

多变量预测控制系统稳态解的相容性与唯一性分析

邹涛¹ 李海强² 丁宝苍³ 王丁丁²

摘要 多变量控制系统在结构形态上可以划分为方系统和非方系统, 非方系统可进一步划分为胖系统和瘦系统. 对瘦系统和胖系统, 预测控制系统分别可能出现输出静差和输入稳态值不确定问题. 本文从控制输入与被控输出稳态关系入手, 将上述问题归结为非齐次线性方程组的相容性与唯一性问题. 通过非齐次方程组解的判定定理分析了多变量预测控制系统稳态解出现相容性和唯一性问题的原因, 并由此给出了双层结构控制策略及解决方案. 上层稳态优化方法从理论上解决了瘦系统的相容性问题, 并从胖系统的无穷多个相容解中找到最优解. 下层集成控制输入目标的预测控制从根本上保证了胖系统控制输入稳态解的唯一性, 并实现了方系统与非方系统预测控制在算法描述上的统一. 仿真结果验证了本文提出的双层结构预测控制算法的有效性, 即多变量预测控制系统稳态解既是相容的又是唯一的.

关键词 模型预测控制, 稳态优化, 双层结构, 相容性, 唯一性

引用格式 邹涛, 李海强, 丁宝苍, 王丁丁. 多变量预测控制系统稳态解的相容性与唯一性分析. 自动化学报, 2013, 39(5): 519–529

DOI 10.3724/SP.J.1004.2013.00519

Compatibility and Uniqueness Analyses of Steady State Solution for Multi-variable Predictive Control Systems

ZOU Tao¹ LI Hai-Qiang² DING Bao-Cang³ WANG Ding-Ding²

Abstract The multi-variable control systems can be structurally classified into the square and non-square ones, with the latter further into fat and thin ones. For the fat and thin, the output offset and non-determinedness of the steady state input, respectively, can occur in predictive control systems. From the steady-state relationship between the control input and the controlled output, the two issues are tackled as the compatibility and uniqueness, respectively, of the non-homogeneous linear equations set. The reason why the compatibility and uniqueness issues can arise is analyzed based on the determination theorem for non-homogeneous linear equations set, and the solutions based on the double-layer (two-layer) control structure are given. The upper level steady state optimization not only tackles the compatibility issue for the thin system, but also finds the optimal solution from the infinite many consistent ones for the fat system. The lower level predictive control algorithm, integrated with the control input target, guarantees the uniqueness of the steady state solution for fat system, and algorithmically unifies both the square and nonsquare systems. Simulation results have validated the effectiveness of the double-layered predictive control algorithm, i.e., the steady state solutions of the multi-variable predictive control system are consistent and unique.

Key words Model predictive control (MPC), steady state optimization, double-layer structure, compatibility, uniqueness

Citation Zou Tao, Li Hai-Qiang, Ding Bao-Cang, Wang Ding-Ding. Compatibility and uniqueness analyses of steady state solution for multi-variable predictive control systems. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(5): 519–529

收稿日期 2012-05-15 录用日期 2012-11-29
Manuscript received May 15, 2012; accepted November 29, 2012
国家自然科学基金 (61074059, 61174095, 60934007), 中国科学院重点部署项目 (KGZD-EW-302), 浙江省自然科学基金 (Y12F030052) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61074059, 61174095, 60934007), Key Research Program of the Chinese Academy of Sciences (KGZD-EW-302), and National Natural Science Foundation of Zhejiang Province (Y12F030052)
本文客座编委 李少远

Recommended by Guest Editor LI Shao-Yuan
1. 中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110016 2. 浙江工业大学信息工程学院 杭州 310023 3. 西安交通大学电子与信息工程学院 西安 710049

1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016 2. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023 3. School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

模型预测控制 (Model predictive control, MPC) 是一类基于模型的计算机控制算法的总称. 早期的 MPC 算法以 Cutler 提出的动态矩阵控制 (Dynamic matrix control, DMC)、Richalet 提出的模型算法控制 (Model algorithmic control, MAC)^[1-2] 以及随后由 Clarke 提出的广义预测控制 (Generalized predictive control, GPC)^[3] 为代表. MPC 算法在流程行业的成功应用逐渐引起学术界的广泛关注^[4].

现代工业过程中, 大型工业系统通常采用分层递阶控制结构^[5]: 上层为实时优化 (Real time optimization, RTO) 层, 中间层为 MPC, 底层为基础控制 (PID) 层. RTO 负责给出生产过程的稳态最佳生产工况 (工作点), 而 MPC 则负责动态地趋

向于系统最佳工况^[6]. 大系统分层递阶控制结构是一种理想情况, 其 RTO 层要实现面向全装置的优化, 建模工作非常复杂, 建模精度很难保证, 有时难以取得满意的实施效果. 所以, 目前过程工业更普遍地采用了直接以 MPC 为核心的方案.

就设定点的含义而言, RTO-MPC 的设定点是通过优化计算得到的最佳工作点, 而 MPC 的设定点是人工给定的“最佳”工作点, 两者在实现方法上是一致的. 多变量过程的工作点是以输入输出对形式出现的. 但是, 常规的预测控制算法只具备跟踪输出目标(设定点)的能力, 例如 DMC^[4], 只有当控制输入与被控输出稳态值之间满足一一对应的关系时, 也就是输入输出变量个数完全一致时, 输出设定点的实现才意味着控制输入的目标也同时得到满足. 然而, 实际的多变量过程有时是非方的, 输入输出之间的稳态关系并不一一对应, 对这类系统进行稳态分析十分困难, 通常只能采用基于自由度的定性分析方法^[7], 其非定量的结论给多变量控制系统的稳态解带来很多不确定性. 此外, 预测控制是一种基于优化的控制算法, 这使得它可以很方便地将输入设定点集成到性能指标函数中, 从而使得控制系统具有跟踪输入目标的能力^[8-9]. 集成控制输入目标的预测控制算法在解的稳态性质分析方面要优于常规预测控制算法, 因为当输入目标和输出目标无法同时满足时, 偏差的大小将按输入输出对应的权值进行分配.

近年来, MPC 工业技术领域出现了一种集成稳态优化的双层结构预测控制策略^[10-15]. 双层结构中的稳态优化层(Steady state optimization, SSO)一方面可以对 RTO 目标进行渐近跟踪, 另一方面也可以独立完成 MPC 所对应过程的局部经济优化^[11-12]. 具体地, 上层 SSO 采用 MPC 动态数学模型的稳态增益作为数学模型, 在 MPC 所处的约束空间内寻优, 部分操作变量或输出变量的稳态值处于“卡边”位置, 下层的 MPC 算法以 SSO 的计算结果作为设定值. 双层结构预测控制的思路清晰, 功能明确, 已经得到了广泛的应用. 但是, 目前对上层稳态优化的研究仅限于算法上的设计, 缺乏深入的理论分析.

本文从多变量控制系统控制输入与被控输出之间的因果关系入手, 阐述控制输入与被控输出稳态值的关系特征. 通过非齐次方程组解的判定引理, 分析了非方系统稳态解的相容性与唯一性问题产生的根源, 并由此论证了引入了稳态优化层的双层结构预测控制是解决上述问题的有效思路. 继而, 证明了方系统和瘦系统在双层结构预测控制模式下稳态解同时具有相容性和唯一性, 并将控制输入稳态目标引入到预测控制的问题描述中, 给出了能够同时跟踪控制输入设定点和输出设定点的下层 MPC 算法,

确保了胖系统稳态解的唯一性. 这种集成控制输入目标的双层结构 MPC 算法从理论上保证了多变量控制系统稳态解的相容性和唯一性, 实现了方系统、非方系统在控制方法上的统一.

