

# 一类工业过程运行反馈优化控制方法

范家璐<sup>1</sup> 张也维<sup>1</sup> 柴天佑<sup>1</sup>

**摘要** 为了克服流程工业运行优化中控制回路闭环系统的动态误差对运行优化性能的影响, 本文针对一类工业过程提出了使运行指标实际值与目标值偏差和控制回路输出与设定值跟踪误差的二次性能指标极小化的运行优化反馈控制方法. 该方法由运行层设定值反馈控制和回路控制层设定值跟踪控制组成, 其中设定值反馈控制采用基于 LMI 的模型预测控制, 回路控制采用衰减率可调的带有积分项的状态反馈调节律. 本文给出了保证运行优化反馈控制闭环系统渐近稳定的充分条件, 并开展了浮选过程运行优化反馈控制仿真实验, 实验结果表明所提方法的有效性.

**关键词** 工业过程, 运行最优控制, 模型预测控制, 浮选过程

**引用格式** 范家璐, 张也维, 柴天佑. 一类工业过程运行反馈优化控制方法. 自动化学报, 2015, 41(10): 1754–1761

**DOI** 10.16383/j.aas.2015.c150061

## Optimal Operational Feedback Control for a Class of Industrial Processes

FAN Jia-Lu<sup>1</sup> ZHANG Ye-Wei<sup>1</sup> CHAI Tian-You<sup>1</sup>

**Abstract** In order to overcome the influence of the dynamic error of closed-loop control system on the operational process performance, an optimal operational feedback control method is proposed in this paper for a class of industrial processes by minimizing the quadratic performance index based on both the deviation between desired operational process index and actual value, and the tracking error between set-point and controlled plant output. This method employs a dual-layer control structure, consisting of the set-point feedback control in operation layer and the set-point tracking control in device layer. A model predictive controller using LMI is designed to dynamically give optimal set-points; an adjustable decay rate control using state feedback and error integral is employed for designing local controller to guarantee the tracking performance of the plant. In particular, a sufficient condition to guarantee the asymptotic stability of the whole closed-loop system is given. A simulation experiment in a flotation process is finally employed to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

**Key words** Industrial process, optimal operational control, MPC, flotation process

**Citation** Fan Jia-Lu, Zhang Ye-Wei, Chai Tian-You. Optimal operational feedback control for a class of industrial processes. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(10): 1754–1761

工业过程优化与运行的自动控制近年来逐渐成为控制理论与工程领域的热点研究问题<sup>[1–2]</sup>. 从工程实践的角度看, 工业过程自动化的作用不仅仅要使关键过程变量很好地跟踪设定值的变化, 实现工艺上的要求, 而且要控制整个生产运行过程中反映产品质量、效率与消耗相关的指标, 即运行指标在目标值范围内, 实现过程运行的优化控制<sup>[3–5]</sup>.

自优化控制以工业过程的经济效益为目标函数, 在满足工业过程各种约束条件的情况下, 寻找合适的被控变量, 用一组固定的常数作为被控变量的设

定值, 使实际工况处在近似最优操作点上, 实际目标函数与最优目标函数的偏差处于可以接受范围内<sup>[6–7]</sup>. 实时优化 (Real time optimization, RTO) 将回路控制与过程运行的优化相结合, 采用两层结构, 上层在线的实时优化经济性能指标, 经计算产生底层控制回路被控变量的设定值, 通过底层控制器作用使被控变量跟踪设定值, 从而尽可能使生产过程运行在经济优化状态<sup>[8–11]</sup>. 对于钢铁、有色金属等工业过程, 其生产过程往往是动态的. 产品牌号的变化、原料成份的波动等因素使生产过程存在各种干扰和不确定动态; 另外, 生产边界条件变化、各种运行设备或子系统故障、外部干扰等多种因素常常导致被控系统从一个工作点变到另一个工作点, 甚至使系统参数发生大范围跳变. 因此, 难以采用 RTO 等基于稳态模型的运行优化方法.

国外高技术公司针对钢铁等工业过程采用预处理手段使原材料成份稳定、生产工况平稳, 研发将运行指标转化为控制回路设定值的工艺模型或经验模

收稿日期 2015-01-30 录用日期 2015-07-03  
Manuscript received January 30, 2015; accepted July 3, 2015  
国家自然科学基金 (61333012, 61304028) 和国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2015AA043802) 资助  
Supported by National Natural Science Foundations of China (61333012, 61304028) and National High Technology Research and development Program (863 Program) (2015AA043802)  
本文责任编辑 姜斌  
Recommended by Associate Editor JIANG Bin  
1. 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室 沈阳 110819  
1. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819

型, 进行开环设定控制. 然而我国资源条件和生产条件与国外差别较大, 原材料成份波动大, 因此国外研发的控制技术及系统并不适合国情. 国内学者针对我国工业生产过程的上述问题, 通常结合具体的工业过程采用基于智能技术的运行反馈控制方法. 文献 [12] 针对热轧层流冷却过程将常规控制与基于神经网络、模糊推理的智能控制技术相结合, 提出了一种混合监控方法, 来改善最终产品的性能. 文献 [13] 提出了基于集成控制的优化设定方法, 应用于 6 段步进梁式加热炉, 改善了梁坯的加热效果. 文献 [5] 将建模与控制相集成, 反馈、预测、前馈相结合, 采用案例推理、规则推理、神经网络等智能方法, 提出了过程优化运行的混合智能控制方法, 应用于赤铁矿选矿厂竖炉, 将运行指标控制在目标值范围内. 文献 [14] 针对铝烧结生产线的原料浆制备过程采用机理知识与智能技术, 提出了基于集成模型和层次推理的设定控制方法.

