

# 基于改进扰动补偿趋近律的离散滑模控制

郑长明, 张加胜, 陈 荣<sup>†</sup>

(中国石油大学(华东)信息与控制工程学院, 山东 青岛 266580)

**摘要:** 考虑满足匹配条件的不确定离散系统, 提出一种改进扰动补偿趋近律滑模控制算法, 分析准滑动模态的动态特性. 为了减小准滑模域带宽, 重新将扰动变化率定义为二阶扰动差分; 同时, 引入饱和函数, 通过设置适当的边界层厚度, 使得系统准滑模域带宽达到  $O(T^3)$  量级且无稳态抖振, 从而提高系统的控制精度; 最后通过仿真实验验证所提出算法的有效性.

**关键词:** 离散系统; 趋近律; 无抖振; 准滑模; 扰动补偿

中图分类号: TP273

文献标志码: A

## Discrete-time sliding mode control based on improved disturbance compensation reaching law

ZHENG Chang-ming, ZHANG Jia-sheng, CHEN Rong<sup>†</sup>

(College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China)

**Abstract:** Considering the uncertain discrete-time system satisfying matched conditions, an improved disturbance compensation reaching law based sliding mode control algorithm is presented, and the dynamic features of the quasi-sliding mode are analyzed. To decrease the bandwidth of the quasi-sliding mode domain, the changing rate of the disturbance is redefined as the second-order disturbance difference. In addition, the saturation function is introduced, and by setting proper thickness of the boundary layer, the bandwidth of the quasi-sliding mode domain can achieve the magnitude of the order  $O(T^3)$  without steady-state chattering, which improves the control precision of the system. Simulation results verify the effectiveness of the presented algorithm.

**Keywords:** discrete-time system; reaching law; chattering-free; quasi-sliding-mode; disturbance compensation

## 0 引言

滑模变结构控制对满足匹配条件的系统参数的不确定性和外部扰动具有不变性, 故而受到广泛关注. 目前, 先进的控制算法均是通过数字计算机实现的. 注意到离散时间系统的控制输入在每个采样间隔仅计算一次, 即在一个采样周期内保持不变<sup>[1]</sup>. 因此, 有限的采样频率将使系统状态无法保持在理想滑模面上, 而仅能在滑模面附近的邻域内作准滑动模态运动, 并伴有高频抖振. 若将连续滑模算法直接应用到离散系统中, 则会导致离散化误差及系统稳定性等问题<sup>[2]</sup>. 因此, 对于离散滑模控制算法的研究具有重要意义.

各种形式的离散滑模到达条件已被广泛提出<sup>[3-6]</sup>, 其中文献[6]给出了等式到达条件下的离散滑

模趋近律, 提高了趋近过程的动态品质, 但引入了高频抖振, 由于抖振会影响系统性能并激发未建模动态, 诸多学者对传统的离散滑模趋近律进行了相关改进, 旨在减小准滑动模态带宽或消除系统稳态抖振. 文献[7-9]从调整切换增益入手, 改进了传统的离散趋近律, 一定程度上削弱了系统抖振; 文献[10]设计了一种基于解耦扰动补偿器的离散趋近律, 将传统离散滑模需要已知扰动上界的约束条件放宽到扰动变化率上界; 文献[11]利用实际与理想趋近律的偏差构造了一种扰动动态补偿离散趋近律, 使系统鲁棒性得以增强, 但抖振仍然存在; 文献[12]重新定义了准滑动模态及其到达条件, 提出了非切换型无抖振趋近律, 并缩小了准滑模带宽; 文献[13-14]分别针对含匹配和非匹配扰动的离散系统, 采用幂次函数构造了准

收稿日期: 2017-09-14; 修回日期: 2018-06-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51777216); 山东省重点研发计划项目(2016GGX104012).

作者简介: 郑长明(1991-), 男, 博士生, 从事离散滑模与预测控制的研究; 张加胜(1957-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力电子与电力传动等研究.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: jsxzzcm@126.com.

