

# 先进过程控制技术在气分装置的应用

池占胜, 颜景义, 郑伯刚

浙江石油化工有限公司, 浙江 舟山 316200

**摘要 :** 为提高装置的自动化程度、稳定产品质量、降低装置能耗, 同时提升丙烯收率, 实现装置效益最大化, 在气分装置上实施先进过程控制技术。应用结果表明: 先进过程控制投用率 98% 以上, 装置操作频次下降 61%; 发挥 APC 技术卡边优化作用, 降低装置能耗 4.5%, 提高丙烯收率 1.56%, 效益估算约 489.17 万元/年。

**关键词 :** 先进过程控制; 气分装置; 降低能耗; 提高收率

## Application of Advanced Process Control Technology in Gas Separation Unit

Chi Zhanheng, Yan Jingyi, Zheng Bogang

Zhejiang Petrochemical Co., Ltd. Zhoushan, Zhejiang 316200

**Abstract :** To improve the automation level of the unit, stabilize product quality, reduce energy consumption, increase propylene yield, and maximize unit efficiency, advanced process control technology is implemented in the gas separation unit. Application results show that the utilization rate of advanced process control is over 98%, and the operation frequency of the unit has decreased by 61%. By leveraging the optimization function of APC technology, energy consumption of the unit has been reduced by 4.5%, propylene yield has increased by 1.56%, and the estimated benefit is approximately RMB 4.8917 million per year.

**Keywords :** advanced process control; gas separation unit; reducing energy consumption; increasing yield

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>。

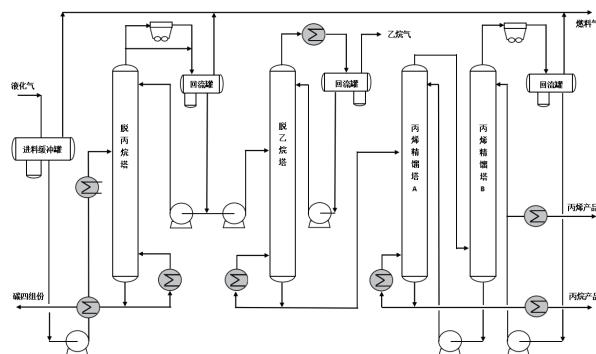
某石化公司 70 万吨/年气分装置, 存在关键工艺指标波动较大、运行平稳性欠佳、产品收率和质量不稳定、能耗偏高等问题; 为提升装置的自动化水平、稳定产品质量、降低能耗、提高高附加值产品丙烯的产率, 实现装置效益最大化, 2024 年 7 月投用 APC, 实现装置的精细化控制和卡边优化, 达成了节能降耗与提高收率的目的<sup>[3]</sup>。本文通过对比 APC 实施前后装置主要参数变化, 包括操作频次、能耗、收率和经济效益。全面考察了该技术的应用效果。

## 一、装置简介

醇的催化液化气进行不同组分的切割分离, 其主要产品是丙烯、丙烷和碳四。

本文提到的气分装置采用常规三塔流程, 包括脱丙烷塔、脱乙烷塔、丙烯精馏塔和公用工程部分, 其中丙烯精馏塔是由两个塔 A 和 B 串联组成。工艺流程如下: 装置外来的液化气, 经原

料缓冲罐沉降脱水，一路经原料泵经换热后从中上部进入脱丙烷塔，从脱丙烷塔顶出来的碳二和碳三组分，经冷却后进入回流罐；回流罐抽出两路，一路返脱丙烷塔顶做回流；另一路经泵送至脱乙烷塔，脱乙烷塔是全回流操作，塔顶抽出经回流罐再次返塔打回流，塔顶设置压控阀，泄放燃料气，防止乙烷集聚造成塔压过高，脱乙烷塔塔底碳三自压送到丙烯精馏塔；丙烯精馏塔分为A塔和B塔，B塔是上塔，A塔是下塔。A塔塔底采用热水作为重沸器热源，塔底丙烷抽出后，经冷却送出装置，丙烯塔A塔塔顶物料直接进B塔，B塔塔底物料打回A塔，B塔塔顶的丙烯组分进丙烯回流罐；回流罐中的丙烯经冷却、过滤、脱水后，产品出装置<sup>[4]</sup>。



