

5-15-2020

Application of Improved Inverse Decoupling Active Disturbance Rejection Internal Model Control in Grinding

Zhou Ying

School of Artificial Intelligence, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

Qiaojuan Jia

School of Artificial Intelligence, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

Zhang Yan

School of Artificial Intelligence, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

Mingxin Chang

School of Artificial Intelligence, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Application of Improved Inverse Decoupling Active Disturbance Rejection Internal Model Control in Grinding

Abstract

Abstract: Aiming at the characteristics of the multivariable, strong coupling and large time delay of the grinding classification system, *the improved inverse decoupling active disturbance rejection internal model control method is proposed. The inverse decoupling method is used to realize the decoupling of the grinding classification system, and the improved internal model control and linear active disturbance rejection control are adopted for the decoupled subsystem. By introducing the internal model compensator and the gain to compensate the time delay, the dependence of the system upon the model is reduced. The model mismatch, external disturbance and uncertainties are suppressed by adjusting the parameters of the linear active disturbance rejection controller, the internal model compensator and gain.* The simulation results show that the improved inverse decoupling active disturbance rejection internal model control method has the better decoupling performance, tracking performance and robust performance. The method is proved to be effective.

Keywords

grinding classification system, inverted decoupling, linear active disturbance rejection control, internal model control

Recommended Citation

Zhou Ying, Jia Qiaojuan, Zhang Yan, Chang Mingxin. Application of Improved Inverse Decoupling Active Disturbance Rejection Internal Model Control in Grinding[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(5): 837-847.

改进的逆解耦自抗扰内模控制在磨矿中的应用

周颖, 贾巧娟, 张燕, 常明新

(河北工业大学人工智能与数据科学学院, 天津 300130)

摘要: 针对磨矿分级系统的多变量、强耦合、大时滞等特性, 提出改进的逆解耦自抗扰内模控制方法。利用逆解耦方法实现磨矿分级系统的解耦, 对解耦后的子系统采用改进的内模控制和线性自抗扰控制。通过引入内模补偿器和增益对时滞进行补偿, 减小了系统对模型的依赖度, 通过调节线性自抗扰控制器参数、内模补偿器参数和增益来抑制模型失配、外部干扰及不确定性因素对系统带来的不利影响。仿真结果表明, 改进的逆解耦自抗扰内模控制方法有较好的解耦性能、跟踪性能和鲁棒性能, 验证了此方法是有效的。

关键词: 磨矿分级系统; 逆解耦; 线性自抗扰控制; 内模控制

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2020) 05-0837-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0527

Application of Improved Inverse Decoupling Active Disturbance Rejection Internal Model Control in Grinding

Zhou Ying, Jia Qiaojuan, Zhang Yan, Chang Mingxin

(School of Artificial Intelligence, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of the multivariable, strong coupling and large time delay of the grinding classification system, the improved inverse decoupling active disturbance rejection internal model control method is proposed. The inverse decoupling method is used to realize the decoupling of the grinding classification system, and the improved internal model control and linear active disturbance rejection control are adopted for the decoupled subsystem. By introducing the internal model compensator and the gain to compensate the time delay, the dependence of the system upon the model is reduced. The model mismatch, external disturbance and uncertainties are suppressed by adjusting the parameters of the linear active disturbance rejection controller; the internal model compensator and gain. The simulation results show that the improved inverse decoupling active disturbance rejection internal model control method has the better decoupling performance, tracking performance and robust performance. The method is proved to be effective.

Keywords: grinding classification system; inverted decoupling; linear active disturbance rejection control; internal model control

引言

在实际工业过程中, 磨矿分级过程受到量测噪



收稿日期: 2018-07-30 修回日期: 2018-10-31;
基金项目: 国家自然科学基金(61741307), 河北省教育厅重点项目(ZD2016071), 河北省自然科学基金(F2018202279);

作者简介: 周颖(1971-), 女, 河北, 博士, 副教授, 研究方向为智能控制与模式识别。

声、模型参数摄动和传输过程中的不确定性扰动等因素的影响, 往往表现为多变量、强耦合、大时滞等特点^[1], 使得磨矿分级过程的控制精度、鲁棒性能较低, 针对以上问题, 通过解耦方法将多变量被控过程转变为单变量的被控过程。然而传统解耦方法涉及矩阵求逆计算, 导致解耦器复杂化, 不适用于高维多变量系统。文献[2]采用模型降阶的方法

拟合被控对象的传递函数值, 简化了解耦器, 但系统误差增大, 导致解耦精度低。文献[3]提出逆解耦方法, 利用反馈思想设计解耦器, 结构简单, 不受系统复杂程度的影响, 可实现完全解耦, 并引入线性自抗扰控制器, 通过线性扩张状态观测器对外部扰动、不确定性扰动等构成的总扰动进行估计补偿, 起到抑制总扰动的作用。董君伊将逆解耦自抗扰方法用于多变量热工过程, 很好实现解耦控制^[4], 其他学者也提出了 ADRC 具有较好的控制效果^[5-7]。文献[8]提出改进的 V 规范型内模控制方法, 提高了系统适应模型失配的能力, 抑制模型摄动对系统的影响, 消除模型误差。

针对磨矿分级系统的多变量、强耦合、大时滞等特性, 本文提出改进的逆解耦自抗扰内模控制方法, 首先通过逆解耦进行解耦, 避免了矩阵求逆, 简化了计算, 再通过改进的内模控制方法对解耦后的系统进行时滞补偿, 消除建模误差、抑制外部扰动, 同时通过线性自抗扰控制器消除系统由于不确定性、外部干扰对系统的影响, 从而使得多变量大时滞的磨矿分级系统实现对分级机溢流浓度、给矿量的设定值跟踪控制, 并提高了磨矿分级系统的鲁棒性能。

1 磨矿分级过程与模型

1.1 磨矿分级过程

图 1 是典型的磨矿分级过程结构图, 矿石由原矿仓输送到一段球磨机入口, 并在一段球磨机内加入一定比例的磨机给水进行研磨^[9]。磨碎后的矿浆顺流到螺旋分级机中进行分级, 同时加入一定比例的分级机补加水, 符合粒度要求的细矿浆排出, 不符合粒度要求的粗矿浆通过返砂槽进入到一段球磨机内重新研磨。图 1 中, $u_1, u_1^*, u_2, u_2^*, y_1, r_1, y_2, r_2$ 为分级机补加水量、磨矿给矿量、分级机溢流浓度、返砂量的实际值与设定值, 通过对分级机溢流浓度、返砂量的设定值最优跟踪控制, 实现对磨矿分级系统的优化控制。其中 u_1, u_2 作为过程变量控制着 y_1, y_2 , 由此可得, 磨矿分级系统是一个严重耦合的闭合回路, 需要对其进行解耦控制。