然而上述自优化、RTO 和智能运行反馈控制方法均假设底层过程控制可以跟踪运行控制给出的设定值, 没有考虑底层跟踪设定值的动态误差对双闭环运行优化与控制的影响. 因此, 本文致力于探讨底层动态特性对工业过程双闭环运行控制的影响. 本文结合工业过程中广泛采用的模型预测控制提出一种更常规的动态运行反馈最优控制策略, 并给出了保证系统渐近稳定的充分条件. 该方法针对实际流程工业过程的运行特点, 提出了运行优化反馈控制的两层结构框架, 并采用双闭环回路控制方法; 建立关于运行指标和底层回路设定值的无限时域二次型预测控制性能指标; 设计了鲁棒模型预测控制器以保证运行指标控制最优跟踪; 该方法应用于黄铜矿浮选过程, 可以动态地给出精矿品位与尾矿品位优化设定值, 当运行工况受到扰动出现波动时, 通过调节作用保证浮选过程运行在目标工况下.

## 1 问题描述

工业过程运行控制问题不仅涉及到底层设备层对关键过程变量的反馈控制, 而且涉及到上层运行层对运行指标的反馈控制. 运行层中的设定控制环节根据期望运行指标  $r^*$  与实际运行指标  $r(T)$  (这里  $T = kT_s$ ,  $k$  为正整数,  $T_s$  为运行层采样周期) 给出设定值  $y_i^*$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), 跟踪控制器产生输入  $u_i(t)$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) 作用于被控对象, 使其输出  $y_i(t)$  很好地跟踪运行层控制器给出的设定值  $y_i^*$ , 运行指标  $r(T)$  跟踪计划调度部门给出的目标值  $r^*$ . 在运行过程中, 由于复杂动态环境的变化等因素, 底层控制回路中的被控对象可能会受到测量噪声等有界未知干扰  $v_1(t)$ , 使得该回路不能始终处于稳态, 为了消除上述扰动对输出  $y_i(t)$  的影响势必会引发

$u_i(t)$  的调整动作, 从而引起运行过程动态性能的变化; 原料成分的波动, 生产设备的磨损、产品市场价格波动等也会对运行指标产生干扰, 难以用数学模型来描述, 这里用有界未知量  $v_2(t)$  来表示干扰作用.

因此, 为保证生产过程的安全运行, 需要从两层控制结构的角度出发, 同时考虑两个层级间不同动态特性的相互作用, 保证运行层能够根据工况变化实时产生当前状态下的最优设定值  $y_i^*(T)$  和与之对应的跟踪控制律, 使得底层回路被控变量与运行指标都能够达到期望设定值, 且跟踪误差尽量最小. 基于此, 本文利用模型预测控制 (Model predictive control, MPC) 的思想, 定义如式 (1) 所示二次型性能指标, 表示每一运行层采样 ( $T + i$ ) 时刻, 运行指标预测值  $r(T + i|T)$  ( $i = 1, 2, \dots, \infty$ ) 与期望值的误差平方的累加以及控制回路设定值  $y^*(T + i|T)$  与预测值  $y(T + i|T)$  ( $i = 1, 2, \dots, \infty$ ) 的误差平方的累加之和极小, 其中  $Q_1, R$  均为对称正定加权矩阵.

$$J^\infty = \sum_{i=0}^{\infty} \{ \|r^* - r(T + i|T)\|_{Q_1}^2 + \|y^*(T + i|T) - y(T + i|T)\|_R^2 \} \quad (1)$$

运行过程的动态模型由运行层的动态模型和设备层被控对象的动态模型两部分组成:

上层的运行过程动态模型是与底层生产过程输入、输出以及产品价格等因素相关的, 运行过程模型如式 (2) 所示, 表示实际运行指标  $r(T)$  与输出  $y(T)$ 、底层回路跟踪控制器输出  $u(T)$  的关系模型:

$$r(T) := My(T) + Nu(T) \quad (2)$$

其中,  $r(T) \in \mathbf{R}^{n_r \times 1}$ ,  $y(T) \in \mathbf{R}^{n_y \times 1}$ ,  $u(T) \in \mathbf{R}^{n_u \times 1}$ ;  $M \in \mathbf{R}^{n_r \times n_y}$  和  $N \in \mathbf{R}^{n_r \times n_u}$  是关于产品价格的效益系数矩阵, 长时间看来矩阵  $M$  和  $N$  受价格市场的影响而波动, 本文考虑短时间内产品价格维持不变. 在接下来的研究中, 会进一步细化运行指标预报模型<sup>[15]</sup>. 由于设备层控制回路的设定是在每个运行层采样时刻由设定控制器给出的, 所以可以认为控制回路的设定点  $y^*(T)$  都是分段常值  $y^*$ , 即  $y^*(T) \in Y = \{y^* | y^*(t) = y^*(k), kT_s \leq t \leq kT_s + T_s\}$ .

