

研究论文

中小氮肥合成氨生产系统操作条件优化

沈之宇, 阎镜予, 薛美盛, 孙德敏
(中国科学技术大学自动化系, 安徽 合肥 230027)

摘要: 针对国内中小氮肥企业合成氨生产系统的设备条件和技术水平, 以提高氨净值为目标, 将整体优化问题进行合理有效的分解, 采用广义预测控制算法实现氨合成塔热点温度自动调节, 以保证在线优化调节的稳定; 抽取单向优化因素进行卡边操作, 最终实现合成氨生产操作条件的自适应在线操作优化, 氨净值提高 0.4%, 系统压力降低 1.2 MPa, 实现节能降耗, 说明了该方案的有效性。

关键词: 自适应在线优化; 预测控制; 合成氨; 氨净值

中图分类号: TP 273; O 232

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2007) 04-0963-07

Optimization for operating conditions for synthetic ammonia system in medium and small scale nitrogen fertilizer plant

SHEN Zhiyu, YAN Jingyu, XUE Meisheng, SUN Demin

(Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China)

Abstract: Based on the condition of equipment and technical level of medium and small scale nitrogen fertilizer plants, increasing the net value of ammonia was considered as the goal of optimization study. The whole optimal problem was decomposed. Then the generalized predictive control (GPC) of the temperature of ammonia reactor hot spot for the stability of online-optimization adjustment, and boundary control for the single-direction factors were realized. Adaptive on-line optimization of operation conditions was successfully accomplished. The operation performance of ammonia reactor was improved, the net value of ammonia was increased by 0.4%, and system pressure dropped by 1.2 MPa.

Key words: adaptive on-line optimization; predictive control; synthetic ammonia; net value of ammonia

引 言

随着能源价格上升和产品价格下降, 降低成本、增加新的生产能力日益重要, 因此合成氨生产系统的优化在氮肥生产中愈来愈受到重视。合成氨是个成熟的工业, 大都采用传统工艺流程, 生产过程的操作参数一般仅凭操作人员的经验而定, 以稳

定生产为目标, 而很少考虑优化操作, 带有很大的主观性和随意性。尤其是这些操作参数相互关联, 很难凭人工经验进行决策优化。从 20 世纪 80 年代至今, 其工艺、设备已有很多改进^[1-2], 并获得良好的经济效益^[3]。我国与国外在合成氨生产的原料、工艺设备上存在着根本性的差异^[4], 上述优化改进对相关专利型设备依赖性过强, 优化改造成

2006-02-16 收到初稿, 2006-04-03 收到修改稿。

联系人及第一作者: 沈之宇 (1978—), 男, 博士。

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目 (KGCX-SW-15);
安徽省优秀青年科技基金项目 (04042046)。

Received date: 2006-02-16.

Corresponding author: SHEN Zhiyu. **E-mail:** simon@mail.ustc.edu.cn

Foundation item: supported by Chinese Academy of Sciences Pilot Project of the National Knowledge Innovation Program (KGCX-SW-15) and Anhui Excellent Youth Technology Fund (04042046).

本很高。与国外单系列、大型化的先进氨合成装置相比,国内中小氮肥企业设备分散,各生产环节之间影响复杂,形成了热点温度控制、最适宜反应温度及气体组分寻优等优化操作中的难点,需要因地制宜地实施优化。

合成氨生产是一个十分复杂的过程,优化目标的影响因素繁多、性质不同、并相互影响。文献[5]采用前馈变 PID 策略控制触煤层温度,但精度仅能达到 $\pm 5^{\circ}\text{C}$,且无法解决现在普遍采用的联醇生产对合成工段的影响;文献[6]采用无限逼近模式,探讨热管式氨合成塔最适宜反应温度控制的可行性,并给出了仿真结果;文献[7]采用多变量优化搜索策略,利用计算机模拟冷激式氨合成塔的操作优化,但都仅是仿真验证,没有成功应用。鉴于此,本文以提高氨净值(即氨合成塔出口氨含量与进口氨含量的差值)为目标,抽取单向优化因素进行卡边操作,辅以稳定的热点温度自动调节作为优化的保证,在此基础上根据自适应稳态优化原理,实现在线操作优化。通过 3 种方法的有机结合,在现有设备基础上实现合成氨操作条件优化,有效而稳定的提高氨净值,真正实现节能降耗。