1.2 磨矿分级过程的模型

图 1 中, 由于给矿量经历了磨矿分级的整个过程, 因此从给矿量到返砂量和溢流浓度的传递函数的延迟较大, 从分级机补加水到返砂量和溢流浓度的传递函数的延迟较小。

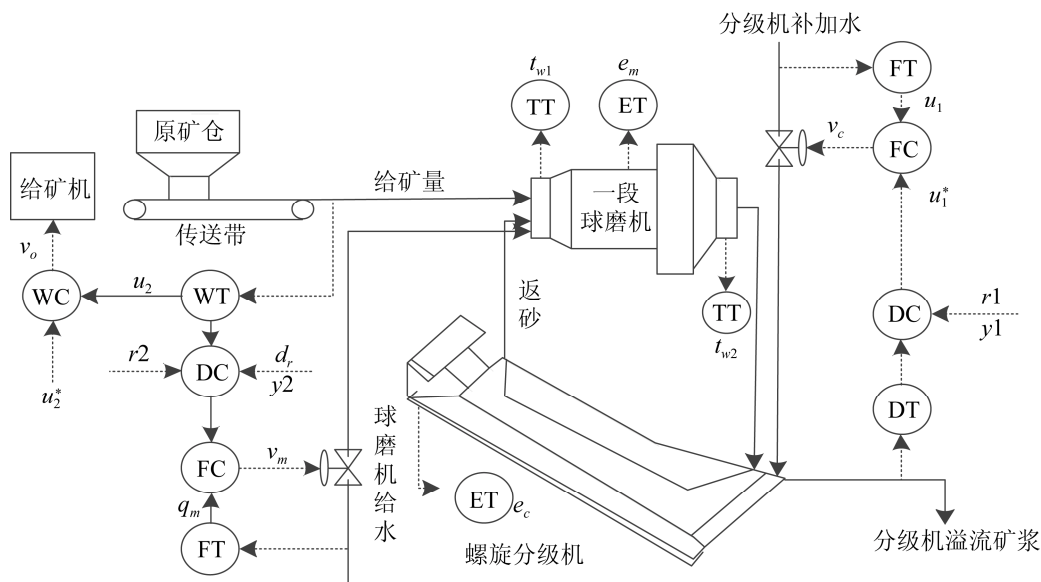


图 1 磨矿分级系统结构图

Fig. 1 Grinding classification system structure diagram

参考文献[10]机理模型可得磨矿分级系统中的传递函数阵为:

$$\begin{bmatrix} y1(s) \\ y2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{20s+1}e^{-20s} & \frac{1.6}{45s+1}e^{-40s} \\ \frac{2}{(20s+1)(15s+1)}e^{-20s} & \frac{2.4}{35s+1}e^{-30s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $u_1(s)$, $u_2(s)$ 为分级机补加水量和给矿量; $y1(s)$, $y2(s)$ 为分级机溢流浓度和返砂量。

2 改进的逆解耦自抗扰内模控制方法

2.1 线性自抗扰控制器设计

根据文献[11]对一阶线性自抗扰控制器(linear active disturbance rejection controller, 简称 LADRC)进行设计, 其结构图如图 2 所示。

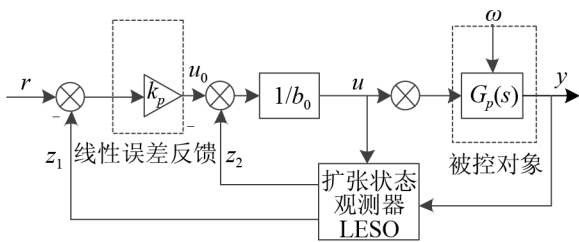


图 2 一阶 LADRC 自抗扰控制结构图
Fig. 2 Block diagram of first order LADRC

图 2 中 u , y 为系统的输入、输出, b 为系统增益, b_0 为 b 的估计, ω 为系统的外部扰动, β_1 , β_2 为 LESO 的增益。

为便于系统的频域分析, 将图 2 转化为图 3, 其中 $R(s)$, $Y(s)$, $U(s)$, $D(s)$, $G_p(s)$, $H(s)$, $G_c(s)$ 分别为设定值、系统输出、控制变量、外部干扰、被控对象、控制器^[11]。

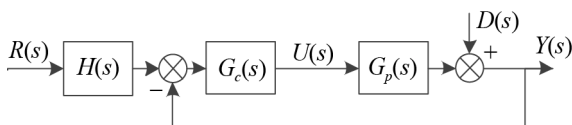


图 3 一阶 LADRC 自抗扰控制传递函数结构图
Fig. 3 Transfer function block diagram of first order LADRC

利用待定系数法求得 $H(s)$, $G_c(s)$ 控制器的传递函数为:

$$\begin{cases} H(s) = \frac{k_p(s^2 + \beta_1 s + \beta_2)}{k_p s^2 + (k_p \beta_1 + \beta_2)s + k_p \beta_2} \\ G_c(s) = \frac{k_p s^2 + (k_p \beta_1 + \beta_2)s + k_p \beta_2}{b_0(s^2 + \beta_1 s)} \end{cases} \quad (2)$$

对线性自抗扰控制器参数进行整定, 其中 LESO 的增益 β_1 、 β_2 的选取, 应使得其特征多项式满足 $s^2 + \beta_1 s + \beta_2 = (s + \omega_o)^2$, ω_o 为观测器带宽^[12], 可得 $\beta_1 = 2\omega_o$, $\beta_2 = \omega_o^2$, 同时令 $k_p = \omega_c$, ω_c 为控制器带宽, 因此一阶 LADRC 中整定的参数为 b_0, ω_c, ω_o , 其既保留了自抗扰控制器的特点, 也简化了控制结构。

2.2 逆解耦自抗扰内模控制方法

图 4 为多变量逆解耦自抗扰内模控制方框图, 其中 $H(s)$, $G_c(s)$ 为线性自抗扰控制器, $K_N(s)$ 为逆解耦器, $G(s)$ 为被控对象, $G_m(s)$ 为过程模型, $r(s)$ 为磨矿分级系统输出期望的设定值, 令其为单位阶跃信号, $y(s)$ 为系统输出, $d_0(s)$ 为外部扰动。

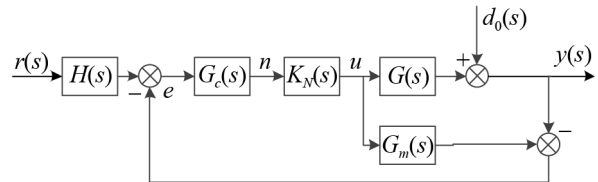


图 4 逆解耦自抗扰内模控制方框图
Fig. 4 Block diagram of inverse decoupling active disturbance rejection internal model control