实际工业过程的动态特性往往比较复杂, 底层被控对象的输入输出模型如果需要在在线运行, 往往要在平衡点处线性化后, 用简化的线性模型来逼近:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $x(t) \in \mathbf{R}^{n_x \times 1}$  是被控对象状态;  $A \in \mathbf{R}^{n_x \times n_x}$ ,  $B \in \mathbf{R}^{n_x \times n_u}$  和  $C \in \mathbf{R}^{n_y \times n_x}$  是系数矩阵. 这一运行

控制问题的输出包括跟踪控制器输出  $u(t)$  和设定值优化控制输出即底层控制回路的设定值  $y^*(T)$ . 于是本文需要解决的最优控制问题可以描述如下:

$$\begin{aligned} \min \quad & J^\infty \\ \text{s.t.} \quad & (2), (3) \end{aligned}$$

最优控制的决策变量是  $y^*(T)$  和在该条件下的跟踪控制输出  $u(t) = f(x(t), y^*(T) - y(t))$ , 其中  $f$  表示控制律.

## 2 运行优化控制器设计

### 2.1 运行优化控制策略

针对上节描述的运行优化控制问题, 本文采用回路控制层和控制回路设定两层控制结构, 提出了如图 1 所示的控制策略. 控制回路的设定点是在每个运行层采样时刻由 MPC 设定控制器给出的, 再通过跟踪控制器的作用实现设定点跟踪, 因此首先针对两层结构分别设计设备层与运行层控制策略, 再将这两层结构作为整体考虑分析运行过程稳定性.

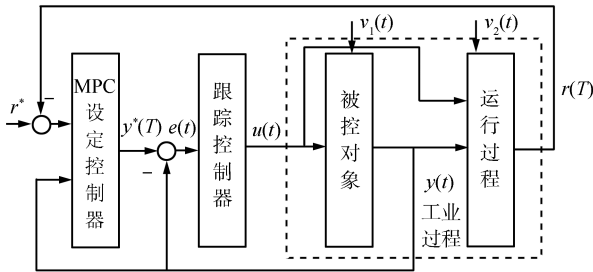


图 1 动态工业过程运行优化控制的两层结构

Fig. 1 The dual-layer structure of operational optimal control in dynamic industrial process

设备层跟踪控制器的控制目标是使设备层控制回路的输出  $y(t)$  跟踪满足性能指标 (1) 的设定值优化控制输出  $y^*(T)$ , 本文假设某一采样时刻的最优设定点  $y^*$  已知, 先保证设备层闭环回路能够稳定跟踪任意假设给定  $y^*$ . 基于被控对象的状态空间模型设计闭环系统衰减率可调的跟踪控制律  $f$ ; 获得闭环控制系统的方程后, 根据闭环系统的输入输出关系建立运行过程的动态模型, 再设计运行层设定值优化控制器计算实际的  $y^*(T)$ .

MPC 设定控制器将被控对象闭环系统和运行过程的跟踪二次性能指标无穷时域累加和作为控制器设计的性能指标, 通过在每个运行层采样时刻  $T$  求解性能指标最小化问题产生这一采样周期内的底层回路的设定值  $y^*(T)$ .

### 2.2 运行优化控制策略的实现

#### 2.2.1 收敛速率可调节的设备层跟踪控制

设备层回路跟踪控制器的作用需要满足在每个

运行层采样周期  $T_s$  内, 被控对象的输出能够及时快速地稳定跟踪这一采样时刻运行层给出的最优设定值. 为了实现无差跟踪, 在状态反馈调节稳态的基础上加入了积分环节. 设备层回路闭环结构图如图 2 所示.

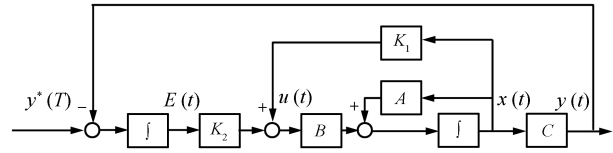


图 2 设备层闭环回路结构框图

Fig. 2 The closed-loop structure of device layer

假设系统  $\{A, B\}$  能控, 跟踪控制器输出为

$$u(t) = K_1 x(t) + K_2 E(t) \quad (4)$$

其中  $E(t) = \int_0^t (y^* - y(t))dt$ , 将式 (4) 代入式 (3), 引入增广向量  $\eta(t) = [x(t), E(t)]^T$ , 可以得到设备层被控系统的闭环方程:

$$\begin{aligned} \dot{\eta}(t) &= A_c \eta(t) + B_c y^* \\ y(t) &= C_c \eta(t) \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $A_c = A_\eta + B_\eta K$ ,  $A_c \in \mathbf{R}^{n_\eta \times n_\eta}$  ( $n_\eta = n_x + n_y$ ),  $A_\eta = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}_{n_\eta \times n_\eta}$ ,  $B_\eta = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}_{n_\eta \times n_u}$ ,  $C_c = \begin{bmatrix} C \\ 0 \end{bmatrix}_{n_y \times n_\eta}$ ,  $K = \begin{bmatrix} K_1 & K_2 \end{bmatrix}_{n_u \times n_\eta}$ ,  $B_c = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}_{n_\eta \times n_y}$ .

