

积分过程预测控制的稳态分析及反馈校正

邹涛^{1†}, 王丁丁², 丁宝苍³, 于海斌¹

(1. 中国科学院 沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016;

2. 浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310023; 3. 西安交通大学 电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 多变量积分过程的控制, 一直是预测控制理论研究与应用过程中的难点问题. 现有的研究成果更多的关注于算法的实现上, 而很少关注理论依据. 本文从积分过程的控制输入平衡关系出发, 利用线性代数方程组解的相容性原理, 得到了一个适用于判断多变量积分过程设定点是否可达的判据, 可以作为算法能否实现多变量积分过程无静差控制的理论依据. 同时分析了传统算法无法在存在模型失配情况下对积分过程进行优化与控制的原因, 利用补偿因子重新设计反馈校正环节, 使改进后的算法能够实现存在模型失配过程的优化与控制, 并通过仿真验证了本文提出的结论.

关键词: 模型预测控制; 多变量过程; 积分控制; 稳态分析; 模型失配; 不可测扰动

中图分类号: TP273 文献标识码: A

Steady-state analysis and feedback correction of model predictive control for integrating process

ZOU Tao^{1†}, WANG Ding-ding², DING Bao-cang³, YU Hai-bin¹

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning 110016, China;

2. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou Zhejiang 310023, China;

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

Abstract: The control of multivariable integrating process has always been a difficult issue in model predictive control for both the academic researches and applications. The existing researches pay more attention to the algorithm design rather than to the theoretical analyses. This paper starts from the balance of the control input for the integrating process, and applies the compatibility principle of linear algebraic equations to determine whether the set-points are reachable, establishing a theoretical basis for the double-layered predictive control. The poor control performance of model predictive control (MPC) in model mismatch is analyzed, and a compensation factor is employed for updating the algorithm so that it can be used to control the integral process with model-plant mismatch. Simulation results validate the effectiveness of the improved algorithm.

Key words: model predictive control (MPC); multi-variable process; integrated control; steady-state analysis; model-plant mismatch; unmeasured disturbance

1 引言(Introduction)

模型预测控制(MPC)是一类基于模型的计算机控制算法的总称. MPC的提出源于工业实践, 因其适合解决有约束多变量控制问题的特点, 在过程行业, 特别是石化、炼油、造纸等领域中得到了广泛的应用^[1]. MPC的主要原理包括过程预测、滚动优化、反馈校正3大部分, 在过程预测环节利用精准的数学模型, 实现未来时刻被控输出的预测, 并在反馈校正环节, 利用当前时刻已知的输出信息, 不断修正被控输出的预

测值, 最后在滚动优化环节通过极小化性能指标计算出控制器的控制作用. 其中较为经典的MPC算法包括动态矩阵控制(dynamic matrix control, DMC)^[2]、广义预测控制(generalized predictive control, GPC)^[3]、模型算法控制(model algorithmic control, MAC)^[4].

大多数的工业过程是开环稳定的, 可以使用线性模型进行描述, 而以DMC为代表的预测控制算法可以有效地控制这类过程. 实际工业过程也存在开环不稳定的被控输出, 对于这类被控输出可以使用“透明控

制”策略,即增加一级PID控制的方法先将不稳定输出镇定,而后将PID控制回路作为预测控制的被控对象.另外,工业过程中还存在一类动态特性较为特殊的被控对象——积分过程,其传递函数描述中包含积分算子.

现有的预测控制针对积分过程的研究,主要是从积分算子的特点展开的.由于受模型描述形式的限制,采用非参数模型——阶跃响应系数模型描述的常规DMC算法只能适用于开环稳定对象.文献[5]分析了包含积分环节的过程产生模型截断误差的原因,改进了常规DMC算法中的移位矩阵,提出了一种适用于积分过程控制的DMC算法,并采用该算法成功地实现了锅炉汽包的控制.文献[6]提出了一种适用于单输入单输出(SISO)积分过程的预测函数控制方法,通过旋转因子的引入,对输出误差进行了补偿.文献[7]将积分过程的传递函数模型描述变换到状态空间模型描述,提出了基于无穷时域性能指标的预测控制算法并证明了系统的名义稳定性.文献[8]针对文献[7]中的可行性问题引入了控制输入的终端容许集,讨论了存在不可测干扰情况下的系统稳定性.文献[9]针对积分过程的时滞问题,提出了一种基于状态空间描述的预测控制算法,并证明了该算法在两种常见工业情形下的稳定性.上述算法存在一个共性特点,即从积分对象的特点出发进行动态控制器设计,缺乏对系统稳态层面的分析.

近年来,为进一步提高预测控制的经济性能,主流的预测控制软件技术都采用了双层结构,例如Aspen-Tech的DMCplus, Honeywell的RMPCT^[1].所谓双层结构,就是在常规的预测控制算法之上添加了一层同周期运行的稳态优化层(算法).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负责对优化设定点进行动态跟踪控制.文献[10]分析了双层结构预测控制系统的一些理论性质,包括稳定性、经济性能以及动态性能.文献[11]将模型的不确定性引入到双层结构预测控制上层稳态优化的问题描述中形成一个一阶锥规划问题,并采用对偶内点法进行求解.文献[12]针对稳态优化中模型不确定性问题进行了灵敏度分析,以此为据对双层结构预测控制的性能进行评估.文献[13]针对双层结构预测控制中稳态优化层可能出现的不可行问题,提出了基于优先级的软约束调整策略.

稳态优化需要过程的稳态模型,开环稳定过程的稳态模型非常明确,但是理论上积分过程没有稳态增益.为了解决无法针对积分过程进行稳态优化的难题,文献[14]从积分过程对物质或能量累积的特点出发,提出了针对一阶积分过程的多变量系统的双层结构预测控制.该文从“稳态”角度分析了多变量积分过程控制输入的稳态平衡条件,并将该条件作为约束条

件置入稳态优化问题描述中.该文存在的问题是给出的算法仅适用于标称系统,当存在模型失配和不可测扰动时,由于积分的累积作用系统无法稳定.双层结构预测控制的优点,不仅在于对多变量约束控制系统的设定点进行协调优化,而且保证了多变量控制系统的内部控制输入与被控输出之间的稳态关系.第二个优点对消除控制系统稳态余差非常有效.文献[15]针对开环稳定过程,应用线性非齐次稳态方程组解的判定定理,给出了多变量预测控制稳态解的相容性与一致性分析方法,突出了设定点合理给定的重要性.

