

预测控制中静态目标的实现*

萧明波 钱积新

(浙江大学工业控制技术研究所·杭州, 310027)

摘要: 通过滚动优化性能指标进行非方系统处理, 是预测控制主要优点之一. 对“瘦系统”, 可直接获得最小二乘解; 而对“胖系统”, 可能出现多余控制自由度, 人们希望在满足基本控制要求的基础上, 还能进一步实现一定的经济指标. 由于经济指标一般表述为静态目标, 本文对“胖系统”预测控制中静态目标的实现提出了综合性能指标法, 改进了多目标优化法.

关键词: 预测控制; 静态目标; 自由度; 多目标优化; 双重控制

1 引言

预测控制能在过程控制领域取得广泛的成功应用, 原因较多^[1,2], 其中的约束处理和非方系统控制便是独具魅力之处. 而这两大特点皆归功于滚动优化性能指标, 可见该环节在预测控制三要素中举足轻重.

多变量预测控制的基本目标是在满足过程各种约束条件的基础上, 将被控变量尽可能控制到其设定值上或某容许带内. 对 R 维输入, S 维输出的系统, 预测控制算法总是试图求解未来 M 个时刻(控制时域)的控制, 使模型预测输出在未来 P 个时刻(优化时域)内达到以上基本目标. 在动态矩阵控制(DMC)中, 该目标表述为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{\Delta U_M(k)} J(k) = \| W(k) - Y_{PM}(k) \|^2_Q, \\ \text{s. t. } Y_{PM}(k) = Y_{P0}(k) + A \Delta U_M(k), \\ U_{M, \min} \leq U_M(k) \leq U_{M, \max} \\ \text{(还可包括一些其它变量, 如被控变量、} \\ \text{控制增量及辅助变量的约束条件);} \end{array} \right. \quad (1)$$

其中, $W(k)$ 为参考轨迹, $(S \times P)$ 维向量; $Y_{PM}(k)$ 为 $\Delta U_M(k)$ 作用下模型预测输出, $(S \times P)$ 维向量; $Y_{P0}(k)$ 为输出预测初值, $(S \times P)$ 维向量; A 为动态矩阵, 由阶跃响应系数排成的 $(S \times P) \times (R \times M)$ 维矩阵; $Q = \text{block-diag}(Q_1, \dots, Q_S)$, $Q_i = \text{diag}[q_i(1), \dots, q_i(P)]$, $i = 1, \dots, S$.

以上构成一个二次规划(QP)问题, 可用各种二次规划优化方法求解^[3]. 但在无约束或为非积极约束时, 优化问题(1), 即 $\frac{\partial J(k)}{\partial \Delta U_M(k)} = 0$, 得如下解析解.

$$\Delta U_M(k) = (A^T Q A)^{-1} A^T Q [W(k) - Y_{P0}(k)]. \quad (2)$$

对“方系统”或“瘦系统”($R \leq S$), 通过合适的 Q 阵选择, 优化问题(1)将给出满意的解.

但在过程控制中, 还常遇到“胖系统”, 此时系统的某些被控变量为容许带控制或 $R > S$, 即在满足基本控制目标后, 往往还有多余的自由度. 这些多余的自由度, 可用来在诸如催化裂化之类的复杂过程中进一步提高控制品质, 但更经常用于实现一定的经济指标, 因为经济指标

* 国家自然科学基金资助项目.

优化一般比控制更能创造经济效益. 经济指标常可归结为控制量的静态目标, 如让控制量尽量接近其 IRV(ideal rest value), 这可由优化级或操作人员设定. 因此, “胖系统”的控制为满足基本控制目标的基础上, 还要实现一个静态目标.

本文给出了“胖系统”的两种静态目标实现方法: 综合性能指标法和多目标优化法, 通过不同的滚动优化性能指标, 将静态目标实现嵌入预测控制求解过程中. 然后, 我们用这两种带静态目标的预测控制实现一个简单系统的双重控制要求, 作为对比说明.