1 合成氨生产工艺

1.1 氨合成工艺流程

氨合成工艺技术及流程有许多种类^[8],一般均包括氨的合成、分离和再循环、惰性气体排放等基本步骤,并由上述基本步骤组合成为氨合成循环反应的工艺流程。其主反应方程式为



安徽临泉化肥厂采用无烟块煤作为原料,其生产工艺流程大致可分为如下几个阶段:原料气的制取、净化与精制,氨的合成,氨的分离,新鲜氢氮气的补入,未反应气体的压缩与循环,弛放气及反应热的回收。氨合成塔采用南化研究院研制的多段绝热冷激式内件。

1.2 优化影响因素的确定

优化目标是提高氨净值,影响其高低的主要有氨合成塔外部条件和床层内部条件等多方面因素,根据工艺分析以及现场摸索,从中提取出最为重要与可控的 7 个因素:甲烷含量、氨冷温度、氢氮比(调节反应气循环氢含量)、氨合成塔 4 段热点温度。

这种多因素问题,通常可以采用正交优化方法,以确定这些因素对氨净值的影响力和优化方向,并可在工况相对稳定的情况下找到一组综合效果较好的优化参数。因此作者提出“两步逐级正交优化”的思想^[9],通过正交试验结论分析确定了各因素的影响力强弱以及基本优化方向。

2 优化方案设计

通过以上分析和正交优化试验筛选,影响氨净值的因素依然不少,并且各个因素之间存在较强的耦合作用,故综合考虑 7 个因素进行在线操作优化时,存在以下问题:

- (1) 辨识参数过多,将降低模型辨识结果精度;
- (2) 各因素间影响力悬殊,即对因变量的相关度差别过大,将造成在线辨识的模型失真;
- (3) 难以避免的各种异常工况也将影响辨识结果以及优化方向。

因此根据正交试验的结论对各个因素进行更全面深入的分析,得到以下结论:(1) 热点温度影响力较弱,还需要提高氨合成塔热点温度的控制精度以配合优化操作,从反应动力学角度考虑,这将为氨合成反应提供良好稳定的反应条件,提高合成效率,提升氨净值;(2) 在工艺条件允许范围内,某些因素只需单向调节来提高氨净值,这些因素可以根据工艺允许值“卡边”调整的;(3) 循环氢含量与氨合成塔 4 段热点温度在不同工况下的最优工作点也不同,需要在线寻优。

因此可以将合成氨生产系统的优化分解为 3 部分:

- (1) 采用广义预测控制算法实现热点温度自动调节,提高控制精度;
- (2) 单调函数关系的甲烷含量和氨冷温度的“卡边”操作;
- (3) 氨合成塔四段热点温度与循环氢含量的在线操作优化。

这样的优化方案充分考虑不同因素的自身特点,以在线操作优化为基础,辅以“卡边”操作和预测控制等次优化方法,使得需要在线建模与优化的变量降低到 5 个,问题得到了有效的简化,又保证了整体优化的质量。

2.1 氨合成塔热点温度预测控制器

国内通常采用的 PID 控制、串级控制等调节

方法难以克服热点温度大时延、强干扰等特性带来的不利影响，控制效果往往很差。本文利用广义预测控制算法^[10-12]，并结合前馈控制，多回路控制较好的解决了系统耦合的问题。

经过深入研究和分析，将氨合成塔简化成一个 4 输入、4 输出的多变量系统，输入为冷副线气体流量和 3 股冷激气体流量，输出分别为 1~4 段催化剂床层热点温度，形成了 4 个单变量温度控制回路。根据合成塔内的氨合成反应机理，并结合工业过程控制的经验，采用一阶惯性带纯滞后模型来近似描述催化剂床层各段热点温度过程对象，即

$$R(s) = \frac{K}{T_s + 1} e^{-\tau s} \quad (1)$$

式中 K 为稳态增益常数， T 为时间常数， τ 为系统时延。

考虑到现场情况，在上位机采用 Visual C++

编写单独的 GPC 温度控制程序，控制周期根据 DCS 与上位机通讯速率确定为 15 s。控制器结构框图如图 1 所示 (T_3 、 T_5 、 T_{10} 、 T_{13} 分别为 1 至 4 段热点温度，后面表示类同)，预测控制器的参数经过仔细整定如表 1 所示。

