

文章编号: 1006-3080 (2004) 05-0564-03

## 含约束条件遗传算法在连续催化重整优化操作中的应用

张 波, 孙自强\*

(华东理工大学自动化研究所, 上海 200237)

摘要: 介绍了通过惩罚函数法解决含约束条件遗传算法的实现问题。分别采用内点法和外点法, 将有约束优化问题转化为无约束的优化问题, 再利用M atlab 编制遗传算法程序。通过对连续催化重整优化操作过程仿真计算, 证明该方法具有快速收敛且优化结果好的特点。

关键词: 遗传算法; 优化; 约束; 惩罚函数; 连续催化重整

中图分类号: TP273

文献标识码: A

## Optimization of Continuous Catalytic Reforming Based on Genetic Algorithm with Constraints

ZHANG Bo, SUN Zi-qiang\*

(Research Institute of Automation ECU ST, Shanghai 200237, China)

Abstract: Genetic algorithm (GA) is an effective method for searching the global optimal resolution. This paper proposes the methods of using punishment function to realize GA with constraints, and then constructing GA program by M atlab tools. In the end, the modified GA is applied to optimize the parameters of continuous catalytic reforming. The results show that the algorithm can converge to good result rapidly. It demonstrates that GA is highly effective and has a good prospect.

Key words: genetic algorithm s; optimization; constrain; punishment function; continuous catalytic reforming

遗传算法(Genetic algorithms, GA)是由Holland教授及其学生首先提出的一种仿照生物学中进化论思想而衍生出的优化算法<sup>[1]</sup>。遗传算法应用于优化问题的求解, 是一个启发式随机搜索的过程, 与传统的优化搜索算法相比具有可以克服局部最优解的陷阱, 搜索得到全局最优解; 良好的鲁棒性和操作的简明性等特点, 适用于大规模复杂问题的优化。

但是在实际生产过程中, 优化目标函数往往必须在一定的约束条件下进行。目前解决遗传算法中约束问题的方法主要有可行方向法, 惩罚函数法, 二次规划法等<sup>[2~4]</sup>。本文通过惩罚函数法解决连续催

化重整(CCR)优化操作中的约束问题, 然后将遗传算法应用于该过程中, 实现遗传算法对含约束条件的CCR操作的优化。

## 1 带约束条件问题的优化算法

对于一般的带约束条件问题的优化目标函数, 可以通过惩罚函数, 即通过给原来的目标函数加一项由约束函数所构成的惩罚项来生成新的目标函数, 将含有约束的问题转化为不含约束的问题来解决。

## 1.1 外点法

对于一般的约束问题

E-mail: zhang1219@21cn.com

收稿日期: 2003-10-08

作者简介: 张 波(1979-), 男, 宁夏银川人, 硕士生, 研究方向为智能控制。

$$\begin{aligned} \min & f(x) \\ \text{s.t.} & g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m \\ & h_j(x) = 0, j = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

可以定义如下辅助函数:

$$F(x, \sigma) = f(x) + \sigma P(x)$$

$$P(x) = \sum_{i=1}^m [\max\{0, -g_i(x)\}]^\alpha + \sum_{j=1}^n h_j(x)^\beta$$

其中,  $\alpha, \beta \geq 1$  均为常数。这样把约束问题转化为无约束问题:

$$\min F(x, \sigma) = f(x) + \sigma P(x)$$

外点法在迭代过程中产生的近似最优解只是近似地满足约束条件, 对于一些要求严格的问题, 得到的效果不是很好, 甚至会出现不适用的情况。

## 1.2 内点法

内点法是在可行域的内部迭代求解约束问题, 这类方法不适用于带有等式约束的问题。

对于一般问题:

$$\begin{aligned} \min & f(x) \\ \text{s.t.} & g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m \end{aligned}$$

