

大型煤制油装置的先进过程控制技术研究

赵亮¹, 姜海明^{2*}, 毛旭涛¹, 秦晓翔¹

(1. 国家能源集团宁夏煤业煤制油分公司, 宁夏银川 750011;

2. 北京和隆优化科技股份有限公司, 北京 100095)

摘要:以某400万t/a煤制油装置为研究对象,在变换、净化、费托合成、加氢精制、裂化、油品精制、尾气制氢等主要流程中开展先进过程控制技术研究,针对系统氢碳比、变换反应器、费托反应器、精制裂化等核心单元及工艺指标控制,采用多变量控制、跨域控制、大系统协调控制等控制方法及策略,进一步提升了装置的自动化智能化水平,大大减少了手动操作,被控变量的标准偏差可以降低30%以上,实现关键指标的“卡边操作”,在保证产品质量的情况下降低能耗、提高收率,达到了预期控制效果,装置运行稳定性及经济性方面均取得了较大的提升。

关键词:煤化工;煤制油;先进控制

中图分类号:TH29

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)04-0255-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.04.044

Research on advanced process control technology for large-scale coal-to-liquid plants

ZHAO Liang¹, JIANG Hai-ming^{2*}, MAO Xu-tao¹, QIN Xiao-xiang¹

(1. Coal to Oil Branch, Ningxia Coal Industry Co., Ltd., CHN Energy Investment Corporation,

Yinchuan 750011, China; 2. Beijing Heroopsys Co., Ltd., Beijing 100095, China)

Abstract: A 4 million tons/year coal-to-liquid (CTL) plant is taken as the research object to study the advanced process control technology in major processes such as shift conversion, purification, Fischer-Tropsch synthesis, hydrogenation refining, cracking, oil products refining, and tail gas to hydrogen. In the light of core units and process indicators like system hydrogen-carbon ratio, shift reactor, Fischer-Tropsch reactor and refinement cracking, the control methods and strategies are adopted, including multi-variable control, cross-domain control, and large system coordinated control, which further enhances the level of automation and intelligence of the plant, significantly reduces manual operations, lowers the standard deviation of controlled variables by 30% at least, and achieves “edge operation” for key indicators. The energy consumption is reduced and the yield rises while ensuring product quality, achieving the expected control effect. The operational stability and economic efficiency of the plant have both been greatly improved.

Key words: coal chemical; coal-to-liquid; advanced process control

煤制油是我国现代煤化工及煤炭高效清洁利用的重要产业,是保障国家能源安全的战略性举措。在煤制油装置的实际生产运行中,由于原料煤质多变、工况复杂以及安全性考虑等因素,虽然装置整体自动化程度较高,但先进控制技术的应用并取得良好效果的案例仍然较少,装置运行控制的一致性、稳定性和经济性存在提升空间。

该400万t/a煤制油是全球单套规模最大的煤制油项目,采用间接液化煤制油技术,年转化煤炭2400万t,打破了国外技术垄断,在装备和材料的国产化方面取得了显著的成就。煤制油分公司在全流程先进控制方面大力开展探索和实践,采用国产化的先进控制平台——和隆优化RASO系统,在装置的变换、净化、费托合成、加氢精制、裂化、油品精制、尾气制氢等主要流程中开展先进过程控制技术研

究。先进控制系统以多变量模型预测控制为主要特征,集成了信号处理、模糊控制、神经网络控制、专家控制等功能。在先进控制项目实施过程中,通过工艺深入分析、控制策略的设计、系统投运及优化,达到了理想控制效果,装置运行稳定性及经济性方面均取得了较大的提升,并具有较强的示范引领作用。

1 工艺流程及控制需求

煤制油装置的主要流程包括气化、变换、净化、费托合成、加氢精制、裂化、油品精制、低温油洗、尾气制氢等。在装置的实际运行中,由于工况特别是煤质变化,造成系统的负荷、介质组分变化较大,进而影响系统氢碳比、变换反应器、费托反应器、精制裂化等核心单元及工艺指标波动,且由于装置数量多、影响因素多、滞后大等因素,DCS系统仅能实现

收稿日期:2024-07-12;修回日期:2025-02-11

作者简介:赵亮(1984-),男,本科,工程师,研究方向为煤制油的先进控制及优化控制,15011354@ceic.com;姜海明(1983-),男,硕士,高级工程师,研究方向为先进控制及工业节能,通讯联系人,jianghaiming@yhkz.com。

