

文章编号: 1001-0920(2009)11-1735-05

基于遗传算法的结晶器液位约束广义预测控制

童朝南, 肖磊, 彭开香, 李江昀

(北京科技大学 信息工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对实际连铸过程中结晶器液位控制须满足多种约束的问题, 将一种基于遗传算法的有约束广义预测控制方法(GCGPC)应用于结晶器液位控制. 首先基于机理模型构造了有约束结晶器液位广义预测控制器; 然后以遗传算法处理带约束的非线性优化问题, 并以此作为滚动优化策略, 求得最优控制律. 仿真结果表明, 在有效处理了约束的基础上, 基于遗传算法的有约束广义预测控制效果优于 PID 控制以及无约束广义预测控制.

关键词: 广义预测控制; 约束; 遗传算法; 结晶器液位

中图分类号: TF341.6; TP273

文献标识码: A

Constrained generalized predictive control of mould level based on genetic algorithm

TONG Chao-nan, XIAO Lei, PENG Kai-xiang, LI Jiang-yun

(School of Information Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China.

Correspondent: XIAO Lei, E-mail: xiaolei2002@126.com)

Abstract: A constrained generalized predictive control based on genetic algorithm (GCGPC) is proposed to complete mould level control with constraints. The mould level controller is constructed based on the mould level model. Then, the constrained nonlinear equation is circularly optimized by using chaos genetic algorithm, and the optimal control rule is obtained. Finally, simulation results show that constraints is effectively dealt with by genetic optimization algorithm, and the mould level control scheme provides satisfactory performance outperforming the PID control and unconstrained generalized predictive control.

Key words: Generalized predictive control; Constraint; Genetic algorithm; Mould level

1 引言

在连铸生产过程中, 保持结晶器液位的稳定至关重要, 否则会严重影响铸坯质量. 由于结晶器系统存在着可测或不可测的扰动和未建模动态, 而且具有大时滞和非线性的特点, 传统的 PID 控制方法只有在特定工艺条件下才能实现较好的液位闭环控制, 控制效果不够理想. 在工业控制中得到广泛应用的预测控制, 由于具有对数学模型要求较低、鲁棒性强以及处理滞后方便等优点, 已经被国内外许多研究人员用于结晶器液位控制, 其控制效果比 PID 方法有较大改善^[1-6]. 但是, 目前已有的结晶器液位预测控制方法大都将结晶器系统当成一个线性无约束的对象, 而实际的连铸生产过程均要求结晶器液位控制器的求解满足多种约束, 而且通常希望

结晶器达到或者接近于这样的约束边界, 因为生产过程的最优工况往往位于约束边界上. 比如, 在以滑动水口为执行器的液位控制过程中, 阀门的移动范围约束是客观存在的, 但为了获得更好的流量特性, 往往会对阀门的移动范围做进一步约束. 对阀门移动速度进行约束能有效地减小液位波动并避免微分冲击^[7]. 另外, 在结晶器液位预测控制中, 当约束被忽略时, 预测控制实际上等价于通常的线性二次型最优控制系统, 因而看起来没有任何新意^[8]. 针对这种情况, 本文提出一种约束广义预测控制方法, 并将其应用于结晶器液位控制中.

在广义预测控制中引入约束后, 会使求解控制量的滚动优化问题变得复杂, 通常需求解一个有约束的二次规划或非凸规划, 而传统的通过迭代求解

收稿日期: 2008-12-18; 修回日期: 2009-03-06.

基金项目: 北京市教委重点学科共建项目(XK100080537).

作者简介: 童朝南(1955—), 男, 安徽无为, 教授, 博士生导师, 从事轧钢生产过程智能控制等研究; 肖磊(1982—), 男, 湖北仙桃, 博士生, 从事冶金生产过程智能控制的研究.

二次规划和非凸规划的方法计算量非常大;另外,非凸规划的求解对初始条件非常敏感,这些都会影响广义预测控制的性能.为了解决这个问题,本文引入遗传算法(GA)来处理带约束的优化问题.遗传算法作为一种非确定性的拟自然随机优化算法,可以处理各种带有约束的优化问题,并得到全局最优解.本文给出了以遗传优化算法作为滚动优化策略的约束广义预测控制在结晶器系统上的实现方法,并通过仿真实验,得到了满意的控制效果.