2 静态目标实现方法

2.1 综合性能指标法

这是我们提出的一种解决的方法, Yousfi 等人的工作^[4]也可归结为这一类. 这种方法的基本思想是在性能指标(1)中加入反映静态优化要求的项:

$$\begin{cases} \min_{\Delta U_M(k)} J(k) = \|W(k) - Y_{PM}(k)\|_Q^2 + \|\Delta U_M(k)\|_{RR}^2 + \|U_M(k) - \text{IRV}\|_{PP}^2, \\ \text{s. t. (1) 式中的约束条件;} \end{cases} \quad (3)$$

其中, IRV 为 $U_M(k)$ 的静态优化期望值,

$$U_M(K) = U_{M0}(k) + T\Delta U_M(k), \quad T = \text{block-diag}(T_1, \dots, T_R),$$

$$T_j = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{M \times M}, \quad j = 1, \dots, R,$$

$U_{M0}(k)$ 为控制初值,

$$RR = \text{block-diag}(RR_1, \dots, RR_R), \quad RR_j = \text{diag}[r_j(1), \dots, r_j(M)],$$

$$PP = \text{block-diag}(PP_1, \dots, PP_R), \quad PP_j = \text{diag}[P_j(1), \dots, P_j(M)], \quad j = 1, \dots, R.$$

其余记号定义同(1).

以上优化也可用二次规划求解, 在无约束或约束非积极时:

$$\begin{aligned} \Delta U_M(k) = & (A^T Q A + RR + T^T P P T)^{-1} [A^T Q (W(k) - Y_{P0}(k)) \\ & + T^T P P (\text{IRV} - U_{M0}(k))]. \end{aligned} \quad (4)$$

(3)式中第二项是控制软约束, 防止控制变化过于激烈. 第三项则反映静态优化要求, PP 阵体现了期望 $U_M(k)$ 与 IRV 的接近程度. 过程中有几个自由度, 就取几个 PP_j 块阵为正, 其余取零, 即可同时满足基本控制目标和静态优化要求. 这种方法计算简单, 一般也能满足“胖系统”控制和优化要求, 而且可用于完成一些别的控制要求^[2].

但综合性能指标法的缺点也很明显, 它将各种不同要求综合成单一指标, 造成各要求的相互耦合^[5], 具体表现在: 1) 动态响应变慢, 在后面的实例研究中将看到这种影响. 2) 可能造成静态偏差, 这是由于这种方法要求已知自由度的数目, 而在实际控制过程中自由度并非恒等于 $R - S$. 例如某一控制变量达到其约束, 会导致自由度降 1, 如果仍按 $R - S$ 个自由度时设计的控制算法工作, 即取 $R - S$ 个 PP_j 块阵为正, 则会使被控变量出现静态误差, 偏离程度取决于加权系数和对象的静态特性. 在自由度有多余时, 还没达到基本控制目标, 这当然很不理想.

2.2 多目标优化方法

为了真正保证在满足基本控制目标的前提下实现静态目标, Grosdidier 等人采用了多目标优化方法^[6], 以性能指标(1)构成第一级优化, 剩余自由度进行第二级优化:

$$\begin{cases} \min_{\Delta U_M(k)} J_1(k) = \|U_M(k) - \text{IRV}\|_{PP}^2, \\ \text{s. t. (1) 式中的约束条件, } Y_{PM}(k) = Y_{PM}^*(k). \end{cases} \quad (5)$$

先求解优化问题(1),若获得唯一解,则以此为所求之 $\Delta U_M^*(k)$,否则进行第二级优化(5),其中 $Y_{PM}^*(k)$ 由(1)给出^[3].

但应当注意到,即使在有多余自由度,即 $R > S$ 时,式(1)一般也能给出唯一解,这将导致控制器不作第二级优化(5),即有多余自由度却不进行静态优化.这是由于预测控制中优化时域 P 往往比控制时域 M 大许多,从而在 $R > S$ 时,仍可能有 $(P \times S) > (R \times M)$,即(2)式中 $A^T Q A$ 可逆,有解;再考虑到(1)中的约束可能进一步消耗自由度,因而此时(1)式肯定有唯一解.且此时(5)因其中的等式约束为矛盾方程组而无解.

可见,“胖系统”有多余自由度并非针对动态而言,而是指静态时有多组控制值能满足基本控制目标.通过合适的优化时域 P 和控制时域 M 的选择,总可保证 $(P \times S) \geq (M \times R)$,即保证 $A^T Q A$ 可逆,从而优化问题(1)有唯一解.为此,我们对多目标优化法改进如下:先求解(1)得 $\Delta U_M'(k)$ 及其对应的 $Y'_{PM}(k)$.再取 $P' = \lceil \frac{M \times R}{S} - 1 \rceil < P$,则 $(P' \times S) < (M \times R)$,方程 $Y_{P'M}(k) = Y'_{P'M}(k)$ 无唯一解,即有多余自由度,可构造第二级优化问题:

$$\begin{cases} \min_{\Delta U_M'(k)} J_1(k) = \|U_M(k) - IRV\|_{PP}^2, \\ \text{s. t. (1) 式中的约束条件, } Y_{P'M}(k) = Y'_{P'M}(k). \end{cases} \quad (6)$$

这里等式约束中的 $Y_{P'M}(k)$,是由从对应未来 P 个时刻预测值的 $Y_{PM}(k)$ 中选出的 P' 个时刻(可以是前 P' 个,也可是间隔较均匀的 P' 个)构成,以保证第一级优化(1)的优先级.优化问题(6),可得 $\Delta U_M^*(k)$ 和对应的 $Y_{PM}^*(k)$.

