

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.06.021

浮选液位控制系统的灰色滑模控制研究*

马明华

(淮北民生矿山机器有限公司,安徽 淮北 235000)

摘要:针对浮选液位控制系统中存在的确定性可能会引起系统的控制品质的恶化,甚至导致不稳定和滑模变结构控制中因时间滞后开关、空间滞后开关、系统惯性、不确定性等因素引起的抖动会影响系统的控制品质和稳定性问题,提出了一种带有灰色预测和补偿的组合趋近律滑模控制策略。其通过利用灰色对系统参数摄动和外部干扰进行了辨识及补偿;利用组合趋近律的方法削弱了滑模控制中存在的抖振问题。在 Matlab 中实现了该控制算法对浮选液位控制系统的液位控制。研究表明:所提出的控制策略能够对外部扰动和系统参数摄动能够有效的进行预测并给以相应补偿;同时滑模变结构控制的抖动也得到明显的抑制,系统的抗外部扰动和系统参数能力、稳定性和控制品质得到进一步的提高。

关键词:浮选液位控制系统;滑模变结构;灰色估计;灰色补偿

中图分类号:TH39;TH69;TP273

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)06-0841-05

Sliding mode control with gray for level control of flotation cells

MA Ming-hua

(HuaiBei Minsheng Mining Machinery Co., Ltd., HuaiBei 235000, China)

Abstract: Aiming at uncertainties in level control of flotation cells may cause the deterioration of the control quality of the electro-hydraulic servo system, and even lead to its instability and the chattering phenomenon caused by the time lag switch, spatial lag switch, the system's inertia, uncertainties and other factors may influent the quality and stability of the level control of flotation cells, a mixed reaching law sliding model control (SMC) strategy with gray prediction and compensation was proposed to solve those problems, the gray prediction was used to identify and compensate parameter perturbation and external disturbances, the mixed reaching law approach was proposed to overcome the chattering phenomenon. The control algorithm was realized in Matlab to control level control of flotation cells. The results indicate that external disturbance and parameter perturbation of the system can be effectively predicted and compensated by the proposed control strategy, and the problem of chattering was also inhibited obviously; the anti-interference and anti-parameters perturbation ability, stability and control quality of the system were improved.

Key words: electro-hydraulic servo; sliding model control (SMC); gray prediction; gray compensation

0 引 言

开采的矿物资源中低品位、嵌布粒度细、矿物组成复杂的矿石占有较大的比例,对分选、提纯矿石中的微细粒难选矿石提出了新的挑战。浮选机作为一种分选矿过程中细颗粒矿物的重要设备,得到了广泛的应用。目前生产的浮选机有很多种,常用的有 Wemco

Smart Cell 型智能浮选机、Tank Cell 浮选机、BF 型机械搅拌浮选机、KYF 型深槽充气机械搅拌浮选机、CLF 粗粒浮选机、XJM-S16 型浮选机等几种^[1],对于浮选机而言,液位、浮选药剂量、浮选过程充气量等因素直接影响浮选效果^[2-4],其中液位是否稳定对精矿回收率的影响很大^[5]。因此,对浮选机液位进行控制有着重要的意义。但是,浮选液位控制系统是一种非线性的系统,如果利用传统的经典控制算法对其进行控制的控

收稿日期:2015-01-22

作者简介:马明华(1965-),男,安徽濉溪人,工程师,主要从事选矿设备加工制造研究等方面的研究. E-mail:msksjq@sohu.com

制效果欠佳。

近年来,滑模控制被广泛应用于控制中;滑模控制具有算法简单、鲁棒性好、可靠性高、快速响应、对参数变化及扰动不灵敏等优点^[6]。但由于滑模变结构控制当状态轨迹到达滑模面后,因时间滞后开关、空间滞后开关、系统惯性、不确定性等因素的影响^[7],使得系统不但不能严格地沿着滑模面向着平衡点滑动,反而在滑模面两侧来回穿越,从而产生抖动。由于抖动存在,很容易激发系统中的高频未建模动态,从而破坏系统的性能。为了削弱系统的抖动,柴华伟等^[8]提出利用趋近律来减弱变结构控制所产生的抖动问题;Yanada, H 等^[9]设计了一种带有滤波器的变结构控制器,有效地消除了控制中的抖振问题。自适应控制、神经网络、模糊控制及遗传算法等先进方法也被应用于滑模变结构控制中的削弱抖动现象^[10]。

