

文章编号: 1001-0920(2005)07-0834-03

预测控制偏差区间的一种工程化处理方法

苗新刚, 胡品慧

(中国石油大学 机电学院, 北京 102249)

摘要: 将被控变量的约束区间分为大小两种偏差区, 并设计了调整偏差区大小的参数。当被控变量位于大偏差区时, 连续调整控制率使控制作用加强, 以便被控变量尽快回到小偏差区, 从而加快控制系统的调节过程。控制作用从小偏差区过渡到大偏差时是连续变化的, 避免了控制作用的跳变, 消除了在大小偏差区交界处的震荡现象。仿真结果表明, 在模型存在不确定性情况下, 该工程化处理方法可使控制系统的动态性能明显改善。

关键词: 预测控制; 状态反馈; 约束控制; 仿真

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

An Engineering-oriented Treatment in Constrained Predictive Control

MIAO Xin-gang, HU Pin-hui

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, University of Petroleum, Beijing 102249, China
Correspondent: HU Pin-hui, E-mail: hupnh@cup.edu.cn)

Abstract: A strategy setting two different constrained areas including a small error area and a big error area for controlled variables is presented, and special parameters are designed to adjust error areas. If the controlled variable lies in the big error area, the controller is regulated and the control action is strengthened such that controlled variables return to the small error area as soon as possible. Control action changes continuously from small to big error area. Therefore the jump can be avoided, and the surge is eliminated, which makes the control performance better. Simulation results show that the implementation method can improve the system dynamic performance much better under uncertainty.

Key words: Predictive control; State feedback; Constrained control; Simulation

1 引言

预测控制在炼油化工、医药、轻工等工业生产过程控制中得到了广泛的应用, 并取得了显著的经济效益^[1-3]。在实际生产过程中存在着各种不确定性因素, 会降低控制系统的性能, 从而使系统变得不平稳, 造成经济损失。如果重新确定模型的结构及参数, 设计预测时域, 将会影响控制系统的连续投用率, 从而影响生产装置的经济效益。

目前工程上为了改善控制性能, 一种较简单的处理方法是在距被控变量给定值较远的大偏差区,

让其控制率乘上一个固定的衰减系数, 从而使被控变量在大偏差区内很快到达约束值并过渡到小偏差区。这种处理方法简化了控制算法, 但在从小偏差区过渡到大偏差时控制作用有一跳变, 这样比较容易引起振荡, 反而使控制效果变差。本文提出新的工程化处理方法, 使控制作用从小偏差区过渡到大偏差时乘上一连续变化的系数, 从而避免了控制作用的跳变又起到了改善控制效果的作用。

2 约束条件下的处理方法

假设被控过程数学模型由离散状态空间描述为

收稿日期: 2004-08-19; 修回日期: 2004-11-02

基金项目: 国家 863 计划 C M S 领域过程自动化专题项目 (2001AA 413120); 中国石油集团公司石油科技中青年创新基金项目 (04E7027)。

作者简介: 苗新刚 (1973—), 男, 河北磁县人, 硕士生, 从事先进控制理论与技术的研究; 胡品慧 (1959—), 男, 天津人, 教授, 从事预测控制、先进过程控制的研究。

$$\begin{cases} X(k+1) = AX(k) + BU(k), \\ Y(k) = CX(k). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $X \in R^n, Y \in R^r, U \in R^m, A \in R^{n \times n}, B \in R^{n \times m}, C \in R^{r \times n}$.

