

# 基于趋近律方法的 Delta 算子滑模变结构控制系统

刘云龙<sup>1,2\*</sup>, 韩星海<sup>1</sup>, 唐述宏<sup>1,2</sup>

(1. 潍坊学院 信息与控制工程学院, 山东 潍坊 261061; 2. 潍坊学院节能研究院, 山东 潍坊 261061)

(\* 通信作者电子邮箱 fhyren@163.com)

**摘要:**针对高速信号不确定滑模变结构控制系统的抖振问题,提出一种基于 Delta 算子离散化方法的不确定 Delta 算子系统的滑模变结构控制器。基于反正切函数给出了一种改进的 Delta 算子离散趋近律,将系统的不确定部分用其上、下确界代替,然后设计滑模变结构控制律。仿真结果表明了该方法的可行性和有效性,对内部参数扰动和外部干扰具有良好的完全鲁棒性。因此,基于该趋近律方法设计的滑模变结构控制系统既能在有限时间内快速趋近切换面,又最终稳定于平衡状态。

**关键词:**Delta 算子系统;变结构控制;准滑动模态;趋近律;反正切函数

**中图分类号:**TP273 **文献标志码:**A

## Delta operator sliding mode variable structure control system based on reaching law method

LIU Yunlong<sup>1,2\*</sup>, HAN Xinghai<sup>1</sup>, TANG Shuhong<sup>1,2</sup>

(1. College of Information and Control Engineering, Weifang University, Weifang Shandong 261061, China;

2. Academy of Energy Saving at Weifang University, Weifang Shandong 261061, China)

**Abstract:** Concerning the chattering problem of Sliding Mode Variable Structure Control (SMVSC) for Delta operator system with uncertainties, a sliding mode variable structure controller based on Delta operator discrete method was designed. A modified discrete reaching law for Delta operator system was proposed based on arc tangent function. The system uncertainty was substituted with its least upper bound and greatest lower bound, and then the SMVSC law was designed. The simulation result illustrates the feasibility and validity of the proposed method, and shows it has a good complete robustness for the internal parameter perturbation and external disturbance. Therefore, the SMVSC system based on the proposed reaching law method can not only quickly reach the region of the switching plane in finite time, but also is stable in the equilibrium state.

**Key words:** Delta operator system; variable structure control; quasi-sliding mode; reaching law; arc tangent function

## 0 引言

在现代控制理论分析与综合中,连续系统的研究成果易于理论分析,离散系统的研究成果易于计算机仿真实现。Delta 算子系统(Delta operator system)是连续系统和离散系统的统一描述形式<sup>[1]</sup>,在高速信号处理<sup>[2]</sup>、视觉伺服系统<sup>[3]</sup>等方面具有广阔的应用前景。Delta 算子的采样易于观察和分析,具有良好的数字特性。利用传统的前向移位算子采样的高速系统,当采样周期趋近于零时,采样系统并不完全趋近于相应的连续系统,采样系统的极点趋近于稳定域的边界上,易产生不稳定的状态<sup>[4]</sup>。近年来,Delta 算子系统的理论发展迅速,已成为计算机控制系统分析与综合的重要方法。文献[5]给出了 Delta 算子离散化模糊系统的鲁棒  $H_\infty$  控制器设计;文献[6]采用线性矩阵不等式等方法给出了 Delta 算子系统的非脆弱  $H_\infty$  滤波器设计问题;文献[7]基于有界实引理理论,设计了带有多面体参数摄动的 Delta 算子系统参数依赖  $H_\infty$  控制器;文献[8]等基于凸优化理论,给出了具有范数有界的参数不确定 Delta 算子系统的保性能滤波器设计。

滑模变结构控制是一种先进的非线性控制策略,其准滑动模态易于实现,在满足一定的匹配条件下,对系统内部参数扰动和外部干扰具有完全鲁棒性<sup>[9]</sup>。趋近律方法是离散滑模变结构控制器设计的常用方法,主要思想是根据准滑动模