1 多变量预测控制算法稳态解的相容性与唯一性问题

本文以 DMC 算法作为常规多变量预测控制算法的代表, 并简单给出其预测模型和滚动优化算法, 受篇幅限制不再赘述反馈校正部分. 本文将研究的被控过程限定为开环稳定过程, 但是该研究方法经过适当调整后也可以应用于积分过程^[16].

假设某多变量过程包含 m 个控制输入和 p 个被控输出, 且每一个控制输入对每个输出的阶跃响应系数模型为已知, 其模型向量为

$$\mathbf{a}_{ij} = [a_{ij}(1), \dots, a_{ij}(N)] \quad (1)$$

$i = 1, \dots, p, j = 1, \dots, m$. 其中, N 为阶跃响应系数模型的建模时域. 经过简单推导, 可得到多步预测模型:

$$\tilde{\mathbf{y}}_{PM}(k) = \tilde{\mathbf{y}}_{P0}(k) + A\Delta\mathbf{u}_M(k) \quad (2)$$

其中, P, M 分别为预测时域和控制时域, $\tilde{\mathbf{y}}_{PM}(k) \in \mathbf{R}^{p \times P \times 1}$ 为预测输出, $\tilde{\mathbf{y}}_{P0}(k) \in \mathbf{R}^{p \times P \times 1}$ 为当前时刻的初始预测输出, $\Delta\mathbf{u}_M(k) \in \mathbf{R}^{m \times M \times 1}$ 为控制增量,

$$\tilde{\mathbf{y}}_{PM}(k) = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{y}}_{1,PM}(k) \\ \vdots \\ \tilde{\mathbf{y}}_{p,PM}(k) \end{bmatrix}, \tilde{\mathbf{y}}_{P0}(k) = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{y}}_{1,P0}(k) \\ \vdots \\ \tilde{\mathbf{y}}_{p,P0}(k) \end{bmatrix}$$

$$\Delta\mathbf{u}_M(k) = \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{u}_{1,M}(k) \\ \vdots \\ \Delta\mathbf{u}_{m,M}(k) \end{bmatrix}$$

在多变量的滚动优化过程中, 在每一个执行周期都要极小化如下的性能指标:

$$J(k) = \|\mathbf{w}(k) - \tilde{\mathbf{y}}_{PM}(k)\|_Q^2 + \|\Delta\mathbf{u}_M(k)\|_R^2 \quad (3)$$

其中, $\mathbf{w}(k)$ 为被控输出的设定点, Q 为输出变量对应的加权矩阵, R 为控制输入增量对应的加权矩阵,

$$\mathbf{w}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_1(k) \\ \vdots \\ \mathbf{w}_p(k) \end{bmatrix}, \mathbf{w}_i(k) = \begin{bmatrix} w_i(k+1) \\ \vdots \\ w_i(k+P) \end{bmatrix},$$

$$i = 1, \dots, p$$

$$Q = \text{block-diag}\{Q_1, \dots, Q_p\},$$

$$Q_i = \text{diag}\{q_i(1), \dots, q_i(P)\}, i = 1, \dots, p$$

$$R = \text{block-diag}\{R_1, \dots, R_m\},$$

$$R_j = \text{diag}\{r_j(1), \dots, r_j(M)\}, j = 1, \dots, m$$

在无约束情况下, 由多步预测模型 (2) 可计算出最优控制增量

$$\Delta \mathbf{u}_M(k) = (A^T Q A + R)^{-1} A^T Q (\mathbf{w}(k) - \tilde{\mathbf{y}}_{P0}(k)) \quad (4)$$

同 PID 控制器一样, 常规的预测控制算法也是从跟踪被控输出的设定值出发, 如式 (3) 所示, 但是与 PID 控制器不同的是, 预测控制所面对的多变量过程特性较之 PID 所面对的 SISO 过程却复杂得多. 众所周知, 根据系统输入变量与输出变量的个数, 多变量系统可以划分为方系统和非方系统, 而非方系统又可以进一步划分为胖系统和瘦系统. 非方系统输入输出之间的稳态关系并不一一对应, 常用的稳态分析方法是基于自由度的定性分析方法. 基于自由度的分析方法的缺点在于其分析结果上的不确定性, 例如, 是否只要是胖系统就一定能实现输出目标, 或者只要是瘦系统输出目标就一定不可达? 为了解决上述问题, 需要给出非方系统输入输出稳态关系分析的定量方法.

下面给出一个定理来说明多变量控制系统控制输入的稳态值与被控输出稳态值之间的关系.

定理 1. 若某线性、时不变多变量过程 (不考虑积分过程) 初始稳态工作点为 $(\mathbf{u}_0, \mathbf{y}_0)$, k 时刻后控制输入不发生变化, 则过程输出的稳态值 $\mathbf{y}_{ss,k}$ 仅与 \mathbf{u}_k 和 \mathbf{u}_0 有关, 而与输入变化路径无关.

证明. 以初始稳态点 $(\mathbf{u}_0, \mathbf{y}_0)$ 为过程的初始平衡点, 假设该系统的稳态方程为

$$\Delta \mathbf{y}_{ss} = G \Delta \mathbf{u}_{ss} \quad (5)$$

其中, $\Delta \mathbf{y}_{ss} \in \mathbf{R}^{p \times 1}$ 为被控输出稳态值的变化量, $\Delta \mathbf{y}_{ss} = \mathbf{y}_{ss} - \mathbf{y}_0$, \mathbf{y}_{ss} 为被控输出变量的稳态值, \mathbf{y}_0 为被控输出变量的初始稳态值; $\Delta \mathbf{u}_{ss} \in \mathbf{R}^{m \times 1}$ 为控制输入稳态值的变化量, $\Delta \mathbf{u}_{ss} = \mathbf{u}_{ss} - \mathbf{u}_0$, \mathbf{u}_{ss} 为控制输入的稳态值, \mathbf{u}_0 为控制输入变量的初始稳态值; $G \in \mathbf{R}^{p \times m}$ 为过程稳态增益矩阵. 注意: 由于 \mathbf{u} 是控制输入变量, 所以 k 时刻的控制输入稳态 $\mathbf{u}_{ss,k}$ 即为 $\mathbf{u}(k)$.

设从初始时刻至 k 时刻, 控制器施加的任一控制序列组合为 $\Delta \mathbf{u}(1), \dots, \Delta \mathbf{u}(k)$, 则 k 时刻后, 利用线性系统叠加原理可得到过程的最终稳态值:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_{ss,k} &= \mathbf{y}_0 + \Delta \mathbf{y}_{ss,1} + \Delta \mathbf{y}_{ss,2} + \dots + \Delta \mathbf{y}_{ss,k} = \\ &= \mathbf{y}_0 + G \Delta \mathbf{u}(0) + G \Delta \mathbf{u}(1) + \dots + G \Delta \mathbf{u}(k) = \\ &= \mathbf{y}_0 + G \sum_{i=0}^k \Delta \mathbf{u}(i) = \mathbf{y}_0 + G(\mathbf{u}_k - \mathbf{u}_0) \end{aligned}$$

可见对于线性系统而言, 过程最终的输出稳态仅与过程初始稳态工作点以及最终的控制输入稳态值有关, 而与过程输入变化轨迹无关. \square

由定理 1 可知, 控制输入的稳态值变化是引起控制输出稳态值发生变化的决定因素, 控制输入与被控输出之间为一对因果关系. 在多变量控制系统分析中, 对于方系统, 当过程的稳态增益存在且可逆时, 达到了输出稳态值就意味着控制输入的稳态值也一定能够达到, 这是因为其输入输出的稳态关系是一一对应的. 然而, 对于非方多变量控制系统, 由于非方系统的稳态增益矩阵不可逆, 所以由输出设定值和稳态增益矩阵却无法直接求解控制输入的稳态值. 此时, 单纯地考虑输出设定值将会出现以下情况: 对于胖系统 (稳态增益矩阵满秩), 将有无穷多种控制输入的组合可以使被控输出达到设定值, 则控制输入的稳态解将出现不确定性; 对于瘦系统, 被控输出可能出现静差.