经模型预测、反馈校正和滚动优化后得到其状态反馈预测控制的最优控制律为^[4,5]

$$U(k) = S^{-1}(P) [Y_s(k) - Y(k) - KX(k) + \hat{Y}(k)], \quad (2a)$$

其增量形式可描写为

$$\Delta U(k) = U(k) - U(k-1) = S^{-1}(P) [\Delta Y_s(k) - \Delta Y(k) - K\Delta X(k) + \Delta \hat{Y}(k)] \quad (2b)$$

其中: $Y_s(k)$ 是输出给定值, $Y(k)$ 是输出实测值, $X(k)$ 是实测状态变量, 其他参数如下:

$$K = [C A^{p_1} \dots C A^{p_h} \dots C A^{p_r}]^T, \\ S(P) = [S_1(p_1) \dots S_h(p_h) \dots S_r(p_r)]^T = \begin{bmatrix} p_1 & & p_h & & p_r \\ cA^{j=1}B & \dots & cA^{j=1}B & \dots & cA^{j=1}B \end{bmatrix}^T.$$

$\hat{Y}(k)$ 是输出预测值, 有

$$\hat{y}_j(k) = cA^{p_j}x(k-p_j) + \sum_{i=1}^{p_j} cA^{i-1}B u(k-i), \quad j = 1, 2, \dots, r.$$

将被控变量的给定值与被控变量的约束值之间分成两块区域: 即靠近被控变量给定值 Y_s 的小偏差区和靠近被控变量约束上限 Y_{max} 或约束下限 Y_{min} 的大偏差区, 其界限由公式 $a(Y_{max} - Y_s) + Y_s$ 或公式 $Y_s - a(Y_s - Y_{min})$ 确定, 其中 $a \in [0, 1]$ 为设计参数, 如图 1 所示

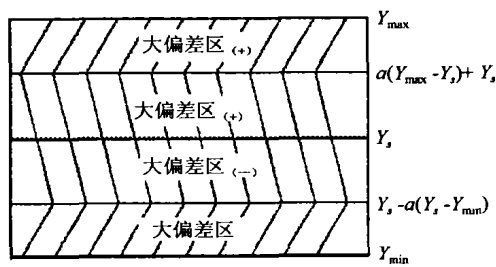


图 1 被控变量给定值与被控变量约束值之间的分区

在小偏差区内控制作用的大小按式(2a)计算得到, 在靠近约束上限的大偏差区内让其控制作用按下式计算:

$$U_s = U_d \left(1 \pm \frac{\exp(Y) - \exp[a(Y_{max} - Y_s) + Y_s]}{\exp(Y)} \right), \quad Y \in [a(Y_{max} - Y_s) + Y_s, Y_{max}], a \in [0, 1] \quad (3)$$

在靠近约束下限的大偏差区内让其控制作用按下式计算:

$$U_s =$$

$$U_d \left(1 \pm \frac{\exp[Y_s - a(Y_s - Y_{min})] - \exp(Y)}{\exp(Y)} \right),$$

$$Y \in [Y_{min}, Y_s - a(Y_s - Y_{min})], a \in [0, 1] \quad (4)$$

其中: U_s 为控制作用的实际应用值; U_d 为控制作用按式(2a)得出的计算值; a 为设计参数, 用来调整偏差区的大小; Y 为被控变量; Y_s 为被控变量给定值; Y_{max} 为被控变量的约束上限; Y_{min} 为被控变量的约束下限

将式(3)变形为

$$U_s = U_d(1 \pm \beta), \quad (5)$$

其中

$$\beta = \frac{\exp(Y) - \exp[a(Y_{max} - Y_s) + Y_s]}{\exp(Y)} = 1 - \exp\{[a(Y_{max} - Y_s) + Y_s] - Y\}, \quad Y \in [a(Y_{max} - Y_s) + Y_s, Y_{max}], a \in [0, 1] \quad (6)$$

讨论:

1) β 既为被控变量 Y 的函数又为设计参数 a 的函数

β 对被控变量 Y 求偏导数得

$$\frac{\partial \beta}{\partial Y} = \exp\{[a(Y_{max} - Y_s) + Y_s] - Y\}, \quad Y \in [a(Y_{max} - Y_s) + Y_s, Y_{max}]$$

可知 $\partial \beta / \partial Y > 0$, 因此 β 是随被控变量 Y 单调递增的函数

β 对设计参数 a 求偏导数得

$$\frac{\partial \beta}{\partial a} = - \exp\{[a(Y_{max} - Y_s) + Y_s] - Y\} (Y_{max} - Y_s), \quad Y \in [a(Y_{max} - Y_s) + Y_s, Y_{max}]$$