本研究采用趋近律变结构控制与灰度预测相结合的方法对浮选液位控制系统进行研究,使得系统具有快速跟踪性能、能对外界干扰及系统参数摄动有效预测及补偿,同时削弱系统抖动现象。

1 滑模控制器设计

1.1 趋近律

高为炳院士提出了在保证滑模条件 $SS < 0$ 的前提下基于趋近律的方法来削弱或抑制 SMC 控制中存在的抖动问题,并给出了等速趋近、指数趋近、幂次趋近和一般趋近 4 种不同的趋近律方法,而指数趋近率则应用十分广泛,其表达式为:

$$S = -\varepsilon \text{sign}S - qS \quad \varepsilon > 0; q > 0 \quad (1)$$

式中: ε —趋近速度, q —滑模常数, sign —符号函数, S —滑模面函数。

上述表达式中 S 的趋近速度与 ε 有关;利用指数趋近率方法来削弱或抑制滑模控制中存在的抖动问题时,趋近速度从一个较大值逐步减小到 0,并使得运动点到达切换面上的速度很小。通过调整趋近律的参数 ε 和 q 既可以保证滑动模态到达过程的动态品质,又可以减弱控制信号的高频抖振。

但由于离散指数趋近率的切换带为带状,在系统运动中,最终不能趋近于原点,而是趋近于原点附近处的一个抖动^[11]。为了解决指数趋近率在原点的抖动问题,文献[12-13]提出了连续系统变速趋近律,对应的离散形式为:

$$S = -\varepsilon \|X\|_1 \text{sgn}(S) \quad (2)$$

变速趋近律的趋近速度为 $\varepsilon \|X\|_1$, 与 $\|X\|_1$ 成

正比。其切换带为经过原点的两条射线组成,并能把 $S = 0$ 夹在中间,可以稳定于原点,但由于系统刚进入切换带时 $\|X\|_1$ 比较大,变速趋近律将产生大的抖动。

因此,本研究将趋近律与指数趋近律相结合,可以克服两种趋近律的不足,保留其优点。从而使得系统的性能更好。

1.2 滑模控制器设计

本研究用组合趋近律变结构控制与灰度预测相结合的方法以提高浮选液位控制系统抗干扰、削弱变结构控制中存在的抖动问题^[14-17]。

假定浮选液位控制系统的传统函数为 $G(s)$, 离散化后得到的状态空间方程为:

$$x(k+1) = Ax(k) + B(u(k) + D(x, k)) \quad (3)$$

其中: $x(k) = [x_1(k) \quad x_2(k)]^T$, $x_1(k)$ —实际位置, $x_2(k)$ —位置变化率; $D(x, k)$ —系统不确定部分, 包含参数不确定和外部干扰。

$$D(x, k) = vx(k) + d = \sum_{i=1}^k V_i x_i(k) + f(k) \quad (4)$$

设 $r(k)$ 、 $dr(k)$ 分别为位置指令及其变化率;取 $R_k = [r(k), dr(k)]$, 利用线性外推技术预测 R_{k+1} :

$$r(k+1) = 2r(k) - r(k-1) \quad (5)$$

$$dr(k+1) = 2dr(k) - dr(k-1) \quad (6)$$

设切换函数为:

$$S(k) = C_e E = C_e (R_k - x(k)) \quad (7)$$

故:

$$S(k+1) = C_e E = C_e (R_{k+1} - x(k+1)) =$$

$$C_e [R_{k+1} - Ax(k) - Bu(k)] \quad (8)$$

指数趋近率的离散形式:

$$S(k+1) = S(k) + T(-\varepsilon \text{sgn}S(k) - qS(k)) \quad (9)$$

为了进一步削弱控制器的抖动问题,本研究利用饱和函数 $\text{sat}(S)$ 来替代指数趋近率中的符号函数 $\text{sgn}(S)$:

$$\text{sat}(S) = \begin{cases} 1 & S > \Delta \\ kS & |S| \leq \Delta, k = \frac{1}{\Delta} \\ -1 & S < -\Delta \end{cases} \quad (10)$$