滑模控制器,并分析其收敛特性,一定程度上削弱了系统抖振;文献[15]设计了一种离散时变趋近律,在保证系统鲁棒性的基础上消除了稳态抖振。

针对上述文献的已有成果及存在的问题,本文提出一种基于改进扰动补偿趋近律的离散滑模算法.该方法不仅能够缩小准滑模带宽,而且可以使系统无稳态抖振,进一步提高系统的控制精度。

### 1 问题描述

考虑如下单输入不确定离散时间系统:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + f(k). \quad (1)$$

其中:  $x(k) \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ ,  $u(k) \in \mathbf{R}^{1 \times 1}$  分别为离散系统的状态和控制输入矩阵;  $f(k) \in \mathbf{R}^{n \times 1}$  为等效扰动矩阵,包含系统参数不确定性和外部扰动;  $A, B$  为具有适当维数的常数实矩阵.当等效扰动  $f(k)$  随采样时间  $T$  缓慢变化时,给出以下假设和引理。

**假设1**  $(A, B)$  可控,等效扰动  $f(k)$  有界,且满足匹配条件<sup>[2]</sup>.

设计系统的滑模面如下:

$$s(k) = Cx(k) = 0, \quad (2)$$

其中  $C \in \mathbf{R}^{1 \times n}$  且  $CB \neq 0$ .

根据文献[10]和[12]可定义如下离散系统准滑动模态及其到达条件。

**定义1** 存在一个正常数  $k^*$ ,若对于所有的  $k \geq k^*$ ,系统(1)的状态均满足

$$|s(k)| \leq \Delta, \Delta > 0, \quad (3)$$

则称系统到达滑模面(2)的  $\Delta$  邻域内的准滑动模态.其中:准滑动模态运动的空间区域称为准滑模域,  $\Delta$  称为准滑模域的带宽。

**定义2** 对于所有的  $k \geq 0$ ,系统在滑模面  $\Delta$  邻域内发生准滑动模态的到达条件为

$$\begin{cases} s^2(k+1) < s^2(k), \forall |s(k)| > \Delta; \\ |s(k+1)| \leq \Delta, \forall |s(k)| \leq \Delta. \end{cases} \quad (4)$$

## 2 离散准滑模控制器设计

### 2.1 改进的扰动补偿趋近律及控制器

考虑到传统离散趋近律和扰动动态补偿离散趋近律的特点<sup>[6,11]</sup>,首先在文献[11]提出的趋近律形式的基础上,引入一种差分函数  $1 - z^{-1}$  (其中  $z^{-1}$  为单位延迟算子)并重新将等效扰动变化率定义为扰动的二阶差分;其次,为解决文献[6,11]中趋近律中符号函数引起的抖振问题,本文选用饱和函数将其连续化,设计如下改进离散趋近律:

$$s(k+1) = (1 - qT)s(k) - \varepsilon T \text{sat}[s(k)] + (1 - z^{-1})C[f(k) - f(k-1)]. \quad (5)$$

其中:  $\varepsilon > 0; q > 0, 1 - qT > 0$ . 且有

$$\text{sat}[s(k)] = \begin{cases} s(k)\rho^{-1}, & |s(k)| \leq \rho; \\ \text{sign}[s(k)], & |s(k)| > \rho. \end{cases} \quad (6)$$

这里  $\rho = \varepsilon T / (1 - qT)$  为边界层厚度。

经化简可得如下改进趋近律的最终形式:

$$s(k+1) = (1 - qT)s(k) - \varepsilon T \text{sat}[s(k)] + \lambda(k). \quad (7)$$

