

双层结构预测控制研究进展

邹涛^{1,2†}, 潘昊^{1,2}, 丁宝苍³, 于海斌^{1,2}

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所 信息服务与智能控制研究室, 辽宁 沈阳 110016;

2. 中国科学院网络化控制系统重点实验室, 辽宁 沈阳 110016; 3. 西安交通大学 电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 现代工业大系统的优化控制采用递阶结构, 其中以预测控制为代表的先进过程控制已经成为重要的一级. 目前, 主流的工业预测控制技术均采用双层结构, 即包含稳态优化层和动态控制层. 双层结构预测控制技术可以有效解决复杂工业过程常见的多目标优化、多变量控制的难点问题. 本文简要总结了双层结构预测控制的算法, 并从控制输入与被控输出稳态关系入手分析了多变量预测控制稳态解的相容性和唯一性, 说明了稳态优化的重要性. 针对双层结构预测控制与区间预测控制的性能比较、稳态模型的奇异性以及闭环系统动态特性等提出了一些见解, 并指出了需要重点研究的主题.

关键词: 模型预测控制; 双层结构; 积分过程; 稳态分析; 奇异性

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Research development of two-layered predictive control

ZOU Tao^{1,2†}, PAN Hao^{1,2}, DING Bao-cang³, YU Hai-bin^{1,2}

(1. Institute of Information Service and Intelligent Control, Shenyang Institute of Automation,
Chinese Academy of Science, Shenyang Liaoning 110016, China;

2. Key Laboratory of Networked Control System, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning 110016, China;

3. School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China)

Abstract: Modern large-scale industrial control, systems adopt hierarchical structures, where the advanced process control, with model predictive control (MPC) as its representative, has been an important level. The two-layered structure, i.e., the steady state optimization plus and the dynamic control layer, is dominant in the industrial MPC technology. The two-layered MPC can effectively handle the multi-objective optimization and multi-variable control problems in the complex processes. The algorithm of two-layered MPC is briefly summarized. The compatibility and uniqueness of the steady state solutions for the multi-variable MPC are analyzed based on the steady-state relationship between the control inputs and the controlled outputs, demonstrating the importance of the steady state optimization. Viewpoints are presented on issues such as performance comparisons between two-layered MPC and zone MPC, the singularity of the steady-state model, and the dynamics of the closed-loop system. Topics requiring further researches are pointed out.

Key words: model predictive control; two-layered structure; integrating process; steady-state analysis; singularity

1 引言(Introduction)

模型预测控制(model predictive control, MPC)是一种基于模型的控制算法的总称. 早期, MPC以不同的算法形式出现, 例如动态矩阵控制(dynamic matrix control, DMC)^[1]、模型算法控制(model algorithmic control, MAC)^[2]、广义预测控制(generalized predictive control, GPC)^[3-5]. 随着预测控制理论的深入研究, 工程技术的不断进步, 预测控制的算法描述呈现出融合的趋势, 不再拘泥于某一种特定的算法形式. MPC算法已经在流程行业取得了显著的应用效果, 而其理论研究方面也取得了长足的进步, 但总体上讲,

MPC的理论研究滞后于技术的发展, 近来学术界越来越关注于其科学内涵方面的研究^[6-7].

目前过程工业普遍地采用了直接以MPC为核心的分层递阶控制方案^[7], 上层为实时优化(real time optimization, RTO)层, 中间层为MPC, 底层为PID(proportion-integral-derivative)等基础控制层. 以RTO为代表的全局优化通过设定点的优化实现了产品质量的提高和成本的降低, 而常规的MPC并未涉及设定点的设计问题^[8], 故无法满足这种需求. 双层结构预测控制是近期出现的、以弥补单层结构MPC不足的一种新型MPC控制结构, 已被主流的预测控制技术所采

用^[9-11].它在常规MPC动态控制层上添加了一层稳态优化(steady state optimization, SSO)功能,具体实现时以线性规划(linear programming, LP)或者二次规划(quadratic programming, QP)标准问题出现.有时也被称为LP-MPC或QP-MPC^[12-13].稳态优化最主要的功能就是基于过程稳态数学模型进行设定点的自动寻优,替代了工程技术人员基于个人经验的设定点给定方法.在每一个控制周期,稳态优化层负责设定点的优化计算,下层MPC负责对最优设定点进行动态跟踪控制,从而解决了设定点的设计问题.双层结构中的稳态优化层一方面可以实现对RTO计算结果的渐近跟踪,另一方面也可以实现MPC所对应过程的局部经济优化^[9-10].

从应用层面上讲,控制系统的结构越简单越好,但是用户对控制系统的要求却是复杂多样的.实践中,工程技术人员对多变量预测控制提出了很多要求,例如,某个变量要最大化、某个变量要最小化、某个变量要保持在一一定的约束范围内等,一般地,这类问题将归结为一个多目标优化问题.多目标优化问题的求解都非常困难,且通用性和一致性难以掌握.将复杂生产过程的多目标优化问题归结为双层结构预测控制中的多级单目标稳态优化是一个简单、有效的方法.各类优化操作问题通过变换可以分别设定为目标函数或约束条件,形成LP或QP问题.尽管这种方法相对原始问题的最优解可能退化,但其解往往是工程上可接受的.优化问题的建立与求解都变得非常简洁、规范,将问题的描述与设计权力留给了项目实施人员.目前,在双层结构预测控制理论研究方面取得了较多的成果.文献[9]将过程模型的不确定性引入到预测控制的稳态优化中去,形成一个一阶锥规划问题.文献[10]针对稳态优化转化为LP问题、当多输入单输出(multi-input single-output, MISO)以及多输入多输出(multi-input multi-output, MIMO)系统中存在模型不确定性的情形时进行灵敏度分析,以此为据对双层结构预测控制的性能进行了评估.文献[14]针对稳态优化的可行性问题,提出了基于优先级的可行性判定与软约束调整策略.文献[15]分析了由状态估计器、稳态优化、动态控制器组成的无静差线性MPC,分析了双层结构的动态稳定性.文献[16]研究了双层结构预测控制约束条件的退避机制选择问题,由此给出了约束调整的规则.文献[17]提出了基于状态空间模型的稳态目标优化方法,并在此基础上设计了一个通用的扰动模型来提高控制系统的扰动抑制能力.文献[18]使用稳态目标计算消除扰动估计的影响.文献[19]提出了一种带双层结构性质的区间预测控制算法(model predictive range control, MPRC),具有工作点变迁和经济优化的功能.稳态优化属于一类过程优化,可行性是其中最重要的问题.

文献[20]将优化的可行性问题归结为有约束多目标多自由度优化(constrained multi-objective multi-degree of freedom optimization, CMMO)问题,文献[21]将CMMO的可行性问题规范成一线性规划问题.

为了在动态变化的情况下寻找到最佳的工艺设定值,双层结构预测控制增加了稳态优化层,这是双层结构预测控制在功能上的主要优势.随着研究的深入,作者发现双层结构预测控制不仅在算法与功能上有所提升,而且还使作者对预测控制这种控制技术有了更深层次的理解^[22].本文将结合本文作者几年来的研究工作从算法设计、理论分析、思考与展望等几个方面对双层结构预测控制进行论述.

