

# 先进过程控制技术在连续重整装置中的应用

池占胜, 王海洋, 王喜刚

浙江石油化工有限公司, 浙江舟山 316200

**摘要 :** 为保证连续重整装置的平稳运行, 提高产率和能源利用率, 在连续重整装置上应用先进控制技术, 分别对三合一炉、二合一炉、重整反应、再生单元、脱戊烷塔 / 脱丁烷塔五个单元实施先进控制技术。实施结果表明, 实施先进控制技术可降低过程参数的波动, 提高芳烃收率和降低装置单位能耗。

**关键词 :** 先进过程控制; 连续重整; 芳烃收率; 降低能耗

## The Application of Advanced Process Control Technology in the Continuous Reforming Unit

Chi Zhanheng, Wang Haiyang, Wang Xigang

Zhejiang Petrochemical Co., Ltd. Zhoushan, Zhejiang 316200

**Abstract :** In order to smooth operation of the Continuous Reforming Unit(CRU) and improve the yield and efficiency of energy utilization, the Advanced Process Control(APC) technology is applied to the CRU, including the Three-in-one Furnace, the Two-in-one Furnace, the Reforming Reaction Unit, the Regeneration Unit and the Depentanizer/Debutane Column. The Results showed that the implementation of the APC could reduce the fluctuation of process parameters, increase aromatics yield coefficient and minimize energy consumption per unit of feed.

**Keywords :** advanced process control; the continuous reforming unit; aromatics yield; reduce energy consumption

## 引言

先进控制技术 (Advanced Process Control, APC) 是基于模型预测控制算法 (Model Predictive Control, MPC) 的一项控制技术, 以模型为基础, 同时包含了预测的原理, 还兼具最优控制的基本特征, 随着计算机的普及, 得到推广和应用; MPC是在 20 世纪 70 年代末开始出现的一种基于模型的计算机控制算法<sup>[1]</sup>。该技术有如下特点:

- (1) 对模型要求低:
  - 功能上: 能满足上述功能的均可以作为预测模型。
  - 结构上: 状态方程、传递函数这类传统的模型都可以作为预测模型, 对于线性稳定对象, 甚至阶跃响应、脉冲响应这类非参数模型也可直接作为预测模型使用<sup>[1]</sup>。
- (2) 能够实现大时滞、多变量耦合等复杂的多变量过程控制, 被控变量和控制变量之间存在各种约束条件<sup>[2]</sup>。
- (3) 应用传统的控制理论难以解决高度非线性的问题, 而应用先进控制技术则可以有效地解决这一问题<sup>[2]</sup>。
- (4) 随着 DCS 技术的不断发展, 当前很多的先进控制策略可以在 DCS 上实现, 先进控制的可靠性、可维护性以及可操作性都得到了比较大的提升<sup>[2]</sup>。

随着石油化工行业的发展, APC 在炼油化工领域得到了广泛应用。众多国内外大型石油化工企业应用先进控制技术实例表明 APC 可提高生产负荷和产品回收率, 带来可观的经济效益<sup>[10]</sup>。APC 系统能够全面提升装置的抗干扰能力, 使主要工艺指标更加平稳; 并通过卡边优化, 提高装置目标产品的收率, 降低装置的物耗和能耗, 实现装置“安、稳、长、满、优”的运行目标<sup>[3]</sup>。

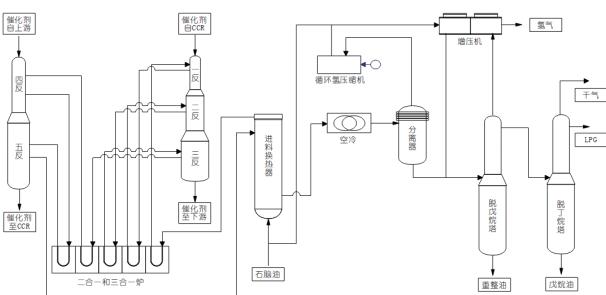
## 一、装置概述

整油<sup>[6]</sup>。主要工艺流程如下:

来自上游装置的各股重石脑油原料在混合后进入重整进料缓冲罐, 升压后送入换热器与氢气混合并与反应产物换热, 进入进料加热炉继续加热至反应所需温度后进入第一反应器, 物流经催化剂床层, 在临氢条件下进行重整反应, 该反应是吸热反应, 反应产物温度降低, 再经反应器内上流式中心管流出进入第一中间

加热炉升温至反应温度后，继续进入第二反应器，按此顺次完成第三、四、五的加热和反应。重整催化剂在循环使用过程中，活性会逐渐降低。从反应器来的待生催化剂在再生器内自上而下依次会经过预热区、烧焦区、再加热区、氯氧化区、干燥区、冷却区，从而恢复活性。

来自反应器的最终反应产物经换热后进入空冷器冷凝冷却，然后在重整气液分离器中进行气液分离，一部分气相经过重整循环氢压缩机升压后作为循环氢返回重整反应系统；另一部分进入一段入口分液罐进行气液相分离。再接触罐底液先经换热升温及脱氯后，送入脱戊烷塔及后续的脱丁烷塔进行精馏得到重整汽油馏分、重整干气、液化石油气、戊烷馏分至下游装置<sup>[4]</sup>。