由式(2,9,10)可得该浮选液位控制系统的滑模控制的控制规律为:

前期:

$$u_s(k) = (C_e B)^{-1} [C_e (R_{k+1} - R_k) - C_e (A - I) x(k) - (T(-\varepsilon \text{sat}(S) - qS(k)))] \quad (11)$$

后期:

$$u_s(k) = (C_e B)^{-1} [C_e (R_{k+1} - R_k) - C_e (A - I)$$

$$x(k) - \varepsilon T \| \mathbf{X} \|_1 \text{sat}(S)] \quad (12)$$

其中: $\mathbf{C}_e = [c, 1]$

2 灰度预测

利用趋近律所得到的控制规律是状态量的确定函数,且与系统的参数和干扰有关,为了防止系统的参数与外部干扰对趋近律控制规律的影响,本研究采用灰色预测实现对系统中摄动和外界干扰进行精确预测。根据预测结果对滑模控制器进行相应的补偿,以提高其抗干扰能力;采用灰色预测理论的滑模控制算法包括灰色估计和灰色滑模补偿两个阶段^[18-19],系统框图如图 1 所示。

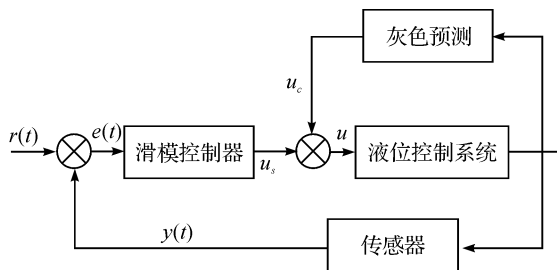


图 1 系统框图

2.1 灰色估计

设 x 的原始离散数列为:

$$x^{(0)}(k) = (x^{(0)}(1) \quad x^{(0)}(2) \quad \dots \quad x^{(0)}(n)) \quad (13)$$

由累加生成算子可得^[20]:

$$x^{(1)}(k_1) = \sum_{m=1}^k x^{(0)}(m) \quad (14)$$

利用 $\mathbf{x}(k) = \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix}$, 容易由 $x_i^{(0)}(k)$ 得出:

$$x_i^{(1)}(k_1) = \sum_{i=1}^2 \sum_{m=1}^k x_i^{(0)}(m) \quad (15)$$

由式(3,11,12)可得:

$$D(x, k) = (B^{-1})(x(k+1) - Ax(k) - Bu_s(k)) \quad (16)$$

利用上式可以得到关于 $D(x, k)$ 离散系列数据 $D^{(0)}(k)$; 由累加生成算子可得:

$$D^{(1)}(k_1) = \sum_{m=1}^k D^{(0)}(m) \quad (17)$$

式中: $k_1 - [1, N - 2]$ 间的整数; $k - [1, N]$ 间的整数; n —系统阶数; $N = n + 3$ 。

按灰色系统理论,采用累加生成方法,可建立 GM(0, N) 灰色预测模型,对不确定部分模型参数 $\hat{\mathbf{V}}$ 粗略地估计出来:

$$\hat{\mathbf{V}} = (\hat{V}_1 \quad \hat{V}_2 \quad \dots \quad \hat{V}_n \quad \hat{f})^T \quad (18)$$

定义:

$$\mathbf{B}_g = \begin{bmatrix} x_1^{(1)}(2) & x_n^{(1)}(2) & 1 \\ x_1^{(1)}(3) & \dots & x_n^{(1)}(3) & 2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1^{(1)}(N) & \dots & x_n^{(1)}(N) & N-2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