本文主要符号如下:

c : 控制输入变量的代价因子; e_k : 误差修正量;

K : 过程的稳态增益矩阵; \mathbb{R}^n : n 维欧氏空间;

$\mathbf{u}(\mathbf{y})$: 控制输入变量, $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$ (被控输出变量, $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^p$);

$\mathbf{u}_s(k)(\mathbf{y}_s(k))$: 控制输入稳态值(被控输出稳态值);

$\Delta \mathbf{u}_s(k)(\Delta \mathbf{y}_s(k))$: 控制输入稳态值增量(被控输出稳态值增量);

$\mathbf{u}_{LL}(\mathbf{y}_{LL})$: 控制输入变量的下限(被控输出变量的下限);

$\mathbf{u}_{HL}(\mathbf{y}_{HL})$: 控制输入变量的上限(被控输出变量的上限);

$\mathbf{u}_T(\mathbf{y}_T)$: 控制输入期望稳态目标(被控输出变量的期望稳态目标);

$\mathbf{u}_{T \min}(\mathbf{y}_{T \min})$: 控制输入期望稳态目标最小值(被控输出变量最小值);

$\mathbf{u}_{T \max}(\mathbf{y}_{T \max})$: 控制输入期望稳态目标最大值(被控输出变量最大值);

\mathbf{y}_{LLL} : 被控输出变量的下下限;

\mathbf{y}_{HHL} : 被控输出变量的上上限;

W : 被控输出变量稳态优化不可行时软约束调整权系数;

Q : 被控输出变量设定点控制权系数矩阵;

\bar{Q} : 目标跟踪问题稳态优化输出目标的权系数矩阵;

R : 控制输入变量动态响应权系数矩阵;

\bar{R} : 目标跟踪问题稳态优化输入目标的权系数矩阵;

V : 控制输入变量设定点控制权系数矩阵.

2 双层结构模型预测控制算法(Two-layered model predictive control)

本小节首先给出双层结构预测控制的架构原理图,之后分别针对稳定过程、积分过程给出相应的双层结

构预测控制算法, 最后将之推广到工业大系统.

2.1 双层结构预测控制算法的系统架构(Structure of two-layered predictive control)

简单地说, 双层结构预测控制就是在常规预测控制之上增加了一个稳态优化层. 文献[23]在介绍 AspenTech 公司推出的新一代状态空间控制器时给出了双层结构预测控制算法的系统架构原理, 见图 1. 较之传统的单层预测控制, 双层结构预测控制在系统架构上中增加了稳态优化这一功能块. 该功能模块的输入参数包括外部目标、优化输入参数和输出反馈项. 其中, 外部目标可以来自 RTO 的计算结果或者是操作人员的经验给定, 此时稳态优化的目的是实现对 RTO 计算目标的跟踪, 作者将这类优化操作模式称之为稳态优化的目标跟踪模式. 如无外部目标给定, 稳态优化可根据优化输入参数在自身约束空间范围内进行面向经济性能指标的优化, 作者将这类优化操作模式称之为稳态优化的经济优化模式. 在应用中, 可根据实际情况设置外部目标选项来决定一个预测控制应用的稳态优化处于何种操作模式.

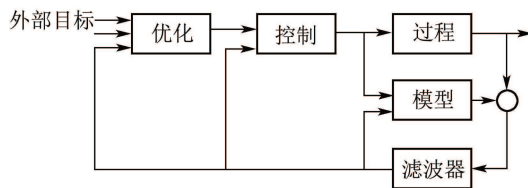


图 1 双层结构模型预测控制的系统结构框图

Fig. 1 Structure of double-layered predictive control

图 1 中的“模型”的功能是基于已经建立好的数学模型进行输出预测, 既包含稳态预测也包括动态预测. “优化”指稳态优化, 其功能是动态地进行最优工作点的计算并传递给“控制”模块; “控制”指预测控制, 其功能主要是跟踪设定值; 这里, “滤波器”指 Kalman 滤波, 因为文献[23]所提出的控制器是一种基于状态空间模型的双层结构预测控制器, 如果使用输入输出模型则“滤波器”的作用就是一般的低通滤波器了. 需要说明, 图 1 所示的优化控制结构是时间驱动的, “模型”、“滤波器”、“优化”、“控制”按照固定的周期运行.

下面, 结合双层结构预测控制的框架原理图给出双层结构预测控制的具体执行步骤:

步骤 1 初始化. 双层结构预测控制启动后, 首先要进行初始化操作, 通过 OPC 等通讯技术从分布式控制系统(distributed control system, DCS)读入当前时刻的控制输入、被控输出和扰动信号, 其中, 控制输入与被控输出的数值作为稳态初始值保存在内存中. 双层结构预测控制的各项参数由操作人员人工给定, 包括控制输入变量的代价因子, 输入输出变量的约束条件等.

步骤 2 周期性地执行稳态优化与动态控制功能. 具体地,

步骤 2.1 通过 OPC 通讯得到控制输入、被控输出与扰动信号的即时值;

步骤 2.2 稳态优化模块使用过程输出信号计算预测误差, 结合内存中存储的输入、输出变量的稳态值进行稳态优化, 例如求解本文中所述的稳态优化问题. 使用当前时刻的优化控制结果对内存中的输入、输出的稳态值更新. 将控制输入的稳态值、开环稳定过程的输出稳态值作为设定点下传至动态控制模块.

步骤 2.3 动态控制模块通过得到的控制输入、被控输出与扰动信号的即时值进行动态预测, 进行控制计算, 并将控制输入结果下传至 DCS 控制系统执行.

需要指出, 一般情况下双层结构预测控制要在系统处于稳定的情况下启动.

2.2 稳态过程的双层结构预测控制(Two-layered model predictive control for steady state process)

2.2.1 稳态过程描述(Description of steady state process)

考虑线性时不变开环稳定系统, 其表征动态特性的传递函数模型为

$$y(s) = G(s)u(s). \quad (1)$$

其稳态模型为

$$\Delta y_s(s) = K \Delta u_s(k), \quad (2)$$

其中 K 是过程稳态增益, 控制输入和被控输出在稳态时受到的约束为

$$\begin{aligned} u_{LL} \leq u_s(k) \leq u_{HL}, \quad k \geq 0. \\ y_{LL} \leq y_s(k) \leq y_{HL}, \end{aligned}$$

在稳态优化中涉及硬约束和软约束的概念. 硬约束主要针对控制输入而言, 其通常取决于控制输入的物理限制, 如阀门的开度等. 软约束则主要针对被控输出而言, 主要考虑的是质量指标和经济性能等因素. 一般来说, 如果稳态优化出现不可行, 输出变量的约束可以允许在一定程度上放松, 例如, 由 $y_{HL}(y_{LL})$ 放松至 $y_{HHL}(y_{LLL})$, $y_{HHL}(y_{LLL})$ 则是输出变量的硬约束. 而且, 对于存在若干个输出变量的多变量系统, 每个输出的重要性是不一样的, 需要按照优先级次序依次进行软约束调整.

2.2.2 稳态优化算法描述(Description of steady state optimization algorithm)

考虑被控过程的输入输出约束条件, 稳态优化问题可描述为面向经济指标的一个线性规划(LP)问题

$$\begin{cases} \min_{\Delta \mathbf{u}_s(k)} J = \mathbf{c}^T \Delta \mathbf{u}_s, \\ \text{s.t. } \Delta \mathbf{y}_s(k) = K \Delta \mathbf{u}_s(k) + \mathbf{e}_k, \\ \mathbf{u}_{LL} \leq \mathbf{u}_s(k-1) + \Delta \mathbf{u}_s(k) \leq \mathbf{u}_{HL}, \\ \mathbf{y}_{LL} \leq \mathbf{y}_s(k-1) + \Delta \mathbf{y}_s(k) \leq \mathbf{y}_{HL}, \end{cases} \quad (3)$$

其中 \mathbf{e}_k 可根据过程的动态预测误差计算得出, 即

$$\mathbf{e}_k = \mathbf{y}_k - \tilde{\mathbf{y}}(k|k-1), \quad (4)$$

其中: \mathbf{y}_k 为 k 时刻输出测量值, $\tilde{\mathbf{y}}(k|k-1)$ 为 $k-1$ 时刻得到的 k 时刻输出预测值.