改进多目标优化法保证了基本控制目标具有高于静态目标的优先级,克服了综合性能指标法的缺点,代价是计算量增大.值得指出的是,以上推导中假设静态目标为 IRV 型,但所有结果均能方便地推广到别的静态经济指标情形.

3 实例研究

“胖系统”在过程控制中不乏其例,而静态目标要求中 IRV 处理的思想在双重控制结构中也有应用,采用阀位调节器(VPC)的双重控制是过程控制中一种重要控制方案,应用场合为:两个控制量控制一个被控量,其中一条调节通道调节速度较快,但在工艺上不太合适,而另一条正好相反.阀位调节器(如图1所示)可使系统调节速度较快,工艺上也较合理^[7].

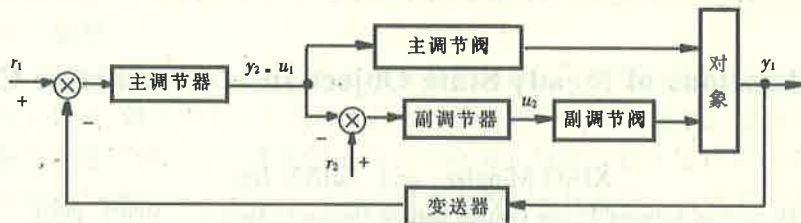


图1 阀位调节器双重控制结构框图

运用带静态目标的预测控制也可实现双重控制功能.对以下简单的双入单出系统:

$$y = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+6s} & \frac{1}{1+20s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix},$$

假设 $u_1 - y$ 通道工艺上不太合理,期望 u_1 取 0.4,被控变量设定值为 0.5.初始值 $y(0) = 0.05$, $u_1(0) = 0.3$, $u_2(0) = 0.1$.为实现该系统的双重控制,取 $irv_1 = 0.4$, $w_1 = 0.5$, $pp_1 = 0.5$, $pp_2 = 0$,并选取适当的 Q 和 RR .

采用两种带静态目标的预测控制来实现的双重控制效果分别如图2,图3所示.从图中可

看出,虽然均保证了 u_1 稳定到 0.4 上,但二者动态品质是不同的:改进多目标优化方法保证了基本控制目标(被控量到设定值上)比静态目标要求(u_1 到 irv_1 上)优先级高;而综合性能指标法在实现静态目标时影响了动态响应,使动态过程变慢,验证了前面的分析结果。

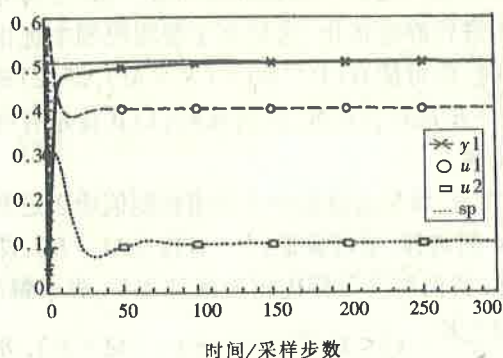


图 2 综合性能指标法实现双重控制

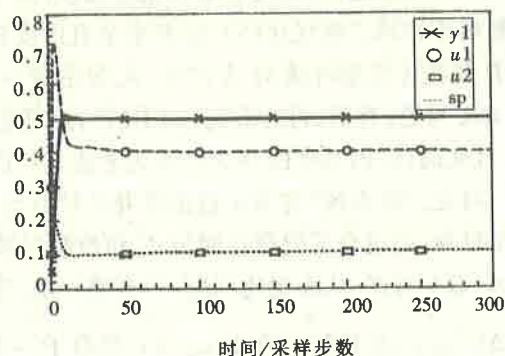


图 3 改进多目标优化法实现双重控制

4 结 论

本文针对“胖系统”预测控制静态目标要求这一实际问题,在澄清自由度若干错误认识的基础上,提出了综合性能指标法,改进了多目标优化法,并对两种方法从理论分析和仿真研究方面进行了比较.结果表明改进型多目标优化法体现了两种指标的不同优先级,不需预知过程自由度数目,更好地解决了“胖系统”预测控制中的静态目标问题。