态的到达条件,保证从任意初始状态出发的系统状态轨线在有限时间内到达切换面来确定趋近律形式,再利用趋近律方法实现滑模变结构控制器的设计<sup>[10]</sup>。文献[9]提出了工程上容易实现的离散指数趋近律,所设计的滑模变结构控制系统调节精度高、响应速度快,但在平衡状态产生一定程度的抖振,影响了系统的动态性能;文献[11]利用变速趋近律设计了比例—等速—变速的滑模变结构控制,有效地削弱了准滑动模态段内的抖振,但趋近运动段的时间较长;文献[12]基于 Sigmoid 函数改进了离散指数趋近律,较好地削弱了系统抖振;文献[13]设计了基于扰动动态补偿的理想趋近律,直接平滑地预测扰动;文献[14]利用线性矩阵不等式技术给出了 Delta 算子滑模变结构控制系统的切换面存在的充分条件,分析了 Delta 算子系统实现滑模变结构控制的到达条件,基于 Delta 算子离散指数趋近律设计了不确定 Delta 算子系统的滑模变结构控制器;文献[15]给出了 Delta 算子滑模变结构控制系统的状态观测器,具有良好的动态性能;文献[16]给出了不确定时滞 Delta 算子系统的鲁棒滑模变结构控制器设计。

本文讨论了含有内部参数扰动和外部干扰的 Delta 算子系统滑模变结构控制器的设计问题。基于反正切函数的趋近律方法设计的不确定 Delta 算子滑模变结构控制系统,在趋近运动段内,系统状态轨线迅速趋近切换带,在准滑动模态段内,系统状态轨线快速到达平衡状态,有效地削弱了系统抖

收稿日期:2013-02-04;修回日期:2013-03-06。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(60974025);山东省自然科学基金资助项目(ZR2012FL06);潍坊学院博士科研基金资助项目(2013BS10)。

作者简介:刘云龙(1982-),男,山东日照人,讲师,博士,主要研究方向:变结构控制、Delta 算子系统;韩星海(1972-),男,山东潍坊人,讲师,硕士,主要研究方向:计算机控制;唐述宏(1966-),男,山东潍坊人,教授,博士,主要研究方向:变结构控制、计算机控制。

振,保证了原点的稳定性和过程的平稳性。

## 1 Delta 算子系统描述

定义 1<sup>[1]</sup> Delta 算子的形式如下:

$$\delta x(t) \triangleq \begin{cases} \frac{d}{dt}x(t), & T = 0 \\ \frac{x(t+T) - x(t)}{T}, & T \neq 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中  $T$  为系统采样周期。当  $T = 0$  时,系统为连续时间系统;当  $T \neq 0$  时,系统为离散时间系统。在控制理论中,离散时间系统通常采用移位算子表示,即  $x(k+1) = qx(k)$ ,其中  $q$  为移位算子。Delta 算子与移位算子关系如下:

$$\delta = (q - 1)/T \quad (2)$$

考虑不确定 Delta 算子系统:

$$\delta x(k) = Ax(k) + \Delta Ax(k) + bu(k) + Df(k) \quad (3)$$

其中:  $x(k) \in \mathbf{R}^n$  为状态向量,  $u(k) \in \mathbf{R}$  为控制输入;  $A \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 、 $D \in \mathbf{R}^{n \times l}$  均为常数矩阵,  $b \in \mathbf{R}^n$  为常数向量;  $\Delta A \in \mathbf{R}^{n \times n}$  为系统内部参数摄动,  $f(k) \in \mathbf{R}^l$  为外部干扰。参数摄动  $\Delta A$  及外部干扰  $f(k)$  均不可测;矩阵对  $(A \ b)$  可控。

对于不确定 Delta 算子系统(3),相应的无控无扰系统为

$$\delta x(k) = Ax(k) \quad (4)$$

引理 1<sup>[3]</sup> Delta 算子系统(4)为渐近稳定的充分必要条件是,系统(4)的所有极点均在以  $(-1/T, j0)$  为圆心,以  $1/T$  为半径的左复平面的稳定圆域内。其中  $j$  为虚数单位。

