汽提蒸汽量。进料原油性质和与之对应工况的改变往往会带来操作规律的变化,完全依靠标定模型来指导不同原油的加工是不够准确的。

### 3 工业优化实例

在生产过程中,操作人员需要保证产品质量的合格稳定,工艺人员会进一步关注装置的效益,这两种需求的操作调整可以通过实时模型中的优化功能进行测算。

#### 3.1 产品质量优化

在工艺调整过程中,精馏塔各参数之间相互关联,只依靠单变量的变化规律不足以完成多产品质量的调整。此时可以借助模拟软件中的序贯二次规划(SQP)优化器进行求解。目标为各产品质量与指标差的平方和最小,如式(1)所示:

$$\text{MINERROR} =$$

$$\sum (A_i - C_i)^2 + \sum o[(X_j - X_{j0})/\sigma_j]^2 \quad (1)$$

其中: $A_i$ 为*i*产品的化验结果; $C_i$ 为*i*产品的指标;对于需要维持稳定的参数的变化添加调整的惩罚项,式中 $X_j$ 为*j*参数优化后的值; $X_{j0}$ 为*j*参数优化前的值; $o$ 为惩罚系数; $\sigma_j$ 为*j*参数的量纲系数,取*j*参数仪表的量程。在此优化方案中,选取常压塔顶温度作为惩罚项,避免塔顶温度大幅变化影响整塔平衡。

在加工上述阿曼原油时,加工指标发生改变,产品化验结果及改变后的控制指标见表2。

表2 常压塔化验数据及产品指标

项目名称	指标要求	化验结果
常顶油终馏点/℃	155±3	152
常一线冰点/℃	-51~-49	-52.9
常三线95%馏出温度/℃	365±3	357

常一线和常三线侧线产品质量均不符合指标要求,因此上述目标包含常顶油终馏点155℃、常一线冰点-50℃、常三线95%馏出温度365℃。优化变量选取各侧线及常顶油流量。现场按照模型测算结果将调整目标输入DCS控制系统,待系统稳定一段时间后取样化验,结果见表3。

现场进行调整后,装置各仪表的趋势与测算结果一致,化验结果显示产品质量都在控制指标范围内,验证了模型的可靠性。使用实时原油及仪表数据建立实时模型,对工艺操作参数进行优化,可以有效地指导操作人员的操作,保证产品质量稳定。

表3 质量优化方案执行结果

项目	调整前参数	模型调整建议	执行后参数
常顶油终馏点/℃	152.0	155.0	154.0
常一线冰点/℃	-52.9	-50.0	-50.2
常三线95%馏出温度/℃	357.0	365.0	365.5
常压塔顶温度/℃	123.3	124.6	124.3
常一线抽出温度/℃	185.7	187.3	186.9
常二线抽出温度/℃	256.0	257.0	256.4
常三线抽出温度/℃	303.4	304.5	303.8
常四线抽出温度/℃	335.0	336.8	336.2
常顶油流量/(t·h <sup>-1</sup> )	43.3	44.8	44.1
常一线流量/(t·h <sup>-1</sup> )	100.6	106.9	108.2
常二线流量/(t·h <sup>-1</sup> )	69.7	59.0	56.1
常三线流量/(t·h <sup>-1</sup> )	47.2	56.0	53.3
常四线流量/(t·h <sup>-1</sup> )	43.2	37.1	39.6

#### 3.2 效益优化

上述产品质量优化方案适用于指导操作员操作,完成生产目标。在验证了模型预测的可行性后,可以采用该技术路线进行效益优化,以加工萨宾诺原油为例,目标函数为式(2):

$$\text{MaxProfit} =$$

$$\sum \text{Product}_i P_i - \sum \text{Feed}_j F_j - \sum \text{Utility}_k U_k \quad (2)$$

其中: $P_i$ 为产品价格; $F_j$ 为原料价格; $U_k$ 为公用工程价格。

常减压各侧线产品为中间产物,没有具体市场价格,可以通过下游产品的价格反推出中间结算价格,表4给出了各侧线产品的中间结算价格和公用工程价格。

表4 价格数据汇总

项目名称	单价/(元·t <sup>-1</sup> )	项目名称	单价/(元·t <sup>-1</sup> )
原料	3382	减一线蜡油	3585
初顶石脑油	3223	减二线蜡油	3585
常顶石脑油	3223	减三线蜡油	3585
常一线煤油	4063	减四线蜡油	3585
常二线柴油	3609	减压渣油	2689
常三线柴油	3609	低压蒸汽	157
常四线蜡油	3585	燃料气	2440

同样,在实际优化过程中需要对函数添加惩罚项,计算方法与上文一致。其目的一是为了维持关键参数的稳定;二是避免非重要参数的大幅变化带来微小的效益变化。修正后的目标如式(3):

$$\text{AdjProfit} = \sum \text{Product}_i P_i - \sum \text{Feed}_j F_j - \sum \text{Utility}_k U_k - \sum \text{Penalties} \quad (3)$$

本例的惩罚项有各塔塔顶温度、塔顶回流及中段循环流量。优化主要考虑的约束有产品质量约束

和设备约束,产品质量约束包括石脑油终馏点、航煤冰点和终馏点等,本次优化采用上述控制指标作为产品质量约束。与工艺人员沟通后确定塔顶和各侧线温度、各管路流量等设备约束,主要的设备约束见表5。