各前馈通道的前馈系数根据实际情况确定，可以在线调整。根据数据分析，1~4 段的热点温度手动控制精度为： $T \pm 2.1^\circ\text{C}$ (标准差， T 为工艺指标范围平均值)，预测控制软件投运后，温度控制精度提高为： $T \pm 0.7^\circ\text{C}$ (标准差)，运行效果参见图 2、图 3 曲线。这种基于广义预测控制的控制思路化繁为简，针对主要矛盾构建控制回路，利用广义预测控制 (GPC) 良好的预测能力和鲁棒控制特性，实现了热点温度的稳定控制，同时这也为下阶段实施在线操作优化奠定了良好的工作基础。

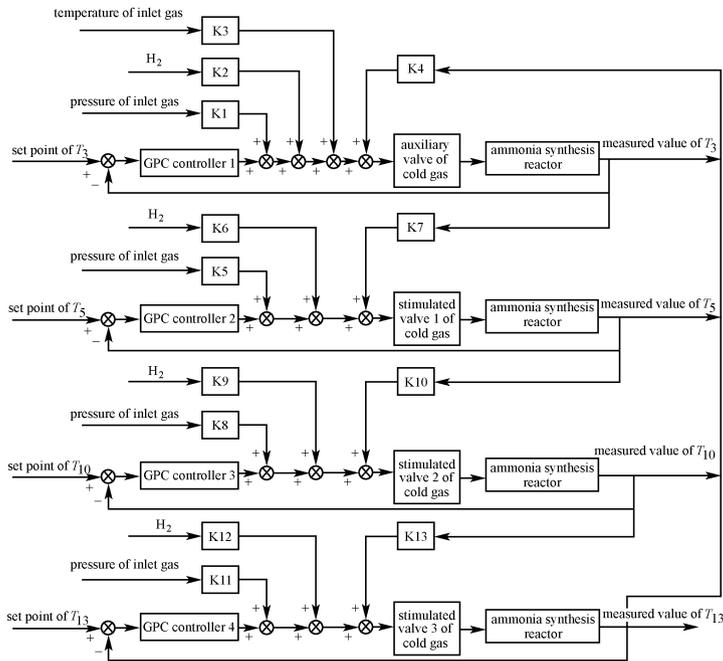


图 1 预测控制器结构框图

Fig. 1 Structure diagram of predictive controller

表 1 热点温度预测控制器参数

Table 1 Parameters of predictive controller of hot-spot temperature

Controller	Set-point / $^\circ\text{C}$	Sample time /s	Increment limit	Predictive step length	Control step length	Weight	Gentle factor	Stair factor	Output ratio
1	472.5	15	1.2	30	6	1	0.98	0.8	3.5
2	457.5	15	0.5	30	6	1	0.98	0.8	2.5
3	462.5	15	0.2	30	6	1	0.98	0.8	3
4	465.5	15	0.2	30	6	1	0.98	0.8	10

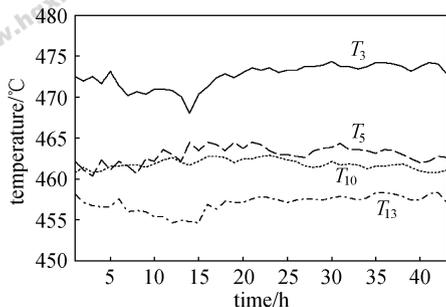


图 2 手动控制温度曲线

Fig. 2 Temperature curve of manual control

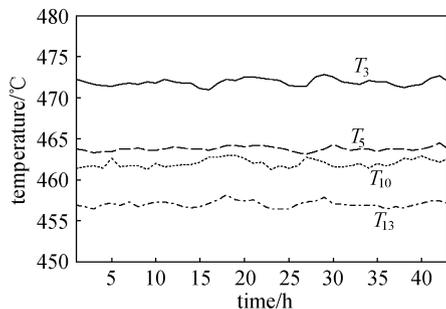


图 3 自动控制温度曲线

Fig. 3 Temperature curve of automatic control

2.2 “卡边”操作优化

“卡边”^[13]就是事先根据经验将模型中的某些待定参数或变量设计在合适的数值，而将求解问题大大简化，这种次优化控制的设计方法，更具有工程实践意义。

根据正交试验结论，甲烷含量、氨冷温度两个因素属于单调调节因素，可采用“直接卡边搜寻”策略进行卡边操作优化，设定初始目标优化参数为甲烷含量 12%，氨冷温度 -5℃。