文献 [16] 定义了基于 Lyapunov 指数的衰减率  $\alpha$ , 即对于闭环系统 (5) 所有的状态轨迹, 满足  $V(\eta(t)) \leq V(\eta(0))e^{-\alpha t}$ , 其中  $V(\eta(t)) = \|\eta(t)\|_S^2$ ,  $S$  为对称正定矩阵, 为使闭环系统 (5) 渐近稳定, 衰减率  $\alpha$  的下界需要满足不等式

$$\frac{dV(\eta(t))}{dt} \leq -2\alpha V(\eta(t)) \quad (6)$$

$\Leftrightarrow$

$$A_c^T S + S A_c + 2\alpha S < 0 \quad (7)$$

代入相关变量及等式, 整理得

$$A_\eta^T S + S A_\eta + S B_\eta K + K^T B_\eta^T S + 2\alpha S < 0 \quad (8)$$

方程 (8) 不等号的两端分别左右乘  $S^{-1}$ , 并令  $S^{-1} = X$  ( $X = X^T \in \mathbf{R}^{m \times n}$ ),  $W = KX$  ( $W \in$

$\mathbf{R}^{n_{B_\eta} \times m_{A_\eta}}$ ), 有线性矩阵不等式:

$$A_\eta X + X A_\eta^T + B_\eta W + W^T B_\eta^T + 2\alpha X < 0 \quad (9)$$

综上, 只要存在矩阵  $X, W$  使式 (9) 成立, 就可以求得设备层控制器的控制增益  $K = [K_1, K_2] = WX^{-1}$  的数值解<sup>[8]</sup>, 闭环系统的收敛速度可以通过改变  $\alpha$  的取值来调节, 跟踪控制器的调节时间  $t_r$  满足对于任意的  $\Delta t > 0$ , 下式成立:

$$0.95y^* \leq y(t_r + \Delta t) = C_c \int_0^t e^{A_c(t-\tau)} B_c y^* d\tau \leq 1.05y^* \quad (10)$$

在满足控制需求的条件下尽量使得  $t_r$  小于运行层的采样周期  $T_s$ .

### 2.2.2 基于模型预测控制的运行层设定值优化控制

为了满足运行指标的最优跟踪, 从运行层的时间尺度出发, 在每个运行层采样时刻, 应由设定值优化控制器动态地给出底层控制回路的设定值. 运行层的采样时间为  $T_s$  ( $T = kT_s$ ), 对式 (5) 进行离散化处理, 根据式 (4) 和式 (2), 引入增广向量  $\eta$  后重写运行过程的动态方程, 得到运行层被控对象的动态方程

$$\begin{cases} \eta(k+1) = A_d \eta(k) + B_d y^*(k) \\ r(k) = C_d \eta(k) \end{cases} \quad (11)$$

其中  $A_d = e^{A_c T_s} = e^{(A_\eta + B_\eta K) T_s}$ ,  $B_d = \int_0^{T_s} e^{(A_\eta + B_\eta K)\tau} d\tau B_c$ ,  $C_d = [MC + NK_1, NK_2]$ .

考虑设备层动态特性对运行层稳定性可能产生的影响, 设计鲁棒模型预测控制器, 基于滚动优化的原理动态地给出设备层被控变量的最优设定值, 这里令系统状态  $\eta(k|k) = \eta(k)$ , 离散化处理后, 将式 (1) 无限时域性能指标重写如下:

$$J = \sum_{i=0}^{\infty} \{ \|r^* - r(k+i|k)\|_{Q_1}^2 + \|y^*(k+i|k) - y(k+i|k)\|_R^2 \} \quad (12)$$

满足最优化性能指标  $J$  的模型预测控制器输出序列为

$$y^*(k+i|k) = F(k)\eta(k+i|k), i \geq 0 \quad (13)$$

在  $k$  时刻, 只有序列中的  $y^*(k|k) = F(k)\eta(k|k)$  作用到系统中, 当在下一采样时刻获得系统最新状态  $\eta(k+1|k+1)$  时, 通过寻优计算出这一采样周期内对应的控制律  $F$ , 得到下一时刻的新设定点, 即在每一个采样时刻  $k$  通过滚动求解下面的开环优化问题

来实现闭环反馈控制的作用.

$$\begin{aligned} \min_{y^*(k+i|k)} \max J(k) \\ y^*(k+i|k) = F(k)\eta(k+i|k) \\ \text{s.t. } \eta(k+1) = A_d \eta(k) + B_d y^*(k) \\ r(k) = C_d \eta(k) \end{aligned} \quad (14)$$

这是一个 “min-max” 优化问题. 当被控运行过程受到有界的干扰作用, 在回路层反馈控制的调节下被控系统的状态轨迹始终处在一个超椭球域  $\Omega$  当中. “max” 指求解状态向量  $\eta(k) \in \Omega$  导致  $J(k)$  最大或最坏情况的问题, “min” 指求解该最坏情况下的性能指标在无限时域最小化问题, 以保证闭环系统的稳定性. 为得到上述 “min-max” 优化的数值解, 本节给出了下面的引理及定理.

**引理 1.** 考虑二次函数  $V(\eta(k)) = \|\eta(k)\|_P^2$ , 其中  $P$  是一个正定矩阵, 当满足下面的不等式时

$$\begin{aligned} V(\eta(k+i+1|k)) - V(\eta(k+i|k)) \leq \\ \{ \|r^* - r(k+i|k)\|_{Q_1}^2 + \\ \|y^*(k+i|k) - y(k+i|k)\|_R^2 \} \end{aligned} \quad (15)$$

有下面的不等式关系成立:

$$\max J(k) \leq V(\eta(k|k)) \leq \gamma \quad (16)$$

**证明.** 对于闭环系统 (11), 这里假设有  $\eta(\infty|k) = 0$ , 那么在从  $i = 0$  到  $i = \infty$  递增变化时, 将满足式 (15) 的所有不等式两端分别叠加, 有

$$\begin{aligned} V(\eta(\infty|k)) - V(\eta(k|k)) \leq \\ - \sum_{i=0}^{\infty} \{ \|r^* - r(k+i|k)\|_{Q_1}^2 + \\ \|y^*(k+i|k) - y(k+i|k)\|_R^2 \} \end{aligned} \quad (17)$$