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

$$\begin{cases} \min_{\Delta \mathbf{U}(k)} J = (\|\mathbf{y}_s(k) - \mathbf{y}_T\|_Q^2 + \|\mathbf{u}_s(k) - \mathbf{u}_T\|_R^2), \\ \text{s.t. } \Delta \mathbf{y}_s(k) = K \Delta \mathbf{u}_s(k) + \mathbf{e}(k), \\ \mathbf{u}_{T \min} \leq \mathbf{u}_s(k-1) + \Delta \mathbf{u}_s(k-1) \leq \mathbf{u}_{T \max}, \\ \mathbf{y}_{T \min} \leq \mathbf{y}_{ss, k-1} + \Delta \mathbf{y}_{ss} \leq \mathbf{y}_{T \max}. \end{cases} \quad (5)$$

该目标函数的含义: 在系统初始稳定状态 $(\mathbf{u}_0, \mathbf{y}_0)$ 下寻找稳态工作点 $(\mathbf{u}_s, \mathbf{y}_s)$ 使之与 $(\mathbf{u}_T, \mathbf{y}_T)$ 在最小二乘意义下距离最短.

双层结构预测控制稳态算法的详细设计及其说明请参见文献[23, 27].

2.2.3 稳态优化的可行性(Feasibility of steady state optimization)

稳态优化问题的最优解需要满足输入输出约束条件, 因此必然存在优化可行性问题. 文献[18]中给出了优化求解的两阶段方法. 该方法将优化求解分解为可行性和最优化两个阶段:

可行性阶段: 如果可行解不存在, 则放松输出变量约束边界. 根据输出变量的重要性可设置优先级, 依据优先级顺序, 依次地进行可行性判定与软约束调整.

最优化阶段: 如果存在可行空间, 则根据目标函数信息选择最优的可行解.

2.2.4 集成稳态目标的预测控制算法(Predictive control algorithm with input targets)

经稳态优化模块计算得到的被控过程最佳工作点将被下传至“控制模块”实施. 双层结构预测控制稳态优化的计算结果包括两部分: 控制输入稳态目标和被控输出稳态目标. 需要指出, 在双层结构预测控制的框架下需要将控制输入的稳态目标值的惩罚项加入到常规的预测控制目标函数中去, 形成如下形式的控制目标函数中:

$$J(k) = \|\mathbf{w}(k) - \tilde{\mathbf{y}}_{PM}(k)\|_Q^2 + \|\mathbf{u}(k) - \mathbf{u}_{ss}(k)\|_V^2 + \|\Delta \mathbf{u}_M(k)\|_R^2. \quad (6)$$

之所以选择这种类型的目标函数有它的理论基础, 将

在本文第3小节予以阐述.

预测控制的模型预测、反馈校正同常规的预测控制没有明显区别, 本文就该问题不再赘述. 由于稳态优化方法中显式地考虑了系统的约束条件, 因此在双层结构预测控制中可以直接采用无约束预测控制算法, 为避免调节过程中出现超调, 可以增加控制输入变量增量的权系数.

2.3 积分过程的双层结构预测控制(Two-layered model predictive control for integrating process)

2.3.1 积分过程描述(Description of integrating process)

考虑包含积分输出的多变量过程, 其数学描述形式如式(1), 即

$$\mathbf{y}(s) = G(s)\mathbf{u}(s).$$

包含积分环节的多变量控制系统通常具有一个或一个以上积分输出变量以及若干个稳态输出变量, 很多时候其动态特性可使用如下的一阶惯性加纯滞后模型和纯积分算子的组合进行表示. 假设系统输入输出维数为 $m \times n$, 第 r 行为积分输出, 可得到 $G(s)$ 如下:

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{k_{11}}{T_{11}s+1} e^{-\tau_{11}s} & \cdots & \frac{k_{1n}}{T_{1n}s+1} e^{-\tau_{1n}s} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{k_{(r-1)1}}{T_{(r-1)1}s+1} e^{-\tau_{(r-1)1}s} & \cdots & \frac{k_{(r-1)n}}{T_{(r-1)n}s+1} e^{-\tau_{(r-1)n}s} \\ \frac{k_{r1}}{s(T_{r1}s+1)} e^{-\tau_{r1}s} & \cdots & \frac{k_{rn}}{s(T_{rn}s+1)} e^{-\tau_{rn}s} \\ \frac{k_{(r+1)1}}{T_{(r+1)1}s+1} e^{-\tau_{(r+1)1}s} & \cdots & \frac{k_{(r+1)n}}{T_{(r+1)n}s+1} e^{-\tau_{(r+1)n}s} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{k_{m1}}{T_{m1}s+1} e^{-\tau_{m1}s} & \cdots & \frac{k_{mn}}{T_{mn}s+1} e^{-\tau_{mn}s} \end{bmatrix}.$$

输出变量中可能包含稳态变量也可能包含积分变量, 为区分稳态变量和积分变量将式(1)重新写为

$$\mathbf{y}^s(s) = G^s(s)\mathbf{u}(s), \quad (7a)$$

$$\mathbf{y}^r(s) = G^r(s)\mathbf{u}(s), \quad (7b)$$

式中: 上角标 s 表示该变量为稳态变量; 上角标 r 表示该变量是积分变量.

对动态数学模型7(a)采用终值定理可得到过程的稳态数学模型

$$\Delta \mathbf{y}_s^s(k) = K^s \Delta \mathbf{u}_s(k). \quad (8)$$

显然, 式(8)(2)尽管符号表示上有所区别, 但意义完全一致. 但是, 若对积分过程7(b)使用终值定理可知增益为无穷大, 则无法进行优化.

为了解决积分过程的稳态优化, 文献[24]给出了解决方案, 接下来本文将介绍其主要思路.

图2是某一单输入单输出积分过程的阶跃响应曲线. 从图中可以看出积分过程的在阶跃输入下呈现单调上升(下降)趋势.

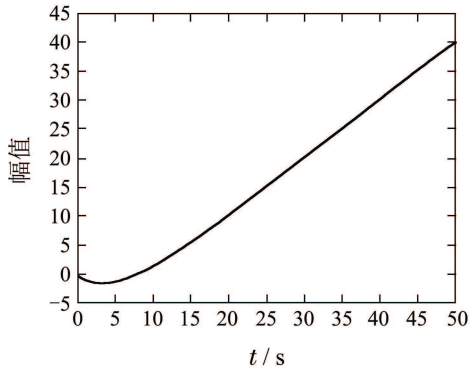


图 2 某一积分输出变量的单位阶跃输出响应
Fig. 2 Step response of an integrating process

假设某积分变量过程的传递函数为 $G(s) = 1/s$, 设计一闭环反馈控制系统. 不考虑约束情况下, 当设定值阶跃变化时, 使用纯比例控制($K_C = 1$)就可实现闭环控制. 控制系统输入输出仿真曲线如图3所示.

