



控制理论与应用
Control Theory & Applications
ISSN 1000-8152, CN 44-1240/TP

《控制理论与应用》网络首发论文

题目：复杂给矿过程信号补偿法驱动的智能 PI 控制
作者：郭策，张亚军，贾瑶，郑锐，柴天佑
收稿日期：2023-10-13
网络首发日期：2024-09-06
引用格式：郭策，张亚军，贾瑶，郑锐，柴天佑. 复杂给矿过程信号补偿法驱动的智能 PI 控制[J/OL]. 控制理论与应用.
<https://link.cnki.net/urlid/44.1240.TP.20240905.1301.004>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

复杂给矿过程信号补偿法驱动的智能PI控制

郭策^{1†}, 张亚军^{1,2}, 贾瑶^{1,2}, 郑锐¹, 柴天佑^{1,2}

(1. 东北大学 流程工业综合自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;

2. 国家冶金自动化工程技术研究中心, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 复杂给矿过程采用常规PI控制难以保证系统稳定运行. 本文首先根据给矿过程的机理特征建立由低阶线性模型和未知高阶非线性动态系统组成的混合动态模型. 其次, 提出了由信号补偿PI控制、规则推理、切换机制组成的智能PI控制方法, 该方法利用一步最优控制律设计信号补偿器, 削弱了非线性扰动和传输时延对给矿过程的影响, 并结合规则推理改善了闭环控制效果. 针对下矿时给矿机的切换问题, 设计了智能切换机制, 保证了给矿机的合理调配. 最后, 将所提方法应用于复杂给矿过程, 实际应用效果表明: 所提方法可将给矿量和给矿频率控制在工艺要求的目标值范围内.

关键词: 给矿过程; 混合动态模型; 信号补偿; 切换机制; 智能PI控制

引用格式: 郭策, 张亚军, 贾瑶, 郑锐, 柴天佑. 复杂给矿过程信号补偿法驱动的智能PI控制. 控制理论与应用, 2024, 41(x): 1–10

DOI: 10.7641/CTA.2014.30679

Intelligent PI Control Driven by Signal Compensation Method for
Complex Ore Feeding ProcessGUO Ce^{1†}, ZHANG Ya-jun^{1,2}, JIA Yao^{1,2}, ZHENG Rui¹, CHAI Tian-you^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110819, China;

2. National Engineering Technology Research Center for Metallurgical Industry Automation, Shenyang Liaoning 110819, China)

Abstract: Conventional PI control is difficult to ensure stable operation for the complex ore feeding process. Firstly, this article analyzes the complexity mechanism characteristics of the ore feeding process, and establishes a hybrid dynamic model consisting of a low order linear model and an unknown high-order nonlinear dynamic system. Secondly, an intelligent PI control method is proposed. It is composed of signal compensation method, rule inference control, and switching mechanism. This method utilizes a one-step optimal control law to design a signal compensator, which weakens the influence of nonlinear disturbances and transmission delay on the ore feeding process, and combines rule inference to improve the closed-loop control effect. Regarding switching problem of the ore feeding machines, an intelligent switching mechanism has been designed to ensure the reasonable allocation of five ore feeding machines. Finally, the proposed method is applied to complex ore feeding process, the actual application results show that the proposed method can control the ore feeding amount and frequency within the target value range required by the process.

Key words: ore feeding process; hybrid dynamic model; signal compensation; switching mechanism; intelligent PI control

Citation: GUO Ce, ZHANG Ya-jun, JIA Yao, ZHENG Rui, CHAI Tian-you. Intelligent PI Control Driven by Signal Compensation Method for Complex Ore Feeding Process. *Control Theory & Applications*, 2024, 41(x): 1–10

1 引言

复杂给矿过程是磨矿工艺的重要组成部分, 给矿控制的目的是将给矿量和给矿频率控制在工艺要求的目标值范围内, 防止给矿特性变化影响磨机的产

量和粒度^[1]. 受到返矿波动、矿石成分多变、给矿机切换等扰动的影响, 给矿回路呈现出强非线性特性^[2]. 同时, 由于矿石运输的起始点和检测点之间的距离, 导致给矿量检测存在时延, 给矿回路呈现出

收稿日期: 2023–10–13; 录用日期: 2024–06–06.

[†]通信作者. E-mail: yajunzhang@mail.neu.edu.cn;

本文责任编辑: 武玉强

国家自然科学基金项目(61991400, 61991402, 62173170).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61991400, 61991402, 62173170).

大时滞特性^[3], 使得给矿过程的控制难度加大. 为此, 亟需一种可靠的高性能控制器.

为了解决复杂给矿系统的时延问题, 文[4]提出Smith预估补偿控制方法, 改善给矿回路的控制效果, 但Smith预估器需要精确辨识模型参数. 文[5]提出Smith预估补偿与模型参考自适应相结合的控制方法, 降低了对精确模型的依赖. 文[6]利用李雅普诺夫理论设计了自适应控制器, 补偿Smith预估模型和被控对象之间的偏差, 改善了控制效果, 但增加了系统时变性.

为了解决复杂给矿系统的非线性扰动问题, 文[7]采用非线性扰动观测器对扰动进行估计和补偿, 提升了回路的抗扰能力. 文[8-9]提出自抗扰控制ADRC方法, 增强给矿回路的鲁棒性. 但文[7-9]的方法结构复杂, 调节参数多, 增加了控制方法的复杂性. 为此, 文[10-11]提出了线性自抗扰控制方法, 将参数简化为控制器带宽和观测器带宽, 但低阶线性自抗扰控制无法对未知高阶非线性系统产生的扰动做出准确估计^[12-13], 不适用于给矿过程.

