

空分设备自动变负荷控制技术综述

陈秋霞, 周芬芳

(杭州杭氧股份有限公司设计院, 浙江省杭州市中山北路 592 号 310014)

摘要: 综述国内外大型空分设备的自动变负荷控制技术的发展状况, 分析自动变负荷控制技术的难点, 着重对空分设备先进控制系统结构和操作流程、模型预测控制基本原理及其在空分领域的研究成果等进行了较全面的阐述, 最后对空分设备自动变负荷技术的发展进行了展望。

关键词: 空分设备; 自动变负荷; 模型预测控制; 控制系统

中图分类号: TB663 **文献标识码:** B

General description of automatic variable-load control technique for air separation plant

Chen Qiuxia, Zhou Fenfang

(Designing Institute, Hangzhou Hangyang Co., Ltd., 592[#] North Zhongshan Road, Hangzhou 310014, Zhejiang, P. R. China)

Abstract: The development situation of home and abroad automatic variable-load control technique for large-sized air separation plant is briefed, the difficult problems of automatic variable load control technique are analyzed, the structure and operation process of advanced control system for air separation plant, the fundamental principle, model prediction control and its research achievements in air separation field are overall described, and finally the development of automatic load variation technique for air separation plant is prospected.

Keywords: Air separation plant; Automatic load variation; Model prediction control; Control system

前 言

空分设备是冶金、化工、石油、医疗和航空航天领域广泛采用的大型设备。我国每年用于空分设备的能源消耗很大, 约占空分产品成本的 70%~80%, 但能源利用率相对较低。由于工业气体需求呈现阶段性、间歇式的特点, 空分设备生产负荷也随之大幅度变动, 手动调节速度慢, 氧气放散率高, 经济损失大。据统计, 我国钢铁企业的氧气放散率一般在 7%~12%, 有的甚至超过 20%, 放散率每降低 1% 可节约成本约 200 万元/年。空分行业中, 在不同负荷要求之间切换的变负荷技术统称为自动变负荷控制 (Automatic Load Change,

ALC) 技术, 是当前国际大型空分设备先进自动化的标志性技术, 对于空分设备的节能降耗具有很好的推进作用, 市场需求较大。在节能减排、低碳环保日益得到重视的今天, 如何设计高效、节能的自动变负荷先进控制系统, 已成为当今空分行业的一个迫切需求。现对近几年国内外大型空分设备的自动变负荷控制系统的发展状况进行综述, 并阐述空分设备自动变负荷技术的难点和先进控制系统结构, 分析模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC) 基本原理及其技术现状, 最后对空分设备自动变负荷技术发展前景进行探讨。

收稿日期: 2011-06-06; 修回日期: 2011-10-16

作者简介: 陈秋霞, 女, 1982 年生, 2011 年 1 月获浙江工业大学控制理论与控制工程专业博士学位, 现为杭州杭氧股份有限公司设计院仪控设计师。

1 空分设备自动变负荷技术的现状

随着空分设备大型化和节能降耗的需求,自动变负荷控制技术越来越受到国内用户的青睐。20世纪80年代中期,本溪钢铁有限公司 $10000\text{ m}^3/\text{h}$ 空分设备首次引进自动变负荷技术。但由于各种原因,自动变负荷系统并未正式投用^[1]。1994年,武汉钢铁集团 $30000\text{ m}^3/\text{h}$ 空分设备引进了德国林德公司的自动变负荷控制系统,使氧气放散率降低至10%以下^[2]。莱芜钢铁有限公司1997年投运的 $12000\text{ m}^3/\text{h}$ 空分设备同样引进林德公司产品,基础自动化控制系统具有一级的DCS、PLC系统控制和二级自动变负荷控制,实现了70%~100%的负荷变化,调节时间小于1小时^[3]。此后,渭河化肥厂 $40000\text{ m}^3/\text{h}$ 空分设备^[4]和兖矿国泰化工有限公司 $60000\text{ m}^3/\text{h}$ 空分设备^[5]相继引进了法国液化空气公司设计的自动变负荷控制系统,可实现70%~105%间的负荷变化。以上均是以法国液化空气和德国林德等公司为代表的第一代ALC系统,采用物料平衡计算、开环前馈设定方案,产品质量波动大、变负荷操作不连续性、稳定性差^[6]。