预测控制目标函数 (3) 的目的是: 当系统处于稳态时使被控输出达到设定值, 由定理 1 可知当系统达到稳态时, 必然满足稳态方程 (5). 由于控制输入在控制系统内是自变量, 同时在给定输出设定值的情况下 \mathbf{y}_{ss} 为已知量, 因此式 (5) 可以被看作是一个非齐次线性方程组

$$G \Delta \mathbf{u}_{ss} = \Delta \mathbf{y}_{ss} \quad (6)$$

其中, 系数矩阵 G 为

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \dots & g_{1m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{p1} & g_{p2} & \dots & g_{pm} \end{bmatrix}_{p \times m}$$

系数矩阵 G 的增广矩阵为

$$B = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \dots & g_{1m} & \Delta \mathbf{y}_{ss,1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ g_{p1} & g_{p2} & \dots & g_{pm} & \Delta \mathbf{y}_{ss,p} \end{bmatrix}_{p \times (m+1)}$$

下面, 给出非齐次方程组解的判定引理.

引理 1. m 元非齐次方程组 $G_{p \times m} \Delta \mathbf{u}_{ss} = \Delta \mathbf{y}_{ss}$ 有解的充分必要条件是系数矩阵 G 的秩等于增广矩阵 $B = (G, \Delta \mathbf{y}_{ss})$ 的秩. 显然, 当 $\text{Rank}(G) < \text{Rank}(B)$ 时, 方程组无解, 方程组是不相容的. 当被控系统为瘦系统时, 过程控制输入与被控输出的维数为 $m < p$. $\text{Rank}(G)$ 的最大值为 m , 而 $\text{Rank}(B)$ 的最大值为 $m + 1$, 所以对于瘦系统很有可能出现 $\text{Rank}(G) < \text{Rank}(B)$ 的情况, 导致稳态方程组的解不存在.

引理 1 有以下推论.

推论 1. $G \Delta \mathbf{u}_{ss} = \Delta \mathbf{y}_{ss}$ 有唯一解的充要条件为 $\text{Rank}(G) = \text{Rank}(B) = m$; $G \Delta \mathbf{u}_{ss} = \Delta \mathbf{y}_{ss}$ 有无穷多解的充要条件为 $\text{Rank}(G) = \text{Rank}(B) < m$. 对于方系统, 其稳态增益存在且可逆时, $\text{Rank}(G) =$

$\text{Rank}(B) = m$ 成立, 所以其只有唯一解. 对于胖系统, 过程控制输入与被控输出的维数为 $m > p$, $\text{Rank}(G)$ 的最大值为 p , 而 $\text{Rank}(B)$ 的最大值也为 p , 所以 $\text{Rank}(G) = \text{Rank}(B) < m$ 成立, 则说明胖系统所对应的方程组解的个数为无穷多.

我们也可以通过几何方法来验证上述结论. 几何上, 方程组的解可通过判断空间内直线或平面的交点确定, 其规则如下: 1) 空间内直线或平面交于一点, 方程组有唯一解; 2) 空间内直线或平面交于一条线, 则方程组有无穷多解; 3) 空间内直线或平面不相交, 则方程组无解.

假设某 3×2 系统, 其稳态增益矩阵为

$$G = \begin{bmatrix} 4.05 & 1.77 & 5.88 \\ 5.39 & 5.72 & 6.90 \end{bmatrix}$$

过程输出的设定点为 $(0.5, -0.5)$ 过程输出的当前位置为 $(0, 0)$. 相应的稳态方程可以写作

$$\begin{bmatrix} 4.05 & 1.77 & 5.88 \\ 5.39 & 5.72 & 6.90 \end{bmatrix} \Delta \mathbf{u}_{ss} = \begin{bmatrix} 0.5 \\ -0.5 \end{bmatrix}$$

在三维空间内绘出上述方程所对应的空间平面图, 显然过程的稳态解为三维空间的 2 个平面的交集. 如图 1 所示, 两平面的交集为一条直线, 因而该直线上所对应的点都是该方程的解, 也就是说, 该系统具有无穷多种稳态输入组合满足过程设定点要求.

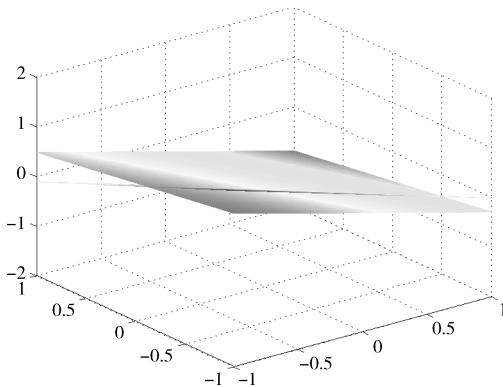


图 1 三输入两输出系统稳态解的几何表示

Fig. 1 Geometry description of the steady state solution of a system with three inputs and two outputs

假设某 3×3 系统, 其稳态增益矩阵为

$$G = \begin{bmatrix} 4.05 & 1.77 & 5.88 \\ 5.39 & 5.72 & 6.90 \\ 4.38 & 4.42 & 7.20 \end{bmatrix}$$

过程输出的设定点为 $(0.5, -0.5, 0.5)$, 过程输出的当

前位置为 $(0, 0, 0)$. 相应的稳态方程可以写作

$$\begin{bmatrix} 4.05 & 1.77 & 5.88 \\ 5.39 & 5.72 & 6.90 \\ 4.38 & 4.42 & 7.20 \end{bmatrix} \Delta \mathbf{u}_{ss} = \begin{bmatrix} 0.5 \\ -0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix}$$

在 3×3 系统中, 过程稳态解为 3 个空间平面的交点, 如图 2 所示, 三个平面相交于一点, 过程具有唯一稳态解.

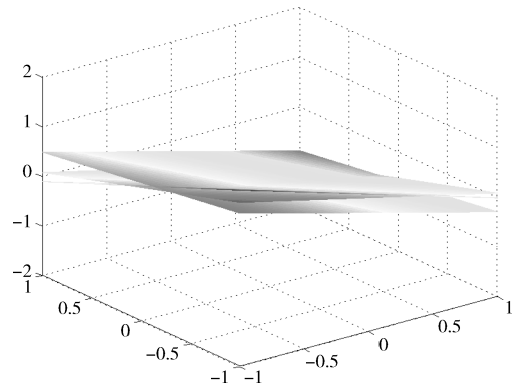


图 2 三输入三输出系统稳态解的几何表示

Fig. 2 Geometry description of the steady state solution of a system with three inputs and three outputs

假设某 2×3 系统, 其稳态增益矩阵为

$$G = \begin{bmatrix} 4.05 & 1.77 \\ 5.39 & 5.72 \\ 4.38 & 4.42 \end{bmatrix}$$

输出的设定点为 $(0.5, -0.5, 0.5)$, 过程输出的当前位置为 $(0, 0, 0)$. 相应的稳态方程可以写作

$$\begin{bmatrix} 4.05 & 1.77 \\ 5.39 & 5.72 \\ 4.38 & 4.42 \end{bmatrix} \Delta \mathbf{u}_{ss} = \begin{bmatrix} 0.5 \\ -0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix}$$

由于过程输入个数小于输出个数, 过程稳态关系可描述为二维平面的三条直线, 如图 3 所示, 三条直线不能相交, 因而稳态方程无解, 故输出设定点无法达到控制系统将出现静差.