2 结晶器液位系统模型

结晶器液压伺服驱动位置系统的开环传递函数为^[9]

$$G(s) = \frac{K_a K_w K_f \omega_n^2}{A_p s (s + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)}. \quad (1)$$

式中: K_a 为伺服放大器增益, K_w 为伺服阀的静态流量增益, K_f 为传感器位移/电压转换系数, A_p 为液压缸活塞有效面积, ω_n 为液压系统固有频率, ζ 为液压阻尼比.

结晶器液位流量模型为

$$\frac{dH}{dt} = \frac{Ac_x \sqrt{2gh} - V_{speed} A_m}{A_m}. \quad (2)$$

式中: H 为液面高度, A_m 为截面积, V_{speed} 为拉速, A 为水口面积, c_x 为注入系数, h 为中间包钢液高度, g 为重力加速度.将滑动水口的流通面积与其移动距离之间做线性近似化处理,则有 $A = ax_v + b$,代入式(2)得

$$\frac{dH}{dt} = \frac{(ax_v + b)c_x \sqrt{2gh}}{A_m} - V_{speed}. \quad (3)$$

式中: a 和 b 为流量阀的有效流通面积系数; x_v 为阀门开度,即液压执行机构的位移.

首先,令

$$\begin{aligned} x_1 &= H, x_2 = x_v, x_3 = \dot{x}_v, \\ a_1 &= ac_x \sqrt{2gh} / A_m, a_2 = -\omega_n^2, \\ a_3 &= -2\zeta\omega_n, b_1 = bc_x \sqrt{2gh} / A_m, \\ \omega &= -V_{speed} + b_1, u = x_v, y = H. \end{aligned}$$

然后,由式(1)和(3)可推出结晶器液位控制系统的状态空间方程模型

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + Bu + E\omega, \\ y = CX. \end{cases} \quad (4)$$

式中

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 0 & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_2 & a_3 \end{bmatrix}, \\ B &= [0 \ 0 \ -a_2]^T, \\ C &= [1 \ 0 \ 0], E = [1 \ 0 \ 0]^T. \end{aligned}$$

3 结晶器液位约束广义预测控制问题描述

基于遗传算法优化的结晶器液位的约束广义预测控制结构如图 1 所示.

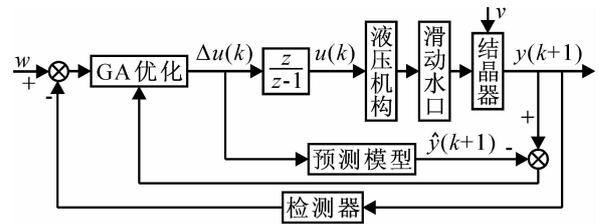


图 1 基于混沌优化的结晶器液位约束广义预测控制系统

将前面所求结晶器液位系统模型离散化为如下 CARIMA 模型^[10]:

$$\begin{aligned} A(z^{-1})y(k) &= \\ B(z^{-1})u(k-d) + \frac{C(z^{-1})\omega(k)}{\Delta}. \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\Delta = 1 - z^{-1}$ 代表结晶器积分特性; d 为系统延迟时间常数; $\omega(k)$ 为主要由拉速等引起的有色噪声扰动.

标准的 GPC 方法要求噪声是均值为零的白噪声,而液位系统中存在的是由拉速等引起的有色噪声,所以必须对有色噪声进行白色化等效处理,然后才可以运用标准的 GPC 方法设计液位最优预测控制律.这里先将有色噪声 $\omega(k)$ 等效为由具有零均值的白噪声 $\xi(k)$ 经过一个线性环节 $H(z^{-1})$ 产生,即有 $\omega(k) = H(z^{-1})\xi(k)$.由此可将模型(5)化为

$$\begin{aligned} A(z^{-1})y'(k) &= \\ B(z^{-1})u'(k-d) + \frac{C(z^{-1})\xi(k)}{\Delta}. \end{aligned} \quad (6)$$