而第二代以英国比欧西公司为代表的ALC系统采用闭环反馈控制方案,虽然在操作平稳性方面有很大进步,但无法主动维持物料平衡,操作经济性不佳。近年来,德国林德、法国液化空气、英国比欧西、美国普莱克斯等国外空分公司先后采用了流程模拟、操作优化和模型预测控制技术来实施空分设备自动变负荷生产,进一步降低了生产能耗且改善了变负荷过程的平稳性,但仍然存在一些技术问题,如:没有考虑流程模拟与实际生产装置的误差,以及变负荷过程中的动态协调等^[7]。现有的采用预测控制策略的空分设备先进控制系统大多通过过程的输入与输出变量建立线性动态模型,并利用经典的线性预测控制策略实现自动变负荷调节,常用的有动态矩阵控制方法。为了进一步降低能耗、提升利润,国外的一些空分公司已经开始尝试采用非线性预测控制(Nonlinear Model Predictive Control, NMPC)策略^[8]。然而,由于滚动优化过程中需要在线求解复杂的非线性规划问题,造成计算量过大,从而限制了非线性预测控制的有效应用。

国产空分设备在自动调节负荷控制方面也展开了初步探索。国产首套自动变负荷空分设备是由杭

氧与浙江大学联合研发并投运于南京钢铁联合有限公司的 $20000\text{ m}^3/\text{h}$ 内压缩流程空分设备,2008年底在保证产品质量的前提下实现了氧气产量在 $15000\sim 22000\text{ m}^3/\text{h}$ 范围内变化,变负荷速率达到氧产量变化30%耗时小于2小时^[9]。杭氧自主研发的自动变负荷先进控制系统填补了我国空分行业自动变负荷技术的空白,打破了国外空分公司在自动变负荷控制技术方面的垄断,有利于企业形成自主知识产权的创新产品,并提高综合自动化产品的设计能力,增强国际竞争力。

2 自动变负荷控制技术

自动变负荷是一个典型的多变量、系统强耦合、时变、强非线性、大滞后的控制命题,其目标是根据氧气产量的需求变化,在产品(氧、氮、氩)纯度合格的条件下,调节与负荷变化有关的多调节回路的设定值,在最短时间内实现生产负荷调节,以减少无功生产、降低氧气放散率。

2.1 空分设备的变负荷范围

空分设备的变负荷能力主要受空压机、循环增压机、精馏塔等设备负荷调节能力的约束及产品需求的限制^[9]。空压机与增压机的负荷调节范围一般在70%~105%,但压缩机在低负荷运行时为了避免进入喘振区通常打开放空阀或回流阀,使得能耗提高。精馏塔采用筛板塔时的最佳负荷调节范围为70%~110%,负荷过低则气体流速过低,从而使筛板漏液;精馏塔采用填料塔时持液量少,操作弹性较大,负荷调节范围可达40%~110%^[11]。考虑到膨胀机、阀门等调节范围要求,且为了保证稳定运行,空分设备整体变负荷范围通常选取在75%~105%。

2.2 自动变负荷难点

对大型空分设备进行自动变负荷操作通常会遇到以下困难:

(1) 热集成和物料再循环技术在空分设备中多次使用,造成了能量与物料的高度耦合,仅靠空分设备的各单元设备独立调节无法达到变负荷要求,常规PID控制难以胜任。

(2) 空分设备大范围变负荷引起动态过程的强非线性变化。

2.3 模型预测控制技术

针对空分设备自动变负荷控制过程中遇到的强耦合、非线性、多变量等技术难点,各大空分公司

均已设计了以模型预测控制为核心的自动变负荷先进控制系统^[10-12]。虽然各个空分公司在其设备上应用预测控制的范围、目标和复杂度各不相同,但足以说明模型预测控制是目前大型空分设备首选的先进控制策略。预测控制器可直接处理系统的各种动态特性,提前预测各种因素对系统的影响并加以控制,具有强大的约束处理能力,并兼具模型要求低、鲁棒性强、设计简单等优点。一般而言,预测控制^[13]主要由三部分组成:预测模型、滚动优化和反馈校正。它综合利用历史信息 and 模型信息,对目标函数不断进行滚动优化,并根据实际测得的对象输出来修正或补偿预测模型。在空分设备自动变负荷预测控制技术方面已取得了不少理论研究成果。Vinson^[14]对空分系统的控制技术进行了详细的综述,并指出模型预测控制是工程上最适用于自动变负荷的方法。Roffeld 等人^[15]在正常工况下对操作点附近进行线性化得到预测模型,通过选取较大的输入权系数可使得多变量预测控制器满足全工况的控制需求。Vinson^[16,17]通过参考执行能力指数(the Operability Index, OI)来辅助设计空分设备的线性预测控制器。OI 值与每次滚动优化中控制量和被控量的起作用集相关,从而为动态过程的实时控制提供了有效信息。

线性预测控制方法已在实际过程控制中得到成功应用,但直接应用到非线性系统中会产生一定偏差,降低控制精度。利用线性预测控制策略进行空分设备大范围自动变负荷调节时偏差较为明显,因此大家把目光转移到了非线性预测控制中,期望其获得较好的控制品质。NMPC^[18]的基本原理与线性 MPC 相同,但预测模型和目标函数是非线性的,本质是一个动态的有限时域非凸的非线性最优控制问题。预测过程中的最优化问题是预测控制算法的核心问题。NMPC 通常要求解一个非凸的非线性规划问题,在线计算量随着决策变量个数呈指数增长,属于 NP-hard 问题,精确计算全局最优解的时间长。非线性预测控制在空分设备变负荷方面的研究刚刚起步。Bian 等人建立了空分设备上塔的降阶分段集结动态模型,用于精馏塔的非线性模型预测控制^[19]。针对在线求解非线性规划问题计算负荷大的问题,Rui 提出一种基于敏感度的改进单步非线性预测控制算法,极大地缩短了在线计算时间^[20]。

2.4 自动变负荷控制系统的结构与功能

2.4.1 传统的自动变负荷控制系统

现以 1994 年投产的武汉钢铁集团 30000 m³/h 空分设备为例,给出传统定点模式的自动变负荷控制系统的大体结构。

(1) 操作点计算模型,用于判断输入的产品产量是否超出允许范围;

(2) 状态模型,根据物料平衡、冷量平衡和产量值等计算出工艺过程中主要环节的模型状态值;

(3) 设置点计算模型,为每个优化控制器计算出设置点值,且每个设置点有相应的线性化模型和变化率;

(4) 传送控制模块,将控制设置点传送到优化控制器;

(5) 动态优化控制器,由滤波器、调节器组成,使上位机的控制达到工艺要求的最佳状态。

上述自动变负荷控制的运行流程主要有:首先输入氧气、液氧及液氮产量的目标值,由系统判断输入数据是否在负荷范围内,若有误则提示重新输入;通过状态模型计算出所需空气量及自动变负荷控制点的目标值;系统自动读取当前负荷下各控制点的测量值及变负荷时间;启动自动变负荷后,将目标值作为控制点设定值,从当前测量值开始根据斜坡方程计算出按设定速率变化的控制点模型值,并将其传送到 DCS 系统中,由 PID 回路调整工况,促使测量值不断逼近模型值,直至所有控制点参数的目标值、模型值、测量值一致时,结束自动变负荷操作。

常规 PID 控制回路采用独立工作模式,属于单输入、单输出系统,以物料平衡和冷量平衡为前提,通过工艺计算出各工况下的理论值。但在实际应用中,由于参数不确定性导致该理论值计算偏差较大,不断修改系数会导致工况的不稳定。而先进控制以整个装置或关键单元为对象,是一个多输入、多输出系统,通过建立各变量的模型关系,对装置实施协调统一控制,弥补常规控制难以对付大型复杂工业过程的缺点。

2.4.2 先进控制策略的自动变负荷控制系统

基于先进控制策略的自动变负荷控制系统以 DCS 系统为基础,以 OPC (OLE for Process Control,用于过程控制的 OLE) 为桥梁与上位机相连,先进控制软件通常被加载于上位机平台,只