本文的主要贡献就是将文献[15]的研究成果推广至多变量积分过程,从积分输出变量与多个控制输入间的相对特性入手,提出了积分输出变量实现无静差控制的必要条件,论述了双层结构预测控制算法稳态优化的必要性,并对积分输出变量稳态斜率的迭代计算和下层动态控制算法目标函数形式进行了有益的完善和补充.同时,通过对积分输出变量预测误差产生的原因进行机理分析,提出了一种校正补偿方法,并通过仿真验证了该方法的控制效果.

2 多变量积分过程预测控制系统的稳态分析 (Steady state analysis of model predictive control for multi-variable integrating process)

为说明积分过程的稳态性质,以简单的单输入单输出一阶积分过程为例开展讨论,假设其传递函数为

$$G(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{K}{(Ts + 1)s}, \quad (1)$$

其中: K 为比例增益, T 为时间常数.

因为输出对输入的积分作用,可知对于如式(1)所示的被控对象,只要输入的“稳态”值不为零则输出将持续增加或减少.因此,对于如式(1)所示的积分过程稳态可达的充分必要条件为输入的稳态值为零(用反证法即可证明).显然,这种纯粹意义上的SISO积分过程是没有实际意义的.以文献[5]中的锅炉汽包为例,给水流量为控制输入,汽包液位为被控输出,事实上系统中还存在一个扰动输入:蒸汽流量.此时,给水流量与蒸汽流量构成了一个平衡对,只要两者间保持平衡关系则液位输出最终将稳定下来.

下面,将汽包液位系统的输入平衡关系推广至一般的多输入单输出积分变量过程.积分输出变量的本质在于其对物质或能量的累积效应.由这一性质出发,可以认为只有当进入系统的物质(或能量)等于离开系统的物质(或能量),并且保持这种状况不变,则表征物质(或能量)累积效应的输出变量将稳定下来.因此,积分输出变量稳定的一个必要条件为所有的过程输入(包括扰动输入)必须平衡,即所有输入对过程的“综合作用”为零.在此需要注意:为了计算积分过

程输入的综合作用, 本文引入了文献[14]中的输入对输出稳态速率增益矩阵概念, 该矩阵由积分输出进入临界稳态后上升或者下降的斜率组成.

下面以一个2输入3输出过程(其中第2个输出是积分输出)为例验证上述结论, 即积分输出只有在输入综合作用为零时才能稳定. 假设过程模型如下:

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{4.05e^{-27s}}{50s + 1} & \frac{1.77e^{-28s}}{60s + 1} \\ \frac{0.0539e^{-18s}}{s(50s + 1)} & \frac{0.0572e^{-14s}}{s(60s + 1)} \\ \frac{4.38e^{-20s}}{33s + 1} & \frac{4.42e^{-22s}}{44s + 1} \end{bmatrix}$$

给定设定值为 $\mathbf{y}_{sp} = (0.2, 0.1, -0.5)^T$, 本文采用文献[5]中提出的RDMC(ramp dynamic matrix control), 算法权系数 Q, R 均取1, 预测时域 P 为120, 控制时域 M 为10, 控制效果如图1-2所示(注意, 这里假设变量已经无量纲化, 因此在仿真图中的坐标是没有单位的. 另外, 在本文有关输出的曲线图中, 实线是实际的输出曲线, 点线是输出的设定值. 本文在进行从传递函数到阶跃响应模型的模型变换中, 选取的采样间隔为3 min, 因此在图1-2中每个点代表的时间也为3 min, 后续仿真类似). 由图可知, 在使用RDMC算法对该过程进行控制时, 输出值稳定在 $\mathbf{y} = (0.1259, 0.1442, -0.0110)^T$, 而输入值稳定在 $\mathbf{u} = (0.0529, -0.0499)^T$. 在这个仿真例子中, 积分输出相对于输入速率变化率增益向量为 $(0.0539, 0.0572)$, 通过计算可验证两个输入的综合作用为0, 通过仿真曲线也可以看出输入输出都已达到稳定状态.

虽然上述仿真例子中的过程最终达到了稳定的状态, 但是被控输出变量均出现了静差. 这说明积分过程稳定性要求的满足并不与输出设定值的达到存在等价关系, 实现积分过程的无静差控制还需要更加严格的条件.

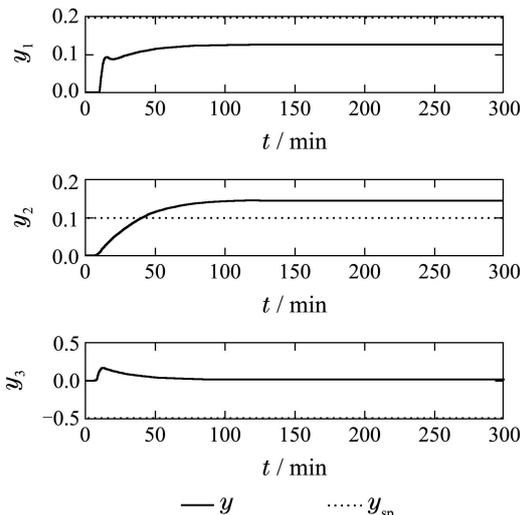


图 1 积分过程的被控输出曲线

Fig. 1 Output curves of integrating process

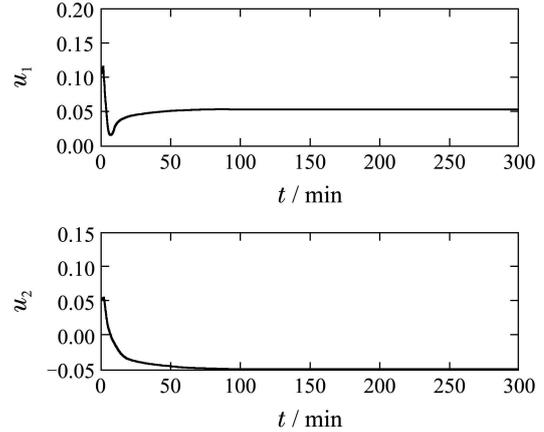


图 2 积分过程的控制输入曲线

Fig. 2 Input curves of integrating process

文献[15]给出了如下的定理: 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 $\mathbf{y}_{ss,k}$ 与 \mathbf{u}_0 和 \mathbf{u}_k 有关, 而与输入变化路径无关. 这样, 通过判定过程的稳态方程是否有解可判定输出设定值是否可实现无静差控制, 简化的稳态方程可描述如下:

$$K \Delta \mathbf{u}_{ss} = \Delta \mathbf{y}_{ss}, \quad (2)$$

其中: $K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{p1} & k_{p2} & \cdots & k_{pm} \end{bmatrix}_{p \times m}$ 是由稳态增益系

数组成的矩阵; $\Delta \mathbf{y}_{ss} = \mathbf{y}_{ss} - \mathbf{y}_0$, \mathbf{y}_{ss} 为被控输出变量的稳态值; \mathbf{y}_0 为被控输出的初始稳态值; $\Delta \mathbf{u}_{ss} = \mathbf{u}_{ss} - \mathbf{u}_0$, \mathbf{u}_{ss} 为控制输入的稳态值, \mathbf{u}_0 为控制输入的初始稳态值.