表5 设备约束

项目	约束范围	项目	约束范围
初馏塔顶温度/℃	90~140	初顶油流量/(t·h <sup>-1</sup> )	20~60
常压塔顶温度/℃	90~140	常顶油流量/(t·h <sup>-1</sup> )	20~60
常一线抽出温度/℃	150~200	常一线流量/(t·h <sup>-1</sup> )	60~120
常二线抽出温度/℃	220~280	常二线流量/(t·h <sup>-1</sup> )	50~100
常三线抽出温度/℃	270~335	常三线流量/(t·h <sup>-1</sup> )	50~100
常四线抽出温度/℃	310~350	常四线流量/(t·h <sup>-1</sup> )	20~70
常顶冷回流流量/(t·h <sup>-1</sup> )	0~110	常底吹汽量/(t·h <sup>-1</sup> )	2~4
减顶温度/℃	75~110	减三线抽出温度/℃	280~350
减一线抽出温度/℃	115~190	减四线抽出温度/℃	320~365
减二线抽出温度/℃	220~280	减底吹汽量/(t·h <sup>-1</sup> )	2.9~3.5

使用实时模型进行优化,使用上述目标及约束,变量选用各产品流量、炉出口温度和常压塔汽提蒸汽等,使用SQP算法对操作参数进行优化<sup>[7]</sup>,优化方案及各侧线产品收率变化见表6和表7。

表6 效益优化方案执行结果

项目	调整前参数	模型调整建议	执行后参数
常顶冷回流流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	59.5	50.4	45.8
常压塔顶温度/℃	114.7	112.1	113.3
常一线抽出温度/℃	178.5	181.4	180.5
常二线抽出温度/℃	250.8	257.7	258.5
常三线抽出温度/℃	301.7	300.8	305.0
常四线抽出温度/℃	339.7	339.6	337.1
常底吹汽量/(t·h <sup>-1</sup> )	3.0	4.0	3.7
减压塔顶温度/℃	88.8	72.8	79.4
减一线抽出温度/℃	195.1	165.0	169.3
减二线抽出温度/℃	312.0	306.2	306.4
减三线抽出温度/℃	344.7	340.0	343.5
减四线抽出温度/℃	356.9	356.7	357.2

表7 效益优化方案执行后收率变化

产品	优化前量/(t·h <sup>-1</sup> )	优化建议量/(t·h <sup>-1</sup> )	优化后量/(t·h <sup>-1</sup> )	优化前总价/(万元·h <sup>-1</sup> )	优化后总价/(万元·h <sup>-1</sup> )
初顶油	24.7	24.7	23.9	8.0	7.7
常顶油	37.0	36.5	37.8	11.9	12.2
常一线	98.0	117.9	111.3	39.8	45.2
常二线	57.1	33.3	46.4	20.6	16.8
常三线	64.3	73.6	50.5	23.2	18.2

常四线	19.5	19.5	31.7	7.0	11.4
减顶油	0.7	0.4	0.3	0.2	0.1
减一线	20.4	16.8	12.3	7.3	4.4
减二线	66.6	55.0	69.1	23.9	24.8
减三线	36.2	47.1	36.2	13.0	13.0
减四线	12.4	12.9	16.6	4.5	6.0
减压渣油	188.8	188.0	189.5	50.8	51.0

在当前价格体系中,煤油价格最高,调整后收率有所增加;柴油价格比蜡油高,但综合调整后柴油收率减少,蜡油收率反而增加。这是综合考虑原料、产品和公用工程价格以及各约束因素的优化结果。装置效益变化(元/t)=(优化后侧线产品总价-优化后能耗总价-优化后原油总价)/优化后原油总量-(优化前侧线产品总价-优化前能耗总价-优化前原油总价)/优化前原油总量。本次操作能提升经济效益约8.1元/t。

## 4 结论

使用计算机模拟软件可以较好地模拟原油蒸馏过程,通过灵敏度分析可以得到各操作参数对产品质量以及收率的影响。离线标定模型和实时模型在进料性质和操作工况上有所区别,因此得出的灵敏度规律不同,宜使用实时模型对当前工况进行测算。

随着油品快速分析技术的发展,操作人员能够实时获得加工原油的性质,将其应用到计算机模拟过程中,建立实时机理模型。使用模型的优化功能可以建立不同的优化目标,用于控制产品质量或提高价值产品的收率。此方法也可以根据不同装置的情况,使用不同的价格、操作变量和约束进行优化,指导实际生产。

## 参考文献

- [1] 袁洪飞.胜利原油常减压蒸馏装置的流程模拟优化与应用[J].广东化工,2015,42(10):171-173.
- [2] Bruno T J, Ott L S, Lovestead T M, et al. The composition-explicit distillation curve technique: Relating chemical analysis and physical properties of complex fluids[J]. Journal of Chromatography A, 2010, 1217(16): 2703-2715.
- [3] 吴青. NIR, MIR 和 NMR 分析技术在原油快速评价中的应用[J]. 炼油技术与工程, 2018, 48(6): 1-7.
- [4] 陈瀑, 孙健, 张风华, 等. 近红外原油快速评价技术二次开发与工业应用[J]. 石油炼制与化工, 2014, 45(8): 97-101.
- [5] 王明辉, 周家庆, 冯晓东, 等. 原油快速评价技术在原油调合中的应用[J]. 炼油与化工, 2015, 26(3): 17-19.
- [6] 郑文刚. 模拟常减压蒸馏装置的物性计算方法 and 模型结构[J]. 石油炼制与化工, 2018, 49(7): 100-106.
- [7] 雷瑶, 楚纪正, 陈福龙. 石脑油裂解炉全周期稳态模拟和操作优化[J]. 石油化工, 2012, 41(10): 1113-1119. ■