

过程控制和优化

基于自适应粒子群优化算法的预测控制 算法及其在加热炉支管平衡中的应用

刘 波¹ 张丽香^{1,2} 黄德先¹

(1. 清华大学自动化系, 北京 100084; 2. 山西大学工程学院, 山西 太原 030013)

摘要:多变量和输出受限系统的预测控制问题一般表现为一个不易直接求解的多变量且多约束的非线性动态规划问题。传统优化方法在解决此优化问题时,存在易收敛到非法解或局部极小、计算时间长以及对模型参数与初值依赖性强的缺点。提出了一种基于自适应粒子群优化的预测控制算法(APSO-DMC),采用自适应粒子群优化算法(APSO)作为模型预测控制的优化方法,在线实时求解最优控制律,从而有效地克服了传统优化方法的不足。将此算法应用于常减压装置加热炉支管温度平衡控制中,仿真试验结果显示了该方法的有效性。

关键词:自适应粒子群优化(APSO)算法;预测控制;加热炉;支路平衡

中图分类号:TP273;TQ051.5

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2004)S2-0150-04

Adaptive particle swarm optimization based predicted control algorithms and its application in balance control of heater bypass

LIU Bo¹, ZHANG Li-xiang^{1,2}, HUANG De-xian¹

(1. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. College of Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030013, China)

Abstract: The model predictive control algorithms for a multi-variables system with limited outputs can be formulated as constrained nonlinear dynamic programming problem which is hard to solve. Traditional optimization methods have been found to be time-consuming, often be trapped in illegal solutions or local minima, or sensitive to initial values in solving the above problems. A new predictive control algorithm based on adaptive particle swarm optimization (APSO-DMC) is proposed, in which APSO is employed as the optimization art in determining the series of optimal manipulated variables online. Then, APSO-DMC is applied to the balance control of the heater bypass of the atmospheric and vacuum distillation unit. The simulation results illustrate its effectiveness.

Key words: adaptive particle swarm optimization (APSO); predictive control; furnace; branches balance

加热炉是石化生产过程中一类重要的加热设备,而加热炉各支管出口温度平衡是加热炉的重要控制指标。加热炉进料支管一般为 4 路或 8 路,由于各路燃料流量、雾化蒸汽量、助燃风量和各支管被加热介质流量的不同,以及受各炉管结焦及受热面积等因素的影响,使得各支管进料无法得到均衡加热,从而导致加热炉各支管出口温度不平衡。各支管温度不平衡会影响后续的精馏塔分馏及原油裂解效果,如果各支管温度偏差过大,还会造成炉管内介质气化结焦现象,影响后续产品的质量和炉管使用寿命。并且,流量越小、温度越高的支管越易于结焦,阻碍管内的介质流动,进一步加剧结焦现象,最终可能会使管壁烧穿而造成事故。因此实施加热炉

支管温度平衡控制对于安全生产、降低能耗、提高产品质量具有非常重要的意义。

1 控制策略

加热炉支管温度平衡控制是一个多变量、非线性、强耦合的控制问题,其控制要求在满足加热炉总进料流量恒定的情况下,通过调整加热炉各支管进料流量来减少各支管出口温度偏差,同时还需要克服由于各支管流量的变化给各支管出口温度造成的干扰。

预测控制通过滚动优化的方式逐次计算出使性能指标达到最优的控制律。杜晓宁和席裕庚^[1]认为由于受对象的复杂特性及运行现场环境的限制,其

基金项目:国家“973”项目子课题(2002CB312200)资助

作者简介:刘波(1979-),男,博士生,通讯联系人,010-62785845-232,liubo1@mails.tsinghua.edu.cn;黄德先(1958-),男,教授,博士生导师,研究方向为控制理论与控制工程,010-62783125-251。

优化问题一般表现为一个不易直接求解的多变量多约束的非线性规划问题,这个问题的优化计算需在线实时进行,因此优化方法的选择对于最终的控制效果非常关键。多年来,许多学者在解决这一复杂的控制问题上做了大量的探索并提出一些有效的解决方案,主要可划分为2类:

(1)基于无模型的控制策略。李嗣福、桂丙武、汪兴轩等^[2-4]提出一种基于差动法的控制算法,该方案把一个多变量强耦合的控制问题转化成了几个单变量的常规控制问题,使问题得以简化。其局限性表现在:①基于差动法的四路平衡控制需要分别设计、整定3个相对独立的平衡调节器,并且随着支路数目的增加需要更多的平衡调节器,这在一定程度上增加了系统的复杂性和不确定性;②由于平衡调节器的调节作用是差动的,尽管不会引起被加热介质静态总流量的变化,但系统的调节作用会比较慢;③由于文中所采用的平衡调节器没有加积分作用,出现了四路支管的出口温度两两趋于一致,但四路没有完全达到平衡的情况。崔帆^[5]用简单的静态补偿方式进行加热炉支路平衡控制,利用带反向增量补偿的加法器算法和基于热焓原理的支路温差平衡算法来抑制了各支路之间的不平衡工况,但是该算法需要在各路流量较为准确的条件下才具有较高的可靠性。