由图 4 可得系统的闭环传递函数为:

$$y = \frac{HG_c K_N G}{I + G_c K_N (s)[G - G_m]} r + \frac{I - G_c K_N G_m}{I + G_c K_N [G - G_m]} d_0 \quad (3)$$

由式(3)可得, 当 $G(s)=G_m(s)$ 模型匹配时, $y(s)/r(s)=HG_c K_N G$, 其中 $K_N G$ 为广义被控对象, 在理想情况下得到正则且稳定的解耦后的磨矿分级系统传递函数对角形式为 $y(s)/r(s)=diag\{H_1 G_{c1} G_{11} H_2 G_{c2} G_{22}\}$, 根据传统解耦结构得到从过程变量输入 u 到控制器 $G_c(s)$ 的输出 n 的传递函数为^[4]:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{G_{11}G_{22}}{G_{11}G_{22} - G_{12}G_{21}} & \frac{-G_{12}G_{21}}{G_{11}G_{22} - G_{12}G_{21}} \\ \frac{-G_{21}G_{11}}{G_{11}G_{22} - G_{12}G_{21}} & \frac{G_{11}G_{22}}{G_{11}G_{22} - G_{12}G_{21}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

进一步写为:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{G_{12}}{G_{11}} \\ -\frac{G_{21}}{G_{22}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式(5)可得逆解耦器分别为:

$$K_{N12} = -\frac{G_{12}}{G_{11}} \quad (6)$$

$$K_{N21} = -\frac{G_{21}}{G_{22}} \quad (7)$$

通过逆解耦自抗扰内模控制方法可得:

$$y_1 = H_1 G_{c1} G_{11} r_1 \quad (8)$$

$$y_2 = H_2 G_{c2} G_{22} r_2 \quad (9)$$

逆解耦器是在前向通道中加入解耦网络,避免了对传递函数矩阵求逆的复杂运算,因此在对磨矿分级系统进行解耦时,简化了计算,解耦效果好,由式(6), (7)可知,逆解耦器由被控对象中的传递函数多项式相除得出,应避免出现不满足物理可实现条件: (1) 分子的时滞比分母小, 出现超前项; (2) 解耦器中含有不稳定的零点, 从而导致解耦后的系统也存在相对应的不稳定的零点; (3) 传递函数的分子的阶次高于分母的阶次, 出现预测项。因此在设计逆解耦器之前需要对被控对象的时滞、非最小相位零点、相对阶次进行补偿, 来解决出现的物理不能实现的问题。

2.3 改进的逆解耦自抗扰内模控制方法

图 5 为改进的逆解耦自抗扰内模控制结构图, 其中 $C(s)$ 是内模补偿器, K 为增益的权重值, 该方法是对解耦后的子系统进行控制, 将建模误差或扰动误差反馈到被控对象的输入端^[8], 其中 K 值可以消除系统扰动以及模型摄动带来的影响, $C(s)$ 可减少系统对模型的依赖, 使得对象输出跟踪设定值, 提高系统的鲁棒性能。

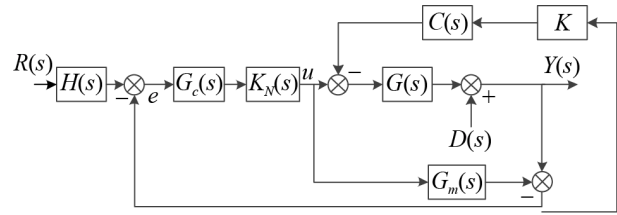


图 5 改进的逆解耦自抗扰内模控制方框图

Fig. 5 Block diagram of improved inverse decoupling active disturbance rejection internal model control

由图 5 可得, 改进的逆解耦自抗扰内模控制系统的闭环传递函数为:

$$Y = \frac{HG_c K_N G + HG_c K_N G_m KCG}{I + G_c K_N [G - G_m] + GK C} R + \frac{I - G_c K_N G_m}{I + G_c K_N [G - G_m] + GK C} D \quad (10)$$

分别将式(3), (10)转换为:

$$G_{yr} = \left\{ I + \left[(G_c K_N)^{-1} - G_m \right] G^{-1} \right\}^{-1} H \quad (11)$$

$$G_{yd_0} = \left\{ I + GK_N (G_c^{-1} - G_m K_N)^{-1} \right\}^{-1} \quad (12)$$

$$G_{YR} = \left\{ I + \left[(G_c K_N)^{-1} - G_m \right]^* \left[G(I + CKG)^{-1} (I + CKG_m) \right]^{-1} \right\}^{-1} H \quad (13)$$

$$G_{YD} = \left[I + G(K_N + CKG_c^{-1})(G_c^{-1} - G_m K_N)^{-1} \right]^{-1} \quad (14)$$

将式(11)与式(13)相比较, 可得 $G^{-1}(s)$ 与 $\left[G(s)(I + C(s)KG(s))^{-1} (I + C(s)KG_m(s)) \right]^{-1}$ 相对应, 可得改进后的等效被控对象传递函数为式(15), 模型匹配时, 等效后的改进的逆解耦自抗扰内模控制与原控制结构相同。

$$G_a(s) = \frac{G(I + CKG_m)}{I + CKG} \quad (15)$$

外部干扰 $D(s)$ 存在时, 式(12)与式(14)改写成式(16)与式(17)。

$$G_{yd_0} = (I - G_c K_N G_m) \left\{ I + G_c K_N [G - G_m] \right\}^{-1} \quad (16)$$

$$G_{YD} = (I - G_c K_N G_m) \left[I + G_c K_N (G - G_m) + GK C \right]^{-1} \quad (17)$$

当模型匹配时, 由式(16), (17)可得:

$$G_{yd_0} = I - G_c K_N G_m \quad (18)$$

$$G_{YD} = (I - G_c K_N G_m)(I + GKC)^{-1} \quad (19)$$

通过比较式(18), (19)可得, 改进后的逆解耦自抗扰内模控制在外部干扰下的传递函数中多出因式 $(I + GKC)^{-1}$, 通过调节增益 K 和 $C(s)$ 内模补偿器参数, 可以抑制外部干扰 $D(s)$ 对磨矿分级系统的影响。