需输入目标值, 氧产量将按一定速率变化, 关键变量、模型计算值、回路设定值和调节阀输出值都处于自动调节状态, 整个调节过程中任一回路都作为整体的一部分考虑, 该调整方式弥补了传统 DCS 系统单回路调整的缺陷, 且考虑了纯滞后等干扰因素的影响。以 2009 年杭氧在南京钢铁联合有限公司投产的 20000 m³/h 空分设备为例, 将基于模型预测控制策略的自动变负荷先进控制系统的主要核心控制模块列举如下:

(1) 模型预测模块, 根据阶跃响应矩阵和稳态增益矩阵计算出稳态优化初值和动态控制初值;

(2) 稳态优化模块, 通过自由度分析、工作点优化确定空分过程中的最佳工作点;

(3) 动态控制模块, 按照稳态优化给出的内部控制要求和动态控制的性能要求计算出未来控制作用, 使变负荷过程趋向稳态优化计算出的最优工作点。

上述自动变负荷先进控制系统的主要运行流程有: 当系统出现阶跃变负荷事件时, 首先将变负荷要求送入稳态优化模块进行评估和计算, 给出合理的产量设定值并送入动态控制模块。动态预测控制器根据变负荷的速率和幅度约束对产量阶跃信号进行滤波, 产生目标产量设定曲线并反馈给稳态优化模块, 并下达指令给装置; 稳态优化模块再根据反馈信息产生最优的控制变量设定值, 直接送入底层控制器作为前馈。同时, 预测控制器在不违背设备约束与产品质量的前提下, 逐步将装置推向最优稳态工作点。

该先进控制系统集流程模拟、操作优化和预测控制技术为一体, 解决了常规 PID 控制难以处理具有非线性、强耦合、多变量、大时滞的空分设备的自动变负荷控制问题。其中, 预测控制技术可较好地对空分设备进行解耦协调控制, 减少前馈变量数, 提高系统的鲁棒性, 有利于实现变负荷过程中整套空分设备的优化要求。操作优化除了通过自由度分析和工作点优化以确定空分过程局部最优稳态操作点外, 还利用剩余自由度平衡能耗与产量关系, 从而获得更大的经济效益。整个自动变负荷过程兼顾优化与控制, 且按照一定速率进行调节, 可保证空分设备平稳运行和产品质量。

3 空分设备自动变负荷技术发展前景

以上是空分设备自动变负荷控制的发展现状和

技术结构, 这一领域仍存在许多问题需要进一步研究, 很多成果有待继续完善。

(1) 近年来, 空分设备自动变负荷技术多采用线性预测控制, 这一领域的非线性预测控制成果较少, 主要是受到非线性滚动优化问题在线求解困难的限制。因此, 提出快速、有效的非线性预测控制方法是今后需要长期努力的方向。

(2) 空分设备自动变负荷控制效果很大程度受模型精确度的影响, 现多采用线性逼近, 大范围变负荷过程偏差明显, 可以尝试采用非线性建模方法, 如神经网络建模、支持向量机建模等。

(3) 自动变负荷过程中难免会出现一些故障, 可建立故障动态模型库, 研究模型预测容错控制技术, 以提高变负荷先进控制系统的可靠性。

4 结 论

近年来, 国内外空分设备自动变负荷控制技术都得到了长足的进步, 模型预测控制能有效解决大范围变负荷过程中出现的非线性、强耦合等问题, 已作为空分领域首选的先进控制策略得到成功应用。为了降低在线计算量, 减小模型偏差, 研究精确的非线性建模方法和快速非线性预测控制策略是今后主攻的方向。对变负荷过程实施监控和故障诊断, 建立故障动态模型库, 研究容错控制技术也是需要长期努力的方向。

参考文献:

- [1] 肖家立. 钢铁企业氧气放散与空分设备的负荷调节 [J]. 深冷技术, 2002 (6): 3-7.
- [2] 靳瑞安. 自动变负荷操作方法实现空分设备生产节能 [J]. 深冷技术, 2002 (2): 20-27.
- [3] 利铭, 史保锋. 自动变负荷技术在空分装置中的应用 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2001 (5): 44-45.
- [4] 鲁正乐. 空分装置变负荷系统介绍 [J]. 化工自动化及仪表, 2003, 30 (3): 25-27.
- [5] 赵爽, 张世丽. 60000 m³/h 空分设备物料平衡及变负荷控制原理 [M] // 边瑾. 深冷技术: 设计制造. 杭州: 杭州出版社, 2006: 45-46.
- [6] 祝铃钰. 复杂分离过程模拟与优化中的若干问题研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [7] 李华银. 控制系统性能评估算法与应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [8] BIAN S, HENSON M A. Nonlinear state estimation and model predictive control of nitrogen purification columns [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research,

2005, 44 (1): 153-167.