引理 2<sup>[3]</sup> Delta 算子系统(4)为渐近稳定的充分必要条件是,对于给定的任意对称正定矩阵  $Q$ ,都存在唯一的对称正定矩阵  $P$ ,满足 Lyapunov 方程

$$A^T P + PA + TA^T P A = -Q$$

不确定 Delta 算子系统(3)的滑模变结构控制器设计可分为两步:1)选取合适的切换函数  $s(k)$ ,使得系统的准滑动模态渐近稳定;2)设计滑模变结构控制律  $u(k)$ ,保证从任意初始状态出发的系统状态轨线均能在有限时间内到达切换面,且在切换带内迅速趋近平衡状态。

对于 Delta 算子滑模变结构控制系统,其指数趋近律的形式如下:

$$\delta s(k) = -qs(k) - \varepsilon \operatorname{sgn} s(k) \quad (5)$$

其中:  $\varepsilon > 0, 0 < qT < 1, T$  为系统采样周期。该指数趋近律揭示了 Delta 算子滑模变结构控制系统的运动特征,离平衡状态较远处,压缩项  $-qs(k)$  起着主要的作用;离平衡状态较远处,平移项  $\varepsilon \operatorname{sgn} s(k)$  起着主要作用,两者相辅相成,较好地解决了系统准滑动模态的到达问题。但是指数趋近律(5)的平移项是常量平移的,无法保证系统满足合理的到达条件,系统状态轨线并不趋近于平衡状态,而是最终在平衡状态附近形成一个抖振。在指数趋近律基础上,文献[11]给出了离散时间系统的变速趋近律,在 Delta 算子系统中,其形式<sup>[10]</sup>如下:

$$\delta s(k+1) = -\varepsilon \|x(k)\| \operatorname{sgn} s(k) \quad (6)$$

当离平衡状态较远处,控制力切换幅度过大,给实际系统和实际过程的滑模变结构控制实现带来了困难。若将变速趋近律和指数趋近律组合给出比例—等速—变速趋近律,在离平衡状态较远处,采用指数趋近律(5),在平衡状态附近,采用变速趋近律(6)。采用这种趋近律的切换时刻如何界定和切换如何实施是个不好解决的问题,易导致系统不稳定。

选取切换函数:

$$s(k) = c^T x(k) \quad (7)$$

其中向量  $c \in \mathbf{R}^n$  待定。记切换面如下:

$$S = \{x(k) \mid c^T x(k) = 0\} \quad (8)$$

记切换带如下:

$$S_\Omega = \{x(k) \mid \|c^T x(k)\| < \Omega\} \quad (9)$$

其中  $2\Omega$  为切换带的带宽。

## 2 基于反正切函数的 Delta 算子离散趋近律

根据 Delta 算子滑模变结构控制系统的指数趋近律(5)和变速趋近律(6)的各自优点,借助反正切函数,给出一个改进的 Delta 算子离散趋近律

$$\delta s(k) = -qs(k) - \varepsilon \arctan(\|x(k)\|) \operatorname{sgn} s(k) \quad (10)$$

其中:  $\varepsilon > 0, 0 < q < 1/T, T$  为系统采样周期。

定理 1 对于不确定 Delta 算子系统(3),利用 Delta 算子离散趋近律(10),系统的状态轨线能够在有限时间内快速到达切换面内,并最终趋近于平衡状态。

证明 系统状态轨线离平衡状态较远时,即  $\|x(k)\| \rightarrow +\infty$ ,有

$$\lim_{\|x(k)\| \rightarrow +\infty} \arctan(\|x(k)\|) = \pi/2$$

因此,Delta 算子离散趋近律(10)近似为

$$\delta s(k) = -qs(k) - \frac{\pi\varepsilon}{2} \operatorname{sgn} s(k)$$

这相当于指数趋近律(5),在趋近运动段内,系统状态轨线能够快速到达切换带  $S_\Omega$ 。但是对于趋近律(5),当系统状态轨线趋近平衡状态时,系统将在切换带形成一个抖振,影响系统的稳定性。而对于趋近律(10),系统状态轨线趋近平衡状态时,此时  $\|x(k)\| \rightarrow 0$ ,由洛必达法则知

$$\lim_{\|x(k)\| \rightarrow 0} \frac{\arctan(\|x(k)\|)}{\|x(k)\|} = 1$$

所以:  $\arctan(\|x(k)\|)$  与  $\|x(k)\|$  是等价无穷小量。所以,Delta 算子离散趋近律(10)近似表示如下:

$$\delta s(k+1) = -qs(k) - \varepsilon \|x(k)\| \operatorname{sgn} s(k)$$

这相当于变速趋近律(6),系统在平衡状态附近形成一个扇形区域,由引理 2 和引理 3 知,利用线性矩阵不等式技术,可设计切换函数<sup>[14]</sup>,使得系统准滑动模态是渐近稳定的。