从上述的讨论中可知, 内模补偿器 $C(s)$ 与逆解耦器两者互不影响, 可以对其进行独立设计, 对补偿器进行设计时引入了内模控制器, 将控制通道中的 $G_m(s)$ 的主对角线的传递函数分解为全通传递函数 $G_{mii+}(s)$ 和稳定的最小相位部分 $G_{mii-}(s)$, 并引入滤波器 $f(s) = 1/\lambda s + 1$, 保证补偿器 $C(s)$ 物理可实现, 可得:

$$C(s) = G_{mii-}^{-1}(s)f(s) \quad (20)$$

由式(15)、(17)可将等效的被控对象 $G_a(s)$ 和干扰的传递函数 $G_{YD}(s)$ 表示为:

$$G_a(s) = G[I + G_{mii-}^{-1}fKG_m][I + G_{mii-}^{-1}fKG]^{-1} \quad (21)$$

$$G_{YD} = (I - G_c K_N G_m) \{I + G_c(s)K_N(G - G_m) + GKG_{mii-}^{-1}f\}^{-1} \quad (22)$$

由式(21)~(22)可得, 当受到外部干扰时, 通过调整 LADRC 参数、增益 K 和补偿器参数 λ 来抑制外部干扰对磨矿分级系统的影响。

由于磨矿分级过程中存在各种干扰, 比如: 磨机中的结构参数、环境参数发生变化, 造成很多不确定性情况, 一般会对被控对象的标称系统加入不确定性来替代系统中存在的不确定性因素, 其中 Δ_1 为乘性不确定性, Δ_2 为加性不确定性。

$$G(s) = (I + \Delta_1)G_m(s) + \Delta_2 \quad (23)$$

改进后的等效的被控传递函数可转换为:

$$G_a(s) = [I + CKG]^{-1}G[I + CKG_m] = [I + CKG]^{-1}\{[I + CKG]G_m + G - G_m\} \quad (24)$$

将式(23)代入式(24)得到式(25), 并与式(23)相比较, 可得等效的被控传递函数的不确定性因式都乘了 $[I + C(s)KG(s)]^{-1}$, 因此通过调节 $C(s)$ 中的滤波器参数 λ 和增益 K 值, 可以减小不确定性因素对系统的影响, 增强系统模型的鲁棒性。

$$G_a(s) = \left\{I + [I + CKG]^{-1}\Delta_1\right\}G_m + (I + CKG)^{-1}\Delta_2 \quad (25)$$

通过上述的讨论, 在改进的逆解耦自抗扰内模控制中加入的补偿器 $C(s)$ 和增益 K , 可以对系统中存在的外部干扰和不确定性因素起到抑制作用。

3 稳定性分析

3.1 磨矿分级闭环系统内部稳定性分析

内部稳定性是保证磨矿分级闭环系统正常运行的最基本条件, 当系统中存在非最小相位系统时, 内部稳定性受到影响, 导致控制系统无法正常工作。图 5 中引入外部扰动在 $d(s)$, 将其转化成图 6, 再将图 6 等价系统交换为控制器与广义被控对象的闭环控制系统图 7, 证明磨矿分级系统是内部稳定的。

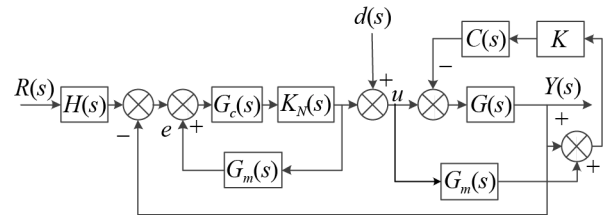


图 6 改进的逆解耦自抗扰内模闭环等价系统

Fig. 6 Improved inverse decoupling ADRC internal model closed loop equivalent system

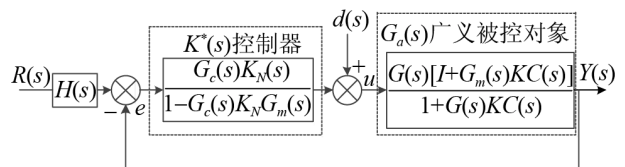


图 7 等价系统交换

Fig. 7 Exchange of equivalent system

定理: 如果下列 3 个条件满足, 则图 6 所示的改进的逆解耦自抗扰内模闭环等价系统是内部稳定的。

- (1) $H(s)$ 、 $G_c(s)$ 、 $K_N(s)$ 、 $G(s)$ 、 $G_m(s)$ 、 $C(s) \in RH_\infty$;
- (2) 闭环系统对于模型不确定性是鲁棒的;
- (3) 从 $[R \ d]^T$ 到 $[e \ u]^T$ 的传递函数是稳定的。

证明: 若条件(1)满足, $H(s)$ 、 $G_c(s)$ 、 $K_N(s)$ 、 $G(s)$ 、 $G_m(s)$ 、 $C(s)$ 均不存在非最小相位, 因此 $K^*(s)$ 、 $G_a(s)$ 不存在非最小相位系统, 可得系统满足鲁棒稳

定性条件, 即条件(2)满足。

如图 6, 7 所示得到由 R, d 到 e, u 的传递关系, 并对式中的传递函数进行简写。

$$\begin{bmatrix} e \\ u \end{bmatrix} = \Gamma(G_a, K^*) \begin{bmatrix} R \\ d \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\Gamma(G_a, K^*) = \begin{bmatrix} H(I + G_a K^*)^{-1} & -(I + G_a K^*)^{-1} G_a \\ H K^* (I + G_a K^*)^{-1} & (I + K^* G_a)^{-1} \end{bmatrix} \quad (27)$$

如果式(27)中包含的 4 个传递函数都是稳定的, 则闭环系统是内部稳定的, 因此条件(3)必须满足。

总之若满足条件(1)~(3), 改进的逆解耦自抗扰内模闭环系统等价系统是内部稳定的。

在式(27)中令:

$$Q = K^* (I + G_a K^*)^{-1} = \frac{G_c K_N (I + GKC)}{I + G_c K_N (G - G_m) + GKC} \quad (28)$$

将式(27)转换为:

$$\Gamma(G_a, K^*) = \begin{bmatrix} H(I - G_a Q) & -(I - G_a Q) G_a \\ HQ & I - Q G_a \end{bmatrix} \quad (29)$$

若条件(1)~(2)满足, Q 的稳定性与闭环控制系统的内部稳定性是等价的。

3.2 磨矿分级系统的鲁棒性能分析

在磨矿分级过程中, 被控对象存在各种不确定性干扰, 如图 8 所示, 通过加性不确定性 $\Delta_2(s)$ 、乘性输入不确定性 $\Delta_1(s)$ 与乘性输出不确定性 $\Delta_0(s)$ 来等效不确定性干扰, 并通过灵敏度 $\varepsilon(s)$ 和互补灵敏度 $\eta(s)$ 对存在不确定性的磨矿分级系统进行讨论。

由式(10)可得互补灵敏度函数 $\eta(s)$ 、灵敏度 $\varepsilon(s)$ 为:

$$\eta(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{HG_c K_N G + HG_c K_N G_m KCG}{I + G_c K_N (G - G_m) + GKC} \quad (30)$$

$$\varepsilon(s) = \frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{I - G_c K_N G_m}{I + G_c K_N (G - G_m) + GKC} \quad (31)$$