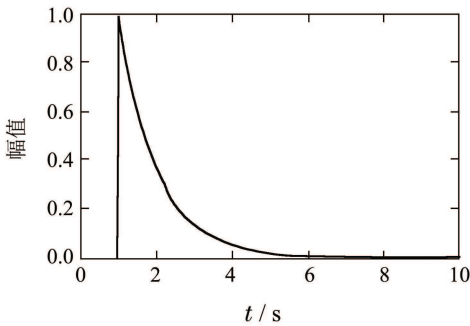


图 3(a) 控制输入曲线

Fig. 3(a) Curve of an control input

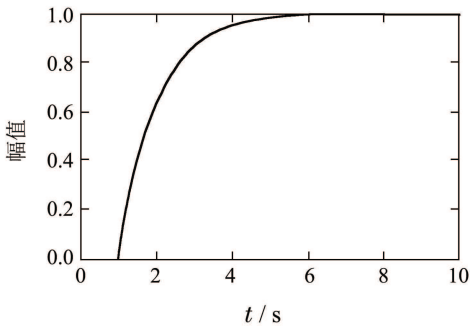


图 3(b) 输出曲线

Fig. 3(b) Curve of an controlled output

从图3中可以看出, 过程输出也成功实现了设定值的跟踪, 而控制输入经过一定的变化后又重新回到初始位置, 其中输入变量的动态变化反映出积分变量过程的内在特性. 可以这样解释: 由于过程输出是输入

的积分, 如果输入在稳态时不为“0”, 输出就将持续上升或下降. 当然, 这里的“0”是相对的, 在实际的过程中, 输入和输出将保持在合适的工作点上.

综上所述, 对于线性单输入单输出积分过程保持其输出稳定的一个必要条件是控制输入的稳态增量为零. 对于线性多输入多输出(仅包含一个积分输出), 其必要条件针对该输出变量使控制输入的综合作用为零, 具体分析过程详见文献[24]. 对于含有多个积分输出变量的更一般的多变量积分过程, 则是针对这些输出变量使控制输入的综合作用为零, 写成矩阵形式如下:

$$S_u^r \Delta u_s(k) = 0. \tag{9}$$

记 n_r 为过程中积分变量数目, $S_u^r \in \mathbb{R}^{n_r \times m}$ 为模型控制输入对输出稳态速率增益矩阵. 式(9)的含义在于要将所有的过程输入变量的叠加和置0. 为使式(9)更具一般性, 在式(9)的基础上引入了参量 $y_{\text{slope}}^r(k)$, 即为过程积分输出在时间点 N 处的斜率,

$$y_{\text{slope}}^r(k) + S_u^r \Delta u_s(k) = 0. \tag{10}$$

这样可以覆盖积分输出变量初始斜率不为零的情况.

式(10)可以保证积分过程的稳定, 在这个前提下, 借用DMC算法中建模时域 N 的概念实现积分输出变量在时间点 N 处的输出预测. 这里, 需要假定在建模时域 N 上该一阶积分过程已经具有如下特点: 其稳态分量的输出已经稳定, 积分分量输出的变化率保持不变, 图2中积分过程的阶跃响应曲线的变化规律反映了上述事实.

本文将建模时域 N 处的模型增益称为积分过程的“点”模型, 并认定在该点处系统进入了“临界稳态”. 沿用稳态变量过程的表示方法, 使用 K^r 来表示积分变量过程的“点”模型增益, 这样就得到积分变量过程在“临界稳态”点处的预测模型,

$$\Delta y_N^r(k) = K^r \Delta u(k), \tag{11}$$

其中下角标 N 为多变量过程的建模时域. 鉴于式(8)(11)形式上已经统一, 可将它们合并, 并引入校正误差, 得到

$$\Delta y_s(k) = K \Delta u_s(k) + e(k), \tag{12}$$

其中

$$\Delta y_s = (\Delta y_s^s, \Delta y_N^r)^T.$$

开环稳定过程的阶跃响应可以看作是由两部分组成: 动态部分和稳态部分, 以稳态时间这个参数为界, 在该时间点前输出响应随时间变化, 在该时间点后输出响应稳定不变, 即与时间无关. 积分过程的阶跃响应同样可以看成是由两部分动态特性组成, 且也是以稳态时间参数为界, 在稳态时间点前针对输入的变化呈现一定的动态响应, 稳态时间点后则呈现单调上升或下降的趋势(斜率恒定). 因此, 对比开环稳定过程和积

分过程,可知稳定性条件(10)实现了标称的积分过程在稳态时间点后的稳定不变(斜率为零),“点”模型(12)则实现了积分输出在稳态时间处的精确预测。

2.3.2 稳态优化算法描述(Description of steady state optimization)

多变量积分过程面向经济目标型的稳态优化问题的决策变量可以表述为若干个输入和输出稳态变量的线性组合,由于输入输出之间的稳态增益关系使得包含输出变量的目标函数都可以转化为如下的形式:

$$\begin{cases} \min_{\Delta \mathbf{u}_s(k)} J = \mathbf{c}^T \Delta \mathbf{u}_s(k), \\ \text{s.t. } \Delta \mathbf{y}_s(k) = K \Delta \mathbf{u}_s(k) + \mathbf{e}(k), \\ \mathbf{y}_{\text{slope}}^r(k) + S^r \Delta \mathbf{u}_s(k) = 0, \\ \mathbf{u}_{\text{LL}} \leq \mathbf{u}_s(k-1) + \Delta \mathbf{u}_s(k) \leq \mathbf{u}_{\text{HL}}, \\ \mathbf{y}_{\text{LL}} \leq \mathbf{y}_s(k-1) + \Delta \mathbf{y}_s(k) \leq \mathbf{y}_{\text{HL}}. \end{cases} \quad (13)$$

式(13)是一种在预测控制所处约束空间内面向经济性指标进行优化的问题描述。

$$\mathbf{y}_{\text{slope}}^r(k) + S_u^r \Delta \mathbf{u}_s(k) = 0$$

称为积分输出变量的稳定性条件,但在每一个计算周期内都要求保证积分输出变量的速率增益为零,是非常困难的.因而,出于工程方面的考虑,应容许部分时刻积分输出变量的稳态斜率不为零,从而提高优化的可行性.不为零的积分稳态斜率必须在后续的计算时刻予以补偿.可以采用如下的框图实现 $\mathbf{y}_{\text{slope}}^r(k)$ 的迭代计算。

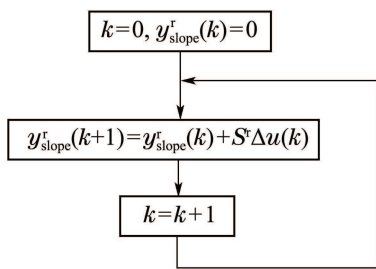


图4 积分输出变量的稳态斜率迭代计算方法

Fig. 4 Iterative computation algorithm for integral output's slope

相对于开环稳定过程的稳态优化,积分过程的稳态优化的实质在于积分稳定性条件的引入实现了由开环不稳定过程到闭环稳定过程的转化。

说明

1) 积分输出变量控制的核心是要平衡条件(10),为满足该平衡条件,相对于开环稳定变量,系统将损失一个自由度。

2) 点模型的功能是输出预测,积分输出变量本质上不易于稳定,所以其卡边将具有一定的风险性;另一方面,积分变量一般对应于罐、釜的液位,卡边操作不具备经济效益.通常针对积分输出需要给定设定点,该设定点一般位于该积分变量输出上限和下限的中间位置。

2.3.3 动态控制算法(Dynamic control algorithm)

由于一般的积分过程通常同时包含积分输出变量和稳态输出变量,文献[25]于1992年首先提出了适用于积分输出变量的DMC算法,文献[26]给出更详细的论证方法.本文将使用该方法处理积分输出变量,也就是在模型预测过程中使用如下的移位阵:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ & 0 & 1 & \dots & 0 \\ & & \ddots & \ddots & 0 \\ & & & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & \dots \end{bmatrix}_{N \times N}$$