另一方面, 针对复杂工业过程的切换控制问题, 文[14]提出一种多模型自适应切换控制方法, 将非线性系统转化为多个类线性系统, 并基于高阶扰动观测器设计自适应控制器, 以跟踪误差最小化为性能指标, 切换多模态控制器. 文[15-16]提出一种数据驱动的非线性切换控制方法, 利用大数据信息, 设计线性控制器和非线性补偿器, 通过切换函数和规则选择控制器, 保证了系统的跟踪性能. 但文[14-16]方法均属于控制器之间的切换, 不适用于给矿机下料过程的切换.

针对以上问题, 本文提出了信号补偿法驱动的复杂给矿过程智能PI控制方法, 并应用于实际工业给矿过程, 实际应用效果表明了所提方法的有效性和优越性. 本文的主要贡献如下:

- 1) 建立了由低阶线性模型和未知高阶非线性动态系统组成的给矿过程混合动态模型.
- 2) 设计了基于一步最优控制律的信号补偿控制器, 消除系统中返矿干扰和传输时延带来的非线性影响, 并结合规则推理, 实现了给矿过程的智能PI控制.
- 3) 提出了给矿过程智能切换机制, 保证了控制频率的合理选择和给矿机的合理调配.

2 给矿过程问题描述

2.1 给矿过程简介

如图1所示, 给矿过程由料仓、五台电磁给矿机、返矿输送机、皮带输送机、皮带秤、半自磨机等组成. 原矿经过简单破碎送往矿仓, 仓内矿石经下方的五台电磁给矿机落至皮带输送机, 电磁给矿机采用人工切换方式工作, 皮带输送机将矿石送往半

自磨机进行研磨, 研磨后粒度合格的矿石送至給料泵池, 进入下一道工序, 不合格的矿石经返矿输送机传回进行二次研磨. 给矿过程的输入量为给矿机的频率, 输出量为皮带机的矿石输送量.

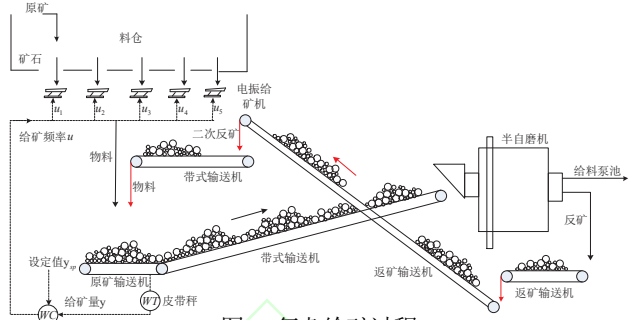


图1 复杂给矿过程

Fig. 1 Complex ore feeding process

2.2 给矿过程动态模型

根据文[17-18]可得第*i*台给矿机的下矿量 $q_i(t)$ 与第*i*台给矿机运行速度的关系式:

$$q_i(t) = 3.6B_iH_i\phi_i v_i(t). \quad (1)$$

其中, B_i 和 H_i 为给矿机的宽度和高度, ϕ_i 为矿石堆积密度.

由于给矿过程存在传输时延 τ , 间接导致控制频率 $u_i(t)$ 滞后 τ 个时刻, 第*i*台给矿机的运行速度 $v_i(t)$ 与给矿机频率 $u_i(t-\tau)$ 关系式可表示为^[17-18]:

$$v_i(t) = k_{i,1}u_i(t-\tau) + k_{i,2}. \quad (2)$$

其中, $k_{i,1}$ 和 $k_{i,2}$ 为关于振幅 $A_i(\cdot)$ 、频率 $u_i(t-\tau)$ 、槽倾角 α_i 、振动方向角 β_i 、摩擦系数 μ 的未知非线性函数.

皮带机给矿分量 $y_i(t)$ 与第*i*台给矿机下矿量 $q_i(t)$ 之间的关系可表示为^[17]:

$$\frac{dy_i(t)}{dt} = \left[1 - \frac{1}{Tr(\delta_i(t-\tau), u_i(t-\tau))}\right]y_i(t) + q_i(t). \quad (3)$$

其中, $r(\delta_i(t-\tau), u_i(t-\tau))$ 为皮带秤的称重干扰系数, T 为惯性环节时间常数.

由式(1)~(3)可得 $y_i(t)$ 与 $u_i(t-\tau)$ 的关系式为:

$$\frac{dy_i(t)}{dt} = \left[1 - \frac{1}{Tr(\delta_i(t-\tau), u_i(t-\tau))}\right]y_i(t) + K_{i,1}(\cdot)u_i(t-\tau) + K_{i,2}(\cdot). \quad (4)$$

其中,

$$\begin{cases} K_{i,1} = 3.6B_iH_i\phi_i k_{i,1}(\cdot), \\ K_{i,2} = 3.6B_iH_i\phi_i k_{i,2}(\cdot). \end{cases}$$

皮带机给矿总量 $y(t)$ 与给矿分量 $y_i(t)$ 之间的关系式为^[17]:

$$\frac{dy(t)}{dt} = \sum_{i=0}^5 \frac{dy_i(t)}{dt} + M(\cdot). \quad (5)$$

其中, $M(\cdot)$ 为返矿干扰, 是与给矿分量 $y_i(t)$ 、磨机工况 $\zeta(t)$ 、矿石硬度 $\varepsilon(t)$ 相关的非线性函数, 即:

$$M(\cdot) = M\left(\sum_{i=0}^5 y_i(t), \zeta(t), \varepsilon(t)\right). \quad (6)$$

由式(4)~(5)可得给矿动态模型:

$$\frac{dy_i(t)}{dt} = \sum_{i=0}^5 \left[1 - \frac{1}{Tr(\delta_i(t-\tau), u_i(t-\tau))}\right] y_i(t) + \sum_{i=0}^5 [K_{i,1}(\cdot) u_i(t-\tau) + K_{i,2}(\cdot)] + M(\cdot). \quad (7)$$