考虑合成氨生产正常波动造成的工况变化，根据工艺指标制定卡边边界参数，甲烷含量 15%~10%，氨冷温度 0~-5℃。

实际操作时，可由在线优化软件根据当前及历史工况和工艺条件范围计算出合适的卡边设定值，然后根据此设定值按一定优化周期实施“卡边”操作，逐渐靠近优化工艺边界。

为了分析卡边优化效果，分别取 A、B 两个时段（各 3 天）的数据进行对比分析，A 时段为常规操作，B 时段为卡边操作，相关数据分析结果如表 2 所示。从表 2 可见，“卡边”操作优化期间甲烷含量、氨冷温度比正常操作条件分别朝有利于提高氨净值的方向调低 2.31%、2.6℃，控制精度也高于平常生产，氨净值提高 0.27%。

2.3 氨合成塔自适应在线操作优化

根据正交优化分析，氨合成塔 4 段 4 点热点温度存在最优组合，即最适宜反应温度；考虑到设备承受能力及实际生产的需要，不能过分降低循环氢含量以追求合适的氢氮比，故也需要通过在线寻优确定其最优值。如果将氨净值（以 C_{NH_3} 表示）看成因变量，热点温度（分别以 T_3 、 T_5 、 T_{10} 、 T_{13} 表示）与循环氢含量（以 C_{H_2} 表示）看成是自变量，则其关系可以表示为

$$C_{NH_3} = f(T_3, T_5, T_{10}, T_{13}, C_{H_2})$$

氨合成塔在线操作优化的任务可以转化为在满足工艺约束条件下（比如热点温度工艺范围等），求取函数 $f(T_3, T_5, T_{10}, T_{13}, C_{H_2})$ 的极大值的问题。由于优化对象特性受到各种因素的影响（如设备老化、催化剂活性的变化等），也会发生变化，所以要求操作优化控制系统必须具有适应环境条件变化的能力，故本文采用基于动态模型的自适应优化方法^[14-15]，根据过程实际存在的动态脉动数据辨识非线性动态模型的参数，然后抽取其静态部分，计算目标函数对各操作参数的一阶和二阶梯度，利用 Newton 法或最速下降法计算新的工作点。

表 2 卡边操作优化结果分析

Table 2 Result for boundary control

Period ^①		$C_{CH_4}/\%$	$T_N^{\text{③}}/^\circ\text{C}$	$C_{H_2}/\%$	$T_3/^\circ\text{C}$	$T_5/^\circ\text{C}$	$T_{10}/^\circ\text{C}$	$T_{13}/^\circ\text{C}$	$C_{NH_3}/\%$
A	average	14.70	-1.50	63.25	473.99	458.11	462.21	466.98	10.17
	std. ^②	0.31	1.22	0.73	0.58	0.46	0.85	1.16	0.13
B	average	12.39	-4.10	63.29	473.06	458.25	462.59	466.77	10.44
	std.	0.17	0.48	0.74	0.83	0.60	1.1	1.45	0.11

① Period A—period of ordinary operation; Period B—period of boundary operation.

② std.—standard deviation.

③ T_N —temperature of ammonia cooler.

自适应优化算法各部分与系统关系如图 4 所示。模型辨识利用处理过的工况和产量数据拟合系统动态模型，并计算梯度，优化计算部分则利用所得梯度及工况数据，计算新的操作参数。监督级监督辨识和优化中出现的问题，并采取适当的处理方法，保障辨识和优化的稳定进行。

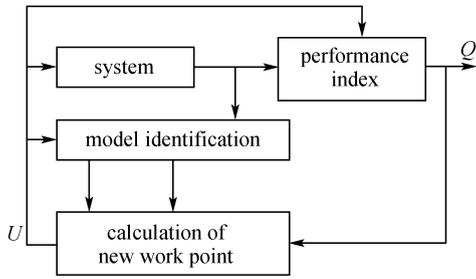


图 4 自适应控制结构框图

Fig. 4 Structure diagram of adaptive-optimization

2.3.1 模型结构及辨识 为了满足在线辨识和优化的要求，所选择的模型结构需满足：(1) 能在所要求工作范围内以足够精度拟合实际过程的非线性；(2) 对参数为线性，以适应在线辨识的要求。Hammerstein 模型恰好能够满足这一要求。另一方面，在正常操作甚至在优化过程中，由于采用梯度寻优（最速下降法）方法，工作点总是在原工作点附近变动一步，因此在一定时间段内，总变化有限，故采用遗忘因子方法，逐步跟踪工作点变化，弥补过程非线性。基于这种想法，实际上可以采用线性模型来计算，即采用的辨识模型不用考虑交叉项，模型结构如下