下面说明在有限时间  $LT$  内,系统状态轨线可达切换带  $S_\Omega$ 。其中,

$$L = \left\langle \frac{\ln \Omega - \ln |s(k_0)|}{\ln(1 - qT)} \right\rangle + 1$$

其中:  $\langle * \rangle$  表示  $*$  的整数部分,  $s(k_0)$  为初始状态。

若  $s(k) \notin \Omega$ ,趋近律(10)即为

$$s(k+1) = (1 - qT)s(k) - \beta T \operatorname{sgn} s(k)$$

其中  $\beta = \varepsilon \arctan(\|x(k)\|) \in (0, \varepsilon)$ 。

$$s(k+1) =$$

$$\begin{cases} (1 - qT)s(k) - \beta T < (1 - qT)s(k), & s(k) > 0 \\ (1 - qT)s(k) + \beta T > (1 - qT)s(k), & s(k) < 0 \end{cases}$$

所以,无论  $s(k)$  的正负如何,总有

$$|s(k+1)| < (1 - q) |s(k)|; 0 < 1 - q < 1$$

则存在正整数  $l$ ,使得  $|s(k_0 + l)| < (1 - q)^l |s(k_0)|$ ,当  $l > L$  时,

$$|s(k_0 + l)| < (1 - q)^{\frac{\ln \Omega - \ln |s(k_0)|}{\ln \alpha}} |s(k_0)| = \Omega$$

这也就说明了系统状态轨线在有限时间内快速到达切换面内,并最终趋近于平衡状态。

为得到更理想的控制效果,可将 Delta 算子离散趋近律(10)中  $\arctan(\|x\|)$  替换成  $\arctan(\alpha \|x\|)$ ,然后适当调

节参数  $\alpha$  的取值。

### 3 滑模变结构控制器设计

对于不确定 Delta 算子滑模变结构控制系统(3),假定不确定项的上、下界已知,即有

$$\begin{cases} A_m(k) \leq c^T \Delta A x(k) \leq A_M(k) \\ f_m(k) \leq c^T D f(k) \leq f_M(k) \end{cases} \quad (11)$$

其中  $A_m(k), A_M(k), f_m(k), f_M(k)$  均为常量。

假设系统内部扰动与外部干扰满足匹配条件:

$$\begin{cases} \Delta A = b a^T \\ D = b d^T \end{cases} \quad (12)$$

其中:  $a \in R^n, d \in R^l$  为常向量。

则系统(3)可化为

$$\delta x(k) = A x(k) + b(a^T x(k) + u(k) + d^T f(k)) \quad (13)$$

假定  $c^T b \neq 0$ , 采用 Delta 算子离散趋近律(10),得滑模变结构控制律如下:

$$\begin{aligned} u(k) = & - (c^T b)^{-1} (c^T A x(k) + q c^T x(k) + \\ & \varepsilon \arctan(\|x(k)\|) \operatorname{sgn} c^T x(k) - \\ & c^T b a^T x(k) - c^T b d^T f(k)) \end{aligned} \quad (14)$$

滑模变结构控制律(14)中含有不确定量,无法直接实施,仅仅在数学理论上有意义。在实际系统中,不确定量往往是有界的,这里用不确定量的上、下界来代替控制律(14)中的所有不确定项,使之变为确定的控制律。