可知 $\partial \beta / \partial a < 0$, 因此 β 是随设计参数 a 单调递减的函数

2) 由 $a \in [0, 1], Y \in [a(Y_{max} - Y_s) + Y_s, Y_{max}]$ 可知, 当 $a = 0$ 时, $Y \in [Y_s, Y_{max}], \beta = 1 - \exp(Y_s - Y)$, 即式(3)从 Y_s 处加入, 整个区域全为大偏差区, 相当于整个区域都加入该公式 当 $a = 1$ 时, $Y = Y_{max}, \beta = 1 - \exp(Y_{max} - Y) = 0$, 即式(3)仅在 Y_{max}

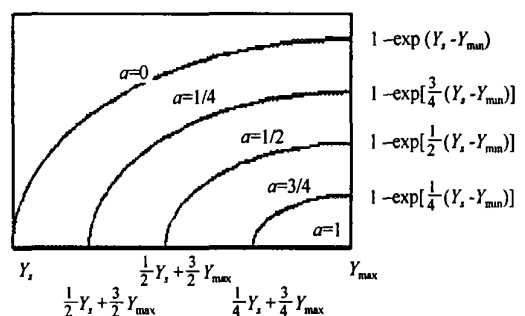


图 2 β 是随被控变量 Y 设计参数 a 的变化曲线

处加入, 整个区域全为小偏差区, 相当于整个区域都没有加入该公式 因此, 可以使用设计参数 a 来调整偏差区的大小, 即减小 a , 使大偏差区增大; 增大 a , 使大偏差区减小 当设计参数 a 取不同的值时 β 随被控变量 Y 的变化如图 2 所示

3) 控制作用的增量——控制率 ΔU 的变化规律(式 2b) 与被控变量 Y 的变化规律可分 4 种情况:

控制率 ΔU 增大, 被控变量 Y 增大 控制率 ΔU 增大, 被控变量 Y 减小 控制率 ΔU 减小, 被控变量 Y 增大 控制率 ΔU 减小, 被控变量 Y 减小 其中在第 和 第 种情况下控制率 ΔU 与被控变量 Y 的变化规律相同, 此时式(5) 取负号, 即 $U_s = U_d(1 - \beta)$; 在第 和 第 种情况下控制率 ΔU 与被控变量 Y 的变化规律相反, 此时式(5) 取正号, 即 $U_s = U_d(1 + \beta)$.

4) 若被控变量 Y_i 受多个控制作用 ΔU_i 的影响时, 应考虑影响最大的控制作用, 或用各控制作用的算术平均值

5) 式(4) 的处理方法与式(3) 类似, 此处不再叙述

3 仿真实例

例 1 被控过程为非最小相位系统, 其离散化状态空间模型为

$$\begin{aligned}
 X(k+1) &= (A + \Delta A)X(k) + (A_1 + \Delta A_1)X(k-5) + \\
 & (B + \Delta B)U(k-12 + \Delta d), \\
 Y(k) &= CX(k).
 \end{aligned}$$

其中: X R^n 为状态变量, Y R^r 为输出变量, U R^m 为操纵变量, A, A_1 $R^{n \times n}$, B $R^{n \times m}$, C $R^{r \times n}$ 为已知的模型参数矩阵; $\Delta A, \Delta A_1$ $R^{n \times n}$, ΔB $R^{n \times m}$ 为不确定项矩阵, 且具有相应的维数; Δd 为不确定控制滞后时间 具体数值如下:

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} 0.918 & 0 \\ 0 & 0.368 \end{bmatrix}, A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.1 \\ 0.15 & 0 \end{bmatrix}, \\
 B &= \begin{bmatrix} 0.364 \\ 0.632 \end{bmatrix}, C = [1 \quad -1], \\
 \Delta A &= \begin{bmatrix} 0.0459 & 0 \\ 0 & 0.0193 \end{bmatrix}, \\
 \Delta A_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0.02 \\ 0.03 & 0 \end{bmatrix}, \\
 \Delta B &= \begin{bmatrix} 0.0728 \\ 0.1264 \end{bmatrix}, \Delta d = 1.
 \end{aligned}$$