式中

$$y'(k) = H^{-1}(z^{-1})y(k), \quad (7)$$

$$u'(k) = H^{-1}(z^{-1})u(k). \quad (8)$$

在标准的 GPC 模型(6)的基础上,根据标准的 GPC 方法,可得到 j 步超前输出预测为

$$\hat{y}' = G\Delta U' + f'. \quad (9)$$

式中: $\hat{Y} = [\hat{y}'(k+1|k), \dots, \hat{y}'(k+N|k)]^T$ 为预测输出; $\Delta U' = [\Delta u'(k), \dots, \Delta u'(k+N_u-1)]^T$ 为控制增量; $f' = [f_1(k), f_2(k), \dots, f_N(k)]^T$ 为输出预测序列中的自由响应构成的向量;而

$$G = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & \dots & 0 \\ g_2 & g_1 & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ & & & g_1 \\ & & & \vdots \\ g_N & \dots & g_{N-N_u+1} \end{bmatrix}_{N \times N_u}$$

为系统的单位阶跃响应系数矩阵,可通过实验测得,

这里由模型系数求得。

引入对系统控制增量和控制量的约束,即滑动水口执行器的移动速度约束和移动范围约束,用线性不等式的形式描述,得到在 k 时刻的优化性能指标为

$$\begin{aligned} \min J(k) = & E\left\{ \sum_{j=d}^{N_2} [y(k+j) - \omega(k+j)]^2 + \right. \\ & \left. \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta u(k+j-1)]^2 \right\}; \\ \text{s. t. } & \Delta u_{\min} \leq \Delta u(k+j-1) \leq \Delta u_{\max}, \\ & u_{\min} \leq u(k+j-1) \leq u_{\max}, \\ & j = 1, \dots, N_u. \end{aligned} \quad (10)$$

式中: N_1 为优化时域的终值; N_u 为控制时域; ω 为输出期望值; $\lambda(j)$ 为控制加权系数,这里简化设其为常数 λ 。

4 基于遗传算法的结晶器约束广义预测控制

引入了约束的广义预测控制问题,实际上就是一个非线性优化的问题,利用遗传算法对其进行处理的基本思想是^[11]:首先通过选择合适的适应度函数,将有约束广义预测控制性能指标优化的极小值问题转化为遗传算法优化的极大值问题;然后通过空间限定法引入约束,经遗传迭代计算后最终得到满足约束的最优控制量求解。具体步骤如下:

Step1 选择如下形式的适应度函数:

$$f = \frac{1}{1 + J(k)}, \quad (11)$$

式中 $J(k)$ 采用式(10)的形式。通过该形式的变换,便将广义预测控制优化的极小值问题转化为遗传算法优化的极大值问题,并使遗传算法的适应度函数值都在区间 $[0, 1]$ 中变化。

Step2 遗传算法编码。遗传算法编码是将优化问题的可行解从其解空间转换到算法能够处理的搜索空间。对于广义预测控制性能指标的优化问题,宜选择浮点数编码的方法。此方法可以避免二进制编码存在的连续函数映射时的映射误差。广义预测控制的每一个控制变量可用一个浮点数表示,编码的长度,即每个染色体基因的个数等于控制步长 N_u ,编码结构如图 2 所示。

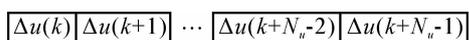


图 2 基因编码结构

Step3 生成初始种群及引入约束。如果是控制开始的第一时刻,则在初始种群的产生过程中通过空间限定法引入约束。由于式(10)中的约束采用的

是上下界限定形式,只需在区间 $(\Delta u_{\min}, \Delta u_{\max})$ 中随机选择 n 个个体来产生初始种群,这样便自动将约束加入到了初始种群中。如果是 $k+1$ 时刻,则将 k 时刻优化结果中的后 N_u-1 个基因左移一位,最后一个基因随机产生,构成 $k+1$ 时刻的一个初始个体(见图 3),该个体保存了前一时刻 k 优化信息的个体;在初始种群中以一定数量比例 α 放入该个体的同时,为保证初始种群的多样性,其余 $1-\alpha$ 比例的个体随机产生。这种方法在保证初始群体中存在优良“种子”个体的同时保证群体的多样性,可以加快算法收敛的速度。