其中

$$\lambda(k) = C[f(k) - 2f(k-1) + f(k-2)]. \quad (8)$$

**引理1** 由文献[16]可知,采用零阶保持器进行精确离散化时,离散系统(1)中的等效扰动  $f(k)$  具有如下属性:  $f(k) = O(T)$ ,  $f(k) - f(k-1) = O(T^2)$ , 且  $f(k) - 2f(k-1) + f(k-2) = O(T^3)$ , 其中  $O(T)$  表示扰动的幅值在  $O(T)$  量级上。

**假设2** 式(8)定义的等效扰动变化率  $\lambda(k)$  有界,且  $|\lambda(k)| \leq \delta \leq \varepsilon T$ ,  $\delta$  为其上界。

**注1** 根据文献[11]可将传统的等效扰动变化率  $\lambda_1(k)$  及其上界  $\delta_1$  定义如下:

$$\begin{cases} \lambda_1(k) = C[f(k) - f(k-1)], \\ |\lambda_1(k)| \leq \delta_1. \end{cases} \quad (9)$$

设计趋近律(7)和(8)的目的在于:通过基于传统的“边界层”抖振抑制策略使得系统在边界层外仍保持较强鲁棒性,而在边界层内尽可能地减小准滑模带宽以降低稳态误差,从而提高控制精度。

综上所述,由引理1可知  $\delta_1 = O(T^2)$ ,而本文定义的等效扰动变化率上界  $\delta = O(T^3)$  要比  $\delta_1$  小.此外,注意到准滑模带宽一般随着扰动变化率上界的增大而增大<sup>[17]</sup>.因此,相比于文献[11]中的离散趋近律方法,本文提出的改进扰动补偿趋近律将具有更小的准滑模域带宽,能获得更高的控制精度。

结合式(1)、(2)和(7)可以得到如下基于改进扰动补偿离散趋近律的控制律:

$$u(k) = -(CB)^{-1}[CAx(k) - (1 - qT)s(k) + \varepsilon T \text{sat}[s(k)] + 2Cf(k-1) - Cf(k-2)]. \quad (10)$$

**注2** 为了使所设计的控制器(10)能够直接实现,对式(10)中的  $f(k-1)$  和  $f(k-2)$  采用“延时扰动估计”方法<sup>[2]</sup>,即

$$\begin{cases} f(k-1) = x(k) - Ax(k-1) - Bu(k-1), \\ f(k-2) = z^{-1}f(k-1). \end{cases} \quad (11)$$

因此,不必事先获知系统的等效扰动上界,本文提出的改进趋近律(7)即可实现对扰动的在线预测和动态补偿.

2.2 系统鲁棒性分析

**定理1** 对于系统(1),结合假设2并采用控制律(10)设计系统参数使其满足下式:

$$\varepsilon T \geq \delta, \quad (12)$$

$$\rho = \frac{\varepsilon T}{1 - qT}, \quad (13)$$

则当 $|s(k)| > \Delta$ 时,从任意初始状态出发的系统轨迹都将渐近收敛到下式所定义的准滑模域 $s_\Delta$ 内:

$$s_\Delta = \{s(k) \mid |s(k)| \leq \Delta = \delta\}. \quad (14)$$

系统一旦进入到准滑模域 $s_\Delta$ 内,将始终保持在准滑模域 $s_\Delta$ 内无法逃出.

**证明** 结合定义1和定义2,分以下4种情况进行讨论:

1) 当 $0 \leq s(k) \leq \rho$ 时,由式(7)和假设2可知

$$\begin{aligned} s(k+1) - s(k) &= \\ &-qTs(k) - \varepsilon Ts(k)\rho^{-1} + \lambda(k) \leq \\ &-qTs(k) - \varepsilon Ts(k)\rho^{-1} + \delta = \\ &[-(\rho q + \varepsilon)Ts(k) + \rho\delta]\rho^{-1}. \end{aligned} \quad (15)$$