2 多变量控制系统的双层结构预测控制

在多变量预测控制的实际应用中, 通常会对控制系统提出两点要求: 1) 实现无静差控制; 2) 控制输入往往与系统的经济性能或能耗挂钩, 因此控制系统需要卡边操作, 迫切需要将控制输入的稳态解唯一化、最优化. 结合上述分析, 可知上述两点要求可转化为多变量控制系统稳态解的相容性和唯一性问题.

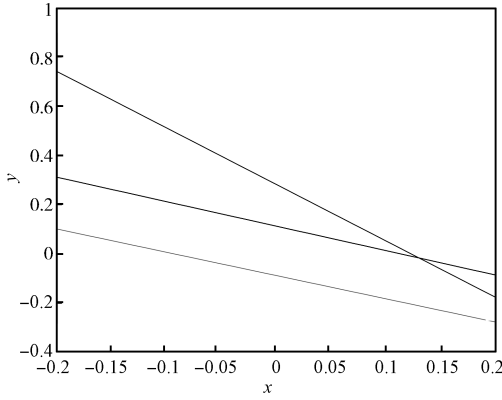


图3 二输入三输出系统稳态解的几何表示

Fig. 3 Geometry description of the steady state solution of a system with two inputs and three outputs

对于瘦系统, 稳态解可能出现不相容问题的根源在于 $\text{Rank}(G) \leq \text{Rank}(B)$. 我们知道, 如果 $\Delta \mathbf{y}_{ss}$ 属于 G 的列空间, 则 $G\Delta \mathbf{u}_{ss} = \Delta \mathbf{y}_{ss}$ 一定是相容的, 即 $\text{Rank}(G) = \text{Rank}(B)$, 而且在行空间满秩 (工程上, 多变量过程一般都满足行满秩条件) 的前提下 $\text{Rank}(G) = \text{Rank}(B) = m$, 这说明此时控制输入的稳态解是唯一的. 可见, 如果能够找到一个使得 $\text{Rank}(G) = \text{Rank}(B)$ 满足的 $\Delta \mathbf{y}_{ss}$, 则瘦系统稳态解的相容性和唯一性问题将同时得以解决. 但是, 问题的关键在于 G 的列空间是一个集合, 而 $\Delta \mathbf{y}_{ss}$ 并不唯一. 综合胖系统和瘦系统稳态解的特点, 我们将在多变量预测控制的基础上引入一个稳态优化层以确保最优控制输入与被控输出的稳态解 $(\mathbf{u}_{ss}, \mathbf{y}_{ss})$ 被唯一确定. 这种稳态优化 + 预测控制的模式被称为双层结构预测控制^[17].

2.1 稳态优化

考虑过程输入输出的稳态约束条件, 稳态经济优化问题可描述为一个线性规划 (Linear programming, LP) 问题:

$$\begin{aligned} \min_{\Delta \mathbf{u}_{ss}} J &= \mathbf{c}^T \Delta \mathbf{u}_{ss} \\ \text{s.t. } \Delta \mathbf{y}_{ss} &= G_u \Delta \mathbf{u}_{ss} + G_f \Delta \mathbf{f} + \mathbf{e}_k \\ \mathbf{u}_{LL} &\leq \mathbf{u}_{ss,k-1} + \Delta \mathbf{u}_{ss} \leq \mathbf{u}_{HL} \\ \mathbf{y}_{LL} &\leq \mathbf{y}_{ss,k-1} + \Delta \mathbf{y}_{ss} \leq \mathbf{y}_{HL} \end{aligned} \quad (7)$$

其中, \mathbf{c} 为代价系数向量, \mathbf{u}_{LL} 为控制输入的下限, \mathbf{u}_{HL} 为控制输入的上限, \mathbf{y}_{LL} 为被控输出的下限, \mathbf{y}_{HL} 为被控输出的上限. 不失一般性, 我们在过程稳态模型中引入了扰动向量 $\Delta \mathbf{f}$ 和误差修正量 \mathbf{e}_k , \mathbf{e}_k 可根据过程的预测误差计算得出, 即:

$$\mathbf{e}_k = \mathbf{y}_k - \tilde{\mathbf{y}}(k|k-1) \quad (8)$$

其中, $\mathbf{y}_k \in \mathbf{R}^{p \times 1}$ 为当前时刻输出值, $\tilde{\mathbf{y}}(k|k-1) \in$

$\mathbf{R}^{p \times 1}$ 为上个时刻对当前时刻输出的预测值. 需要指出, 由于无法得到真正意义上的输出稳态测量值, 式 (8) 所描述的偏差修正项 \mathbf{e}_k 是一种退而求其次的方法. 对于开环稳定过程, 随着时间的延续 \mathbf{e}_k 将趋向于其稳态真值. 鉴于预测控制的反馈校正机制, 扰动向量与误差修正量的引入对本文前面的分析没有实质影响.

目标函数的设计应能够直接反映生产过程经济效益与费用 (成本) 之间的关系. 最优解需要满足式 (7) 中所涉及的稳态关系约束以及控制输入与被控输出的操作限制. 作为约束优化问题, 式 (7) 必然存在优化可行性问题. 文献 [17] 中给出了基于优先级策略的优化可行性判定与软约束调整方法. 鉴于软约束调整时仅放松输出约束条件, 稳态解仍然满足系统的内部平衡关系, 所以可行性问题对于本文的研究不存在实质性影响.

文献 [17] 将式 (7) 所描述的方法称为控制系统的局部经济优化, 其主要功能是在输入输出约束空间内寻找使目标函数最小的控制输入与被控输出稳态值. 对于某些已经给定输出设定点的问题, 可以使用目标跟踪模式的优化问题描述. 假设 RTO 的输出结果或操作者的期望为 $(\mathbf{u}_T, \mathbf{y}_T)$, 可将目标函数写作

$$\begin{aligned} \min_{\Delta \mathbf{u}_{ss}} J &= (\|\mathbf{y}_{ss} - \mathbf{y}_T\|_{\bar{Q}}^2 + \|\mathbf{u}_{ss} - \mathbf{u}_T\|_{\bar{R}}^2) \\ \text{s.t. } \Delta \mathbf{y}_{ss} &= G_u \Delta \mathbf{u}_{ss} + G_f \Delta \mathbf{f} + \mathbf{e}_k \\ \mathbf{u}_{T \min} &\leq \mathbf{u}_{ss,k-1} + \Delta \mathbf{u}_{ss} \leq \mathbf{u}_{T \max} \\ \mathbf{y}_{T \min} &\leq \mathbf{y}_{ss,k-1} + \Delta \mathbf{y}_{ss} \leq \mathbf{y}_{T \max} \end{aligned} \quad (9)$$

该目标函数的含义: 在系统初始稳态 $(\mathbf{u}_0, \mathbf{y}_0)$ 下寻找稳态工作点 $(\mathbf{u}_{ss}, \mathbf{y}_{ss})$ 使之与 $(\mathbf{u}_T, \mathbf{y}_T)$ 在最小二乘意义下距离最短. 其中, \bar{R} 和 \bar{Q} 为输入输出目标的对应权重系数. 对于目标跟踪问题, 工程应用中常希望新的稳态工作点 $(\mathbf{u}_{ss}, \mathbf{y}_{ss})$ 与 $(\mathbf{u}_T, \mathbf{y}_T)$ 保持较高的一致性, 技术上可通过事先对 \mathbf{u}_T 和 \mathbf{y}_T 施加一定范围内的限制来实现该目的. $\mathbf{u}_{T \min}$ 和 $\mathbf{u}_{T \max}$ 可理解为期望的控制输入约束条件的下界和上界, $\mathbf{y}_{T \min}$ 和 $\mathbf{y}_{T \max}$ 可理解为期望的输出变量约束条件的下界和上界. 需要说明: RTO 的输出结果或操作者输入的期望目标 $(\mathbf{u}_T, \mathbf{y}_T)$ 可能并非稳态相容解或唯一解, 但优化问题的计算输出结果必然是相容解和唯一解. 目标跟踪方法事实上是期望操作目标附近进行的微调.