2.3.4 多变量积分过程双层结构预测控制的反馈校正策略(Feedback strategy of two-layered predictive control for MIMO integrating process)

这里,将预测误差的积分性质引入到误差校正系数矩阵的设计过程.在一般多变量DMC算法中反馈校正环节中,通过误差校正矩阵 H 进行反馈校正^[2]. H 的定义如下:

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & h_{pp} \end{bmatrix}, h_{ii} = \begin{bmatrix} h_{ii}(1) \\ \vdots \\ h_{ii}(N) \end{bmatrix}, i = 1, \dots, p.$$

其中误差校正系数 $h_{ii}(1), \dots, h_{ii}(N)$ 均设为1。

对于积分输出变量,需要使用补偿因子 $\alpha(0 \leq \alpha \leq 1)$ 修正预测误差,对引起预测误差的不可测干扰部分的积分作用进行补偿.假设 $i = r$ 时,对应的输出变量为积分变量,则相应的误差校正系数向量为

$$\mathbf{h}_{rr} = (1, 1 + \alpha, 1 + 2\alpha, \dots, 1 + (N - 1)\alpha)^T.$$

该方法将预测误差划分为两部分:噪声引起的误差和不可测干扰引起的误差.噪声引起的误差是作用在输出端的加性误差,不可测扰动引起的误差要被积分算子所累积,随着预测时间的延续而不断增大,这是模型失配和存在不可测干扰情况下积分过程预测控制系统不易稳定的一个主要原因.根据预测误差产生的原因,对噪声引起的误差和不可测干扰引起的误差分别处理,将有助于提高积分过程控制系统输出预测的准确性,提高被控过程的稳定性。

2.3.5 积分过程优化与控制的难点问题(Difficult problems of optimization and control in integrating process)

尽管作者已经针对标称模型给出了积分过程的双层结构预测控制算法并提出了针对不可测干扰和模型失配时的误差校正方法,但这种方法具有一定的试

凑性质, 并没有从理论角度根本性地解决问题, 积分过程的双层结构预测在算法和理论有待进行深入的研究.

2.3.6 工业大系统的双层结构预测控制策略(Two-layered predictive control strategy for industrial large-scale systems)

预测控制是一种面向多变量工业过程的控制方法, 预测控制器的设计首先要确定需将哪些输入变量、哪些输出变量包含其中. 此外, 从优化的角度来看, 往往控制系统输入输出规模越大, 潜在的优化空间越大, 带来的效益也越显著. 但由于计算量以及实施上的困难, 实际应用中预测控制的规模也是有一定限制的. 如何在大系统的框架下提升控制系统的综合性能是一个非常值得研究的问题. 作者针对工业大系统提出了一种基于集中优化、分散控制的双层结构预测控制方法^[29]. 下面, 对该方法进行简要介绍.

假设系统有 m 个控制输入和 p 个被控输出, 其中 m 和 p 数值都很大. 面对如此规模工业系统的多变量控制问题, 工程上的解决方案是按照工艺的特点, 将某些控制输入输出变量划分为一组, 将大系统分解为多个相互独立的子系统, 整个系统由 n 个子系统Sub $_x$, $x = 1, \dots, n$ 构成, 如图5所示.

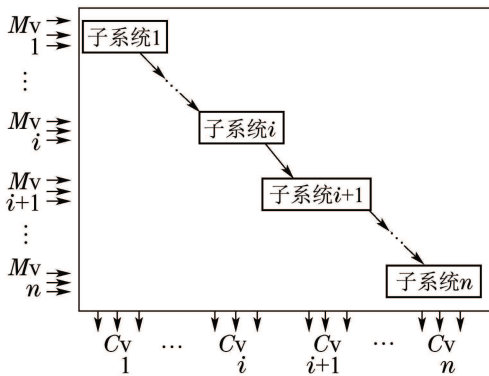


图 5 多个子系统组成的大系统

Fig. 5 Large-scale system composed by multi-subsystems

每个子控制器都是有各自的双层结构预测控制器. 这种策略如果设置得当也可以取得较好的控制效果, 且由于子控制器的规模较小, 其双层结构预测控制器的计算量是可接受的. 但是, 这种配置忽略了工业大系统上下游装置之间以及系统内在的作用关系, 无法进一步提升控制系统的性能.

为兼顾双层结构MPC在大系统优化控制中的全局性以及解决计算量过大问题, 文献^[29]提出了形成如图6所示的优化控制策略. 通过双层结构预测控制中的稳态优化器将各个子系统联系起来, 进行全局的稳态优化, 但控制作用的实施由各自子控制器分别完成.

说明 文中所提及的工业大系统双层结构预测控制策略理论上仅对纯串联系统能够保证其全局最优(动态)性能与

双层结构下的预测控制一致. 在工业过程中(尤其化工过程中)存在大量的循环回路, 关联在很多情况下是双向的, 或存在环路, 很多情况并非纯串联系统, 此时的最优性质将难以得到保证.

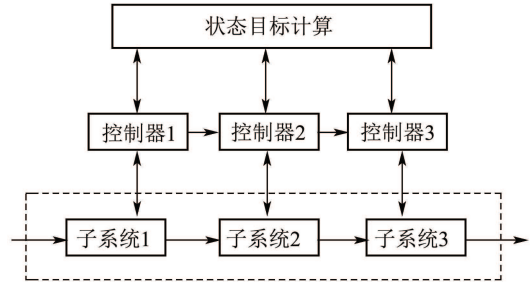


图 6 大系统双层结构MPC框图

Fig. 6 Structure of two-layered MPC for large-scale system

3 稳态优化的理论意义(Theoretical sense of steady state optimization)

目前, 预测控制稳态优化的相关理论研究主要集中在可行性分析方面^[20-21], 在实际应用主要是强调稳态优化的经济性能等工程方面的价值, 关于双层结构预测控制稳态优化与预测控制之间的作用机理的研究非常少. 作者认为文献^[27]是国内外揭示多变量预测控制的内部稳态性质的开创性研究成果. 下面, 作者将就这部分内容进行较为系统地介绍. 首先, 从该项研究的出发点谈起. 在双层结构预测控制中, 上层稳态优化负责工作点(包括控制输入的工作点和被控输出的工作点)的计算, 下层预测控制负责工作点的动态跟踪. 作者在仿真实验中发现如果下层预测控制直接使用常规的预测控制算法, 则有时无法实现控制输入或被控输出工作点的有效跟踪. 如果被控对象是方型系统则计算得到的控制输入工作点和被控输出工作点可实现无静差控制, 但如果是非方系统则很难实现输入输出工作点的无静差控制.

所谓方型系统和非方型系统是根据系统输入变量与输出变量的个数划分的. 若系统的输入变量和输出变量的个数相同, 则该系统被称为方型系统(或简称方系统), 反之, 则该系统被称为非方系统. 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, 如图7所示.



图 7 多变量控制系统的非方结构

Fig. 7 Structure of un-square MIMO control system

下面, 举例说明: 作者曾使用标准的无约束DMC算法^[22]针对一个4输入3输出(模型已经标量化, 为节

省篇幅,此处不给出模型描述)过程做过程仿真,控制目标就是将3个被控输出由初始状态“0”控制到“10”,其中一组仿真结果如图8所示(图8(a)是3个输出的动态变化曲线,图8(b)是4个输入的动态变化曲线),其控制器参数设置为 $Q = I, R = I$.另一组仿真如图9所示(图9(a)和图9(b)中的曲线含义同图8(a)和图8(b)),其控制参数设置为 $Q = I, R = 3I$.