$\Leftrightarrow$

$$-V(\eta(k|k)) \leq -J(k) \quad (18)$$

$J(k)$  的 “最差” 性能指标  $\max J(k)$  一定存在上确界  $V(\eta(k|k))$ , 即  $\max J(k) \leq V(\eta(k|k))$ . 定义  $\gamma > 0$ , 为  $V(\eta(k)) = \|\eta(k)\|_P^2$  的上界, 即

$$\eta^T(k|k) P \eta(k|k) \leq \gamma \quad (19)$$

□

引理给出了  $J(k)$  的上界, 使得关于  $J(k)$  的 min-max 问题得到了简化. 下面以定理的形式给出每一个运行层采样时刻控制律  $F$  的解以及闭环系统 (11) 渐近稳定的充分条件.

**定理 1.** 对于系统 (11), 若存在适当的矩阵  $Q > 0, Y = FQ$  和  $\gamma$  使下面的具有 LMI 约束的优

化问题有解, 则系统的控制律  $F = YQ^{-1}$ , 且闭环系统渐近稳定.

$$\begin{aligned} \min_{\gamma, Y, Q} \quad & \gamma \\ \text{s.t.} \quad & \begin{bmatrix} -1 & \eta^T(k|k) \\ \eta(k|k) & -Q \end{bmatrix} \leq 0 \quad (Q = \gamma P^{-1}) \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} Q & QA_d^T + Y^T B_d^T \\ A_d Q + B_d Y & Q \\ (C_d^T Q_1 C_d)^{\frac{1}{2}} Q & 0 \\ R^{\frac{1}{2}} Y & 0 \\ Q(C_d^T Q_1 C_d)^{\frac{1}{2}} & YR^{\frac{1}{2}} \\ 0 & 0 \\ \gamma I & 0 \\ 0 & \gamma I \end{bmatrix} \geq 0 \quad (21)$$

**证明.** 由引理知式 (19) 成立, 令  $\gamma$  满足关系式  $Q = \gamma P^{-1}$ , 利用 Schur 补定理, 等价于

$$\begin{bmatrix} -1 & \eta^T(k|k) \\ \eta(k|k) & -(\gamma^{-1}P)^{-1} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (22)$$

$$(22) \Leftrightarrow (20)$$

将系统闭环方程 (11) 和 (13) 代入不等式 (15), 有

$$\begin{aligned} & [A_d \eta(k+i|k) + B_d F \eta(k+i|k)]^T P [A_d \eta(k+i|k) + \\ & B_d F \eta(k+i|k)] - \\ & \eta^T(k+i|k) P \eta(k+i|k) \leq \\ & - \{ \|r^* - r(k+i|k)\|_{Q_1}^2 + \\ & \|y^*(k+i|k) - y(k+i|k)\|_R^2 \} \end{aligned}$$

若有

$$\begin{aligned} & [A_d \eta(k+i|k) + B_d F \eta(k+i|k)]^T P [A_d \eta(k+i|k) + \\ & B_d F \eta(k+i|k)] - \eta^T(k+i|k) P \eta(k+i|k) \leq \\ & - [C_d \eta(k+i|k)]^T Q_1 [C_d \eta(k+i|k)] - \\ & [F \eta(k+i|k)]^T R [F \eta(k+i|k)] \end{aligned}$$

$\Leftrightarrow$

$$\begin{aligned} & (A_d + B_d F)^T P (A_d + B_d F) - P + \\ & C_d^T Q_1 C_d + F^T R F \leq 0 \end{aligned} \quad (23)$$

成立, 那么对于所有  $i \geq 0, i = 1, 2, \dots$ , 都一定有

$$V(\eta(k+i+1|k)) - V(\eta(k+i|k)) \leq 0$$

成立, 即在设定值优化控制器的作用下系统渐近稳定.

运用 Schur 补定理, 并将  $Q = \gamma P^{-1}, F = YQ^{-1}$  代入式 (23), 经过整理计算, 有 (23)  $\Leftrightarrow$  (21).  $\square$

### 3 仿真实验与性能分析

将文中提出的运行最优控制方法应用在浮选工业过程中, 以验证文中方法的有效性, 对于单个槽体, 浮选过程的数学模型为 [17-19]

$$\begin{aligned} \frac{dM_p^i}{dt} = & - \left( k_p^i + \frac{q_T}{(1-\varepsilon_g)Ah_p} \right) M_p^i + k_e^i M_e^i + q_a X_a^i \end{aligned} \quad (24)$$

$$\frac{dM_e^i}{dt} = - \left( k_e^i + \frac{q_c}{(1-\varepsilon_g)A(H-h_p)} \right) M_e^i + k_p^i M_p^i \quad (25)$$

其中精矿品位为

$$L_{cg} = \frac{M_e^1 g_{cp}^1 + M_e^2 g_{cp}^2}{M_e^1 + M_e^2} L_{cu} \quad (26)$$

尾矿品位为:

$$L_{tg} = \frac{M_p^1 g_{cp}^1 + M_p^2 g_{cp}^2}{M_p^1 + M_p^2} L_{cu} \quad (27)$$