因 $\rho > 0$ ,故要使 $s(k+1) - s(k) < 0$ 成立,则使

$$-(\rho q + \varepsilon)Ts(k) + \rho\delta < 0 \quad (16)$$

成立即可. 求解式(16)可得

$$s(k) > \Delta_1 = \frac{\rho\delta}{(\rho q + \varepsilon)T}. \quad (17)$$

类似地,由式(7)可得

$$\begin{aligned} s(k+1) + s(k) &= \\ &(2 - qT)s(k) - \varepsilon Ts(k)\rho^{-1} + \lambda(k) \geq \\ &(2 - qT)s(k) - \varepsilon Ts(k)\rho^{-1} - \delta = \\ &\{[\rho(2 - qT) - \varepsilon T]s(k) - \rho\delta\}\rho^{-1}. \end{aligned} \quad (18)$$

故若使

$$[\rho(2 - qT) - \varepsilon T]s(k) - \rho\delta > 0 \quad (19)$$

成立,即

$$s(k) > \Delta_2 = \frac{\rho\delta}{\rho(2 - qT) - \varepsilon T}, \quad (20)$$

则 $s(k+1) + s(k) > 0$ 成立,其中 $\rho(2 - qT) - \varepsilon T > 0$ .

综合考虑式(17)和(20)可知,当 $s(k)$ 满足

$$s(k) > \Delta = \max\{\Delta_1, \Delta_2\} \quad (21)$$

时,有 $s(k+1) - s(k) < 0$ 和 $s(k+1) + s(k) > 0$ 同时成立,即 $s^2(k+1) < s^2(k)$ 成立. 再将式(13)分别代入(17)和(20)可得

$$s(k) > \Delta = \Delta_1 = \Delta_2 = \delta. \quad (22)$$

由式(12)、(13)和(22)易知, $\rho > \delta = \Delta$ . 当 $s(k) > \Delta$ 时,式(16)和(19)仍然成立,故有

$$s^2(k+1) < s^2(k), \quad \forall \Delta < s(k) \leq \rho. \quad (23)$$

2) 当 $-\rho \leq s(k) < 0$ 时,由式(7)和假设2可得

$$\begin{aligned} s(k+1) - s(k) &= \\ &-qTs(k) - \varepsilon Ts(k)\rho^{-1} + \lambda(k) \geq \\ &[-(\rho q + \varepsilon)Ts(k) - \rho\delta]\rho^{-1}, \end{aligned} \quad (24)$$

则使得 $s(k+1) - s(k) > 0$ 成立的条件为

$$s(k) < -\frac{\rho\delta}{(\rho q + \varepsilon)T} = -\Delta_1. \quad (25)$$

同理,使得 $s(k+1) + s(k) < 0$ 成立的条件为

$$\begin{aligned} s(k+1) + s(k) &= \\ &(2 - qT)s(k) - \varepsilon Ts(k)\rho^{-1} + \lambda(k) \leq \\ &\{[\rho(2 - qT) - \varepsilon T]s(k) + \rho\delta\}\rho^{-1}, \end{aligned} \quad (26)$$

即

$$s(k) < -\frac{\rho\delta}{\rho(2 - qT) - \varepsilon T} = -\Delta_2. \quad (27)$$

类似地,使得 $s^2(k+1) < s^2(k)$ 成立的条件可表示为

$$s(k) < -\Delta = -\Delta_1 = -\Delta_2 = -\delta. \quad (28)$$

同样,当 $s(k) < -\Delta$ 时,式(25)和(27)仍然成立,故有

$$s^2(k+1) < s^2(k), \quad \forall -\rho \leq s(k) < -\Delta. \quad (29)$$

3) 当 $s(k) > \rho$ 时,由式(7)和(12)可得

$$\begin{aligned} s(k+1) - s(k) &= \\ &-qTs(k) - \varepsilon T + \lambda(k) \leq \\ &-qTs(k) - \varepsilon T + \delta < 0. \end{aligned} \quad (30)$$