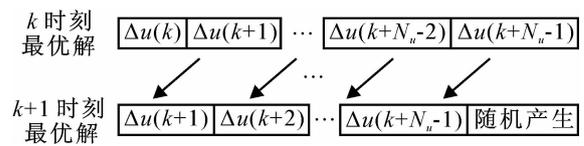


图 3 初始种群的产生

Step4 用排序选择法进行选择操作。排序选择法具有很好的鲁棒性,可以避免因选择导致搜索带变窄而产生过早收敛。排序选择对群体中的所有个体按其适应度大小排序,并基于该排序来分配各个个体被选中的概率。具体操作过程如下:

Step4.1: 对群体中的所有个体按其适应度大小进行降序排列;

Step4.2: 根据求解问题设计一个概率分配表,将各个概率值按上述排列次序分配给各个个体;

Step4.3: 以各个个体所分配的概率值作为其能够被遗传到下一代的概率,并用比例选择的方法产生下一代种群。

Step5 交叉操作与变异操作。交叉操作采用算术交叉方法将 2 个个体线性组合得到新的个体。假设在 2 个个体 X_A^k 和 X_B^k 之间进行算术交叉,则得到的新个体为

$$\begin{cases} X_A^{k+1} = aX_B^k + (1-a)X_A^k, \\ X_B^{k+1} = aX_A^k + (1-a)X_B^k, \end{cases} \quad (12)$$

式中 a 为交叉参数。由式(12)可知,由于初始种群引入了约束,经算术交叉后得到的新个体依然满足约束条件。变异操作按概率随机地在搜索空间与区间 $(\Delta u_{\min}, \Delta u_{\max})$ 的交集中选取 1 个个体代替原来的个体。

Step6 终止判定。

Step6.1: 通过适应度函数的值判断是否终止计算。采用式(12)形式的适应度函数的最大值为 1,如果遗传过程中出现适应度函数值为 1 的个体,则它无疑就是最优个体,选择该个体为最优个体。

Step6.2: 通过最优个体适应度函数的收敛程度判断。给定一个判断算法收敛程度的代数 c ,如果

在连续 c 代当中, 每代群体中的最优个体都没有发生变化, 则终止计算, 选择该个体为最优个体。

以上 2 个条件有一个满足时, 便可以停止计算, 选取最优个体对应的控制作用作为当前最优解 $\Delta u^*(k+1)$; 然后输出控制量, 返回 Step3 进入下一次优化。

至此, 已得到使性能指标(10) 最优的解为

$$\Delta U' = \Delta U^* = [\Delta u^*(k) \cdots \Delta u^*(k+N_u-1)]^T,$$

即时最优控制量

$$u'(k) = u'(k-1) + \Delta u^*(k).$$

由等效化方程(7) ~ (9) 可得到最终结晶器约束广义预测控制的最优预测值和最优控制律为

$$\hat{y} = HG\Delta U^* + Hf',$$

$$u = Hu'(k-1) + H\Delta u^*(k).$$

5 仿真研究

选定某连铸厂结晶器系统的工况条件作为仿真基础, 其现场参数为: 结晶器断面尺寸为 230 mm × 1450 mm, 结晶器高度为 904 mm, 液压阀控缸系统固有频率为 141.3 ω_v rad/s, 液压阀控缸系统体积弹性模量 β_v 为 700 MPa, 浇铸温度为 1557 °C, 中间包阀门的有效流通面积系数取 $a = 0.5, b = 1.1$, 钢液注入系数取 $c_{er} = 0.57$ 。

