

具有输入增量分辨率的多变量预测控制策略

邹 涛^{1†}, 刘博文^{1,2}, 王美聪³, 孙 威¹

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所 中国科学院网络化控制系统重点实验室, 沈阳 110016;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 沈阳化工大学 环境与安全工程学院, 沈阳 110142)

摘 要: 工业现场中不可避免地会出现噪声和不可测扰动等不利因素,造成控制器的控制变量波动,不利于加以控制和实现设备的长期使用.同时,对于现场中需要控制动作较大的阀门,在面对较小的控制动作时,无法准确跟踪控制.针对上述两种问题,结合当前工业控制目标为设定点和区间混合类型,引入动态增量阈值和静态增量阈值作为输入分辨率.当约束多变量系统通过QP规划算法求解出最优控制律后,对于动态阈值,若控制律超过阈值,则将此控制律添加到输入上,反之则忽视此控制律;对于静态阈值,若控制律超过阈值,则将此控制律添加到输入上,反之将控制律累加,直到累加值超出阈值后采用累加的控制律.仿真结果验证了所提策略能够有效保证控制变量的稳定,解决大控制动作阀门的跟踪控制问题.

关键词: 多变量预测控制; 区间预测控制; 混合型目标; 动态阈值; 静态阈值; 增量分辨率

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Multi-variable predictive control strategy with input increment resolution

ZOU Tao^{1†}, LIU Bo-wen^{1,2}, WANG Mei-cong³, SUN Wei¹

(1. Key Laboratory of Networked Control System of CAS, Shenyang Institute of Automation of Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Environment and Safety Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China)

Abstract: Unfavorable factors such as noise and unmeasurable disturbances are inevitable in the industrial field, which cause the fluctuations in the control variables of the controller and are not conducive to the actual control and long-term use of the equipment. At the same time, for valves that require large control action, it is impossible to accurately track and control when faced with small control action. For the above two problems, combined with the current industrial control target as the hybrid type with set point and interval, the dynamic incremental threshold and the static incremental threshold are introduced as the input resolution. When the constrained multi-variable system solves the optimal control law through the QP planning algorithm, for the dynamic threshold, if the control law exceeds the threshold, the control law is added to the input, otherwise the control law is ignored. For the static threshold, If the control law exceeds the threshold, the control law is added to the input, otherwise the control law is accumulated until the accumulated value exceeds the threshold, and then the accumulated control law is used. The simulation verifies that the strategy effectively guarantees the stability of the manipulated variable and solves the tracking control problem of the large control action valve.

Keywords: multi-variable predictive control; zone predictive control; hybrid type target; dynamic threshold; static threshold; increment resolution

0 引 言

模型预测控制(Model predictive control, MPC)是一种基于模型的新型计算机控制算法^[1],是继PID控制之后在过程控制应用中使用最广泛、最有效的控制算法,已经成为处理复杂约束多变量控制问题的

公认标准^[2].1978年,Richalet等^[3]首次提出了MPC算法,而后经Cutler等^[4]和Clarke等^[5]不断发展,MPC算法已经从最初的在工业过程中的启发式控制算法发展成为一个具有丰富理论和实践内容的学科分支.MPC主要面向有约束、强耦合、多变量的流程工业控

收稿日期: 2017-12-15; 修回日期: 2018-04-09.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0603703); 国家自然科学基金项目(61773366,61503257); 工信部工业互联网创新发展工程及智能制造综合标准化与新模式应用项目(时间敏感网络(TSN)与用于工业控制的对象链接与嵌入统一架构(OPC UA)融合关键技术标准研究与试验验证).

责任编辑: 牛玉刚.

[†]通讯作者. E-mail: zuotao@sia.cn.

制问题^[6-8],近年来在能源、医疗等新领域也取得了不错的成果^[9-11],由此也说明了,其在处理复杂约束优化控制问题上的巨大优势.

工业对象往往是有约束的多变量系统,各个变量耦合性较强,噪声和不可测扰动是实际应用中系统性能面临的重要问题,如何降低噪声和不可测扰动对系统性能的影响问题也渐渐被国内外学者所关注. Xu等^[12]提出了一种扰动自适应模型来提高系统的预测精度,采用新的多迭代伪线性回归(MIPLR)来识别扰动模型. 类似的滚动时域伪线性回归(MHPLR)算法也被提出用于在线估计不可测扰动的动态特性^[13]. 金鑫等^[14]提出了一种基于变权重的对角CARIMA模型抗扰动约束广义预测控制算法,简化了控制器设计,降低了变量之间的耦合性,达到了抑制扰动的目的. 模型质量指数MQI方法也被提出用于判断模型性能,通过优化问题来计算出最优的扰动模型,由此提升模型质量和系统性能^[15]. 由此可见,研究的方向还是主要针对扰动建模问题,研究理论性较强,但对于工业实用性的考虑还欠妥. 因为在工业应用中不仅要考虑被控变量(Controlled variable, CV)的性能,还要考虑控制变量(Manipulated variable, MV)是否平稳. 控制变量关系到执行机构,当控制变量波动时,势必需要不停地调节控制机构,从而增加了现场操作的负担和设备故障的几率,减小了设备使用寿命. 因此,控制变量在面对噪声和扰动时必须要有较好的稳定性. 同时,工业现场中存在需要大控制动作才能调节的阀门,这些阀门往往无法跟踪较小的控制动作,这是工业设备水平缺陷导致的问题. 本文针对上述两种问题,从工业实用性出发,提出具有输入增量分辨率的多变量预测控制策略,并通过Shell benchmark分馏塔模型仿真验证该策略的有效性.