由于 $\rho > \delta$ ,同理可得

$$\begin{aligned} s(k+1) + s(k) &= \\ &(2 - qT)s(k) - \varepsilon T + \lambda(k) \geq \\ &(2 - qT)s(k) - \varepsilon T - \delta > \\ &\rho - \delta > 0. \end{aligned} \quad (31)$$

故有

$$s^2(k+1) < s^2(k), \forall s(k) > \rho. \quad (32)$$

4) 当  $s(k) < -\rho$  时, 类似于  $s(k) > \rho$  时的分析, 由式(7)和(12)可得

$$\begin{aligned} s(k+1) - s(k) &= \\ &-qTs(k) + \varepsilon T + \lambda(k) \geq \\ &-qTs(k) + \varepsilon T - \delta > 0. \end{aligned} \quad (33)$$

同理可得

$$\begin{aligned} s(k+1) + s(k) &= (2 - qT)s(k) + \varepsilon T + \lambda(k) \leq \\ (2 - qT)s(k) + \varepsilon T + \delta &< -\rho + \delta < 0. \end{aligned} \quad (34)$$

故有

$$s^2(k+1) < s^2(k), \forall s(k) < -\rho. \quad (35)$$

综合式(23)、(29)、(32)和(35)可知

$$s^2(k+1) < s^2(k), \forall |s(k)| > \Delta. \quad (36)$$

因此, 当系统位于准滑模域之外时, 从任意初始状态出发的系统轨迹都将渐近收敛到准滑模域  $s_\Delta$  内.

另一方面, 当系统进入到准滑模域内时, 有  $|s(k)| \leq \Delta = \delta$ . 因为  $\Delta < \rho$ , 所以准滑模域位于饱和函数边界层之内. 结合式(7)、(13)和假设2可得

$$\begin{aligned} |s(k+1)| &= \\ |(1 - qT)s(k) - \varepsilon Ts(k)\rho^{-1} + \lambda(k)| &= \\ |\lambda(k)| \leq \delta = \Delta. \end{aligned} \quad (37)$$

综上所述, 一旦系统进入准滑模域  $s_\Delta$  内, 其将始终保持在理想滑模面的  $\Delta$  邻域内且无法逃出. □

**注3** 由引理1可知, 本文提出的改进扰动补偿趋近律的准滑模带宽  $\Delta$  仅与所设计的等效扰动变化率有关, 且幅值在  $O(T^3)$  量级上, 要比文献[6,11]中的准滑模带宽小得多, 故提高了系统稳态精度. 此外, 式(37)还表明, 当系统进入准滑模域后, 滑模函数的第  $k+1$  步值  $s(k+1)$  与等效扰动变化率第  $k$  步值  $\lambda(k)$  相等, 故此时  $s(k)$  相当于  $\lambda(k)$  延迟一步的结果. 又由假设2可知,  $\lambda(k)$  为光滑连续函数, 因此, 本文提出的改进离散趋近律消除了系统稳态抖振.

### 3 数值仿真

为了验证本文提出的改进扰动补偿趋近律的正确性, 结合文献[6,11], 选取含时变匹配扰动的二阶离散系统如下:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + f(k).$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 1.2 & 0.1 \\ 0 & 0.6 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$f(k) = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.2 \sin(0.02k\pi) + 0.5 \end{bmatrix}.$$

下面将本文提出的改进扰动补偿趋近律方法与文献[11]提出的如下基于扰动动态补偿的趋近律方法进行对比:

$$\begin{aligned} u(k) &= \\ &- (CB)^{-1} \left\{ CAx(k) - (1 - qT)s(k) + \right. \\ &\left. \varepsilon T \text{sign}(s(k)) + \sum_{i=2}^k [s(i) - (1 - qT)s(i-1) + \right. \\ &\left. \varepsilon T \text{sign}(s(i-1))] \right\}. \end{aligned}$$

上述两种方法的参数选取如下:  $C = [5, 1], \varepsilon = 14, q = 65$ , 离散系统的采样时间  $T = 0.01$  s, 饱和函数的边界层厚度  $\rho = \varepsilon T / (1 - qT) = 0.4$ , 系统初值  $x(0) = [2, -6]^T$ .