从图8-9的两组仿真曲线可以看出,设定点控制目标显然都已经实现,但两组仿真的控制输入稳态工作点不一致.可以看出,多变量预测控制的稳态特性不完全由输出设定点决定.作者知道,对于方系统,当过程的稳态增益存在且可逆时,在不考虑约束的情况下任意给定一组输出设定点都有唯一的控制输入稳态值与之对应,这是由可逆矩阵的性质决定的.然而,对于非方多变量控制系统,由于稳态增益矩阵非方,即不可逆,所以由输出设定点无法直接得到与之对应的控制输入的稳态值.对于非方系统,在给定输出设定点时可能出现以下情况: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点;对于瘦系统,被控输出设定点可能无法达到,即出现输出静差.那么,多变量预测控制系统稳态输入与输出需要满足何种关系式呢?作者尝试了从系统稳定性方面入手进行研究,最终没有成功.接下来,作者变换了思路,首先解决了稳态优化与动态控制之间的一致性问题的.

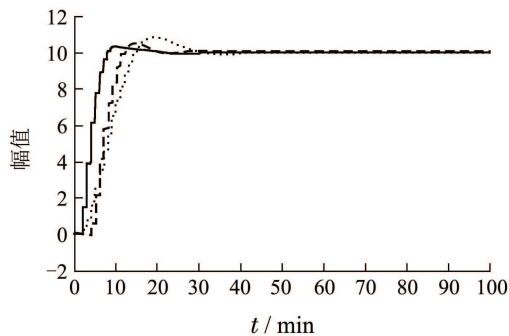


图 8(a) 控制器参数 $Q = I, R = I$ 时输出仿真曲线

Fig. 8(a) Curves of output when $Q = I, R = I$

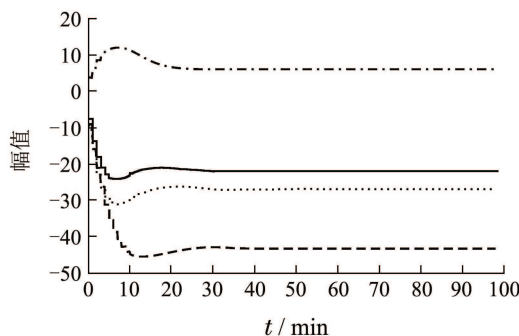


图 8(b) 控制器参数 $Q = I, R = I$ 时控制输入仿真曲线

Fig. 8(b) Curves of input when $Q = I, R = I$

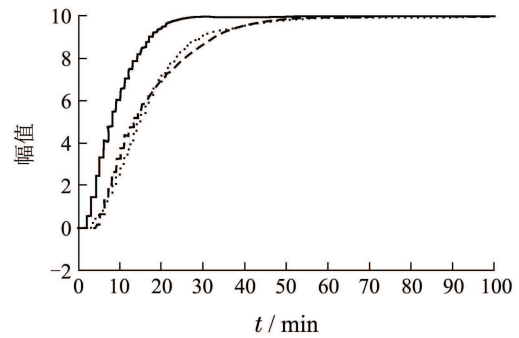


图 9(a) 控制器参数 $Q = I, R = 3I$ 时输出仿真曲线

Fig. 9(a) Curves of output when $Q = I, R = 3I$

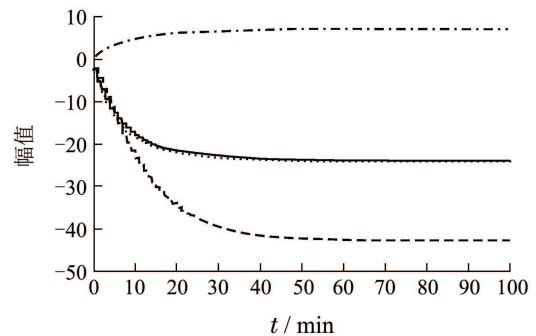


图 9(b) 控制器参数 $Q = I, R = 3I$ 时控制输入仿真曲线

Fig. 9(b) Curves of input when $Q = I, R = 3I$

因上层稳态优化的计算结果中包含控制输入的稳态值,使用本文所述的双层结构预测控制算法,即式(3)-(6)可以求解出相应的模型预测控制律,应用该控制律可以在标称情况下实现线性多变量开环稳定过程的无静差控制,对胖、瘦、方系统皆适用,相关仿真结果详见文献[27].

在目标函数(6)中引入控制输入的稳态目标是实现无静差控制的直接因素,这是因为控制输入与被控输出的稳态之间满足稳态模型关系,即

$$K \Delta u_s = \Delta y_s, \quad (14)$$

其中系数矩阵 K 为

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{p1} & k_{p2} & \cdots & k_{pm} \end{bmatrix}_{p \times m}$$

在控制系统中,控制输入是过程模型函数关系中的自变量,而被控输出是因变量.在目标函数(6)中引入控制输入稳态目标相当于确定了控制系统的自变量,相应地因变量(被控输出)也就确定下来.而且,这与系统究竟是胖系统、瘦系统还是方系统无关.因此,可以认为稳态优化对于预测控制稳态解的唯一性起到至关重要的作用.

接下来,作者从反方向的角度讨论一下常规的单层多变量预测控制稳态解的相容性与唯一性问题[27].常规的单层多变量预测控制算法中不包含控制

输入稳态目标的惩罚项, 从稳态角度上, 稳定的预测控制器相当于已知了线性方程组(13)中的 $\Delta \mathbf{y}_s$, 求解 $\Delta \mathbf{u}_s$. 引入系数矩阵 K 的增广矩阵, 即

$$B = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1m} & \Delta y_{s,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{p1} & k_{p2} & \cdots & k_{pm} & \Delta y_{s,p} \end{bmatrix}_{p \times (m+1)}$$

下面, 使用线性代数方程组解的判定方法来解决多变量预测控制稳态解的相容性与一致性问题. 首先, 回顾线性代数方程组解的判定方法, 即

引理 1 m 元非齐次方程组 $K_{p \times m} \Delta \mathbf{u}_s = \Delta \mathbf{y}_s$ 有解的充分必要条件是系数矩阵 K 的秩等于增广矩阵 $B = (K, \Delta \mathbf{y}_s)$ 的秩.

引理1有以下推论:

推论 1 $K \Delta \mathbf{u}_s = \Delta \mathbf{y}_s$ 有唯一解的充要条件为 $\text{rank}(K) = \text{rank}(B) = m$; $K \Delta \mathbf{u}_s = \Delta \mathbf{y}_s$ 有无穷多解的充要条件为 $\text{rank}(K) = \text{rank}(B) < m$.

需要说明, 在工程意义下控制系统的开环稳态增益矩阵一般都是满秩的, 所以余下的分析说明中作者假设是满秩的. 对于可能出现的奇异情况作者将在本文第4.2小节中进行讨论.

下面结合上述的引理1和推论1对单层多变量预测控制在瘦、方、胖系统下的稳态解进行分析.