对于包含积分输出变量的过程, 文献[15]中给出的方法并不适用. 其原因在于积分过程并不存在一个真正的稳态, 相应的积分变量输出的增益系数仅代表模型截断时域处的模型增益, 并不是真正的稳态增益. 同时, 积分输出的最终稳态值是由一组能使过程稳定的输入在过程从一个稳态转移到另一个稳态之间的动态特性决定的, 因此文献[15]中的方法无法用于判断积分过程能否实现无静差控制.

本文将结合积分过程的特点对文献[15]中的方法进行拓展, 提出适用于积分过程的输出设定值无静差判据. 首先, 针对被控对象给出相应的模型描述. 假设某被控对象包含一个积分输出变量, 其余输出变量皆为开环稳定输出变量, 该过程的传递函数矩阵模型的描述如下:

$$\mathbf{y}(s) = G_u(s)\mathbf{u}(s) + G_f(s)\mathbf{f}(s), \quad (3)$$

其中: $G_u(s)$ 表示输入至输出的传递函数矩阵, $G_f(s)$ 表示可测扰动至输出的传递函数矩阵, 为方便模型表述, 这里使用一阶惯性纯滞后环节来描述开环

稳定过程(当然实际过程可能更为复杂,但是在下面的证明只与过程的稳态关系有关并不涉及动态特性). 积分过程则被表述为一个积分算子与一个“开环稳定过程”的乘积,此时“开环稳定过程”的比例增益实际上就是在阶跃输入作用下积分输出变量的上升或者下降的斜率(也可以称为模型的速率增益). 具体地, $G_u(s)$, $G_f(s)$ 的数学表达式如下:

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

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

其中第 r 个输出是积分输出变量.

定理 1 包含积分输出变量的多变量积分过程的一组设定点满足线性非齐次方程组

$$K_u \Delta u_{ss} + K_f \Delta f = \Delta y'_{ss} \quad (4)$$

是实现多变量积分过程无静差控制的一个必要条件,式(4)中所涉及各矩阵和向量分别定义如下:

$$K_u = \begin{bmatrix} k_{u,11} & k_{u,12} & \cdots & k_{u,1m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{u,(r-1)1} & k_{u,(r-1)2} & \cdots & k_{u,(r-1)m} \\ k_{u,r1} & k_{u,r2} & \cdots & k_{u,rm} \\ k_{u,(r+1)1} & k_{u,(r+1)2} & \cdots & k_{u,(r+1)m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{u,p1} & k_{u,p2} & \cdots & k_{u,pm} \end{bmatrix},$$

$$K_f = \begin{bmatrix} k_{f,11} & k_{f,12} & \cdots & k_{f,1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{f,(r-1)1} & k_{f,(r-1)2} & \cdots & k_{f,(r-1)n} \\ k_{f,r1} & k_{f,r2} & \cdots & k_{f,rn} \\ k_{f,(r+1)1} & k_{f,(r+1)2} & \cdots & k_{f,(r+1)n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{f,p1} & k_{f,p2} & \cdots & k_{f,pn} \end{bmatrix},$$

$$\Delta y'_{ss} = [\Delta y_{ss1} \cdots \Delta y_{ss(r-1)} \ 0 \ \Delta y_{ss(r+1)} \cdots \Delta y_{ssp}]^T,$$

$$\Delta u_{ss} = [\Delta u_{ss1} \ \Delta u_{ss2} \ \cdots \ \Delta u_{ssm}]^T,$$

$$\Delta f = [\Delta f_1 \ \Delta f_2 \ \cdots \ \Delta f_n]^T.$$

步骤 1 首先给出积分输出变量变化速率模型的推导过程. 积分过程的传递函数模型如下:

$$y^r(s) = G_u^r(s)u(s) + G_f^r(s)f(s). \quad (5)$$

对上式两端同乘一个微分算子 s ,则可得

$$s y^r(s) = s G_u^r(s)u(s) + s G_f^r(s)f(s). \quad (6)$$

步骤 2 其次,定义 $y_{Slope}^r = s y^r(s)$,表示积分变量进入临界稳态之后的输出变化斜率,则最终的速率变化模型如下:

$$y_{Slope}^{rs} = y_{Slope}^{ro} + S_u^r \Delta u + S_f^r \Delta f, \quad (7)$$

其中: y_{Slope}^{ro} 代表初始稳态的输出变化斜率, y_{Slope}^{rs} 代表过程最终稳态的输出变化斜率,而 S_u^r , S_f^r 是过程的速率增益模型.

步骤 3 由于本文论述的是过程在两个稳态之间的变化,即 $y_{Slope}^{ro} = 0$, $y_{Slope}^{rs} = 0$,可得

$$S_u^r \Delta u + S_f^r \Delta f = 0. \quad (8)$$

而对于积分过程,只有在其输入的综合作用为零时,其输出才不会呈现不断上升或者下降的现象,该积分过程才是稳定的,因此本文可以利用上式描述积分过程的稳态,本文将这一条件引入描述过程的稳态方程替换相应的增益条件,即可得到定理1.

注 1 1) 作为多变量积分过程实现无静差控制的一个必要条件,式(4)与积分输出变量的设定点没有关系.理论上积分输出变量的设定点可以在约束范围内任意取值,但在实际中还要考虑生产工艺和安全因素,积分输出变量多对应储罐或塔釜的液位,取它们的中位值是个较好的选择. 2) 在上述的推导过程中,过程仅包含一个积分输出变量,但该判据也可以推广到包含多个积分输出的情形. 3) 在此需要注意,本文提出的定理1只是针对包含一阶积分输出变量的多变量控制系统,并没有考虑多变量控制系统中普遍存在约束条件.在本文第3节中,将针对此类积分过程设计双层结构预测控制器,其稳态优化部分将考虑各种约束条件,式(4)将作为稳态输入输出之间的平衡关系约束并入约束条件之中.而且,此时的命题也发生变化,是求解一个满足式(4)的一组设定点,

而非判定一组设定点是否满足式(4).