其中  $i = 1, 2$  分别表示矿物种类 1 (主要为黄铜矿) 和矿物种类 2 (主要为脉石).  $M_p^i$  为泥浆质量,  $M_e^i$  为泡沫质量,  $q_a$  为给矿矿浆流量,  $h_p$  为矿浆液位高度. 其他参数均为常数, 物理意义见文献 [20]. 选取状态向量  $x = (M_p^i, M_e^i)$ , 输入向量  $u = (h_p, q_a)$ , 输出向量  $y = (L_{cg}, L_{tg})$ . 由于时间常数相对较小, 给矿流量与矿浆入口电动阀门 PWM 占空比的信号转换可以认为是线性的. 已知黄铜矿浮选过程在某一平衡点处的参数值:  $[h_p \ q_a] = [3 \ 17]$ ,  $[M_p^1 \ M_p^2 \ M_e^1 \ M_e^2] = [16.8 \ 1123 \ 4.56 \ 0.2]$ , 在该点处对模型 (24) 和 (25) 线性化得到线性时不变模型:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -17.9956 & 0 & 65.6 & 0 \\ 0 & -0.135634 & 0 & 316 \\ 17.9 & 0 & -65.8473 & 0 \\ 0 & 0.04 & 0 & -316.247 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0.535549 & 0.160952 \\ 35.7989 & 5.24216 \\ -5.64767 & 0 \\ -0.247329 & 0 \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.287901 & -6.5741 \\ 0.0282756 & -0.000423001 & 0 & 0 \end{bmatrix} x$$

为验证文中提出控制策略的有效性, 在仿真实例中, 运行指标  $r^*$  的物理意义为黄铜矿浮选生产过程中的单位时间目标经济收益, 本例中令运行层采样周期  $T_s = 30 \text{ min}$ , 设备层采样周期  $t_s = 1 \text{ s}$ , 运行指标目标值  $r^* = 20$ . 参考铜矿和尾矿的市场价格, 定义式 (2) 中  $M = [100, -20]^T$ ,  $N = [0.01, 0.1]^T$ .  $r(k)$  表示浮选过程在单位时间的实际经济收益,  $y^*$  的物理意义为黄铜矿浮选产品品位指标:  $y_1^*$  表示精矿品位设定值,  $y_2^*$  为尾矿品位设定值, 并且考虑运行过程中  $v_1(t)$ ,  $v_2(t)$  的作用. 控制目标是  $r(k)$  跟踪运行指标  $r^*$ , 精矿品位实际值与尾矿品位实际值分别跟踪最优设定值.

为满足控制目标需要首先根据运行层的采样周期确定回路控制层的收敛速率, 决策反馈控制增益矩阵  $K$ . 设精矿品位为 0.1, 尾矿品位为 0.05. 图 3

给出了当闭环系统收敛速率取不同值时的矿物品位跟踪曲线.

由实验结果可知, 当收敛速率减小时, 系统的调节时间延长, 超调量减小, 甚至无超调且稳态时无静差. 即不仅可以通过选择合适的收敛速率  $\alpha$  改变调节时间, 还能满足不同的控制性能要求. 本文最终采用  $\alpha = 0.05$  时矩阵  $K$  的数值解作为回路控制层跟踪控制增益来实现对变化设定值的快速跟踪和未知扰动的快速抑制.

由于被控对象存在动态特性, 同时  $v_1(t)$ ,  $v_2(t)$  对运行过程产生影响, 本文仿真实验中加入了表征原料成分波动的有界随机扰动, 将文献 [8] 方法应用于本例, 运行指标跟踪曲线如图 4 虚划线所示. 这种基于静态模型的方法不能实时地给出适应当前工况的最优设定值, 运行指标与跟踪期望设定值的误差较大, 不能满足控制要求.

图 4 虚点线为设定值优化控制器作用下该浮选过程的运行指标跟踪结果, 由于运行层设定值优化控制器的作用, 通过滚动优化计算, 得到该采样时刻的最佳设定点输出, 使得运行指标逐步接近期望指标, 不断地调节使得运行控制系统最终达到稳态.

图 5 给出了黄铜矿浮选过程的矿物品位指标跟踪情况, 从图 5 中可以看到, 在每一个运行层采样时刻, 运行层设定值优化控制器给出了当前工况下的最优矿物品位设定值, 在闭环系统衰减率可调节的回路控制器的作用下, 设备层中精矿品位与尾矿品位能够分别快速地跟踪给定, 调节时间  $t_r$  远小于运