设被控变量给定值为 $Y_s = 1$, 预测时域分别取 $P_1 = 20, P_2 = 23, P_3 = 26$ 时闭环标称系统的仿真曲线如图 3 所示

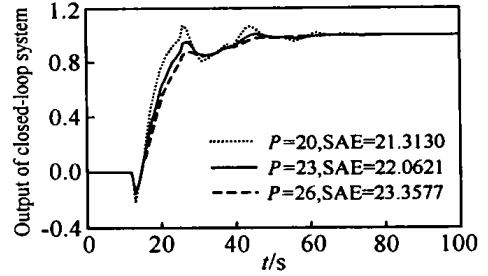


图 3 不同预测时域的闭环标称系统仿真曲线

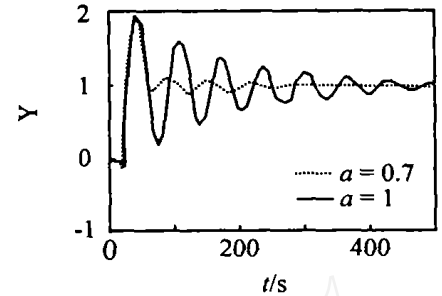


图 4 模型不确定时被控变量 Y 在不同设计参数 a 时的闭环仿真曲线

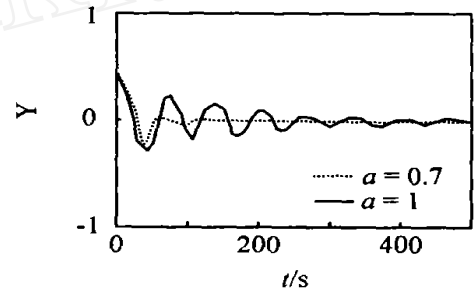


图 5 模型不确定时控制作用 U 在不同设计参数 a 时的闭环仿真曲线

由模型可知, 控制率 ΔU 增大, 被控变量 Y 增大, 式(5) 取负号, 即 $U_s = U_d(1 - \beta)$. 选取预测时域 $P = 23$, 被控变量约束区间为 $Y \in [-2, 2]$, 即 $Y_{max} = 2, Y_{min} = -2$ 控制作用按式(2) 计算(设计参数取 $a = 1$, 整个区域全为小偏差区)和按式(3) 计算(设计参数取 $a = 0.7$) 时, 其模型不确定时被控变量的闭环仿真曲线如图 4 所示, 模型不确定时控制作用 U 的闭环仿真曲线如图 5 所示

由仿真结果可知, 在模型存在不确定时, 控制作用按式(3) 或式(4) 计算与按式(2) 计算比较而言, 在预测时域不变的情况下, 式(3) 或式(4) 使得被控变量和控制作用的动态性能都有明显改善

如果设计参数 a 取的较大, 大偏差区就较小, 其控制效果改善不会太大; 如果 a 取的较小, 则大偏差区就较大, 易引起振荡

(下转第 840 页)

(目标没有出现时超过阈值的概率)为 14.63%, 检测到目标的概率为 98.67%。

5 结 语

本文针对低信噪比下幅值波动目标的跟踪问题,以 Bayes 似然比作为检测准则,提出一种基于粒子滤波器的检测和跟踪算法。仿真研究表明,该算法能实现对目标的检测与跟踪。但算法性能对检测阈值很敏感,如何合理地选择阈值,降低虚警率,以及怎样克服粒子滤波器所具有的退化问题和计算量大等问题还需进一步研究。

参考文献(References)