图1至图4为采用两种离散趋近律时的系统状态  $x_1$ 、状态  $x_2$ 、控制输入  $u$  和滑模函数  $s$  的响应对比曲线. 图5为采用本文方法的滑模函数  $s(k)$  与等效扰动变化率  $\lambda(k)$  的响应对比曲线.

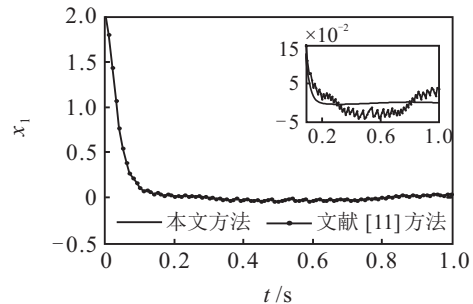


图1 系统状态  $x_1$  的响应对比

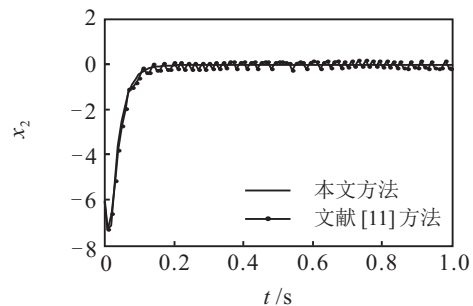


图2 系统状态  $x_2$  的响应对比

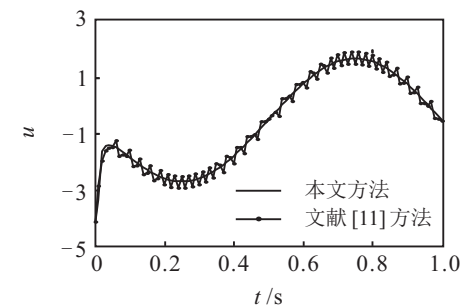
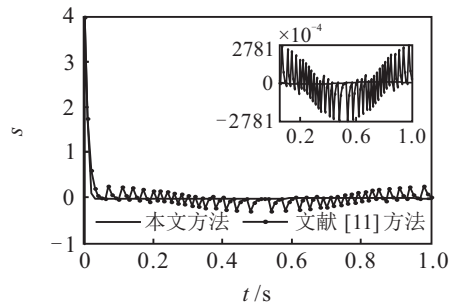
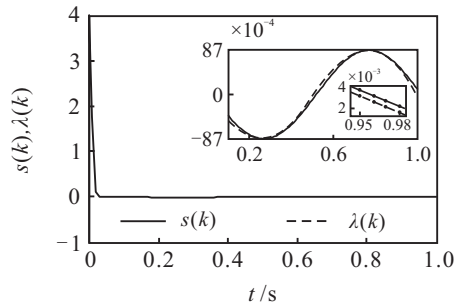


图3 控制输入  $u$  的响应对比

图4 滑模函数  $s$  的响应对比图5 本文方法的滑模函数  $s(k)$  与扰动变化率  $\lambda(k)$  响应

由仿真结果可知,采用本文方法得到的准滑模带宽  $\Delta = 0.0087$  明显要比文献[11]得到的准滑模带宽  $\Delta_{11} = 0.2781$  窄得多. 又由图5可知,  $s(k)$  进入到准滑模域后,  $s(k)$  的下一步值等于等效扰动变化率  $\lambda(k)$  的当前步值,且系统不含任何稳态抖振. 因此采用本文方法要比采用文献[11]方法的控制效果更好.

## 4 结论

本文提出了一种基于改进扰动补偿离散趋近律的滑模算法,讨论了准滑动模态的存在和到达条件. 理论分析和仿真结果表明,本文提出的趋近律方法在保留传统扰动补偿离散趋近律优点的基础上,进一步降低了准滑模带宽,提高了控制精度. 同时,本文方法采用延迟扰动估计技术,无需事先已知等效扰动上界即可实现控制律. 最后,通过合理设置饱和函数的边界层厚度,消除了系统的稳态抖振.