定理1与文献[15]中所提出的方法在本质上是相同的, 但用积分过程的稳定性条件替换了积分过程的“稳态”增益系数. 该定理说明, 只要找到一组输出能够满足式(4)的设定点, 即方程有解, 当控制系统稳定时可实现无静差控制. 可以验证, 前述的2输入3输出积分过程仿真中的设定点并未满足这一条件.

选取一组满足上述方程的输出设定点 $y_{sp} = (0.5, 0.1097, 0.00451)^T$, 其余参数同前文仿真一样, 并未发生变化. 应用RDMC方法进行控制, 其控制效果如图3-4所示, 过程是稳定的, 且快速地达到了设定点, 仿真结果也验证了定理1.

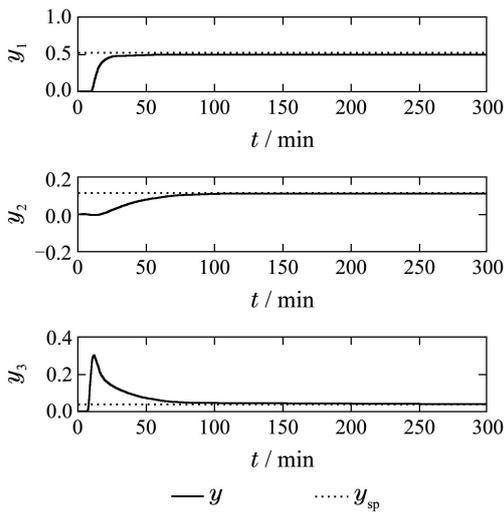


图 3 积分过程输出(第1组设定点)

Fig. 3 Output of integrating process (first setpoints)

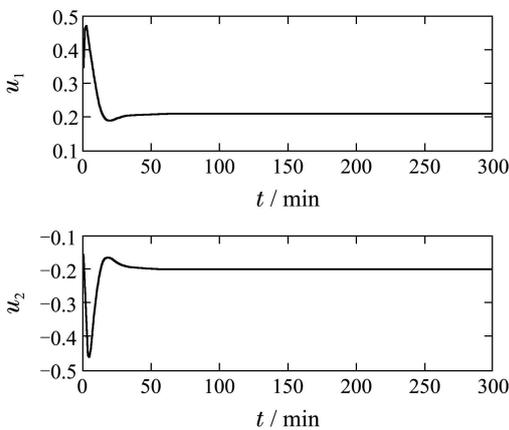


图 4 积分过程输入(第1组设定点)

Fig. 4 Input of integrating process (first setpoints)

选取另外一组满足定理1的设定点 $y_{sp} = (0.5, 0.4, 0.00451)^T$, 两组输出设定点的区别在于积分变量的设定点发生了变化. 控制系统的其余参数不变, 应用RDMC算法进行控制, 其控制效果如图5-6所示, 从图中可以看出, 过程是稳定的, 输出同样快速的达到设定点, 两个控制输入的稳态值也同第1组参数的情

形一样, 但是由于积分输出变量设定点的变化, 输入的动态特性发生了改变, 这也验证了定理1中注释1的观点.

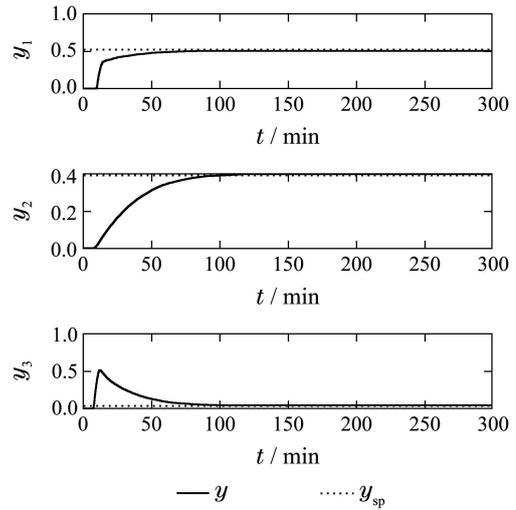


图 5 积分过程输出(第2组设定点)

Fig. 5 Output of integrating process (second setpoints)

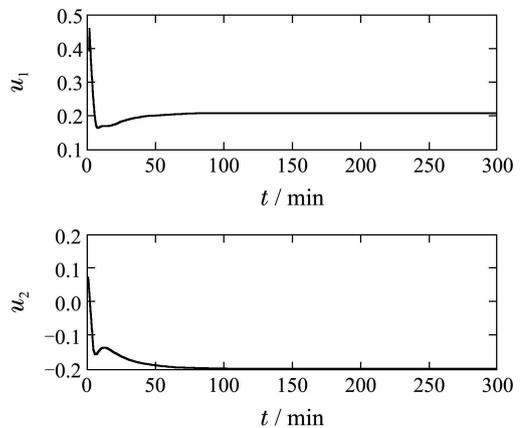


图 6 积分过程输入(第2组设定点)

Fig. 6 Input of integrating process (second setpoints)

3 积分过程的双层结构预测控制算法 (Double-layered model predictive control for multi-variable integrating process)

定理1给出了多变量积分过程实现无静差控制的一个必要条件. 该定理可以用于判断由当前的一组工作点变迁到另一组工作点是否可达. 为有效地将该定理集成到多变量控制系统的设计中, 可以使用双层结构预测控制策略. 双层结构预测控制的出发点是针对多变量工业过程, 结合过程的一些经济指标进行局部优化或者针对分层递阶结构下预测控制的上一层次—实时优化(real time optimization, RTO)的计算结果进行跟踪协调. 文献[14]利用积分过程模型的稳态速率增益提出了适用于积分过程的双层结构预测控制算法, 其主要贡献是首次实现了积分过程的稳态优化, 但仅是给出了算法层面的描述, 缺乏理论支撑基础.