式(32)中的不确定性通过 $\Delta(s)$ 来表述, 在标称磨矿分级系统闭环稳定时, 保证系统鲁棒性能的充要条件是灵敏度函数 $\varepsilon(s)$ 与互补灵敏度 $\eta(s)$ 应满足式(32)^[13]:

$$|\eta(s)\Delta(s)| + |\varepsilon(s)w| < 1, \forall w \quad (32)$$

式中: w 为灵敏度函数的加权因子, $w \in [0.3 \ 0.9]$, 磨矿分级系统的鲁棒性能是在标称性能 $|\varepsilon(s)w| < 1$ 与鲁棒稳定性 $|\eta(s)\Delta(s)| < 1$ ^[14-15] 相互调节达到最好效果。

当模型匹配时, 系统的灵敏度函数、互补灵敏度函数为:

$$\varepsilon(s) = \frac{I - G_c K_N G_m}{I + GKC} \quad (33)$$

$$\eta(s) = HG_c K_N G \quad (34)$$

将式(33)、(34)代入式(32)中, $\forall w$ 可得:

$$|HG_c K_N G \Delta(s)| + \left| \frac{I - G_c K_N G_m}{I + GKC} w \right| < 1 \quad (35)$$

由式(35)可知, 当模型中的乘性不确定性界、加性不确定性界 $\Delta(s)$ 确定时, 只需要调整系统中 LADRC 参数、补偿器中滤波器参数 λ 与增益参数 K 使得系统具有较好的鲁棒性能。

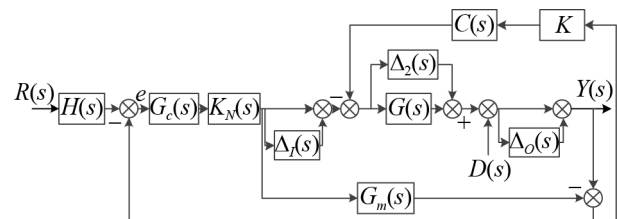


图 8 具有不确定性的改进的逆解耦自抗扰内模控制结构图

Fig. 8 Improved inverse decoupling ADRC internal model control structure diagram with uncertainty

4 改进的逆解耦自抗扰内模控制在磨矿分级中的应用

4.1 磨矿分级过程模型

由式(1)可得磨矿分级系统模型, 并通过改进的逆解耦自抗扰内模控制方法对其进行解耦控制, 如图 9 所示。

在对磨矿分级系统进行逆解耦前, 判定系统存在物理不可实现的问题, 对被控对象进行补偿, 将 $G_{21}(s)$, $G_{22}(s)$ 中的时滞进行交换, 消除系统出现的超前项, 可得系统的逆解耦器为式(36)~(37), 对 LADRC、补偿器 $C(s)$ 中的参数和增益 K 进行整定, 可得在分级机溢流浓度通道 $b_0=0.4167$ 、 $\omega_0=1.2$ 、 $\omega_c=2.1$ 、 $\lambda_1=16$ 、 $K_1=1.5$, 在返砂量通道, $b_0=$

0.222 1、 $\omega_o=1.5$ 、 $\omega_c=1.2$ 、 $\lambda_2=16$ 、 $K_2=1.5$ 。

$$K_{N12} = -\frac{16s + 0.8}{45s + 1} e^{-20s} \quad (36)$$

$$K_{N21} = -\frac{35s + 1}{360s^2 + 42s + 1.2} e^{-10s} \quad (37)$$

4.2 摄动系统下的系统响应

将以上改进的逆解耦自抗扰内模控制方法应用在磨矿分级过程中, 图 10 所示分别为增益增加 20%、时间常数增加 20%、时滞增加 20%的系统的输出响应。在 $t=1\ 000\ s$ 和 $t=1\ 500\ s$ 时对分级机溢流浓度设定值 $r1(s)$ 、返砂量设定值 $r2(s)$ 分别加入幅值为 2, -2 的阶跃干扰信号, 验证磨矿分级系统的跟踪性能、解耦性能。仿真结果表明, 当系统的设定值 $r1, r2$ 发生变化以及存在模型失配时, 改

进的逆解耦自抗扰内模控制方法的输出响应 $y1, y2$ 仍能很好的跟踪设定值、调节时间短, 且更加平稳。逆解耦内模控制的输出响应产生的突变尖峰、调节时间、超调量、调节扰动的时间高于改进的逆解耦自抗扰内模控制的输出响应, 其中磨矿分级系统对时滞项比较敏感, 时滞发生变化时, 改进的逆解耦自抗扰内模控制输出响应的超调量、振荡程度和调节时间都小于逆解耦内模控制的输出响应, 可得磨矿分级系统在被控对象各参数的变化引起的模型失配以及强干扰下, 通过调整 LADRC 参数、补偿器 $C(s)$ 和增益值 K 来抑制外部扰动、模型失配等问题, 使得磨矿分级系统具有较好的随动跟踪性能、解耦性能。

