

不确定 Delta 算子系统的滑模软切换控制

刘云龙¹ 王玉梅¹ 考永贵² 王文成¹

(潍坊学院信息与控制工程学院 潍坊 261061)¹ (哈尔滨工业大学(威海)数学系 威海 264209)²

摘 要 针对一类带有内部参数摄动和外部扰动的快速采样控制系统,基于 sigmoid 函数提出了一种 Delta 算子 S-变速趋近律方法,并设计了不确定 Delta 算子系统的滑模软切换控制器。基于 Delta 算子采样原理,将连续时间系统和离散时间系统的软切换控制器设计统一到 Delta 算子系统。基于 Delta 算子 S-变速趋近律方法设计的闭环快速采样滑模软切换控制器能够在限制时刻内到达切换面,削弱了系统颤振。从仿真实例可以看出,该滑模软切换控制器的稳定性和平稳性优于传统指数趋近律情形,整个动态过程具有良好的完全鲁棒性。

关键词 滑模控制,软切换控制,Sigmoid 函数,趋近律,Delta 算子,完全鲁棒性

中图分类号 TP273 **文献标识码** A

Soft Switching Control for Uncertain Delta Operator Systems Based on Sliding Mode

LIU Yun-long¹ WANG Yu-mei¹ KAO Yong-gui² WANG Wen-cheng¹

(College of Information and Control Engineering, Weifang University, Weifang 261061, China)¹

(Department of Mathematics, Harbin Institute of Technology(Weihai), Weihai 264209, China)²

Abstract Aiming at high speed sampling control systems with internal parameter perturbation and external disturbance, a novel Delta operator reaching law method, called S-type variable rate reaching law, was concerned based on sigmoid function, and a soft switching control for uncertain Delta operator systems was proposed based on sliding mode. Soft switching controller for continuous time systems and discrete-time systems can be unified into those of Delta operator systems via the principle of Delta operator sampling. The closed loop-string high speed sampling soft switching controller design based on sliding mode via Delta operator S-variable rate reaching law can reach the scope of the switching plane in limited moment, and reduce system flutter effectively. The simulation results demonstrate that the stability and process steady of the proposed controller are better than those of conventional exponential reaching law method, and the controller has a good completely robustness in entire dynamic process.

Keywords Sliding mode control, Soft switching control, Sigmoid function, Reaching law, Delta operator, Completely robustness

1 引言

近年来,通信设备、电子线路和电能储存等电网装置的污染程度越来越严重,以快速采样控制技术为核心的计算机控制迅速成为控制科学的研究热点。采样控制是按照一定的时序间隔对模拟信号样本进行采集,将其转换为相应的脉冲序列,是计算机控制实现的重要转换过程。对于快速采样控制系统,利用前向移位算子进行采样时,若采样频率过高,系统状态趋近于稳定区域的临界,会造成采样系统并不趋近于原来的连续系统从而出现许多意料之外的状态情形,如环形振荡等,甚至会导致系统失稳,影响控制器的正常使用^[1,2]。Delta 算子系统可以统一描述连续时间系统和离散时间系统,能够较好地处理快速采样系统的高频振荡问题,并已经应用到永磁同步电机^[3]、快速化学流程^[4]等实际领域。

滑模控制起源于继电控制器的研究,本质在于控制器结构切换的不连续性,一般应用于所研究系统存在着不确定参数的情形^[5]。不确定控制系统的控制算法有许多形式,如最优控制^[6]、鲁棒滑模控制^[7]、保性能控制^[8]等。滑模控制是一种典型的切换控制模式,在一定匹配条件下,系统到达切换面后,总会处于滑动模态,具有完全鲁棒性,也称不变性、完全自适应性。但滑模控制容易引起系统颤振,影响了它的推广应用。人工神经网络中的 sigmoid 型激励函数具有光滑饱和性,可以较好地解决这个问题。文献[9,10]基于 sigmoid 函数设计了一种软变结构控制模式,并研究了没有干扰情形的水下机器人动态过程。文献[11,12]设计了以削弱颤振为目的的动态软变结构控制器。对于不确定采样系统,假设系统动态过程的信息和变化范围可以量测,文献[13]基于 sigmoid 函数改进了离散指数趋近律。计算机硬件技术的迅速发展使

本文受国家自然科学基金项目(61403283,61473097),山东省自然科学基金项目(ZR2012FL06,ZR2013FQ036),山东省高等学校科技计划项目(J14LN52),潍坊市科学技术发展计划项目(2014GX022)资助。