1 多变量约束DMC算法

动态矩阵控制(Dynamic matrix control, DMC)是一种基于模型的最优控制算法. 多变量约束DMC算法主要分为3个部分:预测模型、滚动优化、反馈校正.

假设一个多变量过程的控制输入有 m 个,控制输出有 p 个,并且已测得每个输出 y_i 对于每个控制 u_j 的阶跃响应为 a_{ij} ,则该多变量DMC的数学模型为

$$\begin{aligned} a_{ij} &= [a_{ij}(1), a_{ij}(2), \dots, a_{ij}(N)], \\ i &= 1, 2, \dots, p, j = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (1)$$

该多变量系统的一步和多步预测模型分别为

$$\tilde{\mathbf{y}}_{N1}(k) = \tilde{\mathbf{y}}_{N0}(k) + \bar{\mathbf{A}}\Delta\mathbf{u}(k), \quad (2)$$

$$\tilde{\mathbf{y}}_{PM}(k) = \tilde{\mathbf{y}}_{P0}(k) + \mathbf{A}\Delta\mathbf{u}_M(k). \quad (3)$$

其中: P 是预测时域, M 是控制时域; $\tilde{\mathbf{y}}_{N1}(k)$ 和

$\tilde{\mathbf{y}}_{PM}(k)$ 是预测输出, $\tilde{\mathbf{y}}_{N0}(k)$ 和 $\tilde{\mathbf{y}}_{P0}(k)$ 是当前时刻的初始预测输出; $\Delta\mathbf{u}(k)$ 和 $\Delta\mathbf{u}_M(k)$ 是控制增量; $\bar{\mathbf{A}}$ 和 \mathbf{A} 是模型动态矩阵,由 a_{ij} 得到.

滚动优化过程中,DMC的最小化性能指标可以表示为

$$\begin{aligned} \min_{\Delta\mathbf{u}_M} J(k) &= \|\mathbf{w}(k) - \tilde{\mathbf{y}}_{PM}(k)\|_{\mathbf{Q}}^2 + \\ &\quad \|\Delta\mathbf{u}_M(k)\|_{\mathbf{R}}^2; \\ \text{s.t. } \tilde{\mathbf{y}}_{PM}(k) &= \tilde{\mathbf{y}}_{P0}(k) + \mathbf{A}\Delta\mathbf{u}_M(k), \\ \mathbf{u}_{\min} &\leq \mathbf{u}(k-1) + \mathbf{B}\Delta\mathbf{u}_M(k) \leq \mathbf{u}_{\max}, \\ \Delta\mathbf{u}_{\min} &\leq \Delta\mathbf{u}_M(k) \leq \Delta\mathbf{u}_{\max}, \\ \mathbf{y}_{\min} - \tilde{\mathbf{y}}_{P0} &\leq \mathbf{A}\Delta\mathbf{u}_M(k) \leq \mathbf{y}_{\max} - \tilde{\mathbf{y}}_{P0}. \end{aligned} \quad (4)$$

其中: $\mathbf{w}(k)$ 为被控输出的设定点, \mathbf{B} 为控制变量增量系数矩阵, \mathbf{Q} 和 \mathbf{R} 分别为输出误差加权矩阵和控制增量加权矩阵, \mathbf{u}_{\max} 和 \mathbf{u}_{\min} 为控制变量幅值约束, $\Delta\mathbf{u}_{\max}$ 和 $\Delta\mathbf{u}_{\min}$ 为控制变量增量约束, \mathbf{y}_{\max} 和 \mathbf{y}_{\min} 为被控变量幅值约束.

将式(3)代入(4)中,化简描述为QP问题可得到如下公式:

$$\begin{aligned} \min_{\Delta\mathbf{u}_M(k)} J(k) &= \frac{1}{2}\Delta\mathbf{u}_M^T(k)\mathbf{H}\Delta\mathbf{u}_M(k) + \\ &\quad \mathbf{f}^T\Delta\mathbf{u}_M(k) + \text{常数}; \\ \text{s.t. } \mathbf{C}\Delta\mathbf{u}_M(k) &\leq \mathbf{c}. \end{aligned} \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{H} &= 2(\mathbf{A}^T\mathbf{Q}\mathbf{A} + \mathbf{R}); \\ \mathbf{f} &= -2\mathbf{A}^T\mathbf{Q}[\mathbf{w}(k) - \tilde{\mathbf{y}}_{P0}(k)]; \end{aligned}$$

\mathbf{C} 和 \mathbf{c} 为约束的统一形式,具体可参见文献[2].