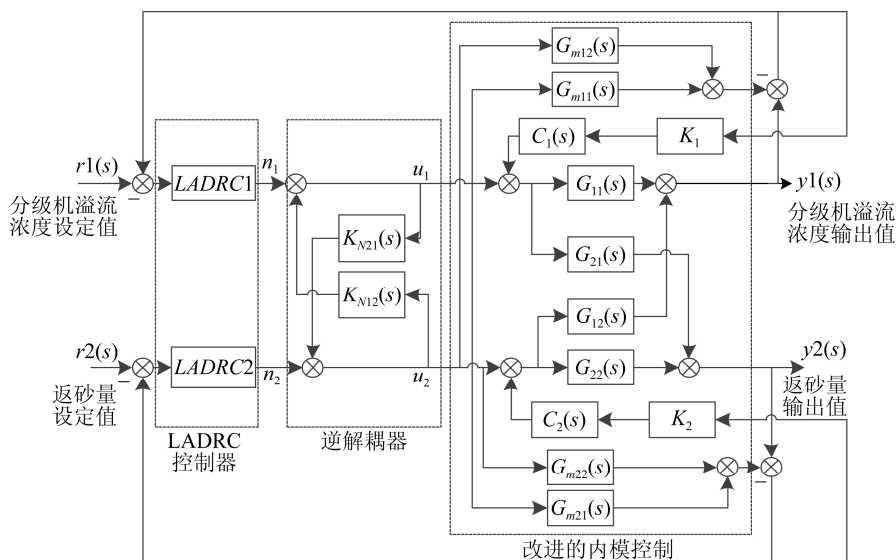
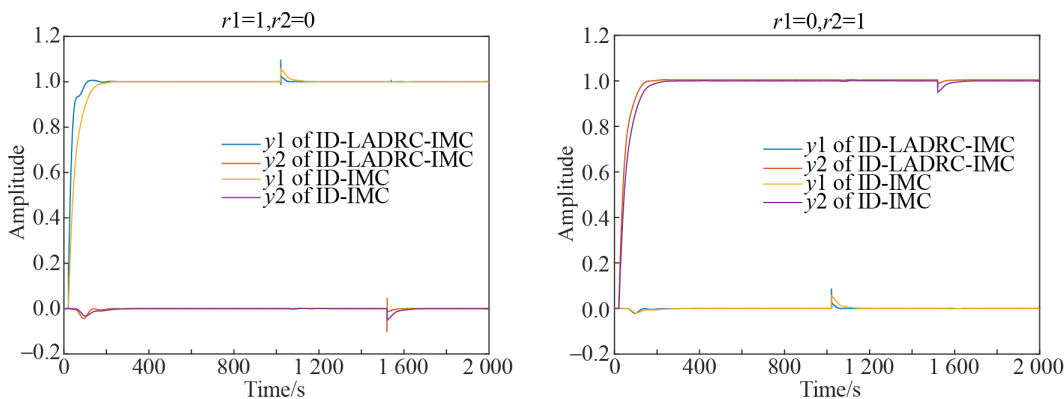
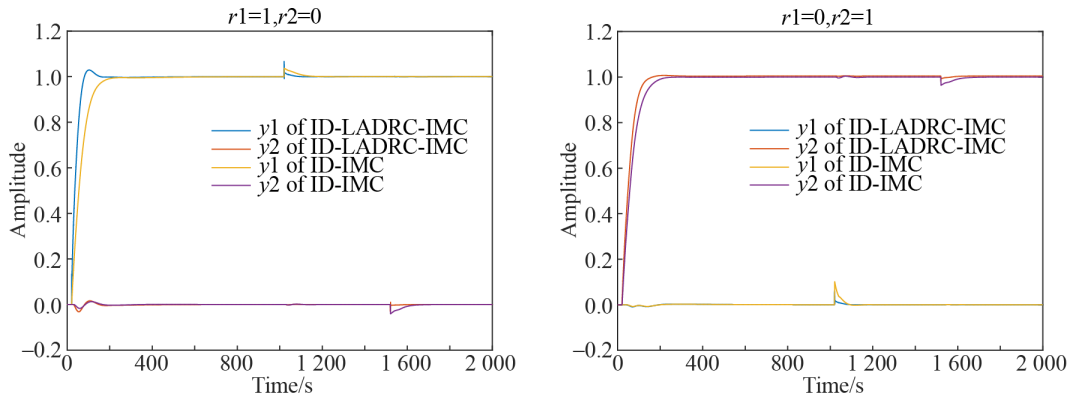


图 9 双输入双输出改进的逆解耦自抗扰内模控制结构图

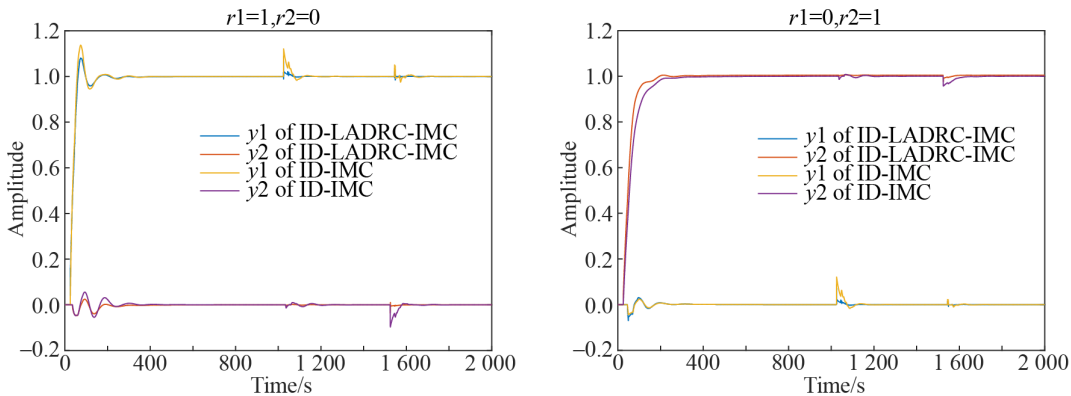
Fig. 9 Two input and double output improved inverse decoupling ADRC internal model control structure diagram



(a) 增益增加 20% 的系统输出响应



(b) 时间常数增加 20% 的系统输出响应



(c) 时滞增加 20% 的系统输出响应

图 10 摄动系统的输出响应

Fig. 10 Output responses of perturbation system

4.3 验证磨矿分级系统的闭环内部稳定性、鲁棒性能

磨矿分级系统满足条件(1), (2), 将 LADRC 参数、内模补偿器参数 λ 和增益 K 代入式(28)中, 可得 Q 是稳定的, 因此磨矿分级闭环系统是内部稳定的。

磨矿分级系统中 Δ_I , Δ_O , Δ_2 的设定值分别为:

$$\Delta_I = \text{diag} \left\{ \begin{array}{cc} \frac{s+0.3}{s+1} & \frac{s+0.3}{s+1} \end{array} \right\} \quad (38)$$

$$\Delta_O = \text{diag} \left\{ \begin{array}{cc} \frac{-s-0.3}{2s+1} & \frac{-s-0.3}{2s+1} \end{array} \right\} \quad (39)$$

$$\Delta_2 = \text{diag} \left\{ \begin{array}{cc} \frac{s+0.2}{2s+1} & \frac{s+0.2}{2s+1} \end{array} \right\} \quad (40)$$

式(38)~(40)中: Δ_I 可视为在高频率和低频率具有约为 100%和 30%的不确定性^[15]; Δ_O 可视为在高频率和低频率具有约为 50%和 30%的误差; Δ_2 可

视为在高频率和低频率时存在失配 50%和 20%, 将式(38)~(40)代入式(35), 并通过 pade 近似任意精度逼近式(35)中所含的延迟项。

由图 11 可看出, 改进逆解耦自抗扰内模控制下的磨矿分级过程满足系统鲁棒性能的充要条件, 具有较好的鲁棒性能。

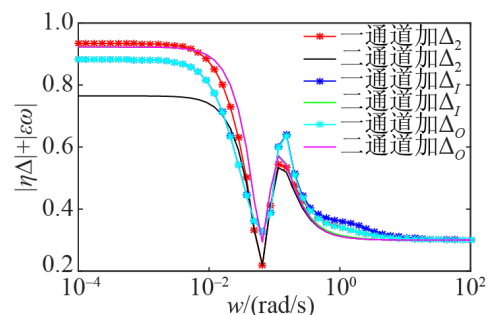
图 11 $|\eta(s)\Delta(s)| + |\epsilon(s)w|$ 的幅频曲线Fig. 11 Magnitude-frequency curves of $|\eta(s)\Delta(s)| + |\epsilon(s)w|$