实际生产中, 要求五台给矿机的频率保持一致, 即 $u(t-\tau) = u_i(t-\tau)$, $i = 1, 2, \dots, 5$, 将 $u(t-\tau)$ 代入式(7), 可将给矿动态模型式(7)转化为:

$$\frac{dy_i(t)}{dt} = \left[1 - \frac{1}{Tr(\delta_i(t-\tau), u_i(t-\tau))}\right] y_i(t) + K(\cdot) u(t-\tau) + M(\cdot). \quad (8)$$

其中, $K(\cdot) = \sum_{i=0}^5 K_{i,1}(\cdot)$, 为 $u_i(t-\tau)$ 频率非线性系数, $W(\cdot) = \sum_{i=0}^5 K_{i,2}(\cdot)$, 为关于频率 $u_i(t-\tau)$ 和返矿扰动 $M(\cdot)$ 的复合扰动。

以 $u_i(t-\tau)$ 为输入, $y(t)$ 为输出的模型式(8)可表示为:

$$\begin{cases} \frac{dy_i(t)}{dt} = a(\cdot)y(t) + b(\cdot)u(t-\tau) + W(\cdot), \\ a(\cdot) = 1 - \frac{1}{Tr(\delta_i(t-\tau), u_i(t-\tau))}, \\ b(\cdot) = K(\cdot). \end{cases} \quad (9)$$

其中, $a(\cdot)$ 和 $b(\cdot)$ 为未知非线性函数。

采用文[19-22]方法可得:

$$\begin{cases} \frac{dy_i(t)}{dt} = ay(t) + bu(t-\tau) + \hat{v}(t), \\ \hat{v}(t) = [a(\cdot) - a]y(t) + W(\cdot) + [b(\cdot) - b]u(t-\tau). \end{cases} \quad (10)$$

采用一阶前向差分可将式(10)表示为:

$$y(k+1) = (1+a)y(k) + bu(t-\tau) + \hat{v}(k). \quad (11)$$

其中, k 为采样时间, 采用最小二乘法对式(11)的参数 a 和 b 辨识, 将辨识结果 \tilde{a} 和 \tilde{b} 代入式(11)可得:

$$y(k+1) = \tilde{a}y(k) + \tilde{b}u(t-\tau) + (1+a-\tilde{a})y(k) + (1-\tilde{b})u(t-\tau) + \hat{v}(k). \quad (12)$$

进一步可将式(12)表示为线性可辨识部分与未知高阶非线性系统 $v(k)$ 之和的形式, 即:

$$y(k+1) = \tilde{a}y(k) + \tilde{b}u(t-\tau) + v(k). \quad (13)$$

其中,

$$\begin{aligned} v(k) &= (1+a-\tilde{a})y(k) + (b-\tilde{b})u(t-\tau) + \hat{v}(k) \\ &= [a(\cdot) - a]y(k) + [b(\cdot) - b]u(t-\tau) + W(\cdot) + (1+a-\tilde{a})y(k) + (b-\tilde{b})u(t-\tau). \end{aligned} \quad (14)$$

根据式(13)得到 $u(t-\tau)$ 为输入, 以 $y(k+1)$ 为输出的给矿动态模型为:

$$A(z^{-1})y(k+1) = B(z^{-1})u(t-\tau) + v(k). \quad (15)$$

其中, $A(z^{-1}) = 1 - a_1 z^{-1}$, $a_1 = \tilde{a}$, $B(z^{-1}) = b_0$, $b_0 = \tilde{b}$.

2.3 给矿过程的控制目标及存在问题

复杂给矿过程的控制目标是将给矿量 $y(k)$ 与设定值 $y_{sp}(k)$ 的跟踪误差 $e(k)$ 和给矿机频率 $u(t-\tau)$ 控制在目标值范围内, 即:

$$|e(k)| = |y_{sp}(k) - y(k)| < \bar{\delta}_1, \bar{\delta}_1 > 0, \quad (16)$$

$$u_{min} < u(t-\tau) < u_{max}, u_{min} > 0, u_{max} > 0. \quad (17)$$

其中, $\bar{\delta}_1$ 为跟踪偏差 $e(k)$ 的上界, u_{min} 和 u_{max} 分别是频率 $u(t-\tau)$ 的下界和上界, 并分别与工艺要求的目标值范围保持一致。

给矿过程的未知非线性、不确定性、传输时延增加了常规PI控制的难度. 人工选择给矿机, 存在单台给矿机过度运转的情况, 加速了给矿机的磨损. 人工控制不能及时准确给出控制频率, 易导致给矿量发生断崖式下降, 影响磨机的产能与稳定性。

3 信号补偿法驱动的智能PI控制

针对给矿过程采用常规PI控制难以保证系统稳定运行的问题, 提出了由信号补偿PI控制、规则推理、给矿机智能切换机制组成的智能PI控制算法, 算法结构如图2所示。

3.1 信号补偿PI控制

当给矿量 $y(k)$ 在目标区间范围 $[y_{min}, y_{max}]$ 内, 采用信号补偿PI控制器保证 $y(k+1)$ 跟踪设定值 $y_{sp}(k+1)$, 信号补偿PI控制器由常规PI控制器和信号补偿器组成。

信号补偿PI控制器的表达式为:

$$u(k-\tau) = u_1(k-\tau) + u_2(k-\tau). \quad (18)$$

其中, $u_1(k-\tau)$ 为常规PI控制器的输出信号, $u_2(k-\tau)$ 为一步最优信号补偿器的输出信号。

带有传输时延 τ 的增量式PI控制器的表达式为:

$$(1 - z^{-1})u_1(k-\tau) = G(z^{-1})e(k-\tau). \quad (19)$$

其中, $e(k-\tau)$ 为滞后 τ 个时刻给矿量跟踪误差, $G(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1}$, $g_0 = k_p + k_i$, $g_1 = -k_p$.