$$A(q^{-1})y(k) = b_0 + \sum_{i=1}^p B_i(q^{-1})u_i(k-d) \quad (2)$$

式中 $y(k)$ 代表 k 时刻的系统输出， d 为过程时延。模型辨识采用增广最小二乘方法，并在模型中引入噪声项 $C(q^{-1})$ ，以保证辨识结果的准确和无偏。兼顾到计算的稳定和方便， $C(q^{-1})$ 的阶次也不能太高，根据上述模型，同样选取噪声模型阶次为 1，于是得到实际用于辨识的过程优化模型

$$y(k) + ay(k-1) = b_0 + \sum_{i=1}^5 b_i u_i(k-d) + e(k) + ce(k-1) \quad (3)$$

2.3.2 最优工作点参数的计算 梯度寻优的基本出发点是沿梯度方向，通过多次小的修改，让每一步都使目标有所提高，并在最后找到最优工作点。从 Taylor 展开可知，梯度方向是工作点附近局部最快上升方向，与等高线垂直。对于式 (3) 所表示的简化模型，梯度相应为

$$\frac{\partial y}{\partial u_i} = \frac{b_i}{1+a} \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (4)$$

令 δ 作为优化步长，记 $u(k)$ 为 k 时刻的工作点（取 k 时刻前面 4 h 的平均值代替）， $u^*(k)$ 为 k 时刻的新工作点，采用梯度寻优时，它们的关系应满足

$$u^*(k) = u(k) + \delta \frac{\partial y}{\partial u} \quad (5)$$

根据前面的讨论，可以得到计算机实现的一次优化算法流程如下。

- Step 1 初始化当前工作点参数以及模型参数，并保存在参数文件中；
- Step 2 从数据文件中读取实时数据，并进行数据预处理，初始化辨识用数据；
- Step 3 辨识模型，将新的模型参数保存在参数文件中，并在辨识过程中随时计算梯度 τ ；
- Step 4 计算新工作点，

$$u^*(k) = u(k) + \delta^* \tau$$

式中 $u^*(k)$ 、 $u(k)$ 分别代表新、旧工作点， δ 为优化步长， τ 为 Step 3 计算出的梯度；

- Step 5 检查新工作点约束，违反约束的取最近边界值作为新工作点参数；
- Step 6 $\delta = 0.90\delta^*$ ，若 δ 仍大于事先设定阈值，转 Step 4，否则转 Step 7；
- Step 7 输出新的工作点，结束本次优化。

这样的优化思路利用过程动态数据，采样时间短，数据点多，辨识能很快收敛，加快了寻优速度，并利用遗忘因子，在工况变化时，也可以很快找到新的优化点，具有自适应的性质；另一方面，辨识与优化循环进行，每一次优化不苛求找到最优工作点，但尽量使现有点改善，抗干扰能力强。

2.3.3 自适应优化参数确定 在确立了模型结构、辨识与优化方法以后，还需要考虑影响辨识与优化结果的参数，除了上面提到的模型结构参数和系统时延，还有采样周期 T_s 、遗忘因子 λ 、优化步长 δ 以及优化周期 T_o 。

采样周期 T_s 需满足采样定理，过小将降低信噪比，使辨识变得不稳定，太大则影响辨识速度和精度。根据原始过程数据采样间隔，确定自适应优化的采样周期 T_s 为 1 min。

遗忘因子 λ 的作用是跟踪时变参数的变化，一般取 $0.95 < \lambda < 1$ 。 λ 的选择要综合考虑，首先要使梯度变化能跟踪新工作点变化，故不能太大；另

外, 由于所要解决的是一个多输入单输出的辨识问题, 各输入变量有较强的相关性, 且系统噪声强烈, 故 λ 也不能太小, 否则模型精度不能得到保证。

优化周期 T_0 是每次修改工作点的间隔时间, 由于甲烷含量、氨冷温度这两个因素的调节十分缓慢, 为了配合它们的优化操作, T_0 取为一天, 即 24 h。

优化步长 δ 为每一步优化从原工作点沿梯度方向移动的步长。优化步长 δ 的选择与优化周期 T_0 和遗忘因子 λ 有关。 δ 过大, 会使辨识参数跟不上工作点的变化, 使工作点在最优点附近左右波动, 甚至找不到最优工作点, 形成欲速不达的局面; 另一方面, 由于仪表精度限制, 每一步工作点的变化也必须足够显著, 否则起不到调优作用, 并且使优化时间变长, 所以 δ 也不能太小。