参 考 文 献

- 1 席裕庚.预测控制.北京:国防工业出版社,1993,189-214
- 2 萧明波,邵惠鹤.多模型 DMC 及其在水力测功器系统中的应用.自动化学报,1997,23(1):103-106
- 3 Gacia, C. E.. Quadratic programming solution of dynamic matrix control (QDMC). Chem. Eng. Commun, 46: 073-087
- 4 Yousfi, C. & Tournier, R.. Steady state optimization inside model predictive control. Proceeding of ACC 1991, 1866-1870
- 5 Derek, A. L.. CAD for control systems. New York: Marcel Dekker Inc., 1993
- 6 Grosdidier, G., Froisy, B. & Hammann, M.. The IDCOM-M controller. IFAC Models Based Predictive Process Control, 1988, 31-36
- 7 蒋慰孙,俞金寿.过程控制工程.北京:轻工业出版社,1988,102-104

The Realizations of Steady State Object Inside Predictive Control

XIAO Mingbo and QIAN Jixin

(Institute of Industrial Process Control, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, PRC)

Abstract: One of the major assets of predictive controls lies in their ability to handle the non-square system through the performance criteria. The control of the “thin system” can be obtained directly in a “least-square” sense. For the “fat system”, the controller has several degrees of freedom, which can be used to fulfill some economic performance. In the paper, two methods of steady state object realization, the aggregative performance method and the multiobjective optimization method, are presented to meet the extra demands of the “fat system”.

Key words: predictive control; steady state object; degree of freedom; multiobjective optimization; dual control

本文作者简介

肖明波 1971 年生, 1992 年 7 月毕业于石油大学(华东), 1995 年 3 月获上海交通大学工学硕士学位, 现为浙江大学工业控制技术研究所博士研究生, 主要兴趣是预测控制, 鲁棒控制, 人工智能和小波理论及其在过程控制中的应用。

钱积新 1939 年生, 1962 年毕业于清华大学电机系, 现任浙江大学工业自动化国家工程研究中心副主任, 教授, 博士生导师, 长期从事复杂工业过程的建模、控制与优化的研究工作, 先后获主要研究成果五项, 发表论文 30 余篇, 目前主要兴趣是智能理论与生产过程建模, 控制及优化。

《预测控制系统及其应用》书评

陶永华

(华东冶金学院自动化系·马鞍山, 243002)

预测控制是 70 年代后期产生和逐渐发展起来的一类新型计算机控制算法, 它具有预测模型、滚动优化和反馈校正等三个基本特征。由于预测控制对于复杂系统的适用性, 以及它在工业实践中的大量成功应用, 这一控制技术的生命力及诱人的应用前景已引起了国内外控制理论界和工程界的广泛重视。

由北京科技大学舒迪前教授编著的《预测控制系统及其应用》一书(机械工业出版社, 1996 年 3 月)是一本结构完善、内容丰富、联系实际、独具一格的系统论述预测控制理论和应用的专著。

全书共分 10 章。第 1 章是绪论。介绍了预测控制的基本思想、主要特征和研究发展状况。第 2 章讨论内部模型控制(IMC)。第 3~6 章分别阐述模型算法控制(MAC)、动态矩阵控制(DMC)、广义预测控制(GPC)和广义预测极点配置(GPP)控制的基本理论, 并给出了六个它们在我国工业生产中的应用实例。第 7 章介绍了神经网络在预测控制中的应用概况。第 8 章给出了各类预测控制算法的 IMC 结构及其统一格式。第 9 章分析了基于非参数模型和参数模型在自适应情况下, 显式和隐式自校正预测控制算法的全局收敛性。第 10 章对预测控制的发展前景作了展望。

纵观全书, 有 4 个明显的特点: ① 首次将各类预测控制算法用内模控制原理统一起来, 给出了它们的统一格式, 便于读者对各类预测控制算法的学习和统一理解。② 首次分析了各类预测控制算法在自适应情况下显式和隐式算法的全局收敛性。这在国内外尚属首创。③ 探讨了预测控制算法与神经网络相结合, 为非线性预测控制系统的研究提供了一条可行的途径。④ 突出理论联系实际, 选材均有明显的应用背景。书中列举的 8 个应用实例, 给出了系统设计、参数选择和现场运行结果, 便于读者应用时参考。

总之, 该书在较高的视野上拓宽研究和应用预测控制的思路, 反映了国内外预测控制的最新成就, 具有较高的学术水平和工程实用价值。该书适宜于从事电气自动化技术的工程技术人员阅读, 也是一本很好的可供工业自动化、自动控制、计算机应用等专业使用的教材和教学参考书。