将式(18)和式(19)代入控制器设计模型式(15), 得以补偿信号 $u_2(k-\tau)$ 为输入, 以给矿量跟踪误差 $e(k+1)$ 为输出的方程:

$$\begin{aligned} [(1 - z^{-1})A(z^{-1}) + z^{-\tau-1}B(z^{-1})G(z^{-1})]e(k+1) &= (1 - z^{-1})A(z^{-1})y_{sp}(k+1) - (1 - z^{-1})v(k) \\ &\quad - (1 - z^{-1})[B(z^{-1})u_2(k-\tau) + v(k)]. \end{aligned} \quad (20)$$

令: $1 - z^{-1} G^*(z^{-1}) = (1 - z^{-1})A(z^{-1}) + z^{-\tau-1}$

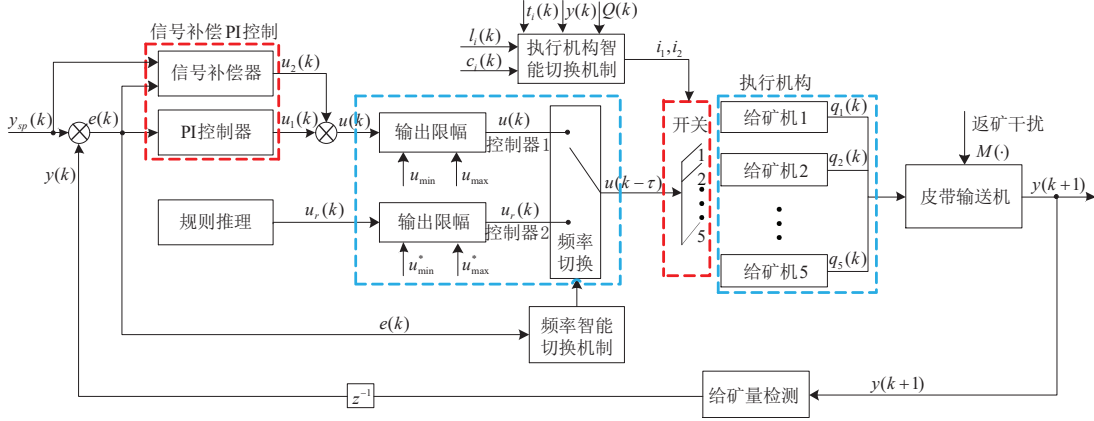


图 2 由信号补偿PI控制、规则推理、切换机制组成的智能PI控制结构图

Fig. 2 An intelligent PI control structure diagram composed of signal compensation PI control, rule inference, and intelligent switching mechanism

$B(z^{-1})G(z^{-1})$, 式(20)可改写为:

$$\begin{aligned} e(k+1) = & G^*e(k) + (1-z^{-1})A(z^{-1})y_{sp}(k+1) \\ & - (1-z^{-1})B(z^{-1})u_2(k-\tau) \\ & - (1-z^{-1})v(k-1) - \Delta^2v(k). \end{aligned} \quad (21)$$

其中, $G^* = g_0^*z^{-1} + g_1^*z^{-2} + g_2^*z^{-3} + g_3^*z^{-4}$, 且 $g_0^* = 1 + a_1$, $g_1^* = -a_1$, $g_2^* = -b_0(k_p + k_i)$, $g_3^* = b_0k_p$, 未知非线性扰动的高阶变化率 $\Delta^2v(k) = v(k-2) + v(k) - 2v(k-1)$.

将式(21)表示为一步最优预报形式:

$$\begin{aligned} e^*(k+1) = & G^*e(k) + (1-z^{-1})A(z^{-1})y_{sp}(k+1) \\ & - (1-z^{-1})B(z^{-1})u_2(k-\tau) \\ & - (1-z^{-1})v(k-1). \end{aligned} \quad (22)$$

其中, $e^*(k+1)$ 表示最优预报误差.

引入可同时使 $u_2(k-\tau)$ 和 $e(k+1)$ 波动最小的一步最优性能指标 J , 即:

$$J = e^2(k+1) + [\lambda_0(1-z^{-1})u_2(k-\tau)]^2. \quad (23)$$

其中, λ_0 为加权常数.

求 J 的极值得:

$$\frac{\partial J}{\partial u_2(k-\tau)} = e^2(k+1) + [\lambda_0(1-z^{-1})u_2(k-\tau)]^2. \quad (24)$$

通过式(24)可得给矿误差 $e(k+1)$ 的最小值, 记为 $e^*(k+1)$, 且

$$e^*(k+1) - \lambda u_2(k-\tau) = 0. \quad (25)$$

其中, λ 为加权常数且 $\lambda = \lambda_0^2/b_0$.

将式(22)与式(25)联立可得信号补偿器:

$$\begin{aligned} u_2(k-\tau) = & u_2(k-\tau-1) + \frac{1}{\lambda + b_0} [G^*(z^{-1}e(k)) \\ & (1-z^{-1})A(z^{-1})y_{sp}(k+1) - (1-z^{-1})v(k-1)]. \end{aligned} \quad (26)$$

3.2 基于规则推理的控制算法

当给矿量 $y(k)$ 超出目标区间范围时, 采用 “IF<条件>THEN<结论>” 规则对给矿过程进行控制, 如表1所示, 条件中的变量为 $e(k)$ 和 $\Delta e(k)$, 限定值为 ε_1 和 ε_2 , 结论中的变量为频率 $u_r(k)$, 其限定的上界和下界分别为 u_{max}^* 和 u_{min}^* .