## 参考文献(References)

- [1] Yu X, Wang B, Li X. Computer-controlled variable structure systems: The state-of-the-art[J]. IEEE Trans on Industrial Informatics, 2012, 8(2): 197-205.
- [2] Young K D, Utkin V I, Ozguner U. A control engineer's guide to sliding mode control[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 1999, 7(3): 328-342.
- [3] Milosavljević Č. General conditions for the existence of a quasi-sliding mode on the switching hyperplane in discrete variable structure systems[J]. Automation and Remote Control, 1985, 46(30): 307-314.
- [4] Sarpturk S, Istefanopulos Y, Kaynak O. On the stability of discrete-time sliding mode control systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2003, 32(10): 930-932.
- [5] Furuta K. Sliding mode control of a discrete system[J].

Systems and Control Letters, 1990, 14(2): 145-152.

- [6] Gao W, Wang Y, Homaifa A. Discrete-time variable structure control systems[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1995, 42(2): 117-122.
- [7] 朱齐丹, 汪瞳. 一种改进的离散时间系统变结构控制设计方法[J]. 自动化学报, 2010, 36(6): 885-889. (Zhu Q D, Wang T. An improved design scheme of variable structure control for discrete-time systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(6): 885-889.)
- [8] 刘希, 孙秀霞, 董文瀚, 等. 一种新的约束变速趋近律离散滑模控制方法[J]. 自动化学报, 2013, 39(9): 1552-1557. (Liu X, Sun X X, Dong W H, et al. A new discrete-time sliding mode control method based on restricted variable trending law[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(9): 1552-1557.)
- [9] 郭玲伟, 孙明轩. 无抖振离散重复控制器的设计与实现[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(4): 554-560. (Wu L W, Sun M X. Design and implementation of a chattering-free discrete-time repetitive controller[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(4): 554-560.)
- [10] Eun Y, Kim J H, Kim K, et al. Discrete-time variable structure controller with a decoupled disturbance compensator and its application to a CNC servomechanism[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 1999, 7(4): 414-423.
- [11] Qu S, Xia X, Zhang J. Dynamics of discrete-time sliding-mode-control uncertain systems with a disturbance compensator[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2014, 61(7): 3502-3510.
- [12] Bartoszewicz A. Discrete-time quasi-sliding-mode control strategies[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1998, 45(4): 633-637.
- [13] 孙明轩, 王辉, 范伟云. 以幂次趋近的离散变结构重复控制[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(11): 1426-1432. (Sun M X, Wang H, Fan W Y. Discrete-time variable-structure repetitive control with power-rate reaching[J]. Control Theory & Applications, 2012, 29(11): 1426-1432.)
- [14] 苏磊, 姚宏, 张志浩, 等. 非匹配离散系统无抖振鲁棒准滑模控制[J]. 控制与决策, 2015, 30(3): 551-555. (Su L, Yao H, Zhang Z H, et al. Chattering-free robust quasi-sliding mode control for unmatched discrete-time systems[J]. Control and Decision, 2015, 30(3): 551-555.)
- [15] 刘涛, 刘贺平, 屈微. 基于离散时变趋近律的准滑模控制[J]. 控制与决策, 2010, 25(5): 797-800. (Liu T, Liu H P, Qu W. Quasi-sliding-mode control based on discrete time-variant reaching law[J]. Control and Decision, 2010, 25(5): 797-800.)
- [16] Abidi K, Xu J X, Yu X. On the discrete-time integral sliding-mode control[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2007, 52(4): 709-715.
- [17] Haibo Du, Xinghuo Yu, Michael Z Q Chen, et al. Chattering-free discrete-time sliding mode control[J]. Automatica, 2016, 68(C): 87-91.