图 12 为扰动系统输出响应, 用不确定性来代替原矿石的硬度、粒度大小的波动等不确定性干扰以及被控对象中存在的模型失配等情况。当加入乘性与加性不确定性时, 并且在 $t=1\ 000\text{ s}$ 和 $t=1\ 500\text{ s}$ 时对设定值分别加入幅值为 2, -2 的阶跃干扰信号, 通过图 12 的仿真曲线可得, 当磨矿分级系统的设定值 r_1, r_2 发生变化以及存在不确定性干扰时, 系统的输出响应 y_1, y_2 仍可以实现解耦

并跟踪设定值, 改进的逆解耦自抗扰内模控制的输出响应的超调量、调节时间、突变尖峰小于逆解耦内模控制的输出响应。由此可得在磨矿分级过程中, 通过调节 LADRC 参数、补偿器 $C(s)$ 和增益值 K 来抑制系统中存在的不确定性和强干扰带来的影响, 使得磨矿分级系统很快地跟踪到设定值, 具有很好的鲁棒性能。

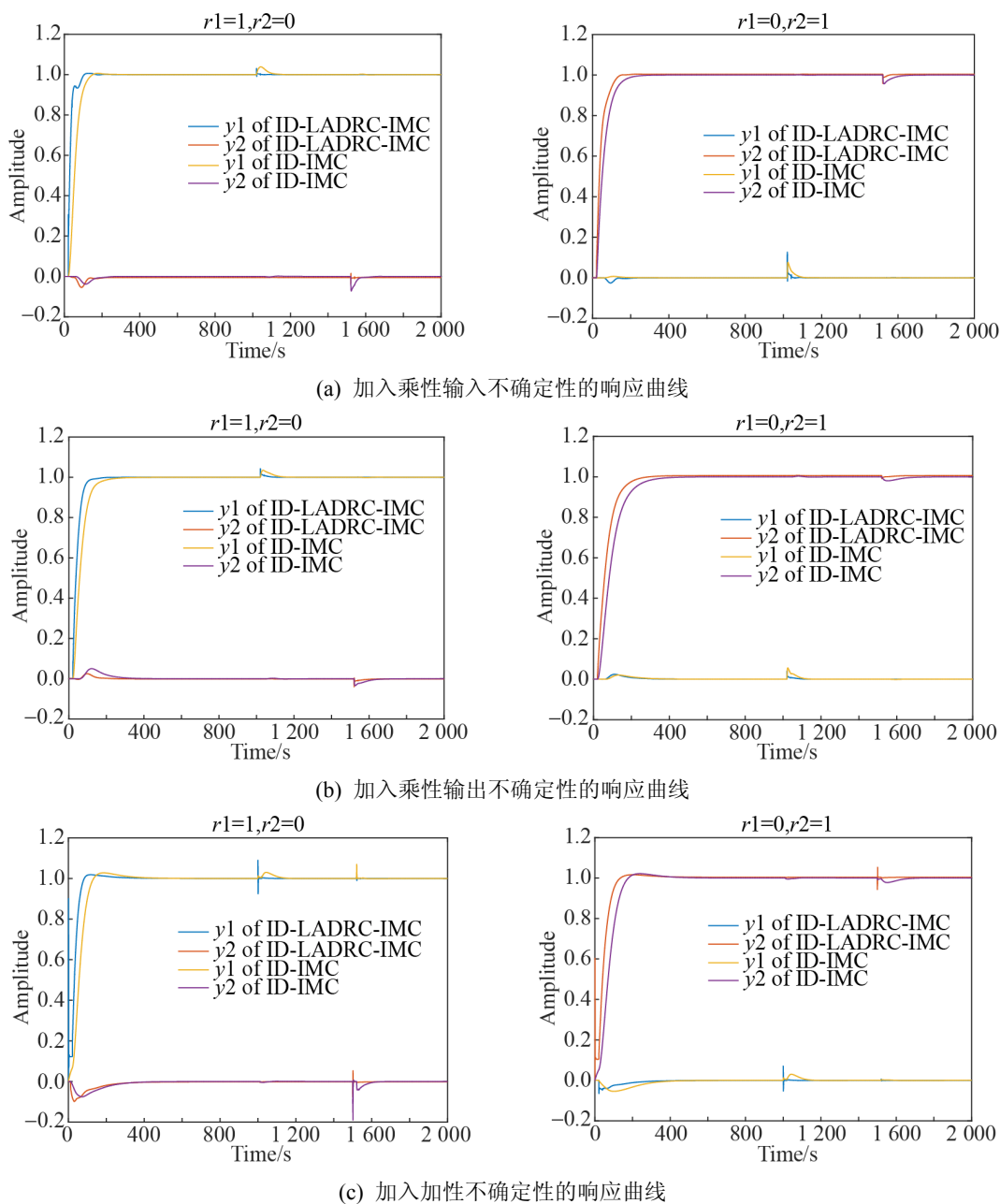


图 12 不确定性下的系统输出响应

Fig. 12 System output responses due to uncertainties

4.4 设备验证

在磨矿分级系统中加入不确定性扰动, 分别采用改进的逆解耦自抗扰内模控制和逆解耦内模控制在半实物磨矿过程实验平台上进行验证, 分级机溢流浓度的设定值由 32% 转换为 48%, 设备输出曲线如图 13~14 所示。

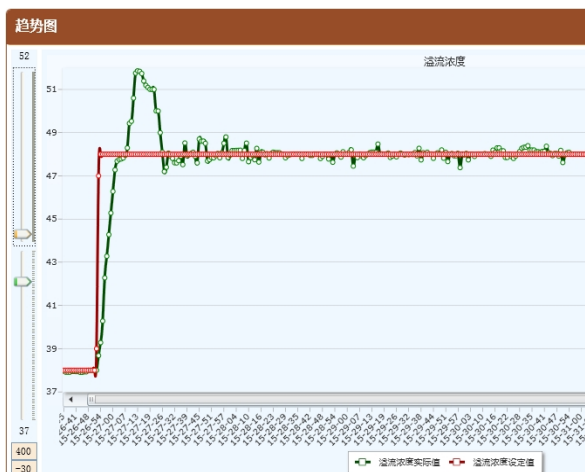


图 13 逆解耦内模控制的分级机溢流浓度跟踪曲线
Fig. 13 Overflow concentration tracking curve of classifier based on inverse decoupling internal model control