记内部参数扰动均量  $\bar{A}(k)$ , 内部参数扰动偏差  $\underline{A}(k)$ , 外部干扰均量  $\bar{f}(k)$  和外部干扰偏差  $\underline{f}(k)$ , 则

$$\bar{A}(k) = \frac{1}{2}(A_M(k) + A_m(k))$$

$$\underline{A}(k) = \frac{1}{2}(A_M(k) - A_m(k))$$

$$\bar{f}(k) = \frac{1}{2}(f_M(k) + f_m(k))$$

$$\underline{f}(k) = \frac{1}{2}(f_M(k) - f_m(k))$$

得双不等式形式的趋近律:

$$c^T b a^T x(k) \begin{cases} \leq \bar{A}(k) + \underline{A}(k) \operatorname{sgn} s(k), & s(k) > 0 \\ \geq \bar{A}(k) + \underline{A}(k) \operatorname{sgn} s(k), & s(k) < 0 \end{cases}$$

$$c^T b d^T f(k) \begin{cases} \leq \bar{f}(k) + \underline{f}(k) \operatorname{sgn} s(k), & s(k) > 0 \\ \geq \bar{f}(k) + \underline{f}(k) \operatorname{sgn} s(k), & s(k) < 0 \end{cases}$$

将滑模变结构控制律(14)中的不确定项  $c^T b a^T x(k)$  和  $c^T b d^T f(k)$  分别替换为确定项  $\bar{A}(k) + \underline{A}(k) \operatorname{sgn} s(k)$  和  $\bar{f}(k) + \underline{f}(k) \operatorname{sgn} s(k)$ , 得到可实施的滑模变结构控制律:

$$\begin{aligned} u(k) = & - (c^T b)^{-1} [c^T A x(k) + q c^T x(k) + \\ & \varepsilon \arctan(\|x(k)\|) \operatorname{sgn} c^T x(k) + \bar{A}(k) + \\ & \underline{A}(k) \operatorname{sgn} s(k) + \bar{f}(k) + \underline{f}(k) \operatorname{sgn} s(k)] \end{aligned} \quad (15)$$

**定理 2** 对于不确定 Delta 算子系统(3),若系统内部参数扰动和外部干扰满足式(9)和匹配条件(12),则存在滑模变结构控制律(15),使得系统在准滑动模态段内具有完全鲁棒性。

**证明** 对于不确定 Delta 算子系统(3),由式(13)和(15)知,

$$\begin{aligned} \delta s(k) = & c^T A x(k) + c^T b (a^T x(k) + u(k) + d^T f(k)) = \\ & c^T A x(k) + c^T b a^T x(k) + c^T b d^T f(k) - [c^T A x(k) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & q c^T x(k) + \varepsilon \arctan(\|x(k)\|) \operatorname{sgn} c^T x(k) + \\ & \bar{A}(k) + \underline{A}(k) \operatorname{sgn} s(k) + \bar{f}(k) + \underline{f}(k) \operatorname{sgn} s(k)] = \\ & - q c^T x(k) - \varepsilon \arctan(\|x(k)\|) \operatorname{sgn} c^T x(k) + \\ & (c^T b a^T x(k) - \bar{A}(k) - \underline{A}(k) \operatorname{sgn} s(k)) + \\ & (c^T b d^T f(k) - \bar{f}(k) - \underline{f}(k) \operatorname{sgn} s(k)) \end{aligned}$$

由引理 1 和引理 2 知:

$$\delta s(k) \begin{cases} \leq -q c^T x(k) - \varepsilon \arctan(\|x\|) \operatorname{sgn} c^T x(k), & s(k+1) > 0 \\ \geq -q c^T x(k) - \varepsilon \arctan(\|x\|) \operatorname{sgn} c^T x(k), & s(k+1) < 0 \end{cases}$$

所以,存在滑模变结构控制律(15),使得系统在准滑动模态段内具有完全鲁棒性。

采用 Delta 算子离散趋近律(10)设计的不确定 Delta 算子滑模变结构控制系统,如文献[14]中的指数趋近律情形,能够快速趋近切换面,又如文献[10]中的变速趋近律情形,能够最终稳定于平衡状态,系统的稳态性更好。

### 4 实例仿真

考虑不确定 Delta 算子系统(3)。其中:

$$A = \begin{bmatrix} 183.3 & 115.5 \\ 0 & -510.8 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} 0 \\ 1277 \end{bmatrix}$$

假定系统不确定项为

$$\begin{aligned} \Delta A x(k) + D f(k) = & \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1 \times \sin(k\pi/25) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