通过求解该QP问题得到最优的控制增量 $\Delta\mathbf{u}_M(k)$,当控制作用实施后,可计算出对象在 $k+1$ 时刻的预测值为 $\tilde{y}_{i,1}(k+1|k)$,到 $k+1$ 时刻测得各输出的实际值为 $y_i(k+1)$,则可得误差向量

$$\mathbf{e}(k+1) = \begin{bmatrix} y_1(k+1) - \tilde{y}_{1,1}(k+1|k) \\ \vdots \\ y_p(k+1) - \tilde{y}_{p,1}(k+1|k) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

利用式(6)可得校正的预测向量

$$\tilde{\mathbf{y}}_{\text{cor}}(k+1) = \tilde{\mathbf{y}}_{N1}(k) + \mathbf{H}\mathbf{e}(k+1). \quad (7)$$

由于时间基点已从 k 时刻移到 $k+1$ 时刻,初始预测值可通过移位阵来得到,有

$$\tilde{\mathbf{y}}_{N0}(k+1) = \mathbf{S}_0\tilde{\mathbf{y}}_{\text{cor}}(k+1). \quad (8)$$

其中: \mathbf{H} 为误差校正矩阵, \mathbf{S}_0 为移位矩阵.

2 区间预测控制策略

工业上对于某一些变量往往没有特别精准的要求,有时可以放松部分输出的控制要求,与设定控制不同,给定一个输出允许的区间,作为其软控制目

标,这就是区间预测控制.

2.1 区间预测控制基本算法

一般DMC算法的目标函数描述如式(4)所示,通过对一般的目标函数进行更改得到下式:

$$J(k) = \|\tilde{y}_{PM} - y_{sp}\|_{Q_{sp}}^2 + \|\Delta u_M(k)\|_R^2 \quad (9)$$

其中: y_{sp} 和 Q_{sp} 分别表示区间控制的设定点向量和输出权系数矩阵,通过对其修改来实现区间控制的控制效果. 假设某一路输出CV的 P 步开环预测值如图1所示.

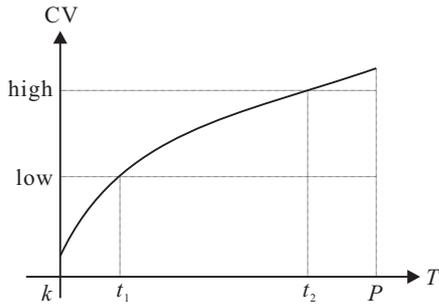


图1 P步输出开环预测值

区间控制的算法策略主要取决于输出开环预测值, high和low是输出CV的区间上下限,当前时刻为k,在P步的输出预测值中,k到t1时刻和t2到P时刻的输出预测值都在区间外,t1到t2时刻输出预测值在区间里面. 因此,针对k到t1时刻和t2到P时刻的输出预测值,由于不在区间内,使其对应的 Q_{sp} 修改为1,即对其输出项进行惩罚;针对t1到t2时刻的输出预测值,由于其在给定的区间内,不对其进行惩罚,使其对应的 Q_{sp} 修改为0. 由此实现了通过修改 Q_{sp} 来对输出项进行惩罚. 值得一提的是,对超出区间的输出预测值修改 Q_{sp} 时不是必须设置为1,可以根据想要惩罚的力度大小调整数值大小. 将第P步的预测值作为控制的设定点 y_{sp} 的参考值,当该预测值在区间内部时,将该预测值作为设定点;若该预测值超出区间上限或者下限,则分别将上限或下限作为设定点.

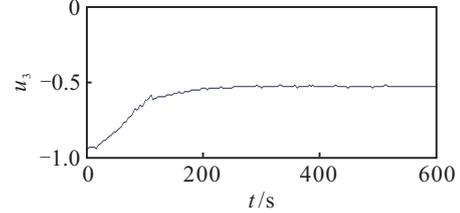
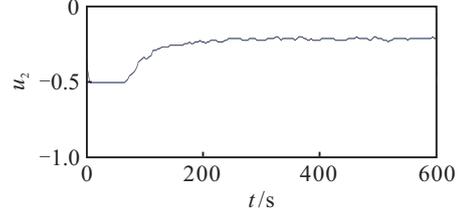
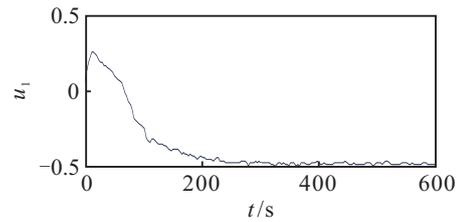
工业对象往往都是有约束的多变量系统,MPC项目实施时将产品性能和控制精度要求高的CV采用设定点控制,对产品性能和精度要求不高的CV采用区间控制,形成一种控制目标为混合型的控制策略. 相比于全部设定点目标的控制方式,工业上这种包含区间控制的混合型控制策略有其独有的优势,相当于系统稳态求解方程的个数变少了,使得稳态解变多^[16],变相地增加了系统的自由度.

2.2 现有控制方式问题模拟

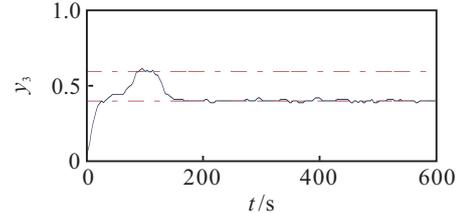
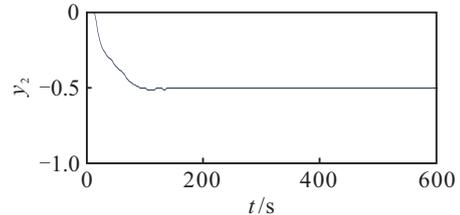
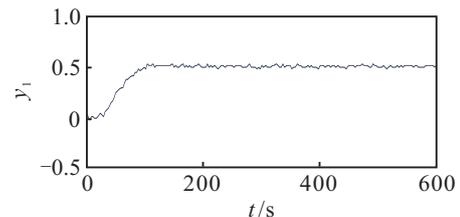
预测控制器的应用扩展比较广泛,控制器的执行机构可能是机械系统,如果执行机构频繁动作,则无疑会导致设备故障几率增加,不利于设备长期使