表 1 基于专家经验的给矿机频率控制规则

Table 1 Frequency control rules for mining machines based on expert experience

规则	IF<条件>	THEN<结论>
规则1	$e(k) > \varepsilon_1$ and $ \Delta e(k) > \varepsilon_2$	$u_r(k) = u_{max}^*$
规则2	$e(k) < -\varepsilon_1$ and $ \Delta e(k) > \varepsilon_2$	$u_r(k) = u_{min}^*$
规则3	$e(k) > \varepsilon_1$ and $ \Delta e(k) < \varepsilon_2$	$u_r(k) = u_{max}$
规则4	$e(k) < -\varepsilon_1$ and $ \Delta e(k) < \varepsilon_2$	$u_r(k) = u_{min}$

3.3 频率与执行机构的智能切换机制

图2中的频率切换机制以偏差 $e(k)$ 为输入, 以切换指令为输出, 具体如下:

$$u(k-\tau) = \begin{cases} u(k); & \text{if } |e(k)| < \varepsilon_3, \\ u_r(k); & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (27)$$

其中, ε_3 为 $|e(k)|$ 变化的上界.

在给矿机执行机构切换机制中, 人工设定下矿口料位 $l_i(k)$ 的下界 l_s , 给矿机运行时长 $t_i(k)$ 的上界为 t_s , 第 i 台给矿机料位的偏差为 $e_{l,i}(k)$, 运行时的偏差为 $e_{t,i}(k)$, 且 $e_{l,i}(k) = l_s - l_i(k)$, $e_{t,i}(k) = t_s - t_i(k)$, $i = 1, 2, \dots, 5$.

若第 i 台给矿机触发了执行机构的切换条件: $e_{l,i}(k) \leq E_1$ or $e_{t,i}(k) \geq E_2$, 表明该给矿机已超负荷运转, 则需采用性能指标式(28)对所有给矿机的优先级 $J_i(k)$ 进行计算, E_1 和 E_2 分别为偏差的约束上限和约束下限.

$$J_i(k) = f_{l,i}(k) + f_{t,i}(k) + f_{m,i}(k). \quad (28)$$

条件1:

$$f_{l,i}(k) = \begin{cases} c_l(l_i(k) - l_s); & \text{if } l_i(k) \geq l_s, \\ -A^*; & \text{otherwise } l_i(k) < l_s. \end{cases} \quad (29)$$

其中, $f_{l,i}(k)$ 为料位项优先级, c_l 为正值常数, A^* 代表最高优先级. $f_{t,i}(k)$ 为运行时长项优先级, $f_{m,i}(k)$ 为人为干预项优先级.

若料位 $l_i(k)$ 高于下界 l_s , 则采用 $c_l(l_i(k) - l_s)$ 计算料位优先级, 若当前料位 $l_i(k)$ 低于下界 l_s , 则给料位最低优先级 $-A^*$.

条件2:

$$f_{t,i}(k) = \begin{cases} c_t(t_i(k) - t_s); & \text{if } t_i(k) \geq t_s, \\ 0; & \text{otherwise } t_i(k) < t_s. \end{cases} \quad (30)$$

其中, c_t 为负值常数.

若第 i 台给矿机的运行时长 $t_i(k)$ 高于上界 t_s , 则采用 $c_t(t_i(k) - t_s)$ 计算时长优先级, 若 $t_i(k)$ 低于上界 t_s , 则第 i 台给矿机优先级为 0.

条件3:

$$f_{m,i}(k) = \begin{cases} A^*; & \text{if } ma = high, \\ 0; & \text{if } ma = 0, \\ -A^*; & \text{otherwise } ma = low. \end{cases} \quad (31)$$

根据式(31), 对计划优先排空的料仓给予最高优先级, $ma = high$, 对正在检修或堵塞的料仓给予最低优先级, $ma = low$, 其他情况.

根据式(28)和条件1~3计算每台给矿机优先级, 并采用冒泡法对优先级进行排序, 选出两台优先级最大的给矿机 i_1 和 i_2 , 作为传输指令传递给执行机构.

4 工业应用

4.1 给矿过程数据采集和参数辨识

在给矿厂采集3000组给矿量和给矿频率数据, 采样间隔为1秒, 绘制成如图3所示的曲线.

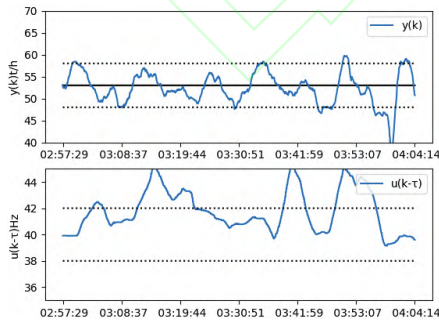


图3 给矿量和给矿频率运行曲线

Fig. 3 Operation curve of ore feeding process

将采集数据 $y(k)$ 和 $u(k - \tau)$ 组成输入数组 $\mathbf{X}(k)$, 将 $y(k + 1)$ 组成输出数组 $\mathbf{Y}(k + 1)$, 即:

$$\mathbf{X}(k) = [y(k), u(k - \tau); \dots; y(k - 2999), u(k - \tau - 2999)]^T. \quad (32)$$

$$\mathbf{Y}(k + 1) = [y(k + 1), y(k); \dots; y(k - \tau - 2998)]^T.$$

最小二乘参数辨识方程为:

$$\hat{\theta} = [\mathbf{X}(k)^T \mathbf{X}(k)]^{-1} \mathbf{X}(k)^T \mathbf{Y}(k + 1). \quad (34)$$

将式(32)~(33)的具体数据代入式(34)可得辨识参数 $\hat{\theta} = [0.05836, 0.1561]^T$. 将 $\hat{\theta}$ 代入(13)式的低阶线性部分, 传输时延 $\tau = 2$, 可得如下混合动态模型:

$$\hat{y}(k + 1) = 0.5836y(k) + 0.1561u(k - 2) + v(k - 1). \quad (35)$$

绘制模型预报值 $\hat{y}(k + 1)$ 与真实值 $y(k + 1)$ 对比图4, 由图4可知式(35)具有相对较好的预报精度.