综合多变量控制系统稳态解的分析与双层结构预测控制上层稳态优化算法的问题描述, 可以给出双层结构预测控制在工程应用中的结构框图, 如图 4 所示.

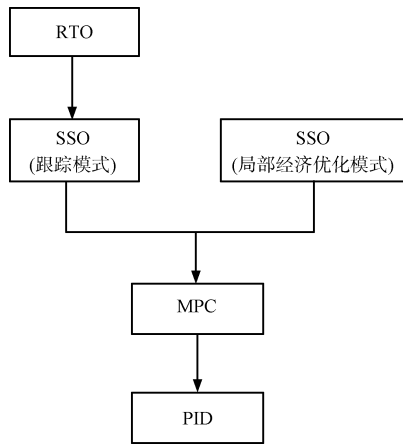


图 4 双层结构预测控制结构框图

Fig. 4 Framework of double-layered predictive control

从图 4 中可以看出,我们在分层递阶控制结构以及传统的 MPC + PID 结构中分别增加了相应的 SSO 层. 在 RTO + MPC + PID 的分支中增加的 SSO 层所起到的作用是对 RTO 计算的结果进行一个重新计算的作用,使输出稳态目标值位于稳态增益矩阵的列空间内,从而满足稳态解的相容性与一致性条件. 在 MPC + PID 的分支中引入 SSO 的作用在于进行局部的优化以进一步提高 MPC 的稳态性能,并且可以有效解决非方系统的设定点给定问题.

2.2 集成控制输入目标的多变量预测控制算法

稳态优化结果包含两部分:控制输入稳态值和被控输出稳态值,但是常规的预测控制只跟踪被控输出的稳态值(设定点),不涉及控制输入稳态值的跟踪,这相当于由被控输出的稳态值求解控制输入的稳态值. 根据非齐次方程组解的判定引理可知方系统和瘦系统在输出设定点(通过稳态优化得到)既定的前提下,非齐次方程组的解是唯一的,但是对于胖系统,对应的非齐次方程组的解仍是无穷多个. 也就是说,虽然稳态优化方法已经将胖系统的稳态解最优化,但是在动态控制层面控制输入的稳态解仍是不唯一的.

为了解决该问题,将控制输入稳态值的惩罚项加入到预测控制目标函数中,促使控制输入最终趋向它的稳态值,即:

$$J(k) = \|\mathbf{w}(k) - \tilde{\mathbf{y}}_{PM}(k)\|_Q^2 + \|\mathbf{u}(k) - \mathbf{u}_{ss}(k)\|_V^2 + \|\Delta\mathbf{u}_M(k)\|_R^2 \quad (10)$$

其中, \mathbf{u}_{ss} 为控制输入的优化目标, $\mathbf{u}(k)$ 为控制输入的未来预测量, $\mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(k-1) + B\Delta\mathbf{u}_M(k)$, $B = \text{block-diag}\{B_0, \dots, B_0\}$ (m 块),

$$B_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}_{(M \times M)}$$

$$\mathbf{u}(k-1) = \begin{bmatrix} u_1(k-1) \\ \vdots \\ u_1(k-1) \\ \vdots \\ u_m(k-1) \\ \vdots \\ u_m(k-1) \end{bmatrix}$$

$$V = \text{block-diag}\{V_1, \dots, V_m\},$$

$$V_i = \text{diag}\{v_i(1), \dots, v_i(M)\}, i = 1, \dots, m$$

将预测模型 (2) 代入式 (10), 可得:

$$J(k) = \|\mathbf{w}(k) - \tilde{\mathbf{y}}_{p0}(k) - A\Delta\mathbf{u}_M(k)\|_Q^2 + \|\mathbf{u}(k-1) - \mathbf{u}_{ss}(k) + B\Delta\mathbf{u}_M(k)\|_V^2 + \|\Delta\mathbf{u}_M(k)\|_R^2 \quad (11)$$

接下来推导无约束控制律, 对式 (11) 展开可得:

$$J(k) = \Delta\mathbf{u}_M^T(k)(A^TQA + B^TVB + R)\Delta\mathbf{u}_M(k) - 2\Delta\mathbf{u}_M^T(k)A^TQ[\mathbf{w}(k) - \tilde{\mathbf{y}}_{p0}(k)] - 2\Delta\mathbf{u}_M^T(k)B^TV[\mathbf{u}_{ss}(k) - \mathbf{u}(k-1)] + \text{const} \quad (12)$$

求取式 (12) 的极小值, 即利用极值必要条件 $\frac{dJ(k)}{d\Delta\mathbf{u}_M(k)} = 0$, 计算出最优控制增量:

$$\Delta\mathbf{u}_M(k) = (A^TQA + B^TVB + R)^{-1}\{A^TQ \times (\mathbf{w}(k) - \tilde{\mathbf{y}}_{p0}(k)) + B^TV(\mathbf{u}_{ss}(k) - \mathbf{u}(k-1))\}$$

而即时控制增量可以通过下式给出: $\Delta\mathbf{u}(k) = LD_1(\mathbf{w}(k) - \tilde{\mathbf{y}}_{p0}(k)) + LD_2(\mathbf{u}_{ss}(k) - \mathbf{u}(k-1))$, 其中

$$D_1 = (A^TQA + B^TVB + R)^{-1}A^TQ \quad (13)$$

$$D_2 = (A^TQA + B^TVB + R)^{-1}B^TV \quad (14)$$

而

$$L = \begin{bmatrix} [1 & 0 & \dots & 0] & & 0 \\ & \ddots & & & & \\ & & 0 & & & [1 & 0 & \dots & 0] \end{bmatrix} \text{ 为 } m \times mM \text{ 维矩阵.}$$

由于 A, Q, R, V, B 均属已知, D_1 和 D_2 可一次离线计算得出.

下面对目标函数中引入控制输入目标的模式加以讨论. 首先, 使用图示方法对只有被控输出设定点

目标的模式加以说明. 图 5 中, 在纵向方向上画了 p 条直线用以表示被控变量 (CV) 的设定值随时间变化的特点, 将时间方向定义为由下而上. 在这种目标的设置模式下, 仅对输出变量赋予期望, 而由控制器驱动被控变量. 集成控制输入目标的双层结构预测控制方法根本地改变了稳态目标的设定方法.



图 5 多变量系统输出目标

Fig. 5 Output target of multi-variable system

图 6 在横轴方向上又增加了 m 条直线, 用以表示集成控制输入目标的预测控制设定值模式. 在这种设置模式下, 对输入变量和输出变量的稳态值都赋予了期望, 输入输出的稳态目标是唯一的. 另一方面, 由定理 1 可知当控制输入达到了目标稳态值则被控输出也必将趋向相应的稳态值. 而且, 如果将控制时域所对应的控制输入最终权系数设置得非常, 这种情形与预测控制稳定性综合理论中终端加权法相类似, 有利于提高控制系统的稳定性^[18]. 最后, 从结构稳定的角度来看, 输入稳态目标与输出稳态目标在时间和空间上结成了一个网状结构, 其性能明显优于图 5 所示的结构. 当系统中存在不确定情况时可以从两个方面分担不确定性给系统带来的影响.