2.3.4 优化监督级的完善 合成氨生产是流程化模式, 其他工段的影响势必波及到合成工段, 影响氨合成塔反应条件。此外中小氮肥企业时常会有倒气、生产负荷调整等情况, 这些所带来的异常数据都必须进行处理, 否则将会影响优化结果。由于上位机采样周期是 15 s, 故以每个优化采样周期 T_s (1 min) 内的 4 个数据平均值作为当前采样数据, 并对毛刺、跳变等加以判断, 剔除异常数据; 如果当前一定时段内 (如 4 h) 的异常数据大于事先设定的阈值, 就认为当前工况属于异常, 无法进行优化, 则停止辨识、优化等工作, 等待下一个优化周期继续。

还应考虑到, 优化控制也会带来一些不安全因素, 如上位机故障或断电、计算错误、送给 DCS 的优化值与实际生产测量值偏差太大等。为此需增加安全保护系统, 以确保合成氨装置生产稳定, 如 (1) 当上位机停机或停电时, DCS 中特定仪表将

保持原优化数据不变; (2) 在上位机内设安全逻辑门——当优化计算超出一定极限时, 保持上次优化数据不变, 本次计算数据全部不下送到 DCS; (3) 当优化程序计算出的设定值在安全范围内但与实际测量值偏差较大时, 系统采用步进方式下送优化数据到 DCS; (4) 当优化程序送给 DCS 的数据超过生产允许范围时, 系统将自动切除与优化控制的联系。针对上述情况, 作者完善了优化监督级, 保障辨识和优化的稳定进行。

3 投运效果分析

根据以上方案设计的操作优化软件经过近半年的投运, 已经取得了明显的优化效果。为了进一步验证, 选取了 20 d 进行了对比试验, 在 C、D 两个相等时段内 (各 8 d 左右, 中间间隔 4 d 左右的过渡期), 分别实施常规操作和在线操作优化, 相关数据分析结果如表 3 所示。

从表 3 可以看出, 优化投运后, 氨净值提升 0.44%, 取得了显著的效果。

4 效益分析

合成氨生产系统操作条件优化的投运, 使氨合成塔的操作条件得以改善, 氨净值有明显的上升 (参见图 5), 同时有效提高了热点温度的控制精度, 进一步增强了合成工段生产的可靠性、安全性和经济性, 并减轻了操作人员的劳动强度。

基于所提出的优化方案编写的优化软件在安徽临泉化肥厂投用已有半年, 在进气量一致的情况下, 该厂 2[#] 系统氨合成塔氨净值提高 0.4%, 系统压力降低 1.2 MPa 以上, 吨氨电耗降低 40 kW·h, 吨氨块煤消耗降低 15 kg, 合成氨日产量提高 6 t, 每年增加经济效益超过 800 万元。

表 3 在线优化操作优化结果分析
Table 3 Result for on-line optimization

Period ^①		$C_{CH_4}/\%$	$T_N^{\text{③}}/^\circ\text{C}$	$C_{H_2}/\%$	$T_3/^\circ\text{C}$	$T_5/^\circ\text{C}$	$T_{10}/^\circ\text{C}$	$T_{13}/^\circ\text{C}$	$P_{\text{syn}}^{\text{④}}/\text{MPa}$	$C_{NH_3}/\%$
C	average	14.47	-2.98	62.09	472.73	457.55	463.62	467.53	23.67	9.80
	std. ^②	0.25	0.46	0.83	0.95	2.29	3.94	2.94	0.33	0.18
D	average	14.52	-2.98	62.01	473.98	457.27	461.96	467.04	23.47	10.24
	std.	0.19	0.67	0.65	0.75	0.88	1.09	1.13	0.32	0.14

① Period C—period of ordinary operation; Period D—period of optimal operation.

② std.—standard deviation.

③ T_N —temperature of ammonia cooler.

④ P_{syn} —synthesis pressure.