用. 而现场中某些输出上不可避免地会出现噪声和不可测扰动,势必造成控制器的输入波动,当控制器不稳定时,上述问题就会显现出来. 将该问题在壳牌石油重油分馏塔模型上进行模拟仿真. 重油分馏塔的过程模型为

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



(a) 控制变量MV仿真图



(b) 被控变量CV仿真图

图2 噪声干扰仿真结果

该过程有如下控制变量: u_1 代表分馏器顶部产品抽出率; u_2 代表分馏器侧线产品抽出率; u_3 代表分馏器底部的回流热负荷. 过程的输出被控变量如下: y_1 代表分馏器顶部产品提取成分; y_2 代表分馏器侧线产品提取成分; y_3 代表分馏器底部回流温度. 系统中的各个变量已经进行归一化处理, 系统的控制变量输入约束为 $[-0.5, 0.5]$, 被控变量输出约束为 $[-0.7, 0.7]$, 控制输入变量的增量约束被限定在 0.2.

3 个被控变量中, 经济性能和操作条件决定分馏塔顶部和侧线抽取的产品性能要求, 底部抽取液无性能要求, 但分馏塔底部有温度操作约束, 因此将顶部 y_1 和侧线 y_2 这两个被控变量设置为设定控制, 将底部 y_3 设置为区间控制, 由此构成混合型控制模式. y_1 设定点控制的控制目标为 0.5, y_2 设定点控制目标为 -0.5, y_3 的控制目标区间为 $[0.4, 0.6]$. 设置模型预测控制的步长 $M = 30$, 预测时域 $P = 120$, 模型的长度 $N = 120$, 采样时间 $T_s = 3$, 仿真时长 $T = 600$. 为了模拟现场噪声和不可测扰动, 在 y_1 上添加均值为 0, 标准差为 0.01 的高斯白噪声来模拟工业现场中的噪声干扰, 仿真结果如图 2 所示.

根据仿真结果, 由于 y_1 上白噪声干扰的影响, 3 个控制变量 MV 都不能平稳控制在某一个具体值, 出现了上下波动的现象, 导致 3 个控制阀门会不停地动作来满足实际控制需求, 长期下来设备故障几率会大大增加, 不利于现场实际控制和设备长期使用.

3 输入动作分辨率

根据第 2 节介绍的问题, 当工业 MPC 控制目标为混合类型, 面对工业噪声和不可测扰动问题, 没有工程实用性较好的策略来使控制变量平稳无波动. 另外, 针对大控制动作阀门无法跟踪较小的控制动作这一问题, 也需要一种控制策略来解决. 故本文提出两种输入阈值约束策略作为输入增量分辨率来解决上述问题.

3.1 动态阈值

输入动态阈值约束策略主要解决的问题是噪声和不可测扰动带来的控制器波动问题, 通过动态增量阈值来使控制动作变得平稳.

3.1.1 输入约束策略

如图 3 所示, 工业控制目标分为区间控制和设定点控制, y_1 是区间控制, y_2 是设定点控制, 而 $[y_{i,low}, y_{i,high}]$ 是各个变量对应的动态阈值约束的作用域. 所谓的作用域, 是指在此作用域内, 输入动态阈值控制策略有效, 超出此作用域, 此策略失效. 对应于区间控制 y_1 , 其作用域是其输出区间上下限. 而对应于设

定点控制 y_2 , 其动态阈值约束的作用域往往是根据工业现场中噪声和扰动的容忍度来决定的.

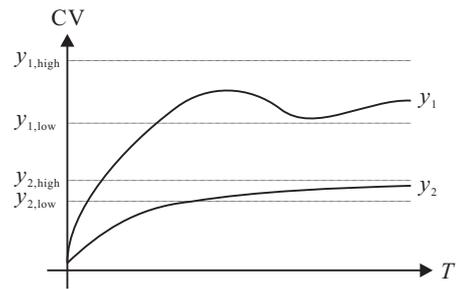


图 3 两种控制模式下的输入区间作用域

当作用域确定之后, 引入动态增量阈值 $du_{i,ths}$, 之所以是动态的, 是因为其计算要结合当前实际输出的大小. 动态阈值计算有两种方法, 首先介绍第 1 种方法:

$$du_{i,ths} = k_s \left[\frac{y_{i,high} - y_{i,low}}{2} - (|y_i - y_{i,m}|) \right]. \quad (10)$$

其中: k_s 为增量阈值比例系数, 作用为将控制变量受噪声干扰的动作变化与被控变量的变化归一为同样的数量级, 故可将过程对象模型增益的倒数取均值作为该参数值; y_i 为第 i 个 CV 的实际输出值, $y_{i,m}$ 是第 i 个 CV 的动态阈值作用域中点.