>图1 气分装置工艺流程简图

能源利用方面，气分装置充分利用热联合，脱丙烷塔底重沸器采用催化顶循油作为热源，以0.5MPa 低压蒸汽作为开工辅助热源，这在一定程度上降低了能耗。但对气分装置来说，其精馏过程是一个传质传热过程，产品纯度要求高，回流比大，能耗相对其他种类的工艺装置仍然较大，因此工艺有优化能耗的需求<sup>[4]</sup>。

## 二、项目实施

为保证 APC 的应用效果, APC 技术实施前, 首先要完成基础控制回路 PID 整定和控制方案优化, 提高装置的自控率和有效投用率, 发挥 APC 多变量协调控制的作用, 并达到卡边优化的目的。其次, 结合装置运行状态和工艺人员经验, 优化控制方案, 避免人为操作和干预, 干扰和影响 APC 控制, 如脱丙烷塔顶压力和丙烯塔顶压力, 修改为压力和冷后温度串级控制, 保持塔压在合理的区间范围内。

完成上述工作后，围绕气分装置与工艺讨论并制定详细功能设计方案，按照方案开展阶跃测试确定变量间的模型关系，下装 DCS 与 APC 数据传递程序并测试相关逻辑组态，保证程序的可靠性和安全性，最后投用 APC、优化参数并完成标定验收。

### 三、控制器设计

APC 系统以现有的 DCS 基础控制回路为基础, 综合考虑气分装置各单元之间及单元内部变量之间相互的关联性, 结合装置的设计理念、操作经验和工艺指标等, 确定影响和决定装置运行的关键变量并利用模型确定变量之间的关系, 完成控制器设计。装

置整体的控制策略设计如下：

1. 调节空冷冷后温度，稳定控制丙烯塔塔顶压力。
  2. 调节丙烯塔塔底温度和回流量，稳定控制丙烯塔运行。
  3. 丙烯塔塔顶压力、塔底液位和塔顶丙烷含量作为约束变量，保证产品质量合格。
  4. 在约束变量满足要求的情况下，操作回流比和塔底温度，于边界，卡边优化丙烯塔运行，提高丙烯收率，降低装置耗能。

根据以上的原则，在气分装置上设计了两个 APC 控制器，分别是：

(一) 脱丙烷塔控制器：设计1个操作变量和2个被控变量。以回流量作为操作变量，对脱丙烷塔的操作实施控制与优化。将脱丙烷塔第25层塔盘温度设为约束变量，以确保产品质量。设定合理区间，优化回流比，实现脱丙烷塔的卡边优化。

(二) 丙烯塔控制器: 设计3个操作变量和5个被控变量。其中空冷冷后温度控制丙烯塔塔顶压力, 实现塔顶压力稳定控制, 同时减少操作次数。操作变量塔底温度和回流量, 与被控变量塔顶压力、塔底液位、塔顶丙烷含量和回流比相对应, 实现多变量协调控制, 满足工艺指标约束, 保证丙烯和丙烷合格, 同时引入优化功能, 实现卡边优化。