> 图1 连续重整装置工艺流程

连续重整装置是炼油过程的重要环节，装置工艺复杂，变量间的耦合明显，进料性质和加热炉燃料组份的波动使得装置的平稳运行面临挑战，这对控制技术也提出了更高的要求。重整过程是一个化学反应的过程，存在着多种化学反应。重整系统是高温、易燃、易爆的临氢系统，操作大幅波动随时可能发生意外事故，所以在操作过程中要做到平稳操作，避免引发事故的发生。在生产中，要密切注意重整进料质量是否符合指标，关注反应温降、氢油比等操作参数，保护好催化剂的性能<sup>[6]</sup>。

## 二、技术方案

针对连续重整装置的现状和生产需求，主要对重整反应（包括三合一炉和二合一炉）、重整再生、脱戊烷塔和脱丁烷塔实施了先进控制，平稳装置的操作并提高反应苛刻度，达到平稳操作和卡边操作。

### (一) 反应控制器

重整反应的操作参数决定了重整生成油的总芳含量、产品收率（或芳烃产率）、纯氢产率及催化剂的运转周期。连续重整反应的操作参数，即反应条件，包括：反应压力、反应温度、空速和氢烃比。其中：

反应温度：主要取决于保护催化剂和满足产品质量要求两个方面的因素<sup>[4]</sup>。

反应压力：降低反应压力，有利于芳构化反应而抑制裂化反应；相反，提高反应压力将增加加氢裂化反应而减低芳构化作用。但是，在低压下操作，催化剂的结碳速率迅速增加，将严重影响催化剂的使用周期<sup>[4]</sup>。

空速：空速的大小直接影响产品的质量。空速大，产品的质量

就低；提高反应温度可以弥补高空速的影响，但又会降低催化剂的选择性，低空速会使加氢裂化反应加剧而使重整液收率下降<sup>[4]</sup>。

氢烃比：正常操作条件下，反应系统氢油比不作为调节手段，只作为控制参数<sup>[4]</sup>。

表1 反应控制器变量列表

被控变量 CV	操作变量 MV	干扰变量 DV
反应器平均入口温度	入口温度设定（一反~五反）	进料经换热流量
入口温度差（二反与一反）	催化剂循环速率设定	循环氢气流量
入口温度差（三反与二反）	循环压缩机转速设定值	
入口温度差（四反与三反）		
入口温度差（五反与四反）		
一反~五反出入口温差		
生成油芳烃含量		
反应空速		
反应氯烃比		
待生催化剂结焦量		

## (二) 加热炉控制器

加热炉的控制目标是控制氧含量和炉膛负压，既要防止过低而导致熄火，又要防止过高浪费能耗。加热炉控制器包括二合一炉控制器和三合一炉控制器。

表2 二合一炉 APC 控制器变量列表

被控变量 CV	操作变量 MV	干扰变量 DV
二、三炉氧含量	二、三炉支风道流量	至二、三炉燃料气流量
二合一炉炉膛负压	二、三炉烟道调节挡板	
二合一炉总烟道压力	二合一炉烟道调节总阀门	

表3 三合一炉 APC 控制器变量列表

被控变量 CV	操作变量 MV	干扰变量 DV
一、四、五炉氧含量	一、四、五炉支风道流量	至一、四、五炉燃料气流量
三合一炉膛负压	一、四、五炉顶烟道调节挡板	
三合一炉总烟道压力	三合一炉烟道调节总阀门开度	

### (三) 再生控制器

操作参数对于再生部分的性能是相当重要的，确保在烧炭区高效烧掉积炭，避免在烧炭区下部发生积炭燃烧。如果在燃烧区以下烧焦，例如氯化区或干燥区，则会对催化剂和设备造成严重损坏<sup>[7]</sup>。操作员须时刻关注着催化剂循环速率、燃烧区氧含量、待生剂碳含量和燃烧段气体流速。再生控制器主要是控制再生器再生 O<sub>2</sub> 浓度，使再生 O<sub>2</sub> 浓度保持在设置允许的最大 O<sub>2</sub> 浓度和最小 O<sub>2</sub> 浓度之间，维持再生烧焦温度的合理分布，控制再生催化剂残焦量。

表4 再生控制器变量列表

被控变量 CV	操作变量 MV	干扰变量 DV
烧焦区床层温度 - 第4~9层	再生气氧含量	待生催化剂结焦量
	烧焦空气温度设定值	催化剂循环速率

#### (四) 精馏单元控制器

精馏单元控制器的控制对象是脱戊烷塔和脱丁烷塔，主要作用是分离不同的组份和产出产品出装置；先进控制提供两个塔顶温、底温、回流罐液位、压差的控制和回流比的优化，具体优化和控制目标定义如下：

表5 精馏单元控制器变量列表

被控变量 CV	操作变量 MV	干扰变量 DV
两塔塔顶温度	两塔回流量	两塔进料温度
两塔上部灵敏板温度	两塔加热量	
两塔回流罐液位	两塔塔顶采出量	
两塔回流比		
两塔压差		
两塔塔底温度		