如果 $(\mathbf{B}_g^T \mathbf{B}_g)$ 可逆,根据最小二乘法有:

$$\hat{\mathbf{V}}^T = (\mathbf{B}_g^T \mathbf{B}_g)^{-1} \mathbf{B}_g^T \mathbf{D}^{(1)} \quad (20)$$

按照灰色预测理论,经过 N 步灰色辨识,可实现对干扰参数的辨识。

2.2 控制器补偿

通过 2.1 节中对干扰参数的估计,可以实现对滑模控制器进行有效的补偿,其补偿器为:

$$u_c(k) = - \left(\sum_{i=1}^n \hat{V}_i x_i + \hat{f} \right) \quad (21)$$

故灰色滑模控制器的控制规律为:

$$u = u_s + u_c \quad (22)$$

2.3 浮选槽液位数学模型

浮选时,浮选槽的给矿量 q_{in} ,浮选槽溢流量 q_j ,以及尾矿量 q_w 三者是影响浮选槽液位的重要因素,根据容器的液位动态平衡关系,则有^[21]:

$$q_{in} - q_j - q_w = A \frac{dh}{dt} \quad (23)$$

式中: A —浮选槽的横截面积, h —浮选槽液位。

将式(23)改写成增表达式,则有:

$$\Delta q_{in} - \Delta q_j - \Delta q_w = A \frac{dh}{dt} \quad (24)$$

因: $\Delta q_w = w_0 \Delta h$, $\Delta q_j = \Delta u v_m$, $\Delta q_{in} = A \Delta h$, 式(24)可以改成为:

$$A \Delta h - w_0 \Delta h - \Delta u v_m = A \frac{dh}{dt} \quad (25)$$

改写式(25)可得:

$$A \Delta h - w_0 \Delta h - A \frac{dh}{dt} = \Delta u v_m \quad (26)$$

式中: w_0 —溢流系数, u —尾矿排出口阀门开度, v_m —阀门全开时的尾矿流量。

对式(26)进行 Laplace 变换得其动态传递函数为:

$$G(s) = \frac{H(s)}{Q(s)} = \frac{v_m}{A - w_0 - sA} \quad (27)$$

3 仿真研究

为验证上述控制器的功效,本研究利用 Matlab 对

浮选液位控制系统进行仿真。将文献[19]的传递函数简化后得到传递函数为:

$$G(s) = \frac{265}{s^2 + 40s} \quad (27)$$

采样时间这 1 ms,离散后的状态方程为:

$$x(k) = Ax(k-1) + B(u(k) + D(x,k)) \quad (28)$$

灰色预测采用 GM(0,N)模型,本研究分别对系统进行了加入和不加入灰色预测,进行了参数预测与系统仿真。

3.1 灰色补偿控制器仿真

仿真结果如图 2~5 所示。普通滑模位置跟踪图如图 2 所示、灰色滑模位置跟踪图如图 3 所示;加入灰色预测前、后变结构控制相轨迹图如图 4、图 5 所示;从图 2、图 3 中可以看出,在同样的参数条件下,没有灰色补偿的滑模控制算法跟踪性能较差,存在外界参数扰动时,传统的滑模控制算法不能有效地实现位置的跟踪保持,而加入灰色预测后,系统的实际输出能与理想输入想重合,表现出了良好的位置跟踪性能和抗外界参数扰动能力。从图 4、图 5 可以看出,加入灰色