可行域记为:

$$D = \{x | g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m\}$$

保证迭代点在可行域内部的情况下, 可定义辅助函数:

$$G(x, r) = f(x) + rB(x)$$

把约束问题转化为无约束问题。B(x)在实际中常采用倒数罚函数  $\sum_{i=1}^m \frac{1}{g_i(x)}$  和对数罚函数  $\sum_{i=1}^m \ln g_i(x)$ 。对数罚函数比倒数罚函数收敛得快些。

在遗传算法的优化过程中, 可以采用以上方法先将带有约束的优化问题转化为无约束问题, 再调用遗传算法工具箱进行优化。

## 2 带约束条件的遗传算法在连续催化重整优化中的应用

某石油化工公司炼油厂建设的 60 万吨/年连续催化重整装置采用 UOP 技术, 以低辛烷值石脑油为原料, 通过原料预处理、重整反应、催化剂连续再生和重整油分馏 4 个工序, 生成富含芳烃的高辛烷值汽油。连续重整反应器生产控制的主要目的是在保证重整产品辛烷值、催化剂结焦含量合格的前提下, 提高重整产品  $C_5^+$  液收率。

根据工艺分析, 影响重整产品辛烷值、催化剂结焦含量、重整产品  $C_5^+$  液收率的因素众多, 如反应器进出口温度、加权平均床层温度、反应压力、空速、氢

油比等, 而生产上只是将反应器进口温度作为操作变量进行优化操作, 在满足辛烷值要求和催化剂结焦含量的标准下得到最大的产品液收率。通过软测量方法可以获得重整产品辛烷值、催化剂结焦含量、重整产品  $C_5^+$  液收率的模型, 在此基础上可以调整反应器进口温度, 实现优化操作。

连续重整优化问题数学表达如下:

$$\begin{aligned} \max & y = f(x_1, x_2, x_4, x_6, t_b) \\ \text{s.t.} & R = G_1(x_1, x_3, x_4, t_b, t_i) \\ & C = G_2(x_1, x_3, x_4, x_5, t_b, t_i) \\ & t_b = G_3(t_i, t_{01}, t_{02}, t_{03}, t_{04}) \\ & R_{\min} \leq R \leq R_{\max} \\ & C_{\min} \leq C \leq C_{\max} \\ & t_{b_{\min}} \leq t_b \leq t_{b_{\max}} \end{aligned}$$

式中 y 为收率;  $x_1$  为进料流量, 是上道工序的负荷参数;  $x_2$  为出料流量;  $x_3$  为干点;  $x_4$  为芳烃潜含量;  $x_5$  为氢油比;  $x_6$  为 50% 馏程;  $t_i$  为反应器进料温度 (4 个叠加反应器的进料温度控制在相同数值, 故仅考虑第一反应器进料温度);  $t_{01}$ 、 $t_{02}$ 、 $t_{03}$ 、 $t_{04}$  分别为第一、二、三、四反应器出口温度,  $t_b$  为加权平均床层温度; 通过 4 个反应器进料温度和出口温度求出; R 为辛烷值, 要求  $94 \leq R \leq 100$ ; C 为催化剂结焦含量, 且要求  $1 \leq C \leq 6$ 。在优化计算时, 考虑通过改变反应器加权平均床层温度提高收率, 要求  $450 \leq t_b \leq 480$ 。

### 2.1 外点法遗传算法

建立如下辅助函数

$$\text{fun} = y + w_1 \times (94 - R) \times (R - 100) + w_2 \times (C - 6) \times (1 - C)$$

将带约束的优化问题转化为不含约束的优化问题, 其中  $w_1, w_2$  是惩罚因子, 取  $w_1 = 0.1, w_2 = 0.2$ , 然后调用遗传算法工具箱<sup>[2]</sup>, 对必要的参数进行设置:

```
[tb_endPop] = ga(bounds, fun, [], initPop,
    [1e-6 1 1], maxGenTerm, 25,
    nomGeomSelect, [0 0.8], [arithX-
    over], [20], nonuniMutation, [2 2.5
    3]);
```