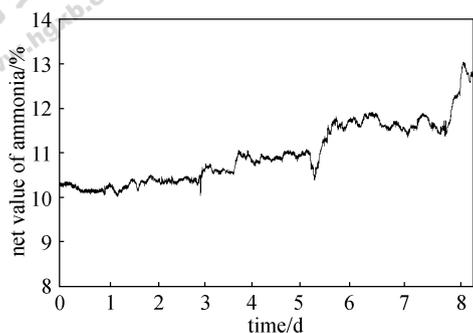


图5 优化实际投运氨净值曲线

Fig. 5 Curve of net value of ammonia in application of optimization

5 结论

中小氮肥合成氨优化一直以来为热点温度自动调节、操作条件在线寻优等难点所困扰，国内该领域并没有同时克服以上难题的成功案例。针对于此，本文提出一种有效的优化方案，在国内率先实现了合成氨生产操作条件的自适应在线优化以及热点温度广义预测控制，解决了临泉化肥厂关键工艺因素无法投自动、生产条件不合理的问题，使性能指标优于部颁标准的要求，获得了良好的实际运行效果。

这种优化方案目标明确，针对性和可操作性都更强，有效而稳定地提高了氨净值，能够实现节能降耗的最终目标，产生的经济效益是显著而巨大的，适用于我国中小型氮肥企业的合成氨生产系统优化，具有很高的推广应用价值。

References

[1] Grotz Jr, Bernard J. Temperature controlled ammonia synthesis process; US, 4624842. 1986-11-25

[2] Sun Baoci (孙宝慈). A summarization of operation and technical reformation on large scale plants in recent 2 years. *Large Scale Nitrogenous Fertilizer Industry* (大氮肥), 2000, **23** (1): 1-6

[3] Grasdal K, Barone P, Poe W. Benefits of advanced control to ammonia plant operations//Proc. AIChE Ammonia Safety Symposium. San Francisco, 1997: 22-24

[4] Max Appl. Modern ammonia technology: where have we got to, where are we going. *Nitrogen*, 1992, **199**: 46-74

[5] Zhang Rufeng (章如峰), Jia Xunhui (贾勋慧), Zhu Ming (朱铭). Computer control of medium scale ammonia synthetic unit. *Control and Instrument in Chemical Industry* (化工自动化及仪表), 1997, **24** (5): 20-22

[6] Zhang Hong (张红). Study on heat pipe ammonia converter-study on two-phase flow inside evaporator of loop heat pipe and control of optimal ammonia formative temperature [D]. Nanjing: Nanjing Chemical Engineering University, 1999

[7] Lü Daiqing (吕待清). Optimization of operation of a multistage adiabatic ammonia converter with interstage quenching. *Journal of the Chemical Fertilizer Industry* (化肥工业), 2001, **28** (5): 21-26

[8] Huang Dao (黄道), Yu Jinshou (俞金寿). Automation of Nitrogen Fertilizer Production (氮肥生产自动化). Beijing: Chemical Industry Press, 1992

[9] Shen Zhiyu (沈之宇), Zhang Qingwu (张庆武), Yan Jingyu (阎镜予), Xue Meisheng (薛美盛), Wu Gang (吴刚), Sun Demin (孙德敏). Two-step and gradual orthogonal optimization on a synthetic ammonia system. *Journal of University of Science and Technology of China* (中国科学技术大学学报), 2005, **35** (2): 277-283

[10] Shu Diqian (舒迪前). Predictive Control System and Application (预测控制系统及其应用). Beijing: China Machine Press, 1998

[11] Wang Dong (王东), Zhou Donghua (周东华), Jin Yihui (金以慧). Adaptive generalized generic model control. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2003, **54** (3): 344-349

[12] Clarke D W. Application of generalized predictive control to industrial processes. *IEEE Control Systems Magazine*, 1988, **8** (2): 49-55

[13] Wang Yongchu (王永初). On the suboptimal method for the process control system (III): Suboptimal system with extreme value on borderline. *Journal of Huaqiao University* (华侨大学学报), 1996, **17** (1): 52-55

[14] Bamberger W, Isermann R. Adaptive on-line steady-state optimization of slow dynamic process. *Automatica*, 1978, **14**: 223-230

[15] Zhang Zhigang (张志刚), Xue Meisheng (薛美盛), Wu Gang (吴刚). An adaptive on-line steady state optimization method and its application to acrylonitrile apparatus. *ACTA Automatic SINICA* (自动化学报), 1998, **24** (1): 73-80