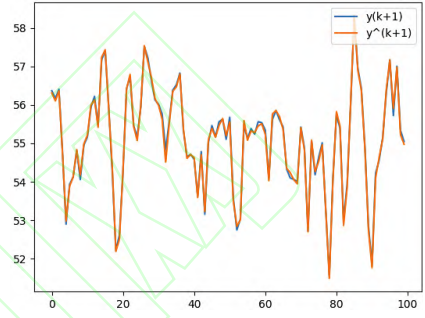


图4 模型预报值与真实值对比

Fig. 4 Comparison between predicted values and actual values

4.2 实验效果分析

4.2.1 数值仿真

为了说明本文所提方法的优越性, 采用PI控制方法、Smith控制方法、本文控制方法进行数值仿真对比, 并采用图5所示正弦波模拟非线性系统干扰, 实验结果对比如图6~8所示.

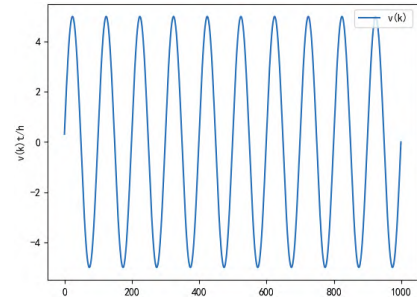


图5 正弦波扰动信号

Fig. 5 Sine wave disturbance signal

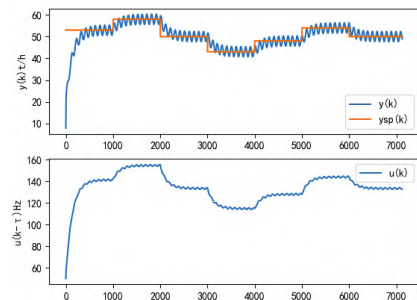


图6 正弦波扰动下的PI控制效果

Fig. 6 PI control effect under sine wave disturbance

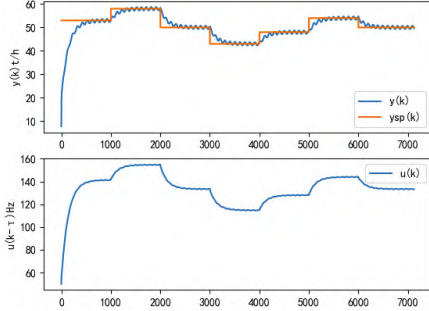


图7 正弦波扰动下的Smith控制效果

Fig. 7 Smith control effect under sine wave disturbance

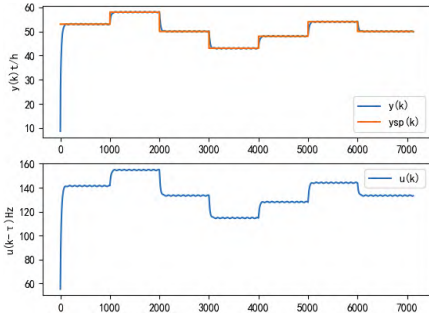


图8 正弦波扰动下的本文方法控制效果

Fig. 8 Control effect of the method proposed in this paper under sinusoidal disturbance

Smith预估控制如图9所示:

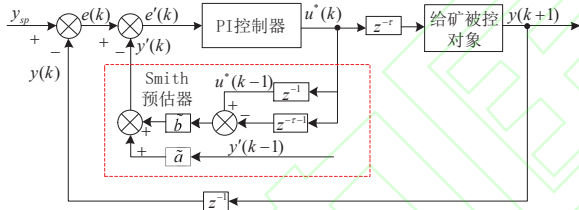


图9 Smith预估控制原理图

Fig. 9 Smith control schematic diagram

Smith预估控制器的表达式为:

$$\begin{cases} u^*(k) = u^*(k-1) + k_p[e'(k) - e'(k-1)] + k_i e'(k), \\ e'(k) = e(k) - \tilde{a}y'(k) + \tilde{b}u^*(k-\tau-1) - \tilde{b}u^*(k), \\ y'(k) = \tilde{b}[u^*(k-1) - u^*(k-\tau-1)] + \tilde{a}y'(k-1). \end{cases} \quad (36)$$

式中, $u^*(k)$ 为Smith预估控制器的输入信号, $y'(k)$ 为Smith预估控制器的输出量, $e'(k)$ 、 $e'(k-1)$ 、 $y'(k-1)$ 、 $u^*(k-1)$ 、 $u^*(k-\tau-1)$ 为Smith预估控制器的中间变量, 参数 \tilde{a} 、 \tilde{b} 、 k_p 、 k_i 和 $e(k)$ 的含义与本文一致。

从图6~8中可以看出, 采用本文方法时, 系统输出能够稳定跟踪设定值, 且输出的波动较小, Smith控制跟踪略有滞后, PI控制效果较差。

4.2.2 工业验证

为了说明本文所提方法的实用性, 分别采用常规PI控制方法, Smith控制方法, 本文控制方法进行工业验证, 三种方法的控制效果如图10~12所示。

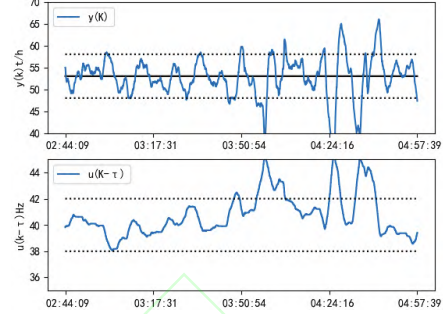


图10 采用常规PI算法时的给矿量y(k)和频率u(k-tau)曲线

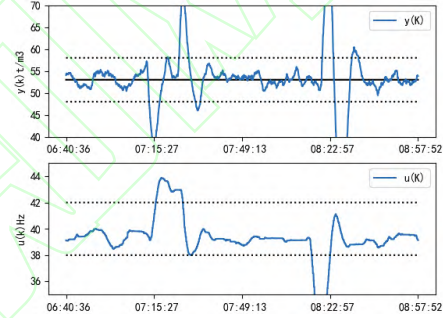
Fig. 10 The curves of feeding amount $y(k)$ and frequency $u(k-\tau)$ when using conventional PI algorithm