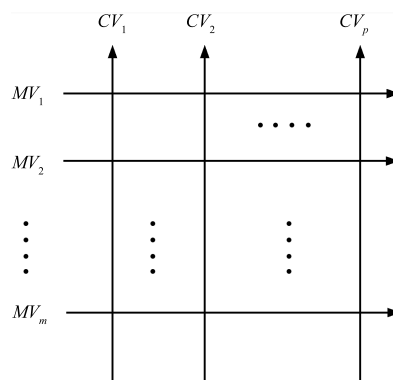


图 6 多变量系统输入目标与输出目标形成的网格

Fig. 6 Grid formed by multi-variable system's output target and input target

2.3 模型不确定性及不可测扰动分析

实际应用中, 控制器模型与实际过程不可避免

地会出现失配情况 (也就是模型不确定性问题), 而且由于检测方面的原因无法将所有的输入因素纳入模型中, 使得某些系统在控制输入、可测扰动之外可能还包含不可测扰动因素. 模型不确定性以及不可测扰动的存在导致了模型与对象两者内部平衡关系出现差异, 这种差异将必然引起控制系统输入与输出间的不匹配, 但是由于修正项的存在将使得开环稳态优化解不断得到校正, 若稳态优化问题持续可行则最终得到的稳态解仍位于多变量系统的相容解空间之内, 在控制系统稳定性得到保证的前提下双层 MPC 下层控制解将趋近直至等于上层稳态优化解. 第 3 节将分别就模型失配与不可测扰动情况进行仿真以验证前述分析.

3 仿真实验

为验证双层结构预测控制稳态解的相容性和唯一性, 分别对胖系统、方系统和瘦系统进行仿真, 采用的模型为 Shell benchmark 问题的重油分馏塔模型. 这里不对其物理含义做过多介绍, 感兴趣的读者可参考文献 [19]. 仿真过程中, 稳态优化方法采用式 (7) 描述的经济优化方法, 稳态优化的主要参数为各控制输入变量的代价系数.

3.1 胖系统

取 Shell benchmark 输入输出传递函数矩阵模型的第 1 行和第 2 行构造一个 3×2 (三输入两输出, 下文略) 的胖系统过程进行仿真, 该过程的数学模型为

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{4.05e^{-27s}}{50s + 1} & \frac{1.77e^{-28s}}{60s + 1} & \frac{5.88e^{-27s}}{50s + 1} \\ \frac{5.39e^{-18s}}{50s + 1} & \frac{5.72e^{-14s}}{60s + 1} & \frac{6.90e^{-15s}}{40s + 1} \end{bmatrix}$$

将稳态优化中控制输入变量的代价系数参数设置为 $(-2, -1, 2)$, 输入输出约束均限制在 ± 0.5 之间, 后续仿真均采用该约束条件. 稳态优化的计算结果为 $\mathbf{y}_{ss} = [-0.5, 0.5]$, $\mathbf{u}_{ss} = [0.5, 0.2108, -0.4929]$. 为了验证集成控制输入目标的性能, 有必要将常规预测控制和集成控制输入目标预测控制的仿真结果进行对比, 如表 1 所示. 需要说明, 由于仿真过程中控制器模型与对象模型是相同的, 即标称情况, 稳态优化计算的目标值在整个控制过程中是不变的, 且动态可达, 为节省版面, 仅列出各种情形下的系统输入输出稳态值.

由仿真结果可以得出以下结论: 在常规预测控制算法下, 当被控对象为胖系统时, 输出设定值均可以达到, 但控制输入的稳态解将随控制器权重系数的改变而改变, 不满足唯一性. 而在集成控制输入目标预测控制算法下, 当被控对象为胖系统时集成控制输入的预测控制系统稳态解的相容性和唯一性都

得到满足.

3.2 方系统

取 Shell benchmark 输入输出传递函数矩阵模型作为 3×3 方系统过程进行仿真, 该过程的数学模型为

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{4.05e^{-27s}}{50s+1} & \frac{1.77e^{-28s}}{60s+1} & \frac{5.88e^{-27s}}{50s+1} \\ \frac{5.39e^{-18s}}{50s+1} & \frac{5.72e^{-14s}}{60s+1} & \frac{6.90e^{-15s}}{40s+1} \\ \frac{4.38e^{-20s}}{33s+1} & \frac{4.42e^{-22s}}{44s+1} & \frac{7.20}{19s+1} \end{bmatrix}$$

设置稳态优化控制输入变量代价系数分别为 $(-2, -1, 2)$, 稳态优化的计算结果为 $\mathbf{y}_{ss} = [-0.5, 0.5, -0.4269]$, $\mathbf{u}_{ss} = [0.5, 0.2108, -0.4929]$. 常规预测控制和集成控制输入目标预测控制的仿真结果对比如表 2 所示. 当被控对象为方系统时, 常规预测控制算法与集成控制输入的预测控制系统稳态解的相容性和唯一性都得到满足.

3.3 瘦系统

取 Shell benchmark 输入输出传递函数矩阵模

型中的第 1 列和第 2 列作为 2×3 瘦系统过程进行仿真, 该过程的数学模型为

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{4.05e^{-27s}}{50s+1} & \frac{1.77e^{-28s}}{60s+1} \\ \frac{5.39e^{-18s}}{50s+1} & \frac{5.72e^{-14s}}{60s+1} \\ \frac{4.38e^{-20s}}{33s+1} & \frac{4.42e^{-22s}}{44s+1} \end{bmatrix}$$

设置稳态优化控制输入变量代价系数分别为 $(-2, -1)$, 稳态优化的计算结果是 $\mathbf{y}_{ss} = [0.5, 0.5, 0.4175]$, $\mathbf{u}_{ss} = [0.1450, -0.0492]$. 常规预测控制和集成控制输入目标预测控制的仿真结果对比如表 3 所示.

仿真结果与之前的分析完全一致, 瘦系统无需使用集成控制输入目标的预测控制算法即可保证稳态解的相容性和唯一性.

3.4 模型失配

以方系统为仿真对象进行模型失配研究. 约束条件与优化参数均保持不变, 可知系统的最优稳态

表 1 常规预测控制和集成控制输入目标预测控制的稳态值 (胖系统)

Table 1 Steady state values of traditional MPC and MPC integrated with input target for fat system case

控制算法	控制器参数	u_1 稳态值	u_2 稳态值	u_3 稳态值	y_1 稳态值	y_2 稳态值
常规预测控制	输出权系数均为 5	0.5000	0.3905	0.1560	-0.5000	0.5000
常规预测控制	输出权系数均为 0.5	0.4927	0.3852	0.1385	-0.5000	0.5000
集成输入目标预测控制	输出权系数均为 5	0.5000	0.2107	-0.4931	-0.5000	0.5000
集成输入目标预测控制	输出权系数均为 0.5	0.5000	0.2107	-0.4931	-0.5000	0.5000

表 2 常规预测控制和集成控制输入目标预测控制的稳态值 (方系统)

Table 2 Steady state values of traditional MPC and MPC integrated with input target for square system case

控制算法	控制器参数	u_1 稳态值	u_2 稳态值	u_3 稳态值	y_1 稳态值	y_2 稳态值	y_3 稳态值
常规预测控制	输出权系数均为 5	0.5000	0.2131	-0.4939	-0.5022	0.5001	-0.4245
常规预测控制	输出权系数均为 0.5	0.5000	0.2132	-0.4940	-0.5027	0.4996	-0.4250
集成输入目标预测控制	输出权系数均为 5	0.5000	0.2120	-0.4937	-0.5017	0.4998	-0.4244
集成输入目标预测控制	输出权系数均为 0.5	0.5000	0.2124	-0.4935	-0.5011	0.4988	-0.4248