#### 四、应用效果

为验证 APC 技术在本装置实施的效果,下面从操作频次、装置能耗、丙烯收率和经济效益四个方面,对比 APC 投用前后装置的运行情况。

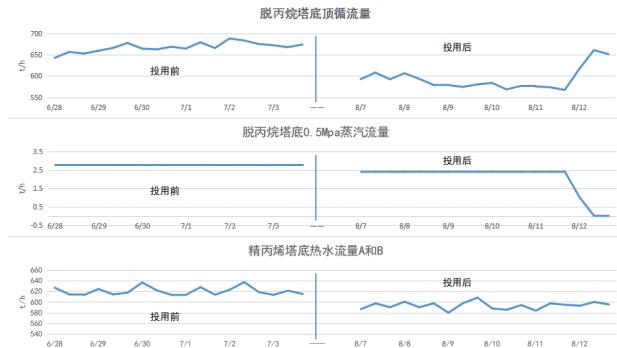
### (一) 操作频次

进料负荷波动，工艺人员频繁干预，操作频次居高不下，进料缓冲罐液位控制作用太强，没有缓冲作用。液位可以在工艺指标一定范围内波动，具有一部分的控制自由度，可以用于装置上下游的物料平稳过渡，减少下游单元进料流量波动<sup>[9]</sup>。本项目中，首先要解决进料负荷波动的问题，要充分发挥进料缓冲罐、各回流罐和塔器液位的缓冲作用，解决进料负荷升降过快对装置的影响；另外，发挥 APC 多变量控制的优势，把工艺人员操作时参考的变量都纳入到 APC 中。APC 投用后，装置的自控率和有效投用率都达到了 100%，对比投用前后装置的操作频次，投用后操作频次降低约 837 次 / 周，约 61%。大幅降低了操作人员的劳动强度，使装置操作人员有更多的时间与精力来思考操作上的优化<sup>[8]</sup>，提升了装置的整体安全水平<sup>[9]</sup>。

## （二）装置能耗

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>[7]</sup>。波动降下来了，就有卡边优化的空间了<sup>[10]</sup>；分析气分装置的能耗，可优化的部位主要集中在两塔（脱丙烷塔和丙烯精馏塔）塔底热源和塔顶空冷，在保证产品质量前提下，APC 重点对两塔的操作条件做了卡边优化，对比投用前后与装置能耗相关的参数变化可看出

(见图1)，投用后，影响能耗的主要参数均有明显的降低。



>图1投用前后与装置能耗相关的参数趋势变化对比图

采集相关数据并计算得出，投用后，装置能耗降低了4.5%，具体数据见表1。

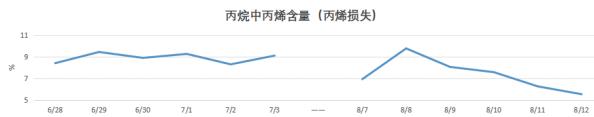
表1 常规控制和APC控制下装置能耗数据对比

项目名称	单位	单位能耗 / kgEo/t	
		常规控制	APC控制
1.3MPa 蒸汽	t/h	1.04	1.07
0.5MPa 蒸汽	t/h	2.49	2.25
循环水	t/h	1.76	1.85
伴热给水	MJ/h	23.08	22.44
0.7MPa 氮气	Nm3/h	0.18	0.19
电	kwh/h	3.44	3.57
顶循热供	MJ/h	11.48	10.14
合计	kgEo/t	43.47	41.52

对APC投用前后的能耗数据进行对比分析。装置年运行时间按8400小时计算。降低能耗的经济效益约为350.74万元/年。

### (三) 丙烯收率

丙烯精馏塔作为产品塔，塔的操作和运行至关重要，此塔优化的目标是在保证产品质量的情况下，减少丙烯损失，降低丙烷产品中丙烯的含量。投用APC后，丙烯塔底丙烷中的丙烯含量明显降低(见图2)，均值降低1.56%，即提高了1.56%的丙烯收率，结合丙烯流量和装置年开工时间，折算后的经济效益约为138.43万元/年。



>图2常规控制和APC控制下丙烷中丙烯含量

### (四) 经济效益

总的经济效益等于增产的丙烯和降低的能耗之和，其中多产丙烯效益为138.43万元/年，降低能耗节省350.74万元/年，合计489.17万元/年。

## 五、结论

在气分装置上应用先进控制技术，发挥了该技术多变量协调控制、卡边优化的技术特点，实现了降低装置能耗、提高产品收率的目的，同时改善装置操作条件，降低操作人员劳动强度，实现了经济效益和社会效益的双收益。

## 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: 185.
- [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, 2#70万吨/年气体分馏装置技术规程, 浙江石油化工有限公司, 2022.5: 1–2, 8–9.
- [5] 张抗抗, MPC的经济效益在哪里? (1) 间接经济效益, (2024-11-04).
- [6] 张韶煜, 柴昕, 刘炳杰. 先进过程控制在气分装置中的应用 [J]. 石油化工自动化, 2014, 50(3): 31–34, 66.
- [7] 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): 31–34.
- [8] 王炳淞, 先进过程控制技术在芳烃抽提装置中的应用 [J], 石油化工自动化, 2022年3月, 第58卷(2期): 16–20.
- [9] 邓昌付, 常减压装置实施优化中的先进控制系统提升 [J], 中外能源, 2022年, 第7期: 89–94.
- [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.