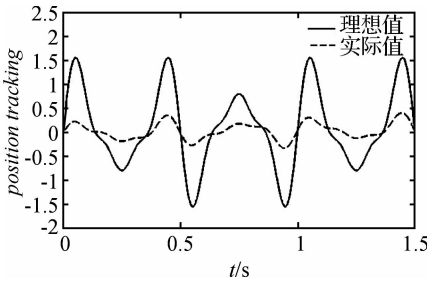


图 2 普通滑模位置跟踪

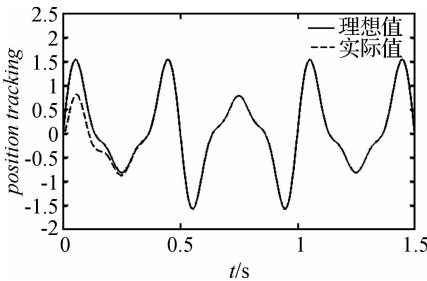


图 3 灰色滑模位置跟踪

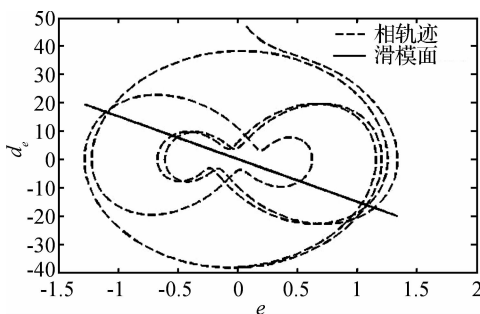


图 4 普通滑模相轨迹

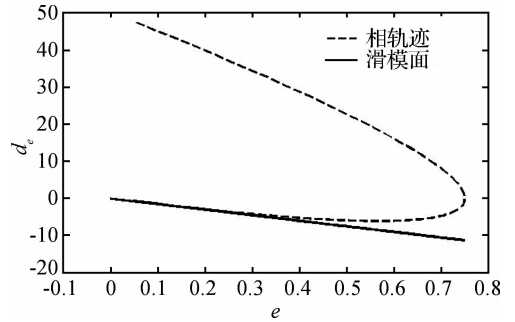


图 5 灰色滑模相轨迹

预测后使得滑模控制器的相轨迹由图 4 所示的任意抖动转变成图 5 所示的沿滑模面移动,由此说明加入灰色预测后能有效地抑制滑模控制中的抖动问题。

综上所述,加入灰色预测后系统能够对外部扰动和参数摄动有效地进行预测和补偿;同时滑模变结构控制的抖动也得到了明显地抑制,能够较好地实现控制器的功能。

4 结束语

本研究针对浮选液位控制系统因不能精确建模而导致的不确定性可能会引起系统的控制品质的恶化、甚至导致不稳定的问题,将滑模变结构应用到浮选液位控制系统中。考虑浮选液位控制系统滑模变结构控制的抖动问题、外界干扰及系统参数摄动,从而影响系统的控制品质和稳定性,笔者提出一种利用组合趋近律的方法来削弱滑模控制中存在的抖振问题;同时用灰色预测实现对外界干扰及系统参数摄动预测及补偿策略。

系统仿真结果表明,系统外部扰动和系统参数摄动能够有效的进行预测和补偿,使得系统具有较强的抗干扰能力;同时滑模变结构控制的抖动也得到了明显的抑制。

参考文献 (References):

- [1] 谢广元. 选矿学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2001.
- [2] 刘晓青. 大型浮选过程计算机控制系统软件设计及开发[D]. 沈阳:东北大学信息科学与工程学院,2009.
- [3] BENNY S, ALEXANDER M. Level control of cascade flotation tanks [J]. **Control Engineering Practice**, 2002, 10 (4):443-448.
- [4] 唐 堃. 大型机械搅拌式充气式浮选机内部流场的数值模拟[D]. 兰州:兰州理工大学流体动力与控制学院, 2009.
- [5] 胡岳华,王淀佐. 现代浮选化学研究进展与展望[J]. 中国科学基金,2001(2):78-82.