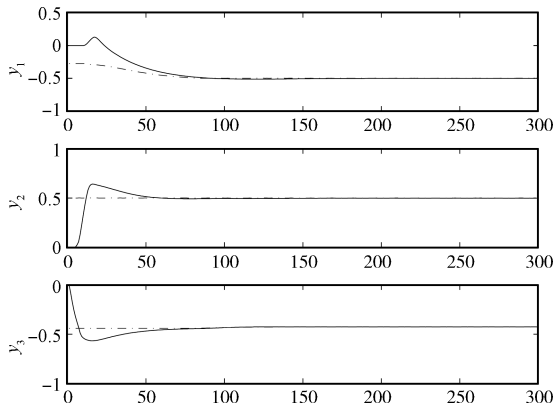
表 3 常规预测控制和集成控制输入目标预测控制的稳态值 (瘦系统)

Table 3 Steady state values of traditional MPC and MPC integrated with input target for thin system case

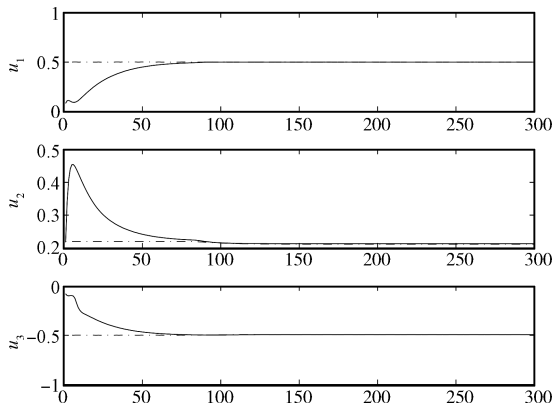
控制算法	控制器参数	u_1 稳态值	u_2 稳态值	y_1 稳态值	y_2 稳态值	y_3 稳态值
常规预测控制	输出权系数均为 5	0.1451	-0.0494	0.5000	0.5000	0.4176
常规预测控制	输出权系数均为 0.5	0.1451	-0.0494	0.5000	0.5000	0.4176
集成输入目标预测控制	输出权系数均为 5	0.1451	-0.0493	0.4999	0.5000	0.4176
集成输入目标预测控制	输出权系数均为 0.5	0.1451	-0.0493	0.4999	0.5000	0.4176

点为 $\mathbf{y}_{ss} = [-0.5, 0.5, -0.4269]$, $\mathbf{u}_{ss} = [0.5, 0.2108, -0.4929]$. 为模拟模型失配, 将控制器模型中 G_{11} 的稳态增益系数修改, 分别针对控制器模型增益变大与变小两种情况讨论.

将控制器中的稳态增益系数由 4.05 修改为 4.55. 权系数分别为 $Q = [10, 2, 60]$, $R = [70, 70, 70]$, $V = [10, 10, 10]$. 此时, 控制器计算出的最优输出稳态操作点为 $[-0.5, 0.5, -0.4271]$, 最优输入稳态操作点为 $[0.5, 0.2109, -0.4930]$. 系统输入输出效果如图 7 所示 (点划线为稳态目标, 实线为真实值).



(a) 控制器模型 G_{11} 稳态增益为 4.55 时, 系统输出曲线
(a) The output responses when the steady state gain of G_{11} in controller model is 4.55



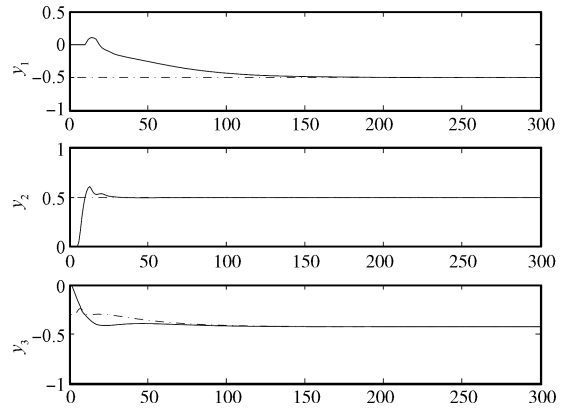
(b) 控制器模型 G_{11} 稳态增益为 4.55 时, 系统输入曲线
(b) The input signals when the steady state gain of G_{11} in controller model is 4.55

图 7 控制器模型 G_{11} 稳态增益为 4.55 时, 系统输入输出曲线

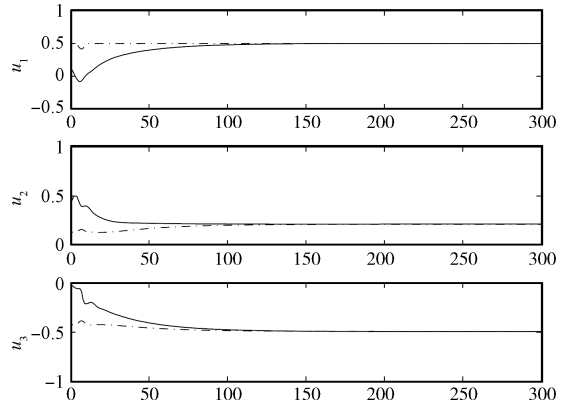
Fig. 7 The input and output responses when the steady state gain of G_{11} in controller model is 4.55

将控制器中的稳态增益系数由 4.05 修改为 3.55. 权系数分别为 $Q = [1, 10, 50]$, $R = [10, 10, 10]$, $V = [10, 10, 10]$. 此时, 控制器计算出的最优输出稳态操作点为 $[-0.5, 0.5, -0.4268]$, 最优输入稳态操作点为 $[0.5, 0.2107, -0.4928]$. 系统输入

输出效果如图 8 所示 (点划线为稳态目标, 实线为真实值).



(a) 控制器模型 G_{11} 稳态增益为 3.55 时, 系统输出曲线
(a) The output responses when the steady state gain of G_{11} in controller model is 3.55



(b) 控制器模型 G_{11} 稳态增益为 3.55 时, 系统输入曲线
(b) The input signals when the steady state gain of G_{11} in controller model is 3.55

图 8 控制器模型 G_{11} 稳态增益为 3.55 时, 系统输入输出曲线

Fig. 8 The input and output responses when the steady state gain of G_{11} in controller model is 3.55

从图 7 和图 8 中可以看出, 在出现模型不匹配的情况时稳态工作点较之标称情况将发生一定的变化. 注意到输出对应的输出稳态目标以及三个控制输入的稳态目标在控制过程的初始阶段是时变的, 这是偏差修正项起作用后产生的结果. 动态控制层实现了稳态工作点的完全跟踪. 说明双层结构预测控制对模型的失配具有一定的鲁棒性, 验证了第 3.3 节中的结论.