本文提出的定理1可作为多变量积分过程稳态分析的理论基础,它与文献[15]的稳态优化算法有着本质的、一致的联系.由于定理1揭示了多变量积分过程的输出设定点的可达条件,一定程度上增加了双层结构预测控制的理论价值.本小节将首先给出双层结构预测控制的系统结构框图,对双层结构预测控制进行系统性论述,而后给出相应的稳态优化与动态控制算法细节.

3.1 双层结构预测控制的系统结构框图(Structure of double-layered predictive control)

与传统的单层预测控制结构框图相比,双层结构预测控制结构框图(图7)中增加了稳态优化这一功能块,该功能块的输入参数包括外部目标参数和输出反馈项.这里的外部目标可以来自RTO(分层递阶控制架构下的实时优化(real time optimization)层)的计算结果或者是操作人员的经验给定.如无外部目标给定,稳态优化可进行在自身约束空间范围内面向经济性能指标的优化.这一点与PID仪表内外给定非常相似.如果某PID仪表置于外给定档时,这就意味着该PID仪表将与另一PID仪表组成串级PID控制系统,其中一个PID仪表的输出信号将是另一PID仪表的设定值.

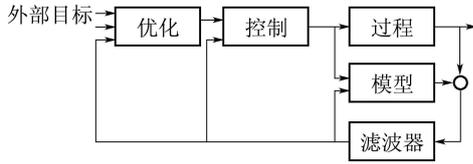


图7 双层结构模型预测控制的系统结构框图

Fig. 7 Structure of double-layered predictive control

文献[16]将跟踪RTO计算结果或者是操作人员的经验给定的稳态优化命名为稳态优化的目标跟踪问题,将面向经济性能指标的优化命名为稳态优化的经济问题.两类问题因出发点不同,形成的稳态优化问题描述亦不相同.文献[16]给出了面向开环稳定过程较为完整的稳态优化数学描述,包括最小移动问题、最小代价问题的稳态性能指标及基于优先级策略的稳态优化不可行处理方法.

在图7所示的预测控制结构框架下,“模型”的功能在于输出预测,既包含稳态预测也包括动态预测.“优化”模块基于稳态预测的结果进行稳态优化,“控制”模块基于动态预测的结果进行动态最优控制.两者的衔接点在于稳态优化的计算结果将作为动态控制的设定点,而且这里所述的设定点既包含输出设定点也包含输入设定点,即稳态工作点.

下面,简单论述面向包含一阶积分输出变量的多变量过程双层结构预测控制的算法细节.

3.2 稳态优化(Steady state optimization)

多变量积分过程面向经济目标的稳态优化问题可

以表述为若干个输入和输出稳态变量的线性组合.利用输入输出之间的稳态增益关系,一般来说目标函数可以转化为如下的形式:

$$\begin{cases} \min J = \mathbf{c}^T \Delta \mathbf{u}_{ss}(k), \\ \Delta \mathbf{u}_{ss}(k) \\ \text{s.t.} \\ \Delta \mathbf{y}_{ss}(k) = K_u \Delta \mathbf{u}_{ss}(k) + K_u \Delta \mathbf{f}(k) + \mathbf{e}(k), \\ \mathbf{y}_{\text{Slope}}^r(k) + S_u^r \Delta \mathbf{u}_{ss}(k) + S_f^r \Delta \mathbf{f}(k) = 0, \\ \mathbf{u}_{LL} \leq \mathbf{u}_{ss}(k-1) + \Delta \mathbf{u}_{ss}(k) \leq \mathbf{u}_{HL}, \\ \mathbf{y}_{LL} \leq \mathbf{y}_{ss}(k-1) + \Delta \mathbf{y}_{ss}(k) \leq \mathbf{y}_{HL}, \end{cases} \quad (9)$$

其中: \mathbf{c}^T 是根据各个控制输入变量的标准化效益或成本构建的代价系数向量,其维数为 $1 \times m$; $\Delta \mathbf{u}_{ss}(k)$ 为稳态控制输入的增量,其定义式为 $\Delta \mathbf{u}_{ss}(k) = \mathbf{u}_{ss}(k) - \mathbf{u}_{ss}(k-1)$,其维数为 $m \times 1$; $\mathbf{u}_{ss}(k)$ 为当前时刻 k 控制输入的稳态值; $\mathbf{u}_{ss}(k-1)$ 为 $k-1$ 时刻控制输入的测量值; $\Delta \mathbf{y}_{ss}(k)$ 为输出变量的稳态增量,其定义式为 $\Delta \mathbf{y}_{ss}(k) = \mathbf{y}_{ss}(k) - \mathbf{y}_{ss}(k-1)$,维数为 $p \times 1$; $\mathbf{y}_{ss}(k)$ 为当前时刻 k 的输出稳态值; $\mathbf{y}_{ss}(k-1)$ 为 $k-1$ 时刻的输出稳态值; $\Delta \mathbf{f}(k)$ 为扰动变量的增量,其维数为 $n \times 1$.需要指出:因为扰动变量不受控,其稳态是不可预测的,只能使用即时值来进行增量. $\mathbf{y}_{\text{Slope}}^r(k)$ 为积分输出变量在 k 时刻的斜率预测值. \mathbf{u}_{LL} , \mathbf{u}_{HL} 分别是控制输入的上、下限, \mathbf{y}_{LL} , \mathbf{y}_{HL} 是输出的上、下限.

式(9)中的 $\mathbf{e}(k)$ 理论上应为稳态误差的修正量,但是由于输出变量的稳态值无法直接测量,所以只能采用近似替代手段,具体采用文献[12]中的方法,由双层结构预测控制的下层——动态控制层计算的预测误差替代,即

$$\mathbf{e}(k) = \mathbf{y}_k - \hat{\mathbf{y}}(k|k-1), \quad (10)$$

其中, $\mathbf{y}_k \in \mathbb{R}^{p \times 1}$ 为当前时刻输出值, $\hat{\mathbf{y}}(k|k-1) \in \mathbb{R}^{p \times 1}$ 为当前时刻预测输出值.对于开环稳定过程和积分过程,采用式(10)对未来的输出预测值进行校正应该采用不同的方法,将在反馈校正(第4部分)中详细论述.

式(9)是一种在预测控制所处约束空间内面向经济性能指标进行优化的问题描述.在大系统的分层递阶优化控制结构中,实时优化(RTO)负责全厂级的稳态优化,预测控制负责对优化设定点进行跟踪控制,此时双层结构预测控制的上层稳态优化可以实现对RTO的计算结果的微调,相关的问题描述参见文献[13],此处不再赘述.