单装置内简单回路的自动,故需要引入先进控制系统,实现多变量控制、跨域控制、大系统协调控制,以

解决装置中的运行控制难点问题。装置的总流程如图 1 所示。

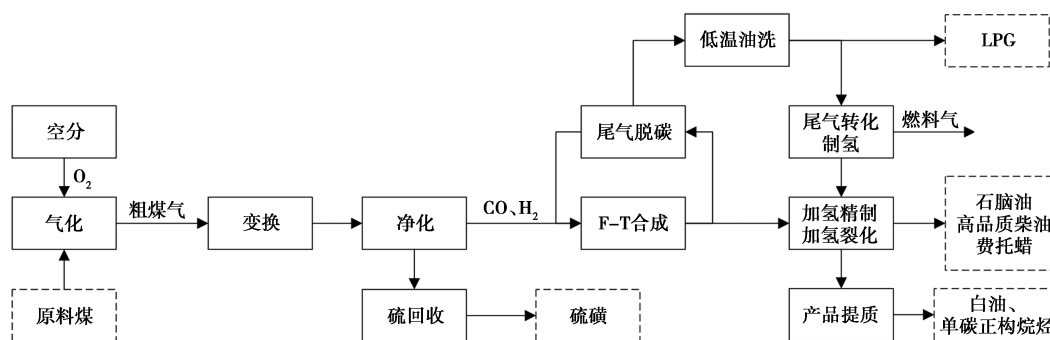


图 1 煤制油装置工艺流程

2 先进过程控制系统设计

2.1 先进过程控制系统功能

先进过程控制(advanced process control, APC)系统是以过程计算机系统及其上位机为实施平台,以常规控制为基础,以整个生产装置或关键单元为控制对象的一类优化控制策略,将整个生产装置或某个工艺单元作为整体研究对象^[1]。先进控制策略利用各变量的成本因子,可以基于效益最大化原则,利用线性规划的方法,计算出操纵变量的权重,生成优化控制方案,使装置处于最优操作点附近运行,从而最大限度地提高目标产品的收率、降低能耗、增加经济效益^[2-3]。

APC 建立在分布式控制系统(distributive control system, DCS)常规控制基础上,要求 DCS 必须具备标准 OPC(ole for process control)接口,即要求先进控制上位机能够通过 OPC 接口采集 DCS 上装置的全部测量数据,且性能稳定,满足先进控制系统所需的点数要求^[4]。

2.2 先进过程控制系统网络结构

根据 DCS 控制系统的网络拓扑结构及控制需求,进行 APC 系统的网络结构设计,需要将采集数据的全部各个域的 OPC 服务器纳入 APC 控制网范围,通过设置隔离网闸保证数据的安全,网闸的控制端连接 OPC 服务器,信息端接入 APC 网交换机,APC 服务器也全部接入交换机,从而实现跨域的数据获取及控制,根据控制回路数量共配置 9 台,APC 服务器的配置及控制单元分配见表 1。

表 1 煤制油装置 APC 服务器明细

APC 服务器	控制器/控制单元
变换 1#	1-3 系列变换反应器、氢碳比等
变换 2#	3-6 系列变换反应器、氢碳比等

净化 1#	1-2 系列净化各塔、CO ₂ 机组等
净化 2#	3-4 系列净化各塔、CO ₂ 机组等
合成 1#	1-4 系列费托、还原反应器等
合成 2#	5-8 系列费托、还原反应器等
加工 1#	加氢精制各塔、加热炉等
加工 2#	加氢裂化各塔、加热炉等
加工 3#	产品提质各塔、尾气制氢等

APC 系统网络结构如图 2 所示。

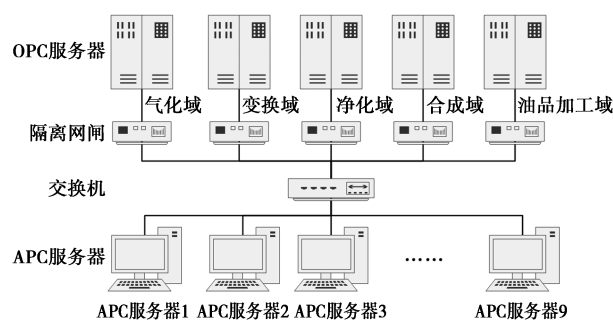


图 2 先进控制系统网络结构

3 主要控制策略研究

3.1 变换系统控制

煤制油中的变换工序是将气化装置产生的合成气进行组分调整,进入装置后合成气分为 2 路,1 路至变换系列将一氧化碳经变换反应器转化为氢气,另 1 路至未变系列水解,产出合格的变换气和未变换气送往净化装置。