寻优后的曲线如图 1 所示, 得到最优控制点:

$$t_b = 475.82 \quad y = 96.5138$$

其中  $t_b$  为经过归一化后的反应器加权平均床层温度值, 对它反归一化后可得反应器加权平均床层温度为  $453.6^\circ\text{C}$ 。此时可获得重整产品  $C_5^+$  最大液收率为 96.5138。图 1 中的曲线是初始函数的图像, “十字”图标是初始种群, “空心圆”图标是经过一次 GA 迭代运算后得到的新种群, “方框”图标是最终

获得的种群,即最优解。

## 2.2 内点法遗传算法

建立辅助函数:

$$f_{un} = y - n_1 \times \ln[(94 - R) \times (R - 100)] - n_2 \times \ln[(C - 6) \times (1 - C)]$$

将约束问题转化为不含约束的问题,其中  $n_1, n_2$  为惩罚因子,取  $n_1 = 0.2, n_2 = 0.1$ 。然后调用遗传算法工具箱。寻优后的曲线如图2所示,最优控制点:

$$t_B = -0.8786, \quad y = 96.4348$$

对  $t_B$  反归一化后可得反应器加权平均床层温度为  $451.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 即当反应器加权平均床层温度为  $451.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  时获得重整产品  $C_5^+$  最大液收率为  $96.4348$ 。

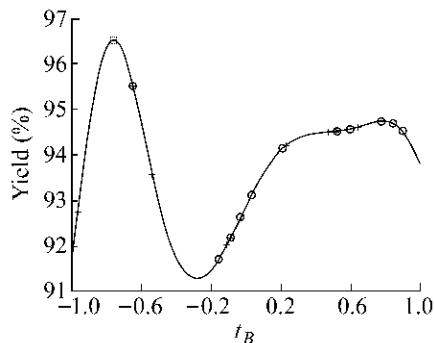


图1 外点法遗传算法优化结果图

Fig. 1 Optimization result graph of GA used outer point method

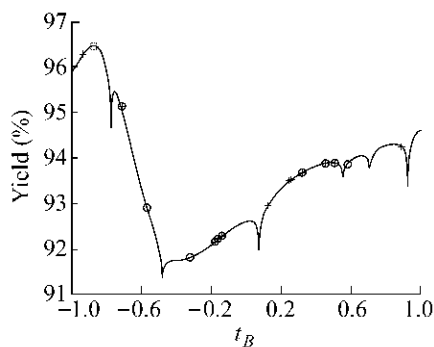


图2 内点法遗传算法优化结果图

Fig. 2 Optimization results graph of GA used inner-point method

## 2.3 内点法和外点法的比较

采用内点法和外点法解决带约束问题的遗传算法时的迭代次数如表1,可以看出使用内点法与外点法解决模型的遗传算法约束问题所经历的迭代次数相差不大。但结合图1和图2及表2可以看出,使

用内点法改进的遗传算法最终种群(Endpop)可以很精确地重合在一点,即最优解。使用外点法改进的遗传算法最终种群的个别个体存在着一定的偏差,这主要是因为外点法是一种近似求解的方法。同时也说明使用内点法解决不含等式约束的遗传算法问题时具有更好的寻优性能。同时在尝试惩罚因子的过程中,有时也会碰到外点法不适合解决该实际问题的情形,即寻找的最优点实际上是次优点或者偏离真实最优点的情况,当然对于本问题可以通过改变惩罚因子,迭代次数等参数消除这种弊端。所以对于不含等式约束的问题,运用内点法是一种很好的解决方法。但是,在存在等式约束的情况时,还是要借助于外点法或者其他方法。