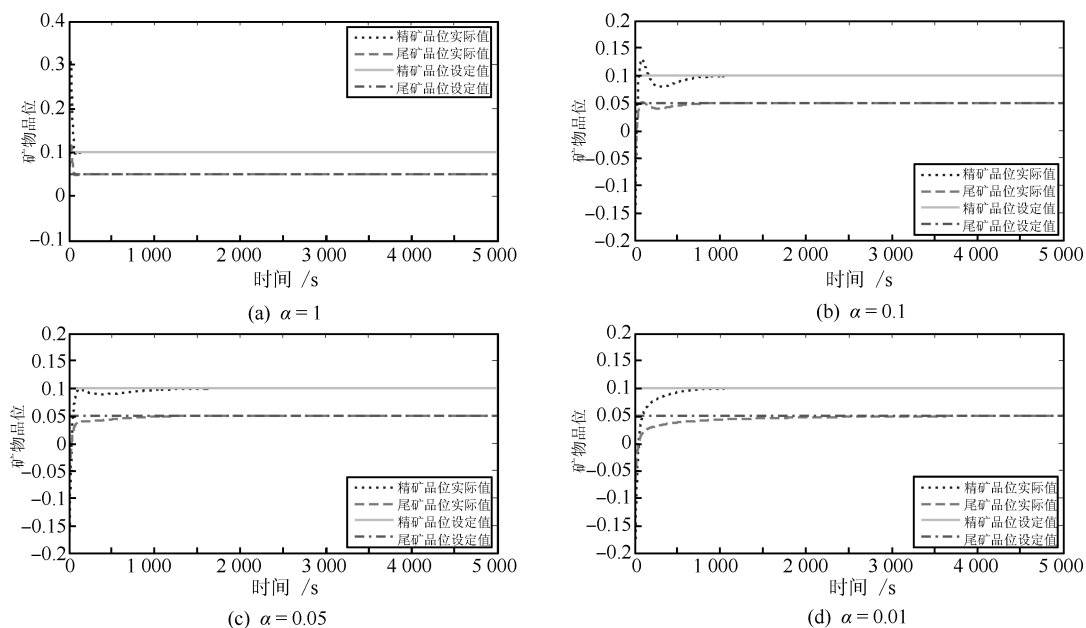


图 3 衰减率  $\alpha$  取不同值时的矿物品位跟踪结果

Fig. 3 The tracking results of ore grades with different decay rates  $\alpha$

行层的采样周期  $T_s$ ; 图 6 给出了设备层回路控制器的输出信号曲线, 对照图 5、图 6 可以看到, 当精矿品位、尾矿品位跟踪设定值变化趋于稳态值时, 回路控制器输出信号收敛, 最终设备层回路趋于稳态。

#### 4 结论

本文针对一类可以用线性模型描述的工业过程提出了一种两层反馈控制结构. 设备层子系统跟踪控制器可以使被控对象的输出快速跟踪回路设定值, 运行层的设定控制作用可以使系统处于指定工况, 减少能源浪费和资源消耗. 以浮选过程为背景的仿真实验结果表明, 运行层设定值优化控制器能够依据最优化性能指标, 动态地给出设备层回路控制设

定点, 保证运行过程的稳定性, 通过动态调节逐步跟踪预定的运行指标。

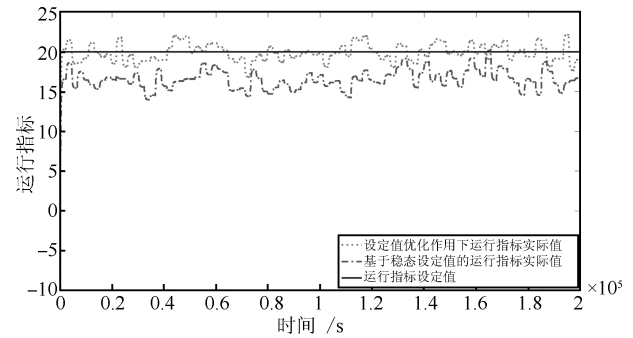


图 4 运行指标跟踪曲线对比

Fig. 4 The tracking results of operational index

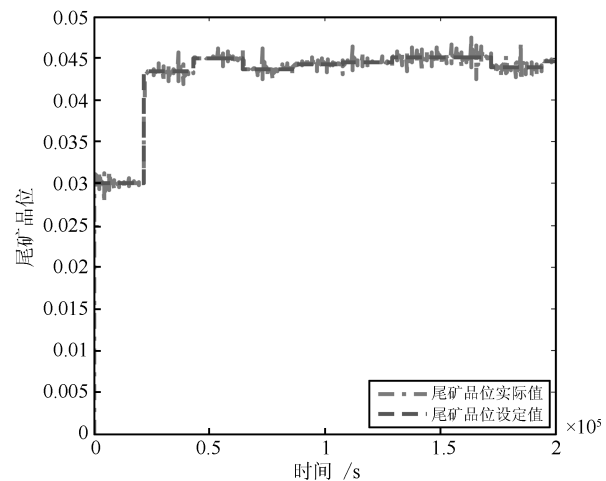
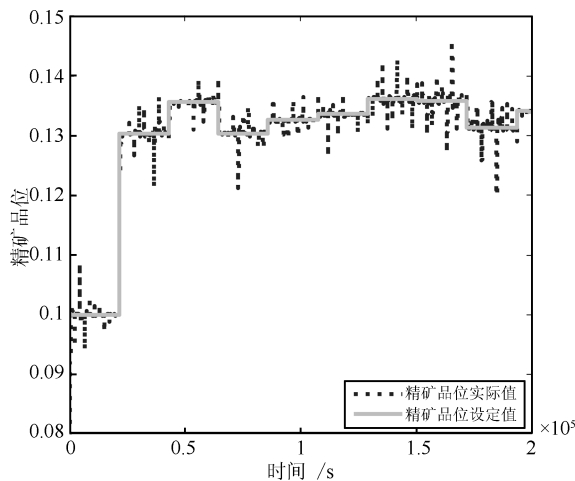