(2)基于有模型的控制策略。王金春等^[6]利用一种两层递阶控制结构来克服支路流量耦合特性和不确定性。曾文华^[7]通过建立各支管温度动态数学模型,采用多变量广义预测控制的思想,使各支管出口温度朝支管温度平均值逼近,以实现支路温差最小的目的,其不足之处是在广义预测控制中需要求解丢番图方程,所以增加了控制算法的复杂性,不利于在线实时优化。

笔者提出了一种基于自适应粒子群优化的预测控制算法(adaptive particle swarm optimization based dynamic matrix control, aPSO-DMC),采用APSO算法作为模型预测控制的优化技术,可以在线实时求解预测控制算法中的性能指标函数,从而有效地克服了传统优化技术在解决此问题时存在易收敛到非法解或局部极小、计算时间长以及对模型参数与初值依赖性强的缺点。

2 粒子群优化算法

2.1 粒子群算法基本原理

粒子群优化算法(PSO)是由 Kennedy 和 Eber-

hart^[8]提出的一种基于仿生的全局进化的计算方法,从鸟群和鱼群觅食过程的生物模型中得到启示,并将其用来解决优化问题。该算法简单、容易实现且不需要利用被优化问题的梯度信息,在解决非线性、多变量、多目标约束优化问题上表现出了优越性。

粒子群算法与遗传算法类似,都是基于群体和适配值概念的优化算法,不同之处在于粒子群算法具有记忆粒子最佳位置的能力以及粒子间的信息共享机制。粒子的位置代表优化问题的可能解,用粒子适配值衡量该粒子的优劣。算法首先在可行解空间和速度空间随机初始化粒子群,为每个粒子分配初始位置 x_i^0 和初始速度 v_i^0 ;然后根据适配值函数评价每一个粒子,得到粒子个体 t 时刻的最优位置 p_i^0 和群体最优位置 p_g^t 。利用公式(1)和(2)分别对粒子速度和位置迭代更新,直到满足迭代终止条件^[9]。

$$v_i^{t+1} = wv_i^t + c_1R_1(p_i^t - x_i^t) + c_2R_2(p_g^t - x_i^t) \quad (1)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (2)$$

式中, w 为惯性权重,用于平衡算法的探索和开发,较大的 w 值有利于跳出局部极小点,较小的 w 值则有利于算法收敛,通常在 0.4~0.9 之间线性或非线性变化; c_1 和 c_2 为正的加速常数。 R_1 和 R_2 为 [0, 1] 的正态分布随机数; v_i 通常应受到速度最大值 v_{\max} 的限制, v_{\max} 一般设置为变量约束区间的 10%~20%。

2.2 粒子群算法的改进

PSO 算法的惯性权重 w 的选择直接影响算法的收敛性,是影响 PSO 算法行为和性能的关键所在,针对 PSO 算法容易早熟和粒子在算法后期易在全局最优解附近“振荡”的现象,通常采用随着迭代的进行,式(1)中的惯性权重由最大值线性减小到最小值的方法。但是需要通过反复试验来确定 w 的最大值、最小值以及最大迭代次数,而且很难找到适应于每个问题的最佳值。考虑到 PSO 算法在解空间寻优的过程本身就是一个非线性过程,提出了一种非线性动态自适应粒子群优化算法(APSO),惯性权重 w 能够随适配值自动改变。惯性权重 w 的计算表达式如下:

$$w = \begin{cases} w_{\max} - \frac{(w_{\max} - w_{\min})(f - f_{\text{avg}})}{f_{\max} - f_{\text{avg}}} & f \geq f_{\text{avg}} \\ w_{\max} & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (3)$$

式中, w_{\max} 和 w_{\min} 分别代表惯性权重的最大值和最小值; f 为粒子的适配值; f_{avg} 为每代的平均适配值; f_{\max} 为粒子群中最大的适配值。当粒子适配值趋于

一致或者趋于局部最优时,使 w 增加;而当粒子适配值比较分散时,使 w 减少。同时,适配值高于粒子群平均适配值的粒子对应于较小的 w ,使该粒子得以保护;而低于平均适应值的粒子对应于较高的 w ,使该粒子能够更快地趋向较好的搜索空间。APSO 算法有效地平衡了探索和开发能力,同时保障了粒子的多样性和 PSO 算法的收敛性。