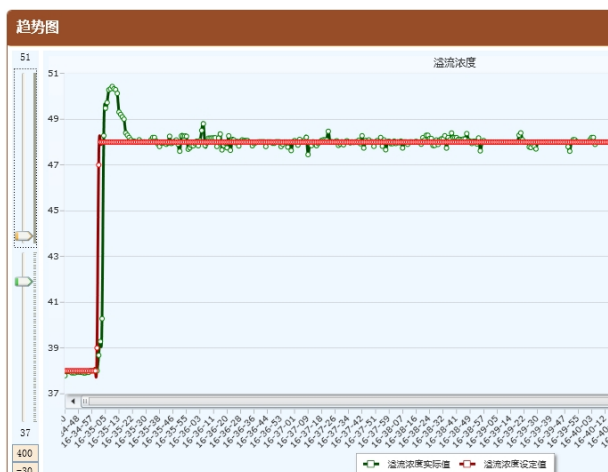


图 14 改进的逆解耦自抗扰内模控制的分级机溢流浓度跟踪曲线
Fig. 14 Overflow concentration tracking curve of classifier based on improved inverse decoupling active disturbance rejection internal model control method

从图 13~14 可以看出, 当系统中存在不确定性扰动时, 采用改进的逆解耦自抗扰内模控制得到的分级机溢流浓度的实际值控制曲线超调量、调节时

间都较小, 最终稳定跟踪到设定值。从而验证了此方法的有效性。

5 结论

针对磨矿分级系统中的多变量、大时滞、强耦合等特性, 采用改进的逆解耦自抗扰内模控制及逆解耦内模控制方法使磨矿分级机溢流浓度跟踪设定值, 通过调节 LADRC 参数、补偿器 $C(s)$ 参数和增益值 K 抑制系统由于存在的模型失配、外部扰动、不确定性干扰对系统带来的不利影响, 根据仿真、半实物磨矿过程实验平台的验证, 提出的改进的逆解耦自抗扰内模控制方法优于逆解耦内模控制方法, 具有良好的解耦性能、鲁棒稳定性以及抑制干扰的能力, 从而保证磨矿分级系统的优化运行, 此方法在高维耦合的被控对象中也具有应用价值。

参考文献:

- [1] 周颖, 赵慧敏, 陈阳, 等. 基于改进混沌自适应粒子群神经网络的磨矿粒度软测[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(12): 2946-2950.
Zhou Ying, Zhao Huimin, Chen Yang, et al. Soft Sensor of Particle Size of Grinding Process Based on Improved CSAPSO Neural Networks[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(12): 2946-2950.
- [2] 周平, 柴天佑. 多变量解耦控制的工业过程运行层次控制方法[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(2): 199-205.
Zhou Ping, Chai Tianyou. Hierarchical Control Approach for Industrial Process Operation Based on Multivariable Decoupling Control[J]. Control Theory & Applications, 2011, 28(2): 199-205.
- [3] 程贇, 陈增强, 孙明伟, 等. 多变量逆解耦自抗扰控制及其在精馏塔过程中的应用[J]. 自动化学报, 2017, 43(6): 1080-1088.
Cheng Yun, Chen Zengqiang, Sun Mingwei, et al. Multivariable Inverted Decoupling Active Disturbance Rejection Control and Its Application to a Distillation Column Process[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(6): 1080-1088.
- [4] 董君伊. 基于逆解耦的多变量热工过程自抗扰控制研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
Dong Junyi. Inverted Decoupling Control for Multivariable Thermal Processes[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.

- [5] Zheng Q, Chen Z Z, Cao Z Q. A Dynamic Decoupling Control Approach and Its Applications to Chemical Processes[C]//Proceedings of the 2007 American Control Conference (ACC'07). New York, USA: IEEE, 2007: 5176-5181.
- [6] Sun L, Dong J Y, Li D H, et al. A Practical Multivariable Control Approach Based on Inverted Decoupling and Decentralized Active Disturbance Rejection Control[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research* (S0888-5885), 2016, 55(7): 2008-2019.
- [7] 唐德翠, 高志强, 张绪红. 浊度大时滞过程的预测自抗扰控制器设计[J]. *控制理论与应用*, 2017, 34(1): 101-108.
Tang Decui, Gao Zhiqiang, Zhang Xuhong. Design of Predictive Active Disturbance Rejection Controller for Turbidity[J]. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(1): 101-108.
- [8] 钟亮民. 大型循环流化床温建模与优化控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
Zhong Liangmin. Research on Modeling and Optimization Control on the Bed Temperature of Large-Capacity Circulating Fluidized Bed Boiler[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [9] 周平. 复杂磨矿过程运行反馈控制方法及应用研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
Zhou Ping. Operational Feedback Control Approaches for Complex Grinding Processes and Their Applications[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.
- [10] Zhou P, Chai T Y, Wang H. Intelligent Optimal-Setting Control for Grinding Circuits of Mineral Processing Process[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* (S1545-5955), 2009, 6(4): 730-743.
- [11] 李大字, 于文龙, 靳其兵. 一阶时滞系统线性自抗扰控制器参数稳定域分析[J]. *控制理论与应用*, 2017, 34(9): 1245-1249.
Li Dazi, Yu Wenlong, Jin Qibing. Stability Region Analysis of Linear Active Disturbance Rejection Controllers for First Order Systems with Time Delay[J]. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(9): 1245-1249.
- [12] 赵越, 孙立军, 吴瑕, 等. 多变量解耦自抗扰控制在气体流量装置中的应用[J]. *化工学报*, 2017, 68(9): 3482-3493.
Zhao Yue, Sun Lijun, Wu Xia, et al. Active Disturbance Rejection Control on Gas Flow Equipment by Multivariable Decoupling Algorithm[J]. *CIESC Journal*, 2017, 68(9): 3482-3493.
- [13] 于哲, 王璐, 苏建波. 基于干扰观测器的不确定线性多变量系统控制[J]. *自动化学报*, 2014, 40(11): 2643-2649.
Yu Zhe, Wang Lu, Su Jianbo. Disturbance Observer Based Control for Linear Multi-variable Systems with Uncertainties[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(11): 2643-2649.
- [14] Liu T, Zhang W D, Gu D Y, et al. Research Progress of Frequency Domain Decoupling Control Design for Chemical and Industrial Multivariable Processes with Time Delays[J]. *Acta Automatica Sinica* (S0254-4156), 2006, 32(1): 73-83.
- [15] 周平, 柴天佑, 陈通文. 工业过程运行的解耦内模控制方法[J]. *自动化学报*, 2009, 35(10): 1362-1368.
Zhou Ping, Chai Tianyou, Chen Tongwen. Decoupling Internal Model Control Method for Operation of Industrial Process[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(10): 1362-1368.