式 $\mathbf{y}_{\text{Slope}}^r(k) + S_u^r \Delta \mathbf{u}_{ss}(k) + S_f^r \Delta \mathbf{f}(k) = 0$ 为积分输出变量的稳定性条件,与式(8)有所不同.这是因为双层结构预测控制中的上层稳态优化与下层的动态控制是同周期的,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,提高优化的可行性.而定理1给出的

判据描述的是过程从一个稳态至另一稳态的变化需要满足的条件, 因此积分过程的稳态优化方法与定理1是契合的. 此外, 不为零的积分稳态斜率必须在后续的计算时刻予以补偿. 可以采用如图8的框图实现 $y_{\text{Slope}}^r(k)$ 的迭代计算.

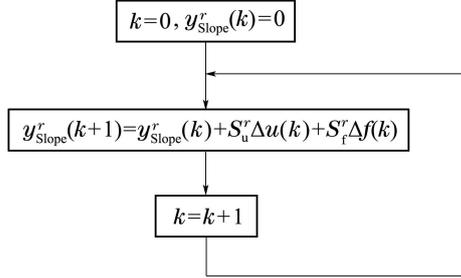


图8 积分输出变量的稳态斜率迭代计算方法
Fig. 8 Iterative computation algorithm for integral output's slope

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.

需要指出, 式(9)的决策变量为 $\Delta \mathbf{u}_{\text{ss}}(km)$. 在双层结构预测控制框架下, 上层的稳态优化与下层的多变量预测控制同周期运行. 当求解优化问题(9)得到 $\Delta \mathbf{u}_{\text{ss}}(k)$ 后, 对于开环稳定过程可由稳态增益矩阵计算相应的输出稳态值 $\mathbf{y}_{\text{ss}}(k)$. $\mathbf{y}_{\text{ss}}(k)$ 将作为设定点下传至动态控制层. 但是对于一阶积分过程, $\mathbf{y}_{\text{Slope}}^r(k) + S_u^r \Delta \mathbf{u}_{\text{ss}}(k) + S_f^r \Delta \mathbf{f}(k) = 0$ 仅为一个验证性条件, 不能根据该方程计算出一阶积分过程的设定点. 积分输出应根据过程工艺特点进行人工设定. 记开环稳定输出变量的设定点为 $\mathbf{w}^s(k)$, 积分变量的设定点为 $\mathbf{w}^r(k)$, 两者共同构成了动态控制模块中预测控制的输出变量设定点 $\mathbf{w}(k)$.

3.3 动态控制算法(Dynamic control algorithm)

在双层结构预测控制系统中, 稳态优化的计算结果包括控制输入稳态目标与被控输出稳态目标, 常规预测控制算法中无法实现对控制输入稳态目标的跟踪. 为了解决该问题, 文献[15]将控制输入稳态值的惩罚项加入到如下的预测控制目标函数中:

$$J(k) = \|\mathbf{w}(k) - \tilde{\mathbf{y}}_{\text{PM}}(k)\|_Q^2 + \|\mathbf{u}(k) - \mathbf{u}_{\text{ss}}(k)\|_V^2 + \|\Delta \mathbf{u}_{\text{M}}(k)\|_R^2, \quad (11)$$

体现了使控制输入最终趋向它的稳态值的意愿.

文献[15]还指出, 对于瘦系统和方系统常规预测控制算法即可实现控制输入目标与被控输出目标的一致跟踪.

3.4 双层结构预测控制执行步骤(Executing procedures of double-layered predictive control)

针对包含一阶积分输出变量的多变量过程给出双层结构预测控制的具体执行步骤:

Step 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. 积分输出变量的设定点由人工给定.

Step 2 周期性地执行稳态优化与动态控制功能. 具体如下:

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;

2) 稳态优化模块使用过程输出信号经式(10)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(9). 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. 积分输出变量的设定点可由操作人员在线调整;

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态的情况下启动.

4 多变量积分过程双层结构预测控制的反馈校正策略(Feedback correction strategy of double-layered model predictive control for multi-variable integrating process)

以上研究的是标称系统的情况, 而在实际过程中, 不论是通过机理建模或者辨识得到的模型都不可能是完全准确的, 且随着控制过程的进行, 模型与对象之间的不匹配一般将加剧. 此外, 在复杂的多变量工业过程中不可测扰动的存在是一个很普遍的现象, 虽然其作用机理与模型失配不同但作用结果却很相似.

4.1 模型失配下的仿真分析(Simulation and analysis under model-plant mismatch)

下面, 通过两个仿真例子来分别观察模型的非积分环节与积分环节存在模型失配情况下的控制效果.

情形 1 非积分环节存在模型失配. 仿真所用的模型如下:

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{4.05e^{-27s}}{50s+1} & \frac{1.77e^{-28s}}{60s+1} & \frac{5.88e^{-27s}}{50s+1} \\ \frac{0.0539e^{-18s}}{s(50s+1)} & \frac{0.0572e^{-14s}}{s(60s+1)} & \frac{0.069e^{-15s}}{s(40s+1)} \\ \frac{4.38e^{-20s}}{33s+1} & \frac{4.42e^{-22s}}{44s+1} & \frac{7.20}{19s+1} \end{bmatrix},$$

$G(s)$ 为预测控制器中所用模型. 将 $G(s)$ 第1输入第1

输出子模型的增益(4.05)乘以1.2后作为过程对象模型. 建模时域 N 取120, P 取120, M 取10, 权系数 Q 和 R 均取1, 被控输出的约束上限是 $(1, 2, 1)^T$, 下限是 $(-1, -2, -1)^T$, 而控制输入的约束上限是 $(0.5, 0.5, 0.5)^T$, 下限是 $(-0.5, -0.5, -0.5)^T$, 代价系数为 $(-2, -1, 1)^T$, 积分输出的设定值设置为 -0.5 . 控制效果见图9. 从被控输出图可以看到, 虽然模型存在失配情况, 但是双层结构预测控制算法仍能取得较好的控制效果. 因篇幅关系, 略去控制输入曲线.