- [6] 穆效江,陈阳舟.滑模变结构控制理论研究综述[J].控制工程,2007(22):1-5.
- [7] 高为炳.滑模变结构理论基础[M].北京:科技技术出版社,1990.
- [8] 柴华伟,贾智,薛亚平,等.火箭炮电液伺服系统的滑模控制研究[J].机电工程,2014,31(1):90-92,118.
- [9] YANADA H, OHNISHI H. Frequency-shaped sliding mode control of an electro hydraulic servo-motor [J]. **J of Systems and Control Engineering**,1999(213):441-448.
- [10] 刘金琨,孙富春.滑模变结构控制理论及其算法研究与进展,控制理论与应用.2007,28(3):407-418.
- [11] 刘金琨.滑模变结构控制 Matlab 仿真[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [12] PARK K B, LEE J J. Sliding mode controller with filtered signal for robot manipulators using virtual plant controller [J]. **J of Mechatronics**,1997(7):277-286.
- [13] 童克文,张兴,张昱,等.基于新型趋近律的永磁同步电动机滑模变结构控制[J].中国电机工程学报,2008,28(21):102-106.
- [14] 张庆丰,高峰,王燕,等.机器人关节滑模变结构的位置控制[J].机电工程,2010,27(10):11-15.
- [15] 柳应全,卢琴芬,叶云岳.带积分补偿器的永磁直线同步电机滑模控制研究[J].机电工程,2013,30(6):717-720.
- [16] 张钊,陈涛,周勇.永磁同步电机伺服控制系统建模与仿真[J].兵工自动化,2014(4):79-82.
- [17] 王丰尧.滑模变结构控制[M].北京:机械工业出版社,1995.
- [18] 熊和金,徐华中.灰色控制[M].北京:国防工业出版社,2005.
- [19] CHIANG H K, TSENG C H. Integral variable structure controller with grey prediction for synchronous reluctance motor drive [J]. **IEE Proc Electr Power Appl.**,2004(151):349-358.
- [20] 刘思峰,郭天榜,党耀国.灰色系统理论及其应用[M].北京:科学出版社,2008.
- [21] 李强,陈东,杨文旺,等.基于单神经元控制器的浮选液位控制系统研究[J].有色金属(选矿部分),2013(z1):2012-215.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

马明华.浮选液位控制系统的灰色滑模控制研究[J].机电工程,2015,32(6):841-845.

MA Ming-hua. Sliding mode control with gray for level control of flotation cells[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015,32(6):841-845.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第811页)

为镗削加工时,刀杆与孔轴线间的偏差会使得切削深度不断变化,切削深度与镗刀所受力成近似正比关系,镗刀受力后发生挠性弯曲,在镗削过程中会加剧镗刀的震颤,影响加工表面质量,此时可以通过增大刀杆直径来抑制这一影响^[10]。

(3)进给速度对镗削质量也有较大影响。较低与较高的进给速度均无法得到最好的表面质量,加工时应根据所选镗刀的刀尖圆弧半径以及刀具的偏角选择合适的进给速度。根据加工经验,对于尺寸较小的孔,进给速度可以优先选为所加工孔的直径。

(4)刀具转速对镗削质量的影响较小,但对孔的尺寸有较大影响,通过选择较高的转速有助于获得理想的表面质量和尺寸精度。

参考文献(References):

- [1] 石文天.微细切削技术[M].北京:机械工业出版社,2011.
- [2] M4 workshop report. Workshop on Micro/Meso-Mechanical Manufacturing[R]. Evanston: Northwestern University,2000.
- [3] 王大鹏.3J33 马氏体时效钢时效行为及晶粒细化[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院,2009.
- [4] 付宏鹤.难加工材料深孔镗削技术研究[D].西安石油大学机械工程学院,2006.
- [5] 吴能章,周利平.一种新型复合材料镗刀杆的建模与有限元分析[J].西华大学学报:自然科学版,2005,24(5):22-25.
- [6] 吴国梁.镗工实用技术手册[D].南京:江苏科学技术出版社,2007.
- [7] 杨蕾,蔡安江.电火花线切割加工参数对加工速度和表面粗糙度影响的研究[J].机床与液压,2011,39(15):45-47.
- [8] 康小会,吉方,张日升.电火花微细孔加工关键技术研究[J].机械,2013(15):65-68.
- [9] 曹自洋,等.微细铣削切削力正交实验研究[J].工具技术,2010,44(10):11-15.
- [10] LU Zi-nan, YONEYAMA T. Micro cutting in the micro lathe turning system [J]. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**,1999,39(7):1171-1183.

[编辑:李辉]