### 三、系统投用效果评估

项目实施完成后，经过上线试运行和参数优化调整，具备了上线运行条件，对装置实施了 APC 和 RTO 的标定和效果评估，具体的结果如下：

#### (一) 平稳性对比

二合一炉和三合一炉控制功能：控制三合一炉的燃烧空气量，降低炉膛过氧量，提高燃烧炉的燃烧效率；控制排烟量，使炉膛负压控制在合理范围内。投用先进控制后，二合一炉的氧含量标准方差较常规控制平均降低了 31.4%，三合一炉的氧含量标准方差较常规控制平均降低了 31.12%。

表6 二合一炉和三合一炉控制器投用前后平稳性对比

描述	标准方差		标准方差 降幅 (%)
	常规控制	APC 控制	
一炉氧含量	0.217	0.149	31.34%
四炉氧含量	0.164	0.112	31.71%
五炉氧含量	0.168	0.117	30.36%
二炉氧含量 A	0.150	0.103	31.33%
三炉氧含量 A	0.237	0.162	31.65%
二炉氧含量 B	0.183	0.128	30.05%
三炉氧含量 B	0.215	0.145	32.56%

再生控制器的控制功能：控制再生气氧含量和烧焦空气温度设定值，使再生氧气浓度保持在设置允许的最大浓度和最小浓度

### 参考文献

- [1] 王树青. 工业过程控制工程 [M]. 2002.12. 北京: 化学工业出版社, 2002.12.
- [2] 张永辉, 纪红霞. 先进控制技术在炼油化工行业的应用 [J]. 化工管理, 2022年01月, 69–71.
- [3] 赵长斌, 先进过程控制系统在催化裂解和气体分离装置的应用 [J]. 石化技术与应用, 2023年3月, 第41卷(2期): 130–134.
- [4] 无作者, 380 万吨 / 年连续重整装置技术规程, 浙江石油化工有限公司, 2023.11: 39–42, 83–90, 297.
- [5] 卢俊文, 先进过程控制技术在催化重整装置中的应用 [J]. 石油化工技术与经济, 2023年2月, 第39卷(1期): 31–35.
- [6] 无作者, CCR Platforming General Operating Manual, UOP-A Honeywell Company, 2014.12; I-1.
- [7] 无作者, UOP Cycle 连续重整再生单元 CycleMax III 技术手册, UOP-A Honeywell Company, 2013.11; III-1.
- [8] 张抗抗, MPC 的经济效益在哪里? (1) 间接接经济效益, (2024-11-04).
- [9] 张抗抗, MPC 的经济效益在哪里? (2) 间接接经济效益, (2024-11-12).
- [10] 韩文华, 先进过程控制技术在芳烃联合装置的应用研究 [J], 技术应用与研究, 2022年, 第17期: 132–134.

之间，维持再生烧焦温度的合理分布，控制再生催化剂残焦量。投用先进控制后，再生器烧焦区温度标准方差较常规控制平均降低了 31.65%。

表7 再生控制器投用前后平稳性对比

描述	标准方差		标准方差 降幅 (%)
	常规控制	APC 控制	
再生器烧焦区温度分布	6.130	4.281	30.16%
再生器烧焦区温度分布	3.541	2.368	33.13%

精馏单元控制器的控制功能：稳定控制脱戊烷塔各关键温、塔顶回流罐液位，优化脱戊烷塔回流比；稳定控制脱丁烷塔各关键温度、塔釜液位，优化脱丁烷塔回流进料比。投用先进控制后，再生器烧焦区温度标准方差较常规控制平均降低了 38.28%。

表8 精馏单元控制器投用前后平稳性对比

描述	标准方差		标准方差 降幅 (%)
	常规控制	APC 控制	
脱戊烷塔塔顶温度	1.929	1.309	32.14%
脱戊烷塔上部灵敏板温度	2.425	1.370	43.51%
脱戊烷塔塔底温度	0.574	0.349	39.20%

#### (二) 产品收率和能耗指标

APC 的功能之一就是控制受控参数在一定范围内的波动，通过模型预测数值与实际测量数值比对，将比对结果反馈给优化控制程序，控制操作变量的数值，使受控对象平稳运行<sup>[5]</sup>。波动降下来了，就有卡边优化的空间了<sup>[8]</sup>；实施 APC 后，提高了目标产品（芳烃）收率，降低了装置的单位能耗，具体数据对比见表9。

表9 APC 投用前后产品收率和能耗对比

描述	常规控制	APC 控制	增幅 (%)
芳烃收率	74.34%	74.85%	0.68%
单位能耗	93.90 kgEo/t	93.27 kgEo/t	0.67%

### 四、结束语

连续重整装置先进控制投用后，有效地提高了装置的自动化水平，提升了装置的整体安全水平<sup>[9]</sup>。众多国内外大型石油化工企业应用先进控制技术实例表明，APC 可提高生产负荷和产品回收率，带来可观的经济效益<sup>[10]</sup>。本文对比先进控制在连续重整装置投用效果，实施先进控制可实现提高产品收率、节能降耗和平稳操作的目标。