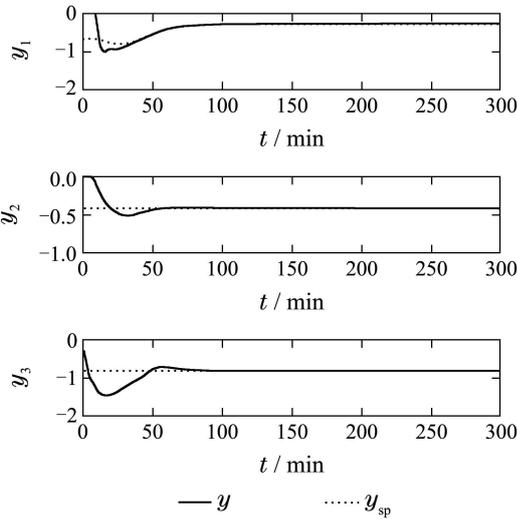


图9 非积分环节失配情况下被控输出曲线

Fig. 9 Output curves of process with model-plant mismatch in stable subsystem

因为模型与过程之间存在着失配, 导致输出预测误差必然存在. 将运行过程中的每个输出预测误差进行记录, 绘制了如图10所示的预测误差曲线. 图中的 e_1 代表了 y_1 的输出预测误差 e 的曲线, e_1 在控制作用的起始阶段不为零, 但随着反馈校正的继续, e_1 最终趋向于零. e_2 和 e_3 误差等级极小, 属于计算误差, 可以忽略不计.

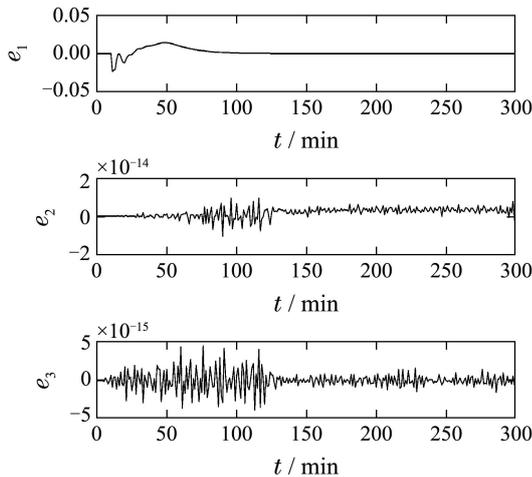


图10 非积分环节失配情况下的输出预测误差曲线

Fig. 10 Prediction error curves of process with model-plant mismatch in stable subsystem

情形2 积分环节存在模型失配. 在这个仿真中, 第1输入第2输出子模型速率增益(0.0539)乘以1.2后作为过程对象模型, 控制器模型仍为 $G(s)$, 其余参数不变, 将积分输出的设定值设置为 -0.8 , 其被控输出曲线如图11所示. 从图11可以看到, 过程虽然保持了稳定, 但是在输出端有静差出现.

输出预测误差曲线如图12所示, 可见除积分输出变量外, 其余两个开环稳定输出变量的输出预测误差基本上为0. 但是, 积分输出变量输出预测误差的特点与图9中所示的开环稳定过程不同, 预测误差最终不能回归到零, 而是保持在某一非零数值上. 这个预测误差将持续对稳态优化(9)中输入输出稳态关系模型进行补偿.

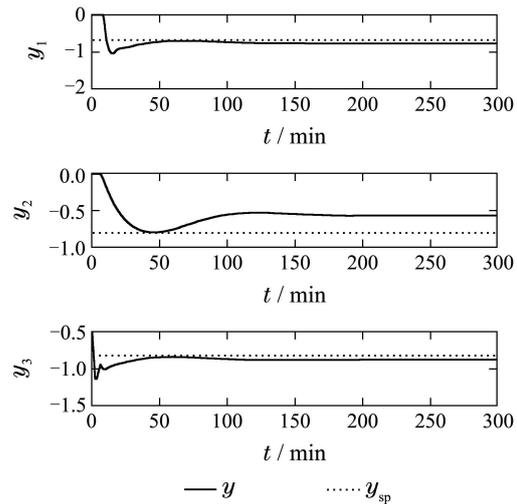


图11 积分环节失配情况下被控输出曲线

Fig. 11 Output curves of process with model-plant mismatch in integral subsystem

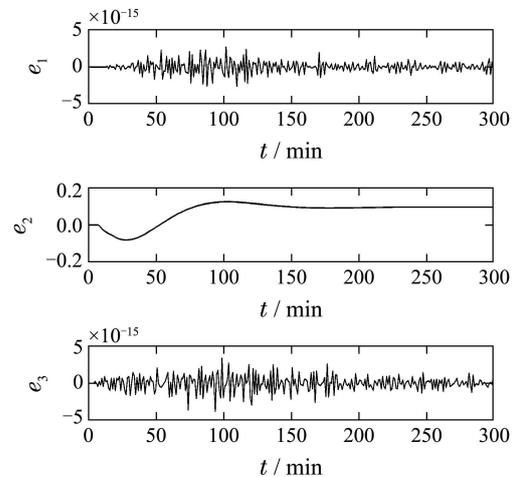


图12 积分环节失配情况下被控输出曲线

Fig. 12 Prediction error curves of process with model-plant mismatch in integral subsystem

4.2 适用于积分对象的反馈校正策略(Feedback correction strategy for integrating process)

模型与对象存在失配, 将影响输出预测的准确性.

预测控制的反馈校正环节能够通过当前时刻输出测量值与预测值之差,对下一个计算周期中的输出预测序列进行修正,一定程度上降低或消除模型失配对预测控制带来的不利影响。

一般来说,输出测量值与预测值之间的偏差可以归结为不可测扰动输入、噪声和模型参数失配的综合作用结果。对于开环稳定过程,不可测扰动输入所产生的预测误差本身是稳定的,显然在一定范围内通过不断地反馈校正可将这些不可测扰动输入的影响抵消。但是,常规的反馈校正策略对积分输出过程不再有效,因为积分输出将对不可测扰动的输入进行积分,由此产生的预测误差将随时间的持续而线性增加,常规的反馈校正策略仅能对一步预测误差进行处理,从而产生严重的累积预测误差,直接导致基于模型预测的控制系统无法正常工作。

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。在多变量动态矩阵控制(dynamic matrix control, DMC)算法的反馈校正环节中,通过如下误差校正矩阵 H 进行反馈校正^[2]:

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & h_{pp} \end{bmatrix}, \quad h_{ii} = \begin{bmatrix} h_{ii}(1) \\ \vdots \\ h_{ii}(N) \end{bmatrix},$$