上述计算方法适合方系统, 可将每一个输出对应一个输入来计算增量阈值, 但是现场对象也有可能不是方系统, 此时可以选择该输入起作用时增益较大的输出作为其增量阈值计算参考, 或者采用如下第 2 种计算方法:

$$du_{i,ths} = \frac{k_s \sum_j^p k_{ij} \left[\frac{y_{j,high} - y_{j,low}}{2} - (|y_j - y_{j,m}|) \right]}{\sum_j^p k_{ij}}. \quad (11)$$

其中: k_{ij} 为第 i 个输入对第 j 个输出的传递函数增益, p 为输出变量个数. 此方法考虑了所有的输出, 通过加权平均来计算增量阈值.

增量阈值的计算主要遵循的策略为: 当前输出 y_i 如果在作用域的中点, 则相应的增量阈值要相对较大; 当 y_i 往作用域的两边靠近时, 相应的增量阈值会逐渐减少; 当输出在作用域边界线上时, $du_{i,ths}$ 为 0, 即超出作用域时动态阈值策略失效. 这种策略也符合工业控制的要求, 输出 y_i 靠近控制目标时, 增量阈值较大, 控制器面对噪声和扰动时就有很宽的调节裕度; 相反, 如果 y_i 本来都偏离了控制目标, 则若增量阈值再过大时, 输入 MV 偏离过大很可能造成控制效果会变差.

在通过求解QP问题得到最优的控制律之后,结合增量阈值来对控制MV进行约束,约束规则为:对于任意一个 u_i 而言,如果计算的控制律 du_i 大于等于增量阈值 $du_{i,ths}$,则将控制律加到控制 u_i 上;如果计算的控制律 du_i 小于增量阈值 $du_{i,ths}$,则忽略该控制律,保持上一时刻的 u_i 不变,通过这种约束策略构成了输入动态阈值约束策略。

3.1.2 控制参数设置

假设控制系统具有 m 个执行机构,相应系统的控制变量也有 m 个,每个控制周期内通过二次型约束求解得到最优的控制增量作用到被控变量上。被控系统有 p 个被控变量,表示为 p 维的列向量 $\mathbf{y} = [y_1 \cdots y_p]^T$ 。

Step 1: 将 p 个被控变量按照控制目标的不同进行分类,将控制目标为设定点控制的被控变量设置为 $\mathbf{y} = [y_1 \cdots y_n]^T$,将控制目标为区间控制的被控变量设置为 $\mathbf{y} = [y_{n+1} \cdots y_p]^T$ 。

Step 2: $\mathbf{y} = [y_{n+1} \cdots y_p]^T$ 中每个 y_i 对应的被控区间为 $[y_{i,low}, y_{i,high}]$,将该区间作为其动态阈值约束作用域;对于 $\mathbf{y} = [y_1 \cdots y_n]^T$ 中的每个 y_i ,需要对其设置噪声容忍度区间 $[y_{i,low}, y_{i,high}]$,同样将该区间作为其动态阈值约束作用域。

Step 3: 设置增量阈值比例系数 k_s 。

Step 4: 设置控制增量阈值 du_{ths} ,对应 m 个控制变量,则有 m 个控制增量阈值。设置控制增量阈值为 $du_{ths} = [du_{1,ths} \cdots du_{m,ths}]^T$ 。计算方法为式(10)或(11),取决于控制对象的模型。

3.1.3 算法流程实现

动态阈值约束控制策略是在原DMC算法的基础上进行改进所得到的,具体的控制流程实现如图4(a)所示。通过引入动态增量阈值使控制量相对平稳,在每一个控制周期内通过此策略计算控制量,然后通过执行机构作用给被控对象。每个控制周期内的动态阈值约束控制算法步骤如下:

Step 1: 通过检测得到 k 时刻的各个被控变量的实际输出值 $\mathbf{y}(k)$,通过 $k-1$ 时刻对当前时刻的预测输出 $\tilde{\mathbf{y}}_{PM}(k|k-1)$ 计算预测误差

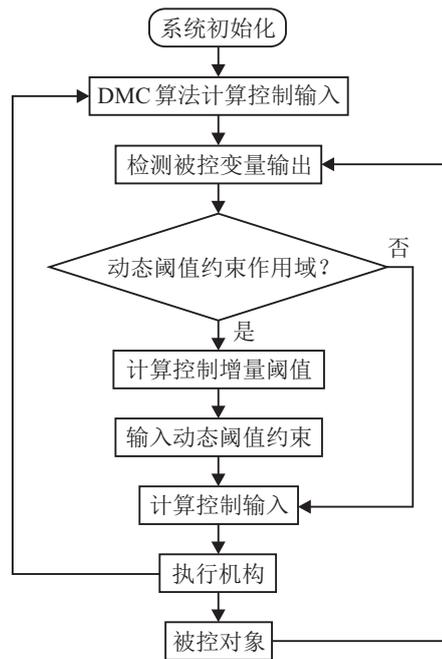
$$\mathbf{e}(k) = \mathbf{y}(k) - \tilde{\mathbf{y}}_{PM}(k|k-1).$$

Step 2: 通过式(7)计算预测输出校正正值 $\tilde{\mathbf{y}}_{cor}(k)$ 。

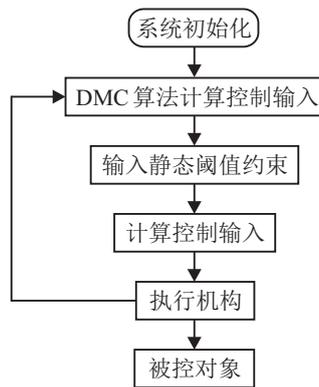
Step 3: 通过式(8)计算初始预测值 $\tilde{\mathbf{y}}_{P0}(k)$ 。