采样周期  $T = 0.001, t = kT$ , 切换函数(7)的系数矩阵  $c = [6 \ 1]^T$ , Delta 算子离散趋近律(8)的系数  $q = 80, \varepsilon = 50$ , 初始状态  $x(0) = [0.6 \ -1.2]^T$ 。利用 Matlab 程序给出的基于反正切函数的 Delta 算子滑模变结构控制系统的状态曲线如图 1 所示,切换函数曲线和控制输入曲线分别如图 2 和图 3 所示。

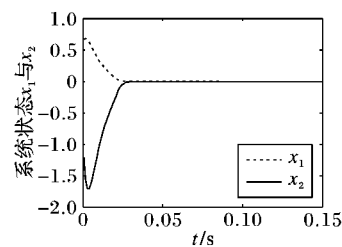


图 1 Delta 算子滑模变结构控制系统的状态曲线

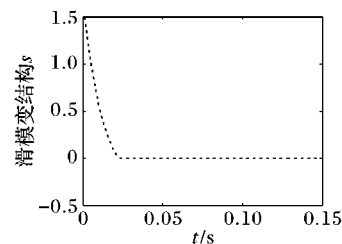


图 2 Delta 算子滑模变结构控制系统的切换函数曲线

将上述 Delta 算子系统对应的连续系统进行移位算子变换后,得到的离散滑模变结构控制系统的闭环极点趋近于单位圆周,处于临界稳定状态,引起了病态问题。而进行 Delta 算子离散化得到的滑模变结构控制系统的闭环极点仍趋近于连续系统的闭环极点,系统是渐近稳定的。采用 Delta 算子离散趋近律(10)设计的滑模变结构控制系统的原点稳定性好,

系统平稳性强,保持快速趋近,抖振幅度较小。改变实例仿真中的不确定项的参数,系统在趋近运动段内存在一定的偏差,而在准滑动模态段内,系统的运动过程几乎一致。由此可见,基于 Delta 算子离散趋近律(10)的滑模变结构控制策略具有良好的仿真效果。

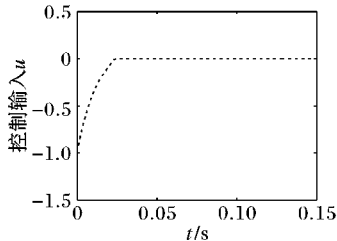


图 3 Delta 算子滑模变结构控制系统的控制输入曲线

## 5 结语

本文基于反正切函数的 Delta 算子离散指数趋近律方法,给出了不确定 Delta 算子系统的滑模变结构控制器设计,克服了传统移位算子离散化方法在高速采样系统中容易引起病态的问题。另外,具有滞后情形的 Delta 算子系统是一个无穷维的动态系统,结构复杂,其滑模变结构控制策略有待于进一步分析研究。

### 参考文献:

- [1] MIDDLETON R H, GOODWIN G C. Improved finite word length characteristics in digital control using delta operators [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1986, 31(11): 1015-1021.
- [2] 张端金, 王忠勇, 吴捷. 系统控制和信号处理中的 Delta 算子方法[J]. 控制与决策, 2003, 18(4): 385-391.
- [3] 李惠光, 武波, 李国友, 等. Delta 算子控制及其鲁棒控制理论基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [4] CHEN S, ISTEPANIAN R, WU J, *et al.* Comparative study on optimizing closed-loop stability bounds of finite-precision controller

(上接第 2396 页)

如何根据胎儿心电图信号提取应用的特点,得到更符合胎儿心电图信号特性的时频分布表示方法,并将其应用于时频盲源分离方法中,进行胎儿心电图信号提取是本文的进一步研究方向。

### 参考文献:

- [1] 程志厚, 宋数良. 胎儿电子监护学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2001: 503-512.
- [2] RUBEN M C, JOSE L C O, SUSANA H M, *et al.* Fast technique for noninvasive fetal ECG extraction [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2011, 58(2): 227-230.
- [3] LIU S J, LIU D L, ZHANG J Q, *et al.* Extraction of fetal electrocardiogram using recursive least squares and normalized least mean squares algorithms [C]// 3rd International Conference on Advanced Computer Control. Piscataway: IEEE, 2011: 333-336.
- [4] CAMPS-VALLS G, MARTINEZ-SOBER M, SORIA-OLIVAS E, *et al.* Foetal ECG recovery using dynamic neural networks [J]. Artificial Intelligence in Medicine, 2004, 31(3): 197-209.
- [5] 蒲秀娟, 曾孝平, 韩亮, 程军. 基于回归支持向量机的胎儿心电图提取[J]. 数据采集与处理, 2009, 24(6): 738-743.
- [6] 高莉, 黄力宇. 基于自适应梯度盲源分离算法的胎儿心电图提取[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(8): 1756-1760.
- [7] CAMARGO-OLIVARES J L, MARTÍN-CLEMENTE R. The maternal abdominal ECG as input to MICA in the fetal ECG extraction