- [9] 秦海中. 南钢 KDON-20000/30000 型内压缩流程空分设备变负荷操作实践 [M] // 边瑾. 深冷技术: 安装运转. 杭州: 杭州出版社, 2009: 6-8.
- [10] BOC. BOC extends global control and information technology solution to 50 plants [M]. 2003.
- [11] GOODHART S G, VENDERBOSCH H M. DMC plus control on the Messer Griesheim air separation unit [C]. In AspenTech's 1999 Advanced Control and Optimization European Users Group Meeting, 1999.
- [12] SEIVER D S, DUPRE L. A pyramid approach to advanced control [J]. Control Magazine, 2000.
- [13] CAMACHO E F, BORDONS C. Model predictive control [M]. Springer-Verlag, London, 2004.
- [14] VINSON D R. Air separation control technology [J]. Computers and Chemical Engineering, 2006 (30): 1436-1446.
- [15] ROFFEL B, BETLEM B H L, RUIJTER J A F. First

principles dynamic modeling and multivariable control of a cryogenic distillation process [J]. Computer & Chemical Engineering, 2000 (24): 111-123.

- [16] VINSON D R. Integrating process control and design for air plants [M]. Boston, MA: AspenWorld97, 1997.
- [17] VINSON D R. A new measure of process operability for improved steady state design of chemical processes [J]. Chemical engineering. Bethlehem, PA, Lehigh University, 2000: 175.
- [18] 陈虹, 刘志远, 解小华. 非线性模型预测控制的现状与问题 [J]. 控制与决策, 2001 (16): 385-391.
- [19] BIAN S, KHOWINI S, HENSON M A, et al. Compartmental modeling of high purity air separation columns [J]. Computers & Chemical Engineering, 2005 (29): 2096-2109.
- [20] RUI H, VICTOR M Z, LORENZ T B. Advanced step nonlinear model predictive control for air separation units [J]. Journal of Process Control, 2009 (19): 678-685.

※

※

※

2011 年机械工业气体分离设备科技信息网 大型空分设备技术交流会在江西九江召开

2011 年机械工业气体分离设备科技信息网大型空分设备技术交流会于 9 月 19—22 日在江西省九江市召开, 大会由机械工业气体分离设备科技信息网与杭州深冷文化传媒有限公司联合举办, 并得到了江西制氧机有限公司的大力支持。共有 63 家单位 100 名代表参加了此次大会。

大会由机械工业气体分离设备科技信息网秘书长马国红主持, 杭州杭氧股份有限公司技术中心副主任、副总工程师周智勇致欢迎词, 中国气协氢气专业委员会秘书长周连元致贺词, 江西制氧机有限公司总经理凌民致欢迎词并介绍了企业情况。

此次会议主要就目前大型空分设备运行、节能降耗、低温液体贮存和输送等技术问题进行探讨和交流。围绕本

次会议的主题举行了专题报告会, 北京科技大学李化治教授、杭氧股份设计院韩一松博士、武钢氧气有限责任公司马大方教授级高工、江西制氧机有限公司刘银松高工、四川空分设备(集团)有限责任公司龙江高工、苏尔寿技术专家陆春生、新钢集团气体厂徐福根高工、江西制氧机有限公司毛海涛高工、萍乡华顺环保化工填料有限公司柳堂吉、杭氧低温容器有限公司陈浩挺总工程师等作了专题报告, 引起了与会代表的浓厚兴趣。通过对技术瓶颈问题的分析, 提出了切实可行的解决思路和措施, 展现行业应对空分设备发展的新技术、新方法、新工艺。

此外, 大会还出版了论文集, 共收录论文 26 篇。