Step 4: 通过式(5)中的QP问题求解得到 m 个控制变量的控制增量 du 。

Step 5: 逐一判断输出 $y_i(k)$ 是否进入输入动态阈值约束作用域,如果 $y_i(k)$ 还未进入作用域,则直接执



(a) 动态阈值策略控制流程



(b) 静态阈值策略控制流程

图4 输入阈值策略控制流程

行Step 7;如果 $y_i(k)$ 已经进入作用域,则通过式(10)计算出控制增量阈值。或者判断 $y_i(k)$ 是否全部进入作用域,若全部进入,则通过式(11)计算控制增量阈值;否则,直接执行Step 7。

Step 6: 结合动态增量阈值进行输入约束,约束规则为3.1.1节所述。

Step 7: 计算 k 时刻的控制输入值

$$u_i(k) = u_i(k-1) + du_i(k).$$

Step 8: 进入 $k+1$ 时刻,重新进行Step 1。

3.2 静态阈值

静态阈值约束策略也能够使控制器在面对噪声和不可测扰动时比较平稳,但是整体平稳性不如动态阈值策略。该策略主要的意义是解决需要控制动作较大的阀门无法跟踪小动作的问题,有较好的工业实用性。

3.2.1 输入约束策略

静态阈值约束的控制策略比较简单,因为该策略针对整个控制过程应用,所以不需要设置的作用域.该策略依据现场阀门控制器的实际情况,根据阀门的最小动作量来选择合适的值作为静态输入阈值 $du_{i,mov}$.该静态阈值可以理解为现场控制器的动作分辨率,即阀门控制的最小动作值,低于该值时,阀门无法调节.另外,设置控制增量累加值 $du_{i,sum}$,作为静态阈值约束策略的辅助变量,初始化为0.

静态增量阈值策略的输入约束规则为:对于任意 u_i 而言,若求解得到的控制增量 du_i 小于静态输入阈值 $du_{i,mov}$,则将 du_i 累加到增量累加值 $du_{i,sum}$,并进一步判断:若 $du_{i,sum}$ 大于等于静态阈值 $du_{i,mov}$,则将 $du_{i,sum}$ 作为当前的控制器控制动作,同时 $du_{i,sum}$ 清零;若 $du_{i,sum}$ 小于 $du_{i,mov}$,则忽视此动作增量 du_i ,维持上一时刻的控制动作不变.若求解得到的 du_i 大于等于 $du_{i,mov}$,则将此刻的 du_i 作为控制器的控制动作,同时 $du_{i,sum}$ 清零.这里需要注意的是,有可能得到的累加值 $du_{i,sum}$ 超出控制增量的工程上限,如果超出上限,则使用上限值,但这种可能性是很小的.

静态阈值约束策略与动态阈值约束策略的区别是其增量阈值是全程不变的,该策略将之前较小的控制律作了累加,没有忽视之前时刻的控制信息,故其控制的频率较动态阈值约束策略会略大,只能够在某段时刻保证控制器平稳,等到控制累计值超过阈值后,控制器会进行新的控制动作.使用该策略后,控制器的最小执行动作即为静态增量阈值,由此解决了控制阀门无法跟踪小增量的问题.

3.2.2 参数设置与算法流程

静态阈值约束策略的参数设置比较简单,只需针对每一个控制变量设置静态阈值 $du_{i,mov}$ 和控制增量累加值 $du_{i,sum}$.具体算法流程如图4(b)所示,其算法与动态阈值约束较为类似,只需要修改Step 5和Step 6即可,其他步骤相同故不再赘述.

将Step 5和Step 6合并,逐一判断 du_i 与 $du_{i,mov}$ 的关系,进行静态阈值约束,约束规则为上一节所述.

通过以上策略将得到的控制变量传递给执行机构,由此实现了静态阈值约束策略.

4 案例仿真

采用本文的控制思路对2.2节中壳牌石油重油分馏塔进行控制.首先采用输入动态阈值控制策略,进行参数设置.

Step 1: y_1 设定点控制的控制目标为0.5, y_2 设定点控制目标为-0.5, y_3 的控制目标区间为[0.4, 0.6].

Step 2: 将 y_1 和 y_2 的动态阈值作用域分别设置为

[0.45, 0.55]和[-0.55, -0.45], y_3 的动态阈值作用域即为原控制区间[0.4, 0.6].

Step 3: 设置增量阈值比例系数 k_s ,令 $k_s = 0.5$.

Step 4: 设置控制增量阈值 $du_{th,s}$,对应3个控制变量,则有3个控制增量阈值.由于为方系统,按照式(10)求解控制增量阈值.

设置基本参数不变.控制结果如图5(a)和图5(b)所示.将动态阈值计算方法换成式(11),其他参数不变,仿真结果如图5(c)和图5(d)所示.

由图5(a)和图5(c)可知,在输出到达动态阈值作用域后,即使输出 y_1 存在着干扰噪声,各个系统的输入动作频率也很小,不会因为噪声干扰的影响而持续波动,有效地保证了控制变量的平稳.由图5(b)和图5(d)可知,各个被控变量CV也基本符合控制目标的要求.