结合工艺条件, 经辨识得到如下模型参数:

$$A(z^{-1}) = 1 - 2.8173z^{-1} + 2.9024z^{-2} - 0.7240z^{-3},$$

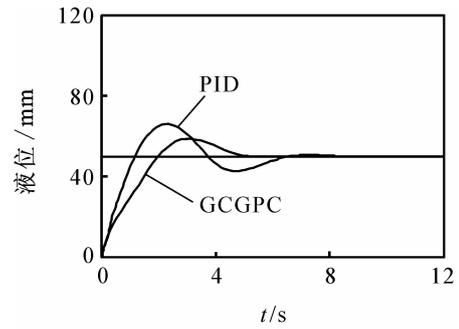
$$B(z^{-1}) = 0.1249 + 0.4073z^{-1} + 0.0944z^{-2},$$

$$C(z^{-1}) = 1, d = 1.$$

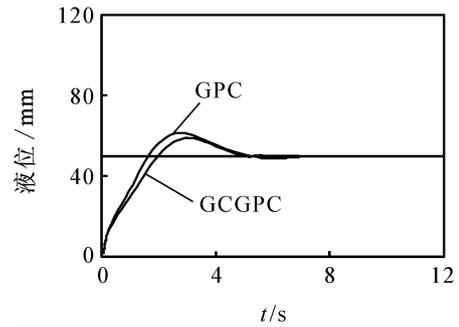
根据连铸工艺条件, 预测控制器参数取 $N_1 = 3, N_u = 2, \lambda = 0.35$; 遗传算法采用浮点数编码, 初始种群个数取 80, 交叉和变异概率分别取 0.7 和 0.02, 遗传代数取 120; 控制量约束和控制增量约束分别取 $-70 \leq u \leq 70, -10 \leq \Delta u \leq 10$; 设定值取恒值 $w = 50$ mm. 仿真实验结果如图 4 所示。

由图 4(a) 可见, 基于遗传算法的结晶器液位约束广义预测控制(GCGPC) 的控制效果优于传统的 PID 控制. PID 控制的液位输出有振荡, 而 GCGPC 控制的液位无振荡, 且低超调. 由图 4(b) 可见, 当设定值突然改变时, GCGPC 的执行器以约束的最大移动速度来执行, 因而液位第 1 次达到设定值的速度比 GPC 稍慢, 但减少了超调量, 而且能够更快地达到稳定. 实际应用中, 由于连铸过程干扰通常较大, 不可知的扰动可能导致 GPC 的执行器产生对生产不利的激烈动作, 而 GCGPC 可通过设定合适的约束来很好地避免这个问题。

系统稳定后, 给液位施加阶跃扰动(用虚线表



(a) GCGPC与文献[12]的PID控制比较



(b) GCGPC与同等条件下无约束 GPC 控制比较

图 4 液位控制对比实验

示) 得到的响应曲线(用实线表示) 如图 5 和图 6 所示, 显然系统表现出良好的控制效果. 由图 6 可见, GA 优化算法能够有效地处理约束问题, 而且当出现约束越界现象时, 惩罚作用并不强烈, 即 GCGPC 实际上是一种“软约束”的方法. 这一点符合结晶器控制的要求, 比如中间包阀门的移动速度稍快一点或稍微慢一点, 并不会对系统产生致命的影响, 而激

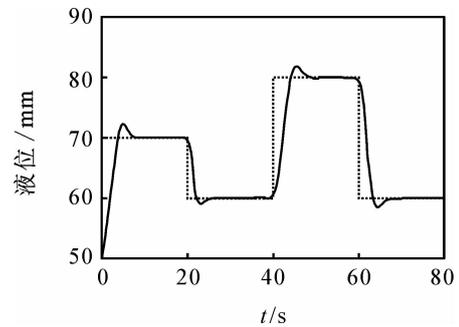


图 5 结晶器液位阶跃响应

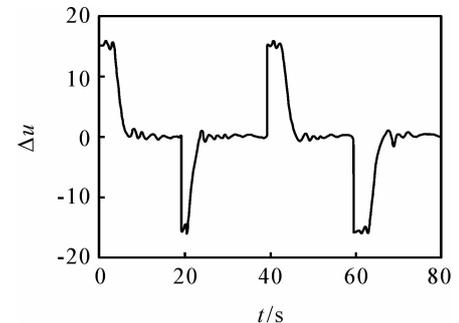


图 6 控制增量响应曲线

烈的回调作用反而会对控制系统不利。

6 结 论

1) 有约束的 GPC 控制器的求解实际上是一个非线性优化问题, 解决此类问题采用 GA 优化算法是非常有效可行的方法。

2) 在相同的控制条件下, 结晶器液位的 GCGPC 控制效果优于传统的 PID 控制以及无约束 GPC 控制, 主要表现在超调量明显减小以及基本不产生振荡。此外, 抗干扰能力也要优于 PID 控制和 GPC 控制。