表1 迭代次数比较

Table 1 Comparison of iteration numbers

Iteration numbers	Inner-point method	Outer-point method
1	96.2675	95.4971
5	96.2675	96.5121
10	96.4158	96.5138
15	96.4347	96.5137
20	96.4348	96.5138
25	96.4348	96.5138
30	96.4348	96.5138

表2 最终种群(取10个)比较

Table 2 Comparison of endpop

Endpop	Outer-point method	Inner-point method
1	96.5138	96.4347
2	96.5122	96.4348
3	96.5138	96.4348
4	96.5138	96.4348
5	96.5137	96.4347
6	96.5138	96.4348
7	96.5138	96.4348
8	96.5122	96.4348
9	96.5138	96.4348
10	96.5137	96.4348

从表1还可以看出,对于本问题采用带约束条件的遗传算法经过20次迭代后可以稳定地达到最优值,对于大规模复杂问题具有很好的应用前景。

(下转第575页)

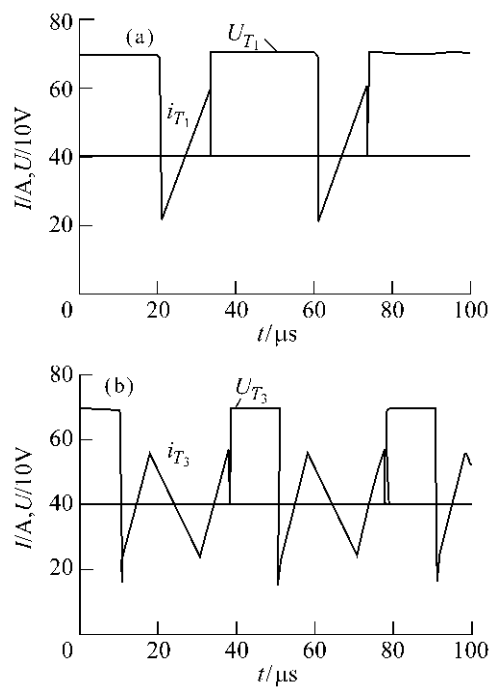


图 6 空载条件下的电压和电流波形

Fig 6 Voltage and current waveforms in zero-load condition

证实了开关的软换流过程。实验结果表明该变流器

(上接第 566 页)

3 结 论

遗传算法可以很好地克服局部最优解的陷阱，搜索得到全局的最优解。本文研究的带约束条件的遗传算法在连续催化重整优化操作中应用问题，能体现遗传算法寻优速度快，收敛快以及全局寻优的特点，解决了带有约束条件优化问题使用遗传算法的难题。

具有下列特点

- (1) 任何负载下所有控制开关都能实现软换流。
- (2) 仅用两个主开关控制从输入端到输出端的能量传送，因而使变流器导通损耗很低，流经辅助开关的电流也很小。
- (3) 采用有源钳位电路消除了由存储在变压器漏电感中能量引起的开关器件两端的电压超调。
- (4) 满载时变流器的效率为 92.8%。
- (5) 观察到输入电容间电压分配良好，流经耦合电路的电流分布合适。

参考文献

[1] Key T S, Lai J S. IEEE and international harmonic standards impact on power electronic design[A]. Proc Virginia Power Electron Sem (VPEC) [C]. USA: [s. n.], 1998. 39-45.

[2] 韩安荣. 通用变频器及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

[3] Deschamps E, Barbi I. A new DC-to-DC ZVS PWM converter for high input voltage applications[A]. Proc IEEE Power Electron Spec Conf (PESC) [C]. USA: [s. n.], 1998. 967-972.

参考文献

[1] 李敏强, 寇纪淦. 遗传算法的基本理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 3.

[2] 飞思科技产品研发中心. MATLAB 6.5 辅助优化计算与设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.

[3] 徐成贤, 陈志平, 李乃成. 近代优化方法[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

[4] 郝燕玲, 徐耀群. 最优化方法[M]. 黑龙江: 哈尔滨工程大学出版社, 2001. 3.