将本文策略与原始策略作对比,结果如图5(e)和图5(f)所示,虚线是原始的控制效果,实线是使用式(10)的动态阈值策略的控制效果.将MV的仿真图放大比较发现,本文策略有效保证了控制变量的平稳,其中300到600时刻的100个点的性能指标与MV动作频率如表1所示,动态1和动态2分别为使用式(10)和(11)的结果.可以发现:由于式(10)的阈值取决于具体某一路输出,当参考输出选择合适时,可以让该输入变得很平稳;而式(11)的阈值计算不是参考具体某一路输出,而是全部输出加权处理,所以其MV的平稳性比较均匀.值得一提的是,当保证了控制变量平稳时,必然牺牲了性能的最优性,故性能指标是增加的,这也是该策略的缺点.

表1 两种策略评价指标对比

	性能指标	MV1	MV2	MV3	总计动作
动态1	46	4	3	34	41
动态2	52	20	17	21	58
原始	38	100	100	100	300

采用输入静态阈值约束策略,基本控制参数不变,令 $du_{1,mov} = du_{2,mov} = du_{3,mov} = 0.01$,仿真结果见图5(g)和图5(h).

从图5(g)可以发现,输入变量MV在一定程度上也实现了平稳控制的效果.从图5(h)可以看出,被控变量CV基本符合被控目标要求,其性能指标与动作频率对比见表2.从表2可以看出,静态阈值策略的性能指标相对另外两种策略变大了.该策略的主要优势是规划了动作的最小分辨率,通过加入静态阈值使得MV没有小于0.01的控制动作,累积了小的动作,等到满足约束条件时,采取一步较大的动作,该策略能够解决现场需要控制动作较大的阀门无法跟踪小动作的问题,工程实用性比较好.