图11 采用Smith算法时的给矿量y(k)和频率u(k-tau)曲线

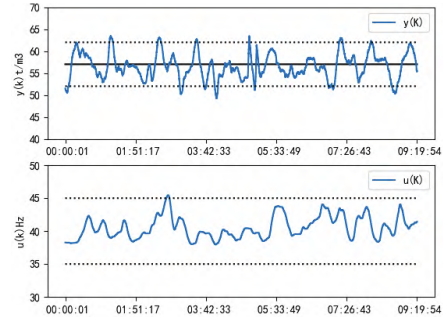
Fig. 11 The curves of feeding amount $y(k)$ and frequency $u(k-\tau)$ when using Smith algorithm

图12 采用本文算法时的给矿量y(k)和频率u(k-tau)曲线

Fig. 12 The curves of feeding amount $y(k)$ and frequency $u(k-\tau)$ when using the algorithm in this article

从图10~12中可看出, 采用常规PI控制方法, 给矿量和给矿频率存在严重的超区间现象. 采用Smith控制时, 在给矿量和给矿频率超区间后, 需要较长的时间才能再次稳定, 重回到区间内. 相比之下, 本文的控制算法效果较好, 无明显的超区间现象。

频率切换机制如图13所示, 将规则控制用数字2表示, 将信号补偿PI控制用1表示。

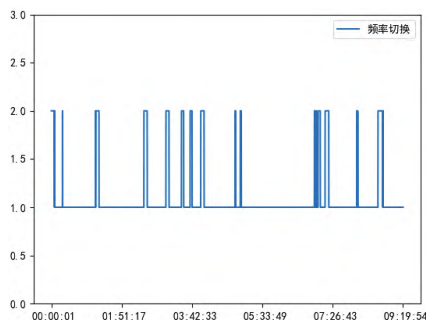


图 13 频率切换序列

Fig. 13 Frequency switching sequence

采用文[23–26]的性能指标: 给矿量跟踪误差超目标区间次数 I_1 , 超区间累积和 I_2 , 控制输入超目标区间次数 I_3 , 超区间累积和 I_4 , 均方误差MSE, 误差绝对值积分IAE, 对上述三种方法的控制性能进行评价, 评价结果如表2~4所示。

表 2 给矿量的控制性能评价表

Table 2 Evaluation table for control performance of ore feeding amount

方法	指标	
	给矿量超区间次数 I_1	超区间误差累积和 I_2
PI	1752	2703.835
Smith	1043	1625.713
本文	537	695.256

表 3 给矿频率的控制性能评价表

Table 3 Evaluation table for control performance of ore feeding frequency

方法	指标	
	频率超区间次数 I_3	超区间误差累积和 I_4
PI	1045	2052.296
Smith	975	1324.013
本文	425	568.754

表 4 跟踪误差的控制性能评价表

Table 4 Evaluation table for control performance of tracking error

方法	指标	
	均方误差MSE	绝对误差积分IAE
PI	3.065	18520.420
Smith	2.013	12456.369
本文	1.152	8816.284

从表2~4中可以看出, 与常规PI控制相比, 本文所提方法使给矿量超区间次数降低90.64%, 超区间累积量降低89.35%, 给矿频率超区间次数降低91.28%, 超区间累积量降低89.78%, 给矿量

的MSE和IAE降低48.74%。与Smith控制相比, 本文所提算法使给矿量超区间次数降低70.45%, 超区间累积量降低69.25%, 给矿频率超区间次数降低73.82%, 超区间累积量降低79.46%, 给矿量的MSE和IAE降低37.52%。从数据分析可以看出, 本文提出的方法改善了复杂给矿过程的控制效果。

5 结论

本文提出了由信号补偿PI控制、规则推理、切换机制组成的非线性智能PI控制方法, 将所提方法应用于复杂工业给矿过程, 工业应用结果表明: 信号补偿器可以削弱非线性系统和传输时延所带来的影响, 规则推理可使超区间的给矿量迅速返回到目标区间内, 执行机构智能切换机制可以有效地避免给矿过程板结、堵塞、空载等现象, 可以保证给矿机的合理调配。当系统受到各种频繁扰动时, 所提控制方法可将给矿量和给矿频率控制在工艺要求的目标值范围内。

参考文献:

- [1] Botha S, le Roux J D, Craig I K. Hybrid non-linear model predictive control of a run-of-mine ore grinding mill circuit. Minerals Engineering, 2018, 123: 49-62.
- [2] Ziolkowski L, le Roux J D, Craig I K. Extremum seeking control for optimization of an open-loop grinding mill using grind curves. Journal of Process Control, 2022, 114: 54-70.
- [3] Le Roux J D, Steyn C W. Validation of a dynamic non-linear grinding circuit model for process control. Minerals Engineering, 2022, 187: 107780.
- [4] LIU T, CAI Y Z, GU D Y. New modified smith predictor scheme for integrating and unstable processes with time delay. IEE Proceedings Control Theory and Applications, 2005, 152(2): 238 - 246.
- [5] Zheng Y D. Adaptive control of time delay systems using smith predictor model. Control Theory and Application, 2021, 8(3): 416-424. (郑仰东. 采用Smith预估器模型的时滞系统自适应控制. 控制理论与应用, 2021, 8(3): 416-424.)
- [6] Taherinasaba S, Soleimaniasl S. Application of model reference adaptive control and modified Smith predictor to control blood glucose in type 1 diabetic patients. Mathematics and Computers in Simulation, 2022, 194: 198-209.
- [7] Du P Z, Yang W C, Wang Y Q. A novel adaptive backstepping sliding mode control for a lightweight autonomous underwater vehicle with input saturation. Ocean Engineering, 2022, 263: 112362.
- [8] Zhou P, Xiang B, Chai T Y. Improved Disturbance Observer (DOB) based advanced feedback control for optimal operation of a mineral grinding process. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2012, 20(6): 1026-1212.
- [9] Chen Z, Hao Y S, Sun Li. Phase compensation based active disturbance rejection control for high order superheated steam temperature system. Control Engineering Practice, 2022, 126: 105200.
- [10] Zhou Y, Jia Q J, Zhang Y, Chang M X. Application of Improved Inverse Decoupling Active Disturbance Rejection Internal Model Control in Grinding. Journal of System Simulation, 2020, 32(5): 837-847.
- [11] Wang Y T, Tan W, Cui W Q, Han W J, Guo Q X. Linear active disturbance rejection control for oscillatory systems with large time-delays. Journal of the Franklin Institute, 2021, 358(12): 6240-6260.

- [12] Yang J, Yang X, Gao T. Improved linear self-immunity control for electromagnetic levitation systems, *Electric Machines and Control*, 2023 :1048.
(杨杰, 杨星, 高涛. 电磁悬浮系统的改进线性自抗扰控制方法. 电机与控制学报, 2023 :1048.)
- [13] Zhou X S, DC bus voltage fluctuation suppression strategy for converter system based on improved self-immunity, *Power System Protection and Control*, 2023, 51(03):69-77.
(周雪松, 基于改进自抗扰的变流系统直流母线电压波动抑制策略. 电力系统保护与控制学报, 2023, 51(03):69-77.)
- [14] Fu Y, Li B, Fu J. Multi-model Adaptive switching control of A non-linear system and its applications In a smelting process of fused magnesia. *Journal of Process Control*, 2022, 115: 67-76.
- [15] Han H G, Liu H X, Qiao J F. Knowledge-Data-Driven flexible switching control for wastewater treatment process. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2022, 30(03):1116-1129.
- [16] Zhang Y J, Chai T Y. Nonlinear PID Switching Control Driven by Data and Unmodeled Dynamics. *Control Theory and Application*, 2020, 37(03): 481-491.
(张亚军, 柴天佑. 数据与未建模动态驱动的非线性PID切换控制. 控制理论与应用, 2020, 37(03): 481-491.)
- [17] Hu M X, Chai T Y. Development of intelligent modeling software for gold mine feeding control process through end-to-end cloud collaboration. *Northeastern University*, 2022.
(胡敏轩, 柴天佑. 端边云协同的金矿给矿控制过程智能建模软件开发[D], 东北大学, 2022.)
- [18] Zeljko V. Despotovic, Djordje Urukalo, Milan R, Aleksandar Cosic. Mathematical modeling of resonant linear vibratory conveyor with electromagnetic excitation: simulations and experimental results. *Applied Mathematical Modelling*, 2017, 41:1-24
- [19] Wang L Y, Jia Y, Chai T Y, Xie W F. Dual-Rate adaptive control for mixed separation thickening process using compensation signal based approach. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(4):3621-3632.
- [20] Jia Y, Chai T Y. A Data-Driven dual-rate control method for a heat exchanging process. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(5):4159-4168.
- [21] Wang L H, Chai T Y. Signal compensation based adaptive cascade control for regrinding processes. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(10):8733-8741.
- [22] Wei C, Chai T Y. A signal compensation-based robust swing-up and balance control method for the pendubot. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(3):3008-3014.
- [23] Chai T Y, Zhang J W, Yang T. Demand forecasting of the fused magnesia smelting process with system identification and deep learning. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(12): 8387-839.
- [24] Chai T Y, Zhou Z, Jia Y, Zheng R. Intelligent system for PID tuning with end-to-end cloud collaboration. *Acta Automatica Sinica*, 2023, 49(03): 514-527.
(柴天佑, 周正, 贾瑶, 郑锐. 端边云协同的智能PID整定系统. 自动化学报, 2023, 49(03): 514-527.)
- [25] Liu Y H, Chai T Y. Demand peak forecasting of the fused magnesia furnace group with model prediction and adaptive deep learning. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2023, 07: 1-12.
- [26] Wang W Z, Chai T Y, Wang H, Yang T. Signal-Compensation-based adaptive PID control for fused magnesia smelting processes. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(9):8441-9451.

作者简介:

郭策 研究方向为智能控制技术, 决策与控制一体化智能系统技术, E-mail: 1810266@stu.neu.edu.cn;

张亚军 研究方向为非线性自适应控制理论及应用, 数据驱动控制, 复杂系统的混合智能建模方法, 大数据建模技术及其工业应用, E-mail: yajunzhang@mail.neu.edu.cn, (本文通讯作者);

贾瑶 研究方向为智能运行控制技术, 智能检测技术, 决策与控制一体化智能系统技术, E-mail: jiayao@mail.neu.edu.cn;

郑锐 研究方向为智能控制技术, 决策与控制一体化智能系统技术, E-mail: 2010263@stu.neu.edu.cn;

柴天佑 研究方向为流程工业综合自动化与智能化系统理论、方法与技术, 自适应控制, 智能解耦控制, E-mail: tychai@mail.neu.edu.cn.