3 基于自适应粒子群优化算法的动态矩阵控制

3.1 动态矩阵控制算法的一般描述

在每一时刻模型预测的基础上,根据系统输出预测值和输出期望值的偏差计算满足约束条件的控制量,使对象的输出尽可能接近期望的柔化参考轨迹^[10]。预测控制算法的优化问题可以描述为:

$$\min J = e^T Q e + \Delta u^T R \Delta u \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \Delta u_{\min} \leq \Delta u \leq \Delta u_{\max} \\ u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \\ y_{\min} \leq y \leq y_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $e = y_R - y_C$ 为输出预测误差; y_R 为参考轨迹, $y_C = A \Delta u + y + p$ 为校正后的预测输出; A 为模型动态矩阵; Q 和 R 为误差权和控制增量权矩阵; y 为 k 时刻的测量值; p 为过去时刻的控制量对未来时刻输出预测校正值的影响; Δu 为控制量增量序列。通过求解上述优化问题得到最优控制序列 Δu , 取 k 时刻控制量并作用于系统。在 $(k+1)$ 时刻重新进行优化计算,得到新的控制增量序列。

3.2 基于自适应粒子群优化算法的动态矩阵控制算法

采用自适应粒子群 (APSO) 优化算法在线实时求解上述多变量多约束的非线性动态优化问题。在加热炉支管温度平衡控制问题中,需要满足各支路流量控制量之和满足某要求量的特殊约束,故在式 (5) 中增加等式约束:

$$\sum_i \Delta u_i = 0 \quad (6)$$

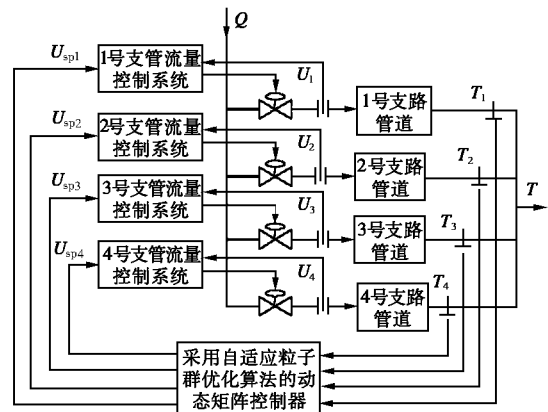
$$\sum_i u_i = Q \quad (7)$$

式中, Δu_i 为 i 支路流量的变化量, u_i 为 i 支路流量, 常数 Q 为总流量。将目标函数 (4) 作为 APSO 算法的适配值评价函数。通过 APSO 优化算法,求得满足约束条件式 (5) ~ (7) 并且使得性能指标 J 取得最小值的控制量增量序列 Δu 。

4 实例仿真

为了验证自适应 PSO 算法的可行性进行了数

字仿真实验。APSO-DMC 算法根据各支管温度预测值与温度期望值的偏差,计算出可以实施的各支管入口流量,作为各支管流量控制系统的设定值,使各支路温度尽可能逼近支路温度平均值,实现各支管出口温度偏差满足工艺过程要求的目标。基于 APSO 的加热炉支管温度平衡控制控制结构如图 1 所示。



注: T_1, T_2, T_3, T_4 分别是各支管出口温度实际测量值; U_1, U_2, U_3, U_4 分别为各支管流量实际测量值; $U_{sp1}, U_{sp2}, U_{sp3}, U_{sp4}$ 分别是各支管流量控制系统物设定值; Q 为加热炉的总流量负荷; T 为加热炉出口温度。

图 1 加热炉各支管温度平衡控制方案示意图

仿真模型采用某石化公司处理量为 220 万 t/a 的常减压装置加热炉 (进料支管为 4 路) 的进料流量与出口温度改变量的近似动态模型。模型采用二阶惯性加纯滞后环节,即

$$G_i(s) = \frac{\Delta T_i(s)}{\Delta u_i(s)} = \frac{K_i e^{-\tau s}}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (8)$$

式中: ΔT_i 为第 i 支路出口温度变化量; Δu_i 为 i 支路流量的变化量。

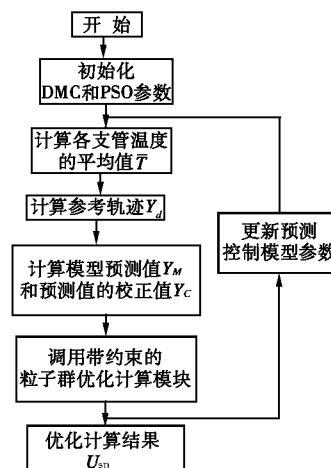


图 2 采用自适应粒子群优化算法动态矩阵控制流程

实时仿真在 Matlab/Simulink 仿真环境中运行。利用 S-function 编写基于自适应粒子群优化算法的动态矩阵控制器,并通过 Matlab 编程语言建立了常减压装置加热炉的进料流量调节量与出口温度改变量的动态模型部分。基于 APSO 的预测控制算法流程如图 2 所示。