图 5 浮选过程矿物品位跟踪曲线

Fig. 5 The tracking results of flotation process ore grades

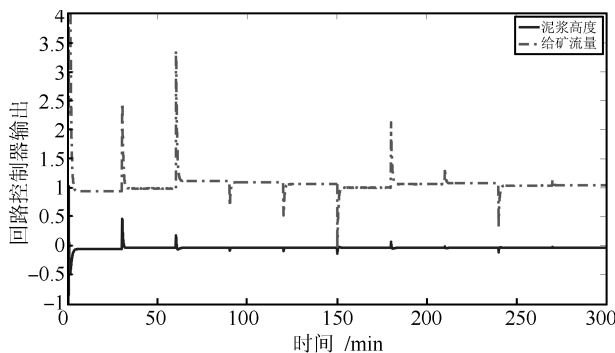


图 6 设备层回路跟踪控制器输出曲线

Fig. 6 The output of tracking controller in device layer

#### References

- Cutler C R, Perry R T. Real time optimization with multi-variable control is required to maximize profits. *Computers & Chemical Engineering*, 1983, **7**(5): 663–667
- Dai Wei, Chai Tian-You. Data-driven optimal operational control of complex grinding processes. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(9): 2005–2014
- Chai Tian-You. Challenges of optimal control for plant-wide production processes in terms of control and optimization theories. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(6): 641–648 (柴天佑. 生产制造全流程优化控制对控制与优化理论方法的挑战. *自动化学报*, 2009, **35**(6): 641–648)
- Chai T Y, Ding J L, Wu F H. Hybrid intelligent control for optimal operation of shaft furnace roasting process. *Control Engineering Practice*, 2011, **19**(3): 264–275
- Chai Tian-You, Ding Jin-Liang, Wang Hong, Su Chun-Yi. Hybrid intelligent optimal control method for operation of complex industrial processes. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(5): 505–515 (柴天佑, 丁进良, 王宏, 苏春翌. 复杂工业过程运行的混合智能优化控制方法. *自动化学报*, 2008, **34**(5): 505–515)
- Skogestad S. Self-optimizing control: the missing link between steady-state optimization and control. *Computers & Chemical Engineering*, 2000, **24**(2–7): 569–575
- Skogestad S. Plantwide control: the search for the self-optimizing control structure. *Journal of Process Control*, 2000, **10**(5): 487–507

- 8 Chai T Y, Zhao L, Qiu J B, Liu F Z, Fan J L. Integrated network-based model predictive control for setpoints compensation in industrial processes. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, **9**(1): 417–426
- 9 Yin S, Luo H, Ding S X. Real-time implementation of fault-tolerant control systems with performance optimization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, **61**(5): 2402–2411
- 10 Rahbar K, Xu J, Zhang R. Real-time energy storage management for renewable integration in microgrid: an off-line optimization approach. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, **6**(1): 124–134
- 11 Chai Tian-You. Operational optimization and feedback control for complex industrial processes. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(11): 1744–1757  
(柴天佑. 复杂工业过程运行优化与反馈控制. *自动化学报*, 2013, **39**(11): 1744–1757)
- 12 Li H X, Guan S P. Hybrid intelligent control strategy. Supervising a DCS-controlled batch process. *IEEE Control Systems*, 2001, **21**(3): 36–48
- 13 Wang Z J, Wu Q D, Chai T Y. Optimal-setting control for complicated industrial processes and its application study. *Control Engineering Practice*, 2004, **12**(1): 65–74
- 14 Yang C H, Gui W H, Kong L S, Wang Y L. A two-stage intelligent optimization system for the raw slurry preparing process of alumina sintering production. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2009, **22**(4–5): 786–795
- 15 Wang T, Gao H J, Qiu J B. A combined adaptive neural network and nonlinear model predictive control for multirate networked industrial process control. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2015, (99), DOI: 10.1109/TNNLS.2015.2411671
- 16 Boyd S, El Ghaoui L, Feron E, Balakrishnan V. *Linear Matrix Inequalities in Systems and Control Theory*. USA: SIAM Studies in Applied Mathematics, 1994
- 17 Harris C C. Multiphase models of flotation machine behaviour. *International Journal of Mineral Processing*, 1978, **5**(2): 107–129
- 18 Thornton A J. The Application and Future Development of Adaptive Control to the Froth Flotation Process [Ph. D. dissertation], The University of Queensland, Australia, 2015.
- 19 Maldonado M, Sbarbaro D, Lizama E. Optimal control of a rougher flotation process based on dynamic programming. *Minerals Engineering*, 2007, **20**(3): 221–232
- 20 Liu F Z, Gao H J, Qiu J B, Yin S, Fan J L, Chai T Y. Networked multirate output feedback control for setpoints compensation and its application to rougher flotation process. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, **61**(1): 460–468



**范家璐** 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室副教授. 2011 年获浙江大学控制科学与工程系博士学位 (与美国宾夕法尼亚州立大学联合培养). 主要研究方向为工业过程运行控制、工业无线传感器网络与移动社会网络. 本文通信作者.

E-mail: fanjialu@gmail.com

(**FAN Jia-Lu** Associate professor at the State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University. She received her Ph.D. degree from Zhejiang University in 2011. She was a visiting scholar with the Pennsylvania State University during 2009~2010. Her research interest covers networked operational control, industrial wireless sensor networks and mobile social networks. Corresponding author of this paper.)



**张也维** 2014 年获得东北大学控制理论与控制工程系硕士学位. 主要研究方向为工业过程运行控制.

E-mail: yewei.zhang@faw-vw.com

(**ZHANG Ye-Wei** Received her master degree in control theory and engineering from Northeastern University in 2014. Her main research interest is networked operational control.)



**柴天佑** 中国工程院院士, 东北大学教授, IEEE Fellow, IFAC Fellow. 1985 年获得东北大学博士学位. 主要研究方向为自适应控制, 智能解耦控制, 流程工业综合自动化理论、方法与技术.

E-mail: tychai@mail.neu.edu.cn

(**CHAI Tian-You** Academician of Chinese Academy of Engineering, professor at Northeastern University, IEEE Fellow, IFAC Fellow. He received his Ph. D. degree from Northeastern University in 1985. His research interest covers adaptive control, intelligent decoupling control, and integrated automation theory, method and technology of industrial process.)