3) 结晶器液位的 GCGPC 控制能够显式地处理约束, 这在实际生产中具有重要的意义。当设备状态改变时, 仅仅通过改变约束设定值便能实现新的控制目标, 从而可避免重新调整控制器参数, 增加了工业控制系统的易用性; 通过设定合适的约束, 能够有效地提高生产效率和系统的安全性能, 具有较高的实用价值。

参考文献 (References)

- [1] Robin D K. Predictive mould level control in a continuous steel casting line[C]. Preprints IFAC 13th World Congress. San Francisco, 1996: 487-492.
- [2] Thomas J, Joseph B. Generalized predictive control with dynamic filtering for process control applications[C]. Proc American Control Conf. Chicago, 1993: 1741-1745.
- [3] Guo Ge, Li Wei, Wang Jun. A CGPC controller in continuous casting process[C]. Proc of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation. Hefei, 2000: 2783-2786.
- [4] Graebe S F, Goodwin G C, Elsley G. Control design and implementation in continuous steel casting[J]. IEEE Control System, 1995, 15(4): 64-70.
- [5] 王朝利, 阳思聪. 预测控制在连铸结晶器液位控制中的应用研究[J]. 控制与决策, 2001, 16(2): 211-214. (Wang C L, Yang S C. Predictive control to molten steel level in the continuous casting mould[J]. Control and Decision, 2001, 16(2): 211-214.)
- [6] 杜鹃, 韩传基, 蔡开科. 基于最小二乘支持向量机的结晶器液面预测控制[J]. 钢铁研究学报, 2007, 19(8): 24-27. (Du J, Han C J, Cai K K. Predictive control for mold level of continuous casting based on least square support vector machine[J]. J of Iron and Steel Research, 2007, 19(8): 24-27.)
- [7] 郭戈, 乔俊飞. 连铸过程控制理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003. (Guo G, Qiao J F. Control theory and technology of continuous casting process [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2003.)
- [8] 钱积新, 赵均, 徐祖华. 预测控制[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007. (Qian J X, Zhao J, Xu Z H. Predictive control[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.)
- [9] 郭戈, 王伟, 柴天佑. 连铸结晶器液位预测控制[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(5): 10-13. (Guo G, Wang W, Chai T Y. Predictive mould level control in a continuous casting line[J]. Control Theory and Application, 2001, 18(5): 10-13.)
- [10] Clarke D W. Generalized predictive control [J]. Automatica, 1987, 23(2): 137-160.
- [11] Martinez M. Generalized predictive control using genetic algorithms [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 1998, 11(3): 355-367.
- [12] Graebe S F, Goodwin G C, Elsley G. Control design and implementation in continuous steel casting [J]. IEEE Control Systems, 1995, 15(4): 64-71.

(上接第 1734 页)

- [8] Kannan R. Minkowski's convex body theorem and integer programming [J]. Mathematics of Operations Research, 1987, 12(3): 415-440.
- [9] Mladenović N, Hansen P. Variable neighborhood search [J]. Computers and Operations Research, 1997, 24(11): 1097-1100.
- [10] Mladenović N, Hansen P. Variable neighborhood search: Principles and applications[J]. European J of Operational Research, 2001, 130(22): 449-467.
- [11] Kytöjoki J, Nuortio T, Bräysy O, et al. An efficient variable neighborhood search heuristic for very large scale vehicle routing problems [J]. Computers and Operations Research, 2007, 34(9): 2743-2757.
- [12] Stützle T. Iterated local search for the quadratic assignment problem [J]. European J of Operational Research, 2006, 174(3): 1519-1539.