系统中采用 APSO-DMC 控制器输出作为加热炉各支管流量控制系统的流量设定值,控制器的设定值为各支管出口温度的平均值,即

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^4 u_i T_i}{\sum_{i=1}^4 u_i} \quad (9)$$

在整个支管温度平衡控制过程中应保证加热炉进料总流量负荷的稳定,即

$$\sum_{i=1}^4 u_{SPi} = Q \quad (10)$$

仿真实验中,选择采样周期 $T = 2.4 \text{ s}$,阶跃响应模型时域长度 $N = 50$,预测时域长度 $P = 30$,控制时域长度 $M = 1$,粒子数 20,目标空间的维数 4,惯性权重根据公式(3)自适应调节,最大迭代次数 50,加速常数 $c_1 = c_2 = 2$ 。

根据现场实际情况,各支路初始进料流量均假设为 80 t/h 。各支路流量和温度变化分别如图 3 (a)、(b)所示。

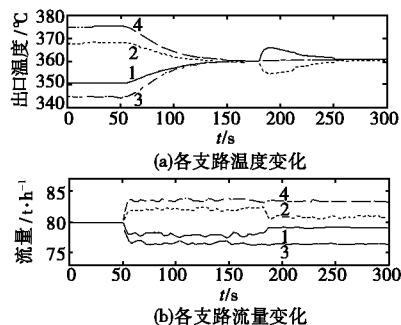


图3 支管平衡控制投入前后各路流量和温度变化曲线

由于没有投入 APSO-DMC 控制器,各支管出口温度存在极大的不平衡,分别为:350、368、345 和 375°C。在系统运行至第 50 s 时投入控制器。从图中可以看出,大约经过 2.5 min,各支管出口温度趋

于一致 ($T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = 360^\circ\text{C}$),此时进料总流量负荷保持稳定,而各支路入口流量不同。为了测试控制器抗温度干扰的能力,在系统运行到 180 s 时,加入 $\Delta T_1 = +8^\circ\text{C}$ 和 $\Delta T_2 = -7^\circ\text{C}$ 的干扰。从图 3 中可以看出,经过大约 1.5 min,各支管出口温度趋于一致 ($T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = 360^\circ\text{C}$),支路 1 和支路 2 的进料流量由于有温度干扰,分别增加和减少 1 t 左右。

仿真试验显示,将 APSO 算法作为模型预测控制算法的优化技术,可以克服由于模型不准确带来的干扰,并能很好地处理系统输入受限问题,而且算法的在线计算量较小,适合在线使用。

4 结语

提出了一种基于自适应粒子群优化的预测控制算法。这种智能优化算法的思想有效地扩展了预测控制的适用范围,对于解决多变量之间有特殊约束的大型复杂生产过程的优化控制和非线性预测控制等问题具有实用价值。仿真试验表明本算法能有效地解决加热炉支管温度平衡控制这种多变量之间有特殊约束的动态优化问题,很容易推广到多变量系统和输出受限系统。

参考文献

- [1] 杜晓宁,席裕庚.[J].控制与决策,2002,17(5):563-566.
- [2] 李嗣福,吴福明,陈红,等.[J].信息与控制,1994,23(4):243-246.
- [3] 桂丙武,汪兴轩,吴刚,等.[J].自动化与仪表,2001,16(5):24-27.
- [4] 汪兴轩,桂丙武,孙德敏.[J].自动化博览,2001,(2),16-18.
- [5] 崔帆.[J].化工自动化及仪表,2001,28(2):23-26.
- [6] 王金春,高裕畅,周春晖.[J].浙江大学学报,1995,29(2):163-171.
- [7] 曾文华.[J].石油化工自动化,2000,(5):35-37.
- [8] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization [A]. In: Proc IEEE Int Conf on Neural Networks[C]. 1995. 1942-1948.
- [9] Shi Yuhui, Eberhart R C. A modified particle swarm optimizer [A]. In: Proc IEEE Int Conf on Evolutionary Computation[C]. 1998. 69-73.
- [10] 金以慧.过程控制[M].北京:清华大学出版社,1993.312-319.

《现代化工》网站介绍

《现代化工》网站网址为: <http://www.xdhg.com.cn>, <http://journals.cheminfo.gov.cn/indexd.asp>, 欢迎广大读者访问。从网上,您可以查到近年《现代化工》文章目录,了解对稿件的要求及投稿注意事项,也可以在网上了解我们的广告联系办法、期刊订阅方法以及近期授权和申请的中国化工专利。另外,如果您对本刊有什么建议和意见,也可以在网上留言。