当被控系统为瘦系统时, 可以使用引理1来分析多变量预测控制解的性质. 因过程控制输入与被控输出维数之间的关系为 $m < p$. 可知 $\max(\text{rank}(K))$ 为 m , 而 $\max(\text{rank}(B))$ 为 $m + 1$, 所以对于瘦系统很有可能出现 $\text{rank}(K) < \text{rank}(B)$ 的情况, 从而导致方程组无解, 即不相容. 如果 $\Delta \mathbf{y}_s$ 属于 K 的列空间, 则该方程组一定是相容的, $\text{rank}(K) = \text{rank}(B)$, 且在行空间满秩的前提下 $\text{rank}(K) = \text{rank}(B) = m$, 说明此时稳态解是唯一的. 可见, 如果能够找到一个使得 $\text{rank}(K) = \text{rank}(B)$ 的 $\Delta \mathbf{y}_s$, 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 K 的列空间中是一个集合, $\Delta \mathbf{y}_s$ 并不是唯一. 在单层结构预测控制下, 输出设定点由人工给定, 使得 $\Delta \mathbf{y}_s$ 属于 K 的列空间比较困难, 尤其对输入输出规模较大的系统, 但是双层结构下, 稳态优化计算的结果自动满足方程(13), 这是双层结构预测控制针对瘦系统的优势所在.

对于方系统, 当稳态增益存在且可逆时, $\text{rank}(K) = \text{rank}(B) = m$ 成立, 所以其只有唯一解.

对于胖系统, 过程控制输入的维数 m 大于被控输出的维数为 p . 由此可以得知, $\max(\text{rank}(K))$ 为 p , 而 $\max(\text{rank}(B))$ 也为 p . 因已假设 K 满秩, 故 $\text{rank}(K) = \text{rank}(B) < m$ 成立, 这说明胖系统所对应的方程组解的个数为无穷多, 这也是仿真案例(如图8-9所示)控

制输入稳态解不一致的理论根源. 在双层结构下, 稳态优化将在可行空间内进行寻优从而使控制输入解唯一化, 这是双层结构预测控制针对胖系统的优势所在.

作者认为: 多变量预测控制系统稳态解的相容性与唯一性分析结论加深了对多变量稳态解的认识程度, 实现了从基于自由度分析的定性分析到基于稳态方程的定量分析的跨越. 另一方面, 也从理论层面论证了双层结构预测控制的技术优越性. 因此, 双层结构预测控制不仅仅是增加了一个稳态优化层, 更重要的是显示地集成了系统的内部输入输出稳态关系特性, 提高了系统的稳定性和鲁棒性.

4 双层结构预测控制的深度思考(Further consideration on two-layered predictive control)

本小节将从区间预测控制、预测控制的奇异性、双层结构预测控制的动态特性等方面进行阐述.

4.1 区间预测控制与双层结构预测控制(Zone model predictive control and two-layered predictive control)

双层结构预测控制是预测控制工业进步的结果. 双层结构预测控制重视动态过程稳态性质的挖掘, 突出强调内部稳态关系的重要性. 但是, 双层结构预测控制每一控制周期都严格计算每个控制输入与被控输出变量的设定值, 并将之上传给预测控制层实施. 在预测控制发展史上出现了一种非常有效的控制策略—区间控制. 区间控制的特点是对某些重要的输出变量设置设定点要求, 对于某些不重要的输出变量仅设置约束要求、无明确设定点. 那么, 区间控制与本文提出的双层结构预测那个性能更加优良呢?

区间控制的优势在于被控过程为瘦系统时, 通过牺牲一些次要输出变量的控制要求, 使得有限的自由度可以保证重要的输出变量实现设定点目标. 经稳态分析方法可知: 对于瘦系统, 如果给定的输出变量设定点位于矩阵 K 的列空间, 则这组设定点都可以达到, 但是在实际中很难准确地给定一组设定点使之位于 K 的列空间.

如果仅设定重要输出变量的设定点且设定输出变量设定点的个数等于控制输入变量的个数, 在不考虑约束的情况下, 通过矩阵求逆即可得到控制输入的稳态值, 继而可得其它输出变量的稳态值. 输出变量设定点个数不等于控制输入变量个数时, 情况将变得非常复杂, 但可以肯定输入输出之间的稳态关系仍然符合解的相容性与唯一性条件.

由此可见, 只要被控过程最终趋于稳定, 其稳定工作点必定位于双层结构预测控制稳态优化的可行空间内, 而经稳态优化计算得到的工作点最优.

4.2 双层结构预测控制的奇异性问题(Singularity of the two-layered predictive control)

预测控制的优势在于针对多变量过程. 多变量过程的输入输出之间的动态关系特性可能出现近奇异性的现象. 所谓近奇异性就是某些输入到某些输出的动态特性非常相近, 实际的控制系统一般不会形成数学上的奇异性, 但这种近奇异性会对控制系统产生很多不利的影响.

多变量控制系统本质上是由若干个 2×2 或 3×3 子控制系统组成, 尽管大多数控制系统在设计时都要保证其是非奇异的, 但有时某些子控制系统存在着接近奇异的现象, 这将导致系统出现严重的稳定性问题. 具体地, 稳态增益可以通过奇异值进行分解,

$$K = USV^T = \sum_{i=1}^n \sigma_i u_i v_i^T. \quad (15)$$

从稳态角度看, 控制本质上就是稳态模型的求逆运算, 矩阵接近奇异, 则其行列式值就会很小, 其逆就会很大, 则意味着系统的控制动作很大, 即

$$\Delta u_s(k) = [USV^T]^{-1} \times \Delta y_s(k). \quad (16)$$

双层结构预测控制中稳态优化使用反映输入输出关系的稳态模型, 对该模型进行分析可以直接得到反映其奇异性质的参量, 进而对稳态模型增益进行调整以解决近奇异性对控制系统造成的影响. 在实际应用中, 条件数是反映奇异性程度的参量, 其定义为

$$\frac{\max(\sigma_i)}{\min(\sigma_i)}. \quad (17)$$

4.3 双层机构预测控制的动态特性(Dynamic character of the two-layered predictive control)

双层结构预测控制较之常规的单层结构预测控制在稳态解的诠释上非常准确、清晰. 目前, 双层结构预测控制的基本算法方面已经取得了初步结果, 但在相关理论问题的分析上尚未取得实质性进展. 这是因为双层结构预测控制不仅在体系架构上较之常规的单层预测控制参数复杂, 而且涉及可行性、最优性等诸多问题, 这些问题很少在控制性能分析中予以考虑. 文献[28]曾指出双层结构预测控制的性能与参数之间的关键需要深入研究, 作者给出了如下的DCS过程数据(如图10所示), 两输出变量的稳态目标呈现出激烈的跳动, 反映了稳态优化参数、动态控制参数与整体性能之间的复杂关系.

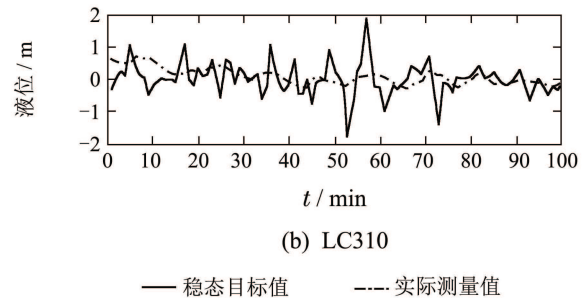
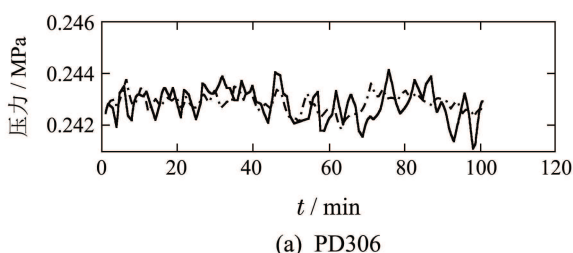


图10 过程输出变量的稳态目标与实时数据

Fig. 10 Real-time data of process outputs' steady state targets

5 总结(Conclusions)

双层结构预测控制是工业预测控制发展到一定阶段而形成的一类控制技术, 它的形成有其必然性. 首先, 预测控制的产生有其背景因素, 石油、化工等过程工业控制的主要任务就是实现平稳操作, 因此稳态性质的挖掘对于这类过程的控制显得尤为重要. 其次, 任何系统都是时变的, 一成不变的控制系统必定不是最优的. 双层结构预测控制实现了稳态优化与动态控制的同步计算, 通过设定点的动态调优实现了稳态性能的提升. 此外, 双层结构预测控制中稳态优化使人们可以重新审视预测控制技术; 多变量预测控制设定点目标的可达性、最优性、稳定性、鲁棒性在双层结构下都可以得到更好的诠释. 例如, 过程奇异性的问题在稳态层面可以进行很好的解释、给出解决方案. 但另一方面, 稳态优化与动态控制的嵌套出现, 使得整体闭环系统的性能分析变得更加复杂.