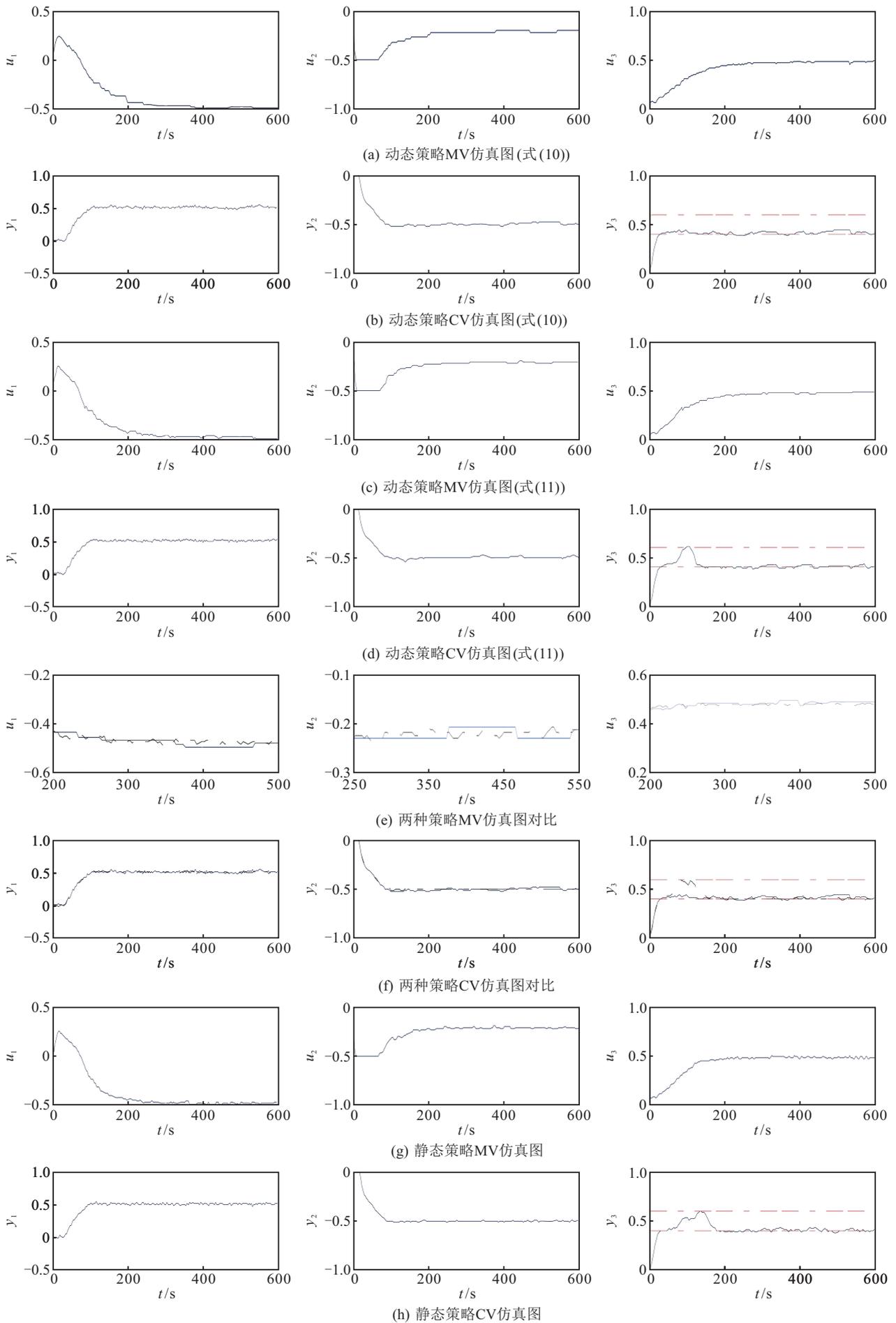


图5 阈值约束仿真结果

表2 3种策略评价指标对比

	性能指标	MV1	MV2	MV3	总计动作
原始	38	100	100	100	300
静态1	46	4	3	34	41
动态	75	29	21	36	86

5 结论

本文针对现场中存在的噪声和不可测扰动造成控制器波动以及大动作阀门无法跟踪控制小动作这两种问题,结合目前工业现场的控制模式,提出了具有输入增量分辨率的多变量预测控制策略,将增量分辨率分成了动态阈值和静态阈值两种形式.仿真结果验证了动态阈值策略能够有效保证控制变量的稳定,避免了频繁地调节执行机构,适用于现场工业控制;静态阈值策略在一定程度上保证了控制变量平稳,主要用于解决现场大动作阀门无法跟踪小动作的问题.本文提出的策略主要面向工业MPC的实际应用,能够为工业MPC现场控制问题提供新的解决思路.

参考文献(References)

- [1] 席裕庚. 预测控制[M]. 第2版. 北京: 国防工业出版社, 2013: 51-72.
(Xi Y G. Predictive control[M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 51-72.)
- [2] 邹涛, 丁宝苍, 张端. 模型预测控制工程应用导论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 1-10, 127-129.
(Zou T, Ding B C, Zhang D. MPC: An introduction to industrial application[M]. Beijing: Chemical Industrial Press, 2010: 1-10, 127-129.)
- [3] Richalet J, Rault A, Testud J L, et al. Model predictive control: Applications to industrial processes[J]. Automatica, 1978, 14(5): 413-428.
- [4] Cuter C R, Ramaker B L. Dynamic matrix control — A computer control algorithm[C]. The 86th AIChE National Meeting. Houston: IEEE, 1979.
- [5] Clarke D W, Mohtadi C. Properties of generalized predictive control[J]. Automatica, 1989, 25(6): 859-873.
- [6] 席裕庚, 李德伟, 林姝. 模型预测控制——现状与挑战[J]. 自动化学报, 2013, 39(3): 222-236.
(Xi Y G, Li D W, Lin S. Model predictive control — Status and challenges[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(3): 222-236.)
- [7] Darby M L, Nikolaou M. MPC: Current practice and challenges[J]. Control Engineering Practice, 2012, 20(4): 328-342.
- [8] Neshasteriz A R, Sedigh A K, Sadjadian H. Generalized predictive control and tuning of industrial processes with second order plus dead time models[J]. J of Process Control, 2010, 20(1): 63-72.
- [9] Salsbury T, Mhaskar P, Qin S J. Predictive control methods to improve energy efficiency and reduce demand in buildings[J]. Computers and Chemical Engineering, 2013, 51: 77-85.
- [10] Wang Y, Zisser H, Dassau E, et al. Model predictive control with learning-type set-point: Application to artificial pancreatic β -cell[J]. Aiche J, 2010, 56(6): 1510-1518.
- [11] Wang Y, Valdés-González H, Vyhmesiter E, et al. Model predictive control of semiautogenous mills(sag)[J]. Minerals Engineering, 2014, 64(1): 92-96.
- [12] Xu Z H, Zhu Y C, Han K, et al. A multi-iteration pseudo-linear regression method and an adaptive disturbance model for MPC[J]. J of Process Control, 2010, 20(4): 384-395.
- [13] 韩恺, 赵均, 朱豫才, 等. 一种在线辨识扰动模型的MPC控制器及其在溶剂脱水塔装置中的应用[J]. 化工学报, 2008, 59(7): 1657-1664.
(Han K, Zhao J, Zhu Y C, et al. MPC with on-line disturbance model estimation and its application to PTA solvent dehydration tower[J]. CIESC J, 2008, 59(7): 1657-1664.)
- [14] 金鑫, 池清华, 刘康玲, 等. 对角CARIMA模型抗扰约束广义预测控制[J]. 化工学报, 2014, 65(4): 1310-1316.
(Jin X, Chi Q H, Liu K L, et al. Disturbance rejection constraints generalized predictive control of diagonal CARIMA model[J]. CIESC J, 2014, 65(4): 1310-1316.)
- [15] Li L J, Song J Q, Zhang X X, et al. Model deficiency diagnosis and improvement via model residual assessment in MPC[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2017, 56(42): 12151-12162.
- [16] 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 T, Li H Q, Ding B C, 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.)

作者简介

邹涛(1975—), 男, 研究员, 博士生导师, 从事工业过程实时优化和模型预测控制等研究, E-mail: zuotao@sia.cn;

刘博文(1992—), 男, 硕士生, 从事模型预测控制理论与应用技术的研究, E-mail: liubowen@sia.cn;

王美聪(1977—), 女, 讲师, 博士, 从事微生物燃料电池处理污水发电及系统建模、数据采集系统开发等研究, E-mail: hollyword@163.com;

孙威(1990—), 男, 助理研究员, 硕士, 从事工业先进过程控制理论及工程应用的研究, E-mail: sunwei@sia.cn.

(责任编辑: 齐 霁)