变换工序共包括 6 个系列变换装置,每 3 个系列对应 1 套油品合成(包括 4 个系列费托合成装置)。变换反应属于放热反应,反应器中心温度控制是主要的控制目标,根据工艺分析,主要影响因素包括合成气水气比、第一变换炉入口温度、负荷以及压差(气速)等,同时兼顾系统氢碳比的调整,变换炉控制器设计如表 2。

表 2 变换 APC 控制器及控制关系

			操作变量					
			MV1	MV2	MV3	MV4	MV5	MV6
			一变炉废锅 压力调节阀 A	一变炉废锅 压力调节阀 B	一变换炉 温度调节阀	大副线 调节阀	二变炉废锅 压力调节阀	未变气流量 调节阀
被控变量	CV1	水气比	X	X				
	CV2	一变炉入口温度	X	X	X			
	CV3	一变炉中心温度	X	X	X			
	CV4	二变炉入口温度					X	
	CV5	CO 含量			X	X		
	CV6	系统 H ₂ /CO 比				X		X
前馈变量	DV1	合成气流量	X	X	X			
	DV2	一变炉压差			X			
	DV3	蒸汽管网压力					X	
	DV4	来自气化炉的组分						X

3.2 系统氢碳比控制

系统氢碳比是指费托合成入口的净化气 H₂ 与 CO₂ 组分的比值,是决定费托合成反应稳定及产品结构的关键工艺指标。系统氢碳比的调节在变换工序进行,调整后经过低温甲醇洗工序,在费托合成工序入口进行在线检测,该过程区域跨度大、响应滞后大、影响因素多。APC 实施采用变换反应系统控制单元结合系统协调的控制策略,控制原理如图 3 所示。

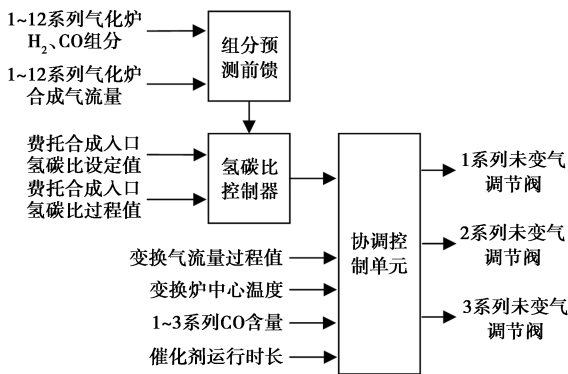


图 3 系统氢碳比协调控制原理

系统协调内容主要是在变换炉稳定的基础上,根据主要特征参数协调分配每套油品合成线对应的 3 系列变换的负荷。在对系统 H₂/CO 比的协调控制策略方面,根据各系列变换的运行状态作为未变换气的负荷分配依据,以当前未变气负荷、CO 含量等作为特征,计算分配权重。

3.3 费托合成反应器控制

费托合成是煤制油项目的核心工艺装置,主要作用是将来自净化装置的新鲜合成气(H₂、CO)在催化剂的条件下转化为轻质石脑油、稳定重质油、合

格蜡等中间产品。费托合成的主反应主要是烷烃化反应和烯烃化反应,产物的种类繁多,是一个非常复杂的反应体系,影响合成反应速度、转化率和产品分布的因素很多,包括催化剂、反应温度、压力、H₂/CO 比、空速、循环比、反应器液位、汽包压力等^[5-6]。根据工艺需求,系统将费托反应的主要工艺指标纳入 APC 控制范围,对费托合成反应的稳定、转化率的提升提供稳定基础。费托合成 APC 控制器及控制关系见表 3。

表 3 费托合成 APC 控制器及控制关系

		操作变量				
		MV1	MV2	MV3	MV4	MV5
被控变量	CV1	入塔气氢碳比	X			
	CV2	反应器上部温度		X		
	CV3	反应器下部温度			X	
	CV4	上汽包液位				X
	CV5	下汽包液位				
前馈变量	DV1	合成气氢碳比	X			
	DV2	净化气流量		X	X	
	DV3	蒸汽管网压力		X	X	
	DV4	蒸汽流量				X

4 实施效果

在煤制油装置先进过程控制系统的实施过程中,结合工艺在关键流程中深入研究 APC 技术的应用和控制策略,不断优化和改善控制方案和模型参

数,系统能够根据实时工况自动进行调节,进一步提升了控制的及时性和准确性,显著增强了工艺流程的控制精度,确保了装置运行的平稳性。以装置的典型关键指标为例,如净化气氢碳比(H_2/CO)、费托反应器入塔气氢碳比(H_2/CO)、费托反应器温度等,采用 APC 投用前后 24 h 分别进行对比。