参考文献(References):

- [1] CULTER C R, RAMAKER B L. Dynamic matrix control — a computer control algorithm [C] // *Proceedings of the Joint Automatic Control Conference*. Michigan: University of Michigan Ann Arbor, 1979: 5-B.
- [2] RICHALET J, RAULT A, TESTUD J L, et al. Model predictive heuristic control: application to industrial process [J]. *Automatica*, 1978, 14(5): 413 – 428.
- [3] CLARKE D W, MOHTADI C, TUFFS P S. Generalized predictive control, Part I: The basic algorithm [J]. *Automatica*, 1987, 23(2): 137 – 148.
- [4] CLARKE D W, MOHTADI C, TUFFS P S. Generalized predictive control, Part II: Extensions and interpretations [J]. *Automatica*, 1987, 23(2): 149 – 160.
- [5] CLARKE D W, MOHTADI C. Properties of generalized predictive control [J]. *Automatica*, 1989, 25(7): 859 – 875.
- [6] DADBY M L, NIKOLAOU M. MPC: Current practice and challenges [J]. *Control Engineering Practice*, 2012, 20(4): 328 – 342.
- [7] QIN S J, BADGWELL A. A survey of industrial model predictive control technology [J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 7(11): 733 – 764.
- [8] CAO Z, EASTERLING D R, WATSON L T, et al. Power saving experiments for large-scale global optimisation [J]. *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*, 2010, 25(3): 381 – 400.

- [9] KASSMANN D E, BADGWELL T A. Robust steady-state target calculation for model predictive control [J]. *AIChE*, 2000, 46(5): 1007 – 1024.
- [10] NIKANROV A, SWARTZ C L E. Sensitivity analysis of LP-MPC cascade control systems [J]. *Journal of Process Control*, 2009, 19(1): 16 – 24.
- [11] RAO C V, RAWLINGS J B. Steady states and constraints in model predictive control [J]. *AIChE*, 1999, 45(6): 1266 – 1278.
- [12] YING C M, JOSEPH B. Performance and stability analysis of LP-MPC and QP-MPC cascade control systems [J]. *AIChE*, 1999, 45(7): 1521 – 1533.
- [13] SCATTOLINI R. Architectures for distributed and hierarchical model predictive control — A review [J]. *Journal of Process Control*, 2009, 19(5): 723 – 731.
- [14] ZOU T, LI H Q, ZHANG X X, et al. Feasibility and soft constraint of steady state target calculation layer in LP-MPC and QP-MPC cascade control systems [C] // *Proceedings of the 4th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes*. Hangzhou: IEEE, 2011, 5: 524 – 529.
- [15] ZOU T. Offset-free strategy by double-layered linear model predictive control [J]. *Journal of Applied Mathematics*, Article ID 808327, 2012(2012): 1 – 14.
- [16] LIU Z, Gu Y, XIE A. An improved LQG benchmark for MPC economic performance assessment and optimisation in process industry [J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2012, 90(6): 1424 – 1441.
- [17] MUSKE K R. Steady-state target optimization in linear model predictive control [C] // *American Control Conference*. Albuquerque, New Mexico: IEEE, 1997, 3596: 3597 – 3601.
- [18] MUSKE K R, BADGWELL T A. Disturbance modeling for offset-free linear model predictive control [J]. *Journal of Process Control*, 2012, 12(5): 617 – 632.
- [19] LU J Z. Challenging control problems and emerging technologies in enterprise optimization [J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11(6): 847 – 858.
- [20] 席裕庚, 李慷. 工业过程有约束多目标多自由度优化控制的可行性分析 [J]. *控制理论与应用*, 1995 12(5): 590 – 596.
(XI Yugeng, LI Kang. Feasibility analysis and constrained multi-objective multi-degree of freedom optimization control in industrial processes [J]. *Control Theory & Applications*, 1995, 12(5): 590 – 596.)
- [21] 席裕庚, 谷寒雨. 有约束多目标多自由度优化的可行性分析及软约束调整 [J]. *自动化学报*, 1998 24(6): 726 – 731.
(XI Yugeng, GU Hanyu. Feasibility analysis and soft constraints adjustment of CMMO [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1998, 24(6): 726 – 731.)
- [22] 邹涛, 丁宝苍, 张端. 型预测控制工程应用导论 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
(ZOU Tao, DING Baocang, ZHANG Duan. *MPC: An Introduction To Industrial Applications* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.)
- [23] FROISY J B. Model predictive control—Building a bridge between theory and practice [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2006, 30(7): 1426 – 1435.
- [24] 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 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2011, 45(2): 2079 – 2087.
(ZOU Tao, LI Haiqiang. Two-layer predictive control of multi-variable system with integrating element [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2011, 45(2): 2079 – 2087.)
- [25] EATON J W, RAWLINGS J B. Model-predictive control of chemical processes [J]. *Chemical Engineering Science*, 1992, 47(7): 705 – 720.
- [26] 邹涛, 刘红波, 李少远. 锅炉汽包水位非自平衡系统的预测控制 [J]. *控制理论与应用*, 2004, 21(3): 386 – 390.
(ZOU Tao, LIU Hongbo, LI Shaoyuan. Dynamic matrix control algorithm on the boiler level integral process [J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(3): 386 – 390.)
- [27] 邹涛, 李海强, 丁宝苍, 等. 多变量预测控制系统稳态解的相容性与唯一性分析 [J]. *自动化学报*, 2013, 39(5): 519 – 529.
(ZOU Tao, LI Haiqiang, DING Baocang, et al. Compatibility and uniqueness analysis of steady state solution for multi-variable predictive control system [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(5): 519 – 529.)
- [28] PATWARDHAN R S. *Studies in synthesis and analysis of model predictive controllers* [D]. Edmonton: University of Alberta, 1999.
- [29] 邹涛, 魏峰, 张小辉. 工业大系统双层结构预测控制的集中优化与分散控制策略 [J]. *自动化学报*, 2013, 39(8): 1366 – 1373.
(ZOU Tao, WEI Feng, ZHANG Xiaohui. Strategy of centralized optimization and decentralized control for two-layered predictive control in large-scale industrial systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(8): 1366 – 1373.)

作者简介:

邹涛 (1975–), 男, 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, E-mail: zoutao@sia.cn;

潘昊 (1986–), 男, 博士研究生, 主要研究方向为复杂工业过程的优化与控制, E-mail: panhao@sia.cn;

丁宝苍 (1972–), 男, 教授, 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;

于海斌 (1964–), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向为工业通信与实时系统理论、分布式控制系统技术、网络协同与智能制造, E-mail: yhb@sia.cn.