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

其中对非积分变量过程,通常误差校正系数 $h_{ii}(1), \dots, h_{ii}(N)$ 均设为1。

对于积分输出变量,使用补偿因子 $\alpha(0 \leq \alpha \leq 1)$ 对误差校正系数进行修正,实现预测误差的积分补偿。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

$$h_{rr} = (1, 1+\alpha, 1+2\alpha, \dots, 1+(N-1)\alpha)^T. \quad (12)$$

由式(12)可知,对未来输出预测的补偿值不是各个时刻相同,而是按照一定的斜率递增,这与积分过程的阶跃响应是一致的。需要注意,若是仅对相应预测误差进行积分处理,只需将补偿因子 α 置1即可,但考虑到过程中可能存在的不可测扰动与测量噪声,将 α 作为一个可根据实际过程调整的参数,便于实时地在线调整 α 的值,更利于工程上的实现。该方法可以很好地解决积分过程模型失配或者存在不可测扰动时的优化与控制问题,增强控制算法的鲁棒性。

利用改进后的算法对积分环节存在失配的模型进行控制,补偿因子取1(此处仿真并未加入噪声),其余参数不变,模型失配的程度也不变,控制效果如图13与图14所示,从仿真结果中可以看到,引入补偿因子后输出预测误差显著减小,且随着控制过程的进行,

预测误差逐渐减小到零,最终消除了输出端的静差,取得了好的优化与控制效果。

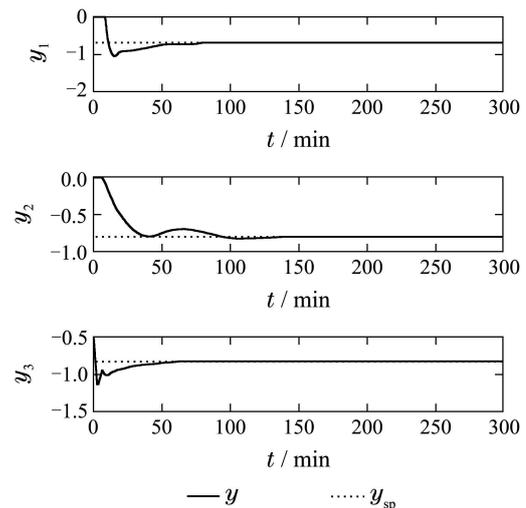


图13 引入补偿因子后的被控输出

Fig. 13 Output curves of process with compensation factor

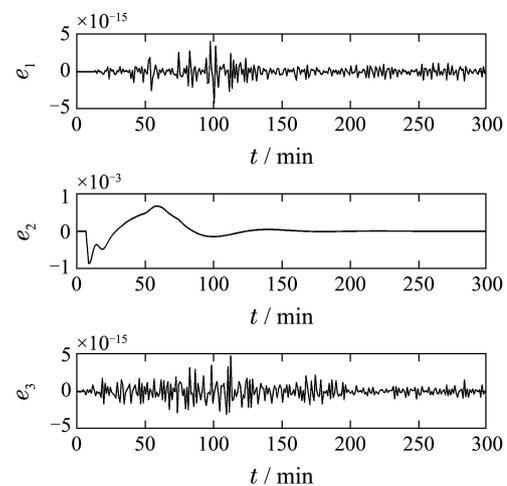


图14 引入补偿因子后的输出预测误差

Fig. 14 Prediction error curves of process with compensation factor

5 结语(Conclusion)

本文针对积分过程,给出了稳定性条件,由此给出了一个判定多变量积分过程控制实现无静差控制的一个必要条件,论证了双层结构预测控制稳态优化的重要性。同时还考虑了积分环节存在模型失配情况下的过程优化与控制。由于积分过程的特殊性质,当系统存在模型失配或不可测扰动时,常规的反馈校正无法适应积分过程的特点,产生较大的输出预测误差。通过对积分过程输出预测误差产生原因进行机理分析,得出了积分输出对不可测扰动的输入进行积分,且由此产生的预测误差将随时间的持续而线性增加的结论。本文针对这个问题,在反馈校正系数向量的设计中引入了补偿因子,使双层结构预测控制算法能够完成对于积分过程的优化与控制。

参考文献(References):

- [1] QIN S J, BADGWELL A. A survey of industrial model predictive control technology [J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 7(11): 733 – 764.
- [2] CULTER C R, RAMAKER B L. Dynamic matrix control—a computer control algorithm [C] // *The AIChE 86th National Meeting*. Houston TX: IEEE, 1979.
- [3] CLARKE D W, MOHTADI C. Properties of generalized predictive control [J]. *Automatica*, 1989, 25(6): 859 – 873.
- [4] RICHALET J, RAULT A, TESTUD J L, et al. Model predictive heuristic control: application to industrial process [J]. *Automatica*, 1978, 14(5): 413 – 428.
- [5] 邹涛, 刘红波, 李少远. 锅炉汽包水位非自衡系统的预测控制 [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.)
- [6] ZHANG B, YANG W, ZONG H, et al. A novel predictive control algorithm and robust stability criteria for integrating processes [J]. *ISA Transactions*, 2011, 50(3): 454 – 460.
- [7] RODRIGUES M A, ODLOAK D. An infinite horizon model predictive control for stable and integrating processes [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2003, 27(8/9): 1113 – 1128.
- [8] CARRAPICO O L, ODLOAK D. A stable model predictive control for integrating processes [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2005, 29(5): 1089 – 1099.
- [9] SANTORO B F, ODLOAK D. Closed-loop stable model predictive control of integrating systems with dead time [J]. *Journal of Process Control*, 2012, 22(7): 1209 – 1218.
- [10] YING C M, JOSEPH B. Performance and stability analysis of LP-MPC and QP-MPC cascade control systems [J]. *AIChE Journal*, 1999, 45(7): 1521 – 1533.
- [11] KASSMANN D E, BADGWELL T A. Robust steady-state target calculation for model predictive control [J]. *AIChE Journal*, 2000, 46(5): 1007 – 1024.
- [12] NIKANROV A, SWARTZ C L E. Sensitivity analysis of LP-MPC cascade control systems [J]. *Journal of Process Control*, 2009, 19(1): 16 – 24.
- [13] 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] // *2011 International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes*. Piscataway, NJ: IEEE, 2011: 524 – 529.
- [14] 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)
- [15] 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.)
- [16] 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.
(ZOU Tao, DING Baocang, ZHANG Duan. *MPC: an Introduction to Industrial Applications* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.)

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;

王丁丁 (1989–), 男, 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;

丁宝苍 (1972–), 男, 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;

于海斌 (1964–), 男, 研究员, 博士生导师, 主要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.