净化气氢碳比控制,投用 APC 控制前主要通过调度指挥人工手动对各系列进行调节,投用 APC 控制后,通过跨域协调控制,对各系列变换装置的水气比、变换温度、大副线、CO 含量等进行建模综合调整,提高了调节的及时性和精准性,投用后平稳率提升 57.5%。投用前后的对比趋势如图 4 所示。

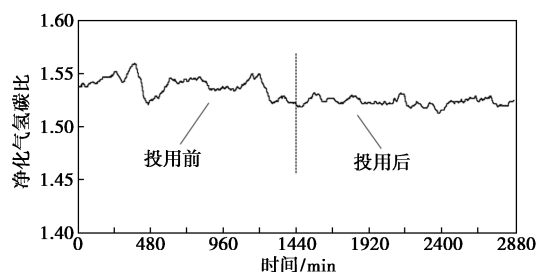


图 4 净化气氢碳比对比趋势图

费托反应器入塔气氢碳比控制,在净化气氢碳比稳定的基础上,通过 APC 控制补新氢流量,投用后平稳率提升 57.5%。投用前后的对比趋势如图 5 所示。

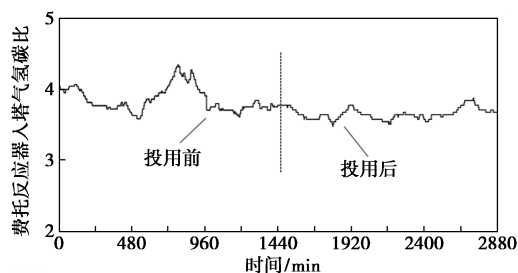


图 5 费托反应器氢碳比对比趋势图

费托反应器温度控制,通过 APC 控制汽包压力,投用后平稳率提升 36.6%。投用前后的对比趋势如图 6 所示。

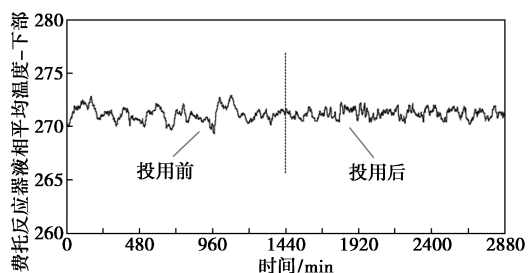


图 6 费托反应器温度对比趋势图

净化气氢碳比(H_2/CO)、费托反应器入塔气氢碳比(H_2/CO)、费托反应器温度等关键指标在 APC 投用前后的平均值、标准差及平稳率提升见表 4。

表 4 部分关键指标 APC 投用前后对比

变量名称	APC 投用前		APC 投用后		平稳率提升/%
	平均值	标准差	平均值	标准差	
净化气氢碳比	1.538	0.0087	1.523	0.0037	57.5
反应器氢碳比	3.924	0.151	3.661	0.079	47.7
反应器温度	271.08°C	0.664°C	271.14°C	0.421°C	36.6

5 结论

通过煤制油装置先进过程控制系统的实施,采用了多变量预测控制、跨域控制以及大系统协调控制等策略,充分发挥了先进控制的优势及卓越性能^[7]。在系统投用后取得了明显的成效,体现在以下方面。

(1)进一步提升了装置的自动化智能化水平,大大减少了手动操作,在部分装置实现了零手动。

(2)提高装置关键指标的平稳性,被控变量的标准偏差可以降低 30%以上,并促进了装置安全及实现长周期稳定运行。

(3)在运行平稳的基础上,实现关键指标的“卡边操作”,在保证产品质量的情况下降低能耗、提高收率。

(4)通过煤制油装置 APC 技术研究及成功实施,实现了对国产化先进控制在大型煤制油装置的技术掌握,具有较强的通用性及推广性。

参考文献

- [1] 云涛.先进过程控制在煤化工行业示范及应用展望[J].自动化仪表,2020,41(8):103-105.
- [2] 剑雪,张颖,罗晓.先进过程控制技术[M].北京:清华大学出版社,2014:15-16.
- [3] 志忠,常玉清.先进控制技术[M].北京:科学出版社,2012:3-5.
- [4] 惠龙龙,方斌,聂旺华.煤化工气化工系统智能控制示范成果探讨[J].化学工业,2019(5):25-29.
- [5] 丁文瑶,王瑞航,李虎.费托合成装置节能降耗研究[J].辽宁化工,2022,51(7):947-949.
- [6] 张成学,周琨,孙乐文.先进过程控制系统在水煤浆气化中的应用[J].大氮肥,2019,42(5):325-329.
- [7] 于现军,吕伟军,俞金树.一种先进的多冷冻机组协调控制系统[J].上海电机学院学报,2018,21(2):53-56.■