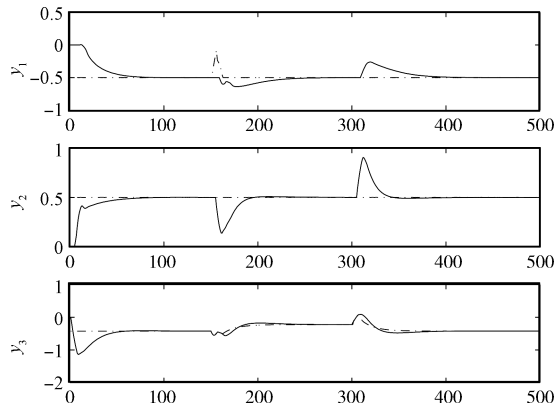
3.5 不可测扰动

以方系统为例, 约束边界以及优化代价与前述方系统相同, 权系数 Q, R, V 均为 1. 假设不可测扰

动的数学模型为

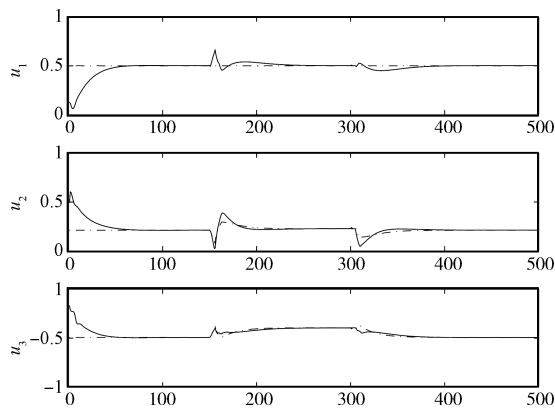
$$G_F(s) = \begin{bmatrix} \frac{1.20e^{-27s}}{45s+1} & \frac{1.52e^{-15s}}{25s+1} & \frac{1.14}{27s+1} \end{bmatrix}$$

不可测扰动存在下的仿真过程如下: $k = 0$ 时刻, 投入双层结构预测控制器; 在 $k = 150$ 时刻, 增加幅值为 0.5 的阶跃扰动; $k = 300$ 时刻扰动消失. 控制效果如图 9 所示 (点划线为稳态目标, 实线为真实值).



(a) 存在不可测扰动情况下的系统输出曲线

(a) The output responses when there exists an unmeasured disturbance



(b) 存在不可测扰动情况下的系统输入曲线

(b) The input signals when there exists an unmeasured disturbance

图 9 存在不可测扰动情况下的系统输入输出曲线

Fig. 9 The input and output responses when there exist unmeasured disturbance

可以看出, 上层稳态优化能够通过稳态误差修正项及时对扰动做出处理, 计算出扰动存在时的最优稳态操作点, 最终通过动态控制层实现平稳跟踪控制, 有效抑制了不可测扰动产生的影响, 实现了无静差控制.

4 结论

常规多变量预测控制算法的目标函数只包含输出设定值目标, 无法有效体现多变量控制系统内部

的因果关系, 随意给定输出设定点可能导致瘦系统的稳态解出现输出静差问题; 对于控制输入个数多于被控输出的胖系统, 被控输出的设定值目标通常可以达到, 但控制输入的稳态值可能随控制系统参数的改变而改变从而产生不确定问题. 本文使用非齐次线性方程组的判定定理找到了输出静差和输入稳态解不确定问题产生的原因, 分别从系统稳态和动态的角度提出方案, 形成了完整的双层结构预测控制策略, 确保了非方系统稳态解的相容性和唯一性, 实现了多变量预测控制在处理方系统和非方系统方法上的统一.

References

- 1 Culter C R, Yocum F H. Experience with the DMC inverse for identification. In: Proceedings of the 4th International Conference on Chemical Process Control. Amsterdam TX, 1991. 297–317
- 2 Richalet J, Rault A, Testud J L, Papon J. Model predictive heuristic control: applications to industrial processes. *Automatica*, 1978, **14**(5): 413–428
- 3 Clarke D W, Mohtadi C, Tuffs P S. Generalized predictive control, Part I: the basic algorithm. *Automatica*, 1987, **23**(2): 137–148
- 4 Darby M L, Nikolaou M. MPC: current practice and challenges. *Control Engineering Practice*, 2012, **20**(4): 328–342
- 5 Scattolini R. Architectures for distributed and hierarchical model predictive control – a review. *Journal of Process Control*, 2009, **19**(5): 723–731
- 6 Adetola V, Guay M. Integration of real-time optimization and model predictive control. *Journal of Process Control*, 2010, **20**(2): 125–133
- 7 Xi Yu-Geng. Satisfactory control of complex industrial process. *Information and Control*, 1995, **24**(1): 14–20 (席裕庚. 复杂工业过程的满意控制. 信息与控制, 1995, **24**(1): 14–20)
- 8 Kwakernaak H, Sivan R. *Linear Optimal Control Systems*. New York: Wiley Interscience, 1972
- 9 Qian Ji-Xin, Zhao Jun, Xu Zu-Hua. *Predictive Control*. Beijing: Chemical Industrial Press, 2007. 3–7 (钱积新, 赵均, 徐祖华. 预测控制. 北京: 化学工业出版社, 2007. 3–7)
- 10 Kassmann D E, Badgwell T A, Hawkins R B. Robust steady-state target calculation for model predictive control. *AIChE Journal*, 2000, **46**(5): 1007–1024
- 11 Rao C V, Rawlings J B. Steady states and constraints in model predictive control. *AIChE Journal*, 1999, **45**(6): 1266–1278
- 12 Ying C M, Joseph B. Performance and stability analysis of LP-MPC and QP-MPC cascade control systems. *AIChE Journal*, 1999, **45**(7): 1521–1533

- 13 Muske K R. Steady-state target optimization in linear model predictive control. In: Proceedings of the 1997 American Control Conference. Albuquerque, NM: IEEE, 1997, **6**: 3597–3601
- 14 Lu J Z. Challenging control problems and emerging technologies in enterprise optimization. *Control Engineering Practice*, 2003, **11**(8): 847–858
- 15 Nikanrov A, Swartz C L E. Sensitivity analysis of LP-MPC cascade control systems. *Journal of Process Control*, 2009, **19**(1): 16–24
- 16 Zou Tao, Li Hai-Qiang. Two-layer predictive control of multi-variable system with integrating element. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2011, **45**(12): 2079–2087
(邹涛, 李海强. 具有积分环节多变量系统的双层结构预测控制. 浙江大学学报(工学版), 2011, **45**(12): 2079–2087)
- 17 Zou Tao, Ding Bao-Cang, Zhang Duan. *Model Predictive Control Engineering Application Introduction*. Beijing: Chemical Industrial Press, 2010. 69–83
(邹涛, 丁宝苍, 张端. 模型预测控制工程应用导论. 北京: 化学工业出版社, 2010. 69–83)
- 18 Mayne D Q, Rawlings J B, Rao C V, Sokaert P O M. Constrained model predictive control: stability and optimality. *Automatica*, 2000, **36**(6): 789–814
- 19 Prett D M, Garcia C E. *Fundamental Process Control*. Boston: Butterworths-Heinemann, 1988



邹涛 中国科学院沈阳自动化研究所副研究员. 主要研究方向为工业过程实时优化与模型预测控制. 本文通信作者.
E-mail: zoutao@sia.cn
(**ZOU Tao** Associate professor at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research

interest covers real time optimization of industrial process and model predictive control. Corresponding author of this paper.)

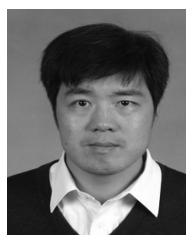


李海强 浙江工业大学信息工程学院硕士研究生, 浙大中控软件技术有限公司先进控制研发工程师. 主要研究方向为工业过程的双层结构预测控制.

E-mail: lihaiqiang@supcon.com

(**LI Hai-Qiang** Master student at the College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology,

APC R & D engineer at Supconsoft Tech Ltd.. His research interest covers two-layered predictive control for industrial process.)



丁宝苍 西安交通大学教授. 主要研究方向为预测控制, 模糊控制及其在过程系统中的应用.

E-mail: baocang.ding@gmail.com

(**DING Bao-Cang** Professor at Xi'an Jiaotong University. His research interest covers model predictive control, fuzzy control, and its application in process control.)



王丁丁 浙江工业大学信息工程学院硕士研究生. 主要研究方向为工业过程的双层结构预测控制.

E-mail: wangdingdingwdd@gmail.com

(**WANG Ding-Ding** Master student at the College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology. His research interest covers

two-layered predictive control for industrial process.)