structures with shift and delta operators [J]. Systems & Control Letters, 2000, 40(3): 153-163.

- [5] YANG H, SHI P, ZHANG J, *et al.* Robust  $H_\infty$  control for a class of discrete time fuzzy systems via delta operator approach [J]. Information Sciences, 2012, 184(1): 230-245.
- [6] GUO X G, YANG G H. Non-fragile  $H_\infty$  filter design for delta operator formulated systems with circular region pole constraints: an LMI optimization approach [J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(9): 1209-1215.
- [7] 姚郁, 张瑞. Delta 算子不确定系统扩展参数依赖  $H_\infty$  控制[J]. 控制与决策, 2009, 24(2): 293-296.
- [8] 胡刚, 任俊超, 谢湘生. Delta 算子不确定系统最优保性能控制[J]. 电机与控制学报, 2003, 7(2): 139-142.
- [9] GAO W B, WANG Y F, HOMAIFA A. Discrete-time variable structure control systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1995, 42(2): 117-122.
- [10] 刘云龙. 变结构控制策略及在广义系统和  $\delta$  算子系统中设计研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [11] 姚琼芸, 宋立忠, 温洪. 离散变结构控制系统的比例-等速-变速控制[J]. 控制与决策, 2000, 15(3): 329-332.
- [12] 高存臣, 刘云龙, 李云艳. 不确定离散变结构控制系统的趋近律方法[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(7): 781-785.
- [13] 刘云龙, 高存臣, 赵林, 等. 离散变结构控制基于扰动动态补偿的理想趋近律[J]. 计算机应用, 2011, 31(7): 2011-2014.
- [14] 张彩虹, 刘云龙, 高存臣, 等. Delta 算子不确定系统的滑模变结构控制[J]. 控制与决策, 2012, 27(2): 237-242.
- [15] YANG H, XIA Y, SHI P. Observer-based sliding mode control for a class of discrete systems via delta operator approach [J]. Journal of the Franklin Institute, 2010, 347(7): 1199-1213.
- [16] XIA Y, FU M, YANG H, *et al.* Robustness sliding mode control for uncertain time-delay systems based on delta operator [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(9): 3646-3655.
- [17] problem [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2011, 18(3): 161-164.
- [8] VAPNIK V. An Overview of Statistical Learning Theory [J]. IEEE Transaction on Neural Networks, 1999, 10(5): 988-999.
- [9] OUTRAM N J. Intelligent pattern analysis of the foetal electrocardiogram [D]. Plymouth: University of Plymouth, 1997.
- [10] BELOUHRANI A, AMIN M G. Blind source separation based on time-frequency signal representations [J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 1998, 46(11): 2888-2897.
- [11] HOLOBAR A, FEVOTTE C, DONCARLI C, *et al.* Single autoterm selection for blind source separation in time-frequency plane [C]// EUSIPCO 2002: Proceedings of the 11th European Signal Processing Conference. Toulouse: [s. n.], 2002: 1-4.
- [12] FEVOTTE C, DONCARLI C. Two contributions to blind source separation using time-frequency distributions [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(3): 386-389.
- [13] 郭靖, 曾孝平. 一种重排时频谱的非平稳信号盲源分离方法[J]. 西南师范大学学报, 2010, 35(6): 147-151.
- [14] LATHAUWER L. Database for the Identification of Systems: FECC data EAST/SISTA K. U. Leuven, Belgium [EB/OL]. [2013-01-25]. <http://www.esat.kuleuven.ac.be/sista/daisy/>.
- [15] MALLAT S. A wavelet tour of signal processing [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2003: 221-222, 255-257, 303-312.