- [1] Barniv Y, Kella O. Dynamic Programming Solution for Detecting Dim Moving Targets, Part II: A Analysis[J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 1987, 23(2): 776-788
- [2] 夏明革,何友,黄晓东,等. 基于红外图像的小目标检测与跟踪方法[J]. *火力与指挥控制*, 2003, 28(1): 1-5
(Xia M G, He Y, Huang X D, et al. A Survey of Small Target Detection and Tracking Based on Infrared Images[J]. *Fire Control and Command Control*, 2003,

28(1): 1-5)

- [3] Tonissen S M, Bar-Shalom Y. Maximum Likelihood Track-before-detect with Fluctuating Target Amplitude[J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, 34(3): 796-808
- [4] Doucet A, de Freitas J F G, Gordon N J. *Sequential Monte Carlo Methods in Practice* [M]. New York: Springer-Verlag, 2001.
- [5] 莫以为,萧德云. 基于粒子滤波算法的混合系统监测与诊断[J]. *自动化学报*, 2003, 29(5): 641-648
(Mo Y W, Xiao D Y. Hybrid System Monitoring and Diagnosing Based on Particle Filter Algorithm[J]. *Automatica Sinica*, 2003, 29(5): 641-648)
- [6] Salmond D J, Birch H. A Particle Filter for Track-before-detect[A]. *Proc of the American Control Conf* [C]. Arlington VA, 2001: 3755-3760
- [7] Rollason M, Salmond D. A Particle Filter for Track-before-detect of a Target with Unknown Amplitude[J]. *IEE Target Tracking: Algorithms and Applications*, 2001, (1): 16-17.

(上接第 836 页)

约束区间如果取的较小, a 应取得较大; 约束区间如果取的较大, a 应取得较小。约束区间既定的情况下, a 一般取 0.6 ~ 0.8 较合适。

4 结 语

本文对预测控制被控变量的约束区间进行了较深入的讨论,对被控变量设置了小偏差区和大偏差区两种不同的约束区间。控制作用从被控变量的小偏差区过渡到大偏差时乘上一连续变化的系数,既避免了控制作用的跳变又起到改善控制效果的作用。当模型存在不确定时,在一定范围内,应用该方法可以改善控制系统的动态性能。设计参数 a 可以在线实时调整,适应装置操作变化情况,可以避免重新确定模型的结构参数以及调整预测时域,使其更具有工程应用的价值。

参考文献(References)

- [1] 徐用懋,杨尔辅. 石油化工流程模拟、先进控制与过程优化技术的现状与展望[J]. *工业控制计算机*, 2001, 14(9): 21-27.
(Xu Y M, Yang E F. The Actuality and Expectation of Petrochemicals Flow Simulation Predictive Control and Process Optimum Technology [J]. *Industry Control Computer*, 2001, 14(9): 21-27.)

- [2] 褚健,王朝辉,苏宏业. 先进控制技术及其产业化[J]. *测控技术*, 2000, 19(8): 1-3
(Chu J, Wang C H, Su H Y. Advanced Process Control Technique and Its Industrialization [J]. *Measurement and Control Technology*, 2000, 19(8): 1-3)
- [3] 胡品慧,杜殿林,左信,等. 状态反馈预测控制在催化裂化柴油产品质量先进控制中的应用[J]. *石油炼制与化工*, 2003, 34(5): 57-59
(Hu P H, Du D L, Zuo X, et al. Advanced Process Control and Plant Implementation for FCC FCO Quality Based on State Feedback Model Predictive Control[J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2003, 34(5): 57-59)
- [4] 胡品慧,袁璞. 关于状态反馈预测控制系统的极点配置[J]. *控制与决策*, 2001, 16(6): 910-913
(Hu P H, Yuan P. On Pole Placement of State Feedback Model Predictive Control Systems[J]. *Control and Decision*, 2001, 16(6): 910-913)
- [5] 胡品慧,袁璞. 状态反馈预测控制干扰解耦的研究[J]. *控制与决策*, 2003, 18(2): 194-198
(Hu P H, Yuan P. Study on Disturbance Decoupling of Stack Feedback Model Predictive Control[J]. *Control and Decision*, 2003, 18(2): 194-198)