刘云龙(1982—),男,博士,讲师,主要研究方向为切换控制、智能控制,E-mail: fhyllren@163.com;王玉梅(1962—),女,硕士,教授,主要研究方向为切换控制、智能控制;考永贵(1971—),男,博士,副教授,主要研究方向为神经网络、智能控制;王文成(1979—),男,博士,副教授,主要研究方向为模式识别、智能控制。

得采样控制技术有了实质性的进步,近年来,Delta 采样控制理论得到了迅速发展。文献[14,15]设计了 Delta 算子系统的 H_∞ 控制器和滤波器。文献[16]研究了 Delta 算子时滞系统的 D-稳定条件以及鲁棒可靠 D-镇定状态反馈控制器。基于 Delta 算子采样的滑模控制系统的研究成果并不多见,文献[17]给出了设计 Delta 算子滑模控制系统的稳定切换面的充分条件。文献[18]基于指数趋近律方法设计了不确定 Delta 算子滑模控制系统。文献[19,20]基于 Delta 算子构造了采样控制系统的不确定鲁棒滑模控制器和滑模状态观测器。但现有结果均未考虑不确定 Delta 算子系统的滑模软切换控制器设计问题。

针对带有内部参数扰动和外部扰动的快速采样控制系统的高频颤振问题,本文利用具有光滑性、严格单调性和饱和性的 sigmoid 函数,提出了一种 Delta 算子 S-变速趋近律,设计了不确定 Delta 算子系统的滑模软切换控制器,整个动态过程具有良好的完全鲁棒性能。

2 问题描述

在快速采样控制系统中,引入 Delta 算子采样有助于分析高频信号系统的性能特征。Delta 算子是一种采样算子,又称 Euler 算子,其数学表达式为

$$\delta = \frac{(q-1)}{T} \quad (1)$$

其中, q 为前向移位算子,即 $x(k+1) = qx(k)$ 。 T 为 Delta 算子采样周期。当 $T=0$ 时,系统可以表达为连续时间系统,有 $\delta x(t) = \dot{x}(t)$ 。当 $T \neq 0$ 时,系统可以表达为离散时间系统,有 $\delta x(t) = \frac{(x(t+T) - x(t))}{T}$ 。

基于 Delta 算子采样原理,在采样频率很高时,Delta 算子采样系统的极点仍趋近于原系统的极点,系统的稳定性与原系统保持一致。考虑如下不确定 Delta 算子系统:

$$\delta x(k) = (A + \Delta A)x(k) + Bu(k) + Df(k) \quad (2)$$

其中, $x(k) \in R^n$ 为系统状态向量, $u(k) \in R^m$ 为系统输入向量; $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times m}$ 和 $D \in R^{n \times l}$ 均为常值矩阵; $\Delta A \in R^{n \times n}$ 为内部参数扰动矩阵, $f(k) \in R^l$ 为外部扰动向量。 ΔA 和 $f(k)$ 的元素均为 Lebesgue 可测。假定该系统是可控的,且矩阵 B 是满秩矩阵,则有 $\text{rank}(B) = m < n$ 。

Delta 算子系统(2)对应的名义系统为

$$\delta x(k) = Ax(k) \quad (3)$$

引理 1^[17] Delta 算子系统(3)为渐近稳定的充分必要条件是:所有的系统极点在复平面虚轴左侧以 $(-1/T, 0)$ 为圆心,以 $1/T$ 为半径的圆域内。

引理 2^[5] Delta 算子系统(3)采用双不等式趋近律时,若到达条件成立,则系统滑动模式具有完全鲁棒性。

3 不确定 Delta 算子系统的滑模软切换控制器

3.1 Delta 算子 S-变速趋近律设计

不确定 Delta 算子系统(2)的滑模软切换控制器的设计一般分两步:首先选取线性形式或积分器等非线性形式的切换函数,保证系统状态轨线平稳运动进入滑动模式区域;其次,基于 Delta 算子 S-变速趋近律设计 Delta 算子滑模软切换控制律,使得系统在有限时间内快速到达切换面,并最终趋近于切换带区域内的平衡状态。

对于移位算子滑模控制系统,设计指数趋近律为

$$s(k+1) = (1-qT)s(k) - \epsilon T \text{sgn } s(k) \quad (4)$$

其中, $\epsilon > 0$, $0 < qT < 1$, T 为系统采样周期。趋近律(4)的切换项 $\epsilon \text{sgn } s(k)$,使得系统具有抵抗系统内部扰动和外部扰动的完全鲁棒性。但趋近律(4)无法保证系统满足滑模到达条件,系统状态轨线最终并不稳定于平衡状态,而是在平衡状态的附近形成一个环形的振荡状态,不利于滑模控制器的实际设计。针对指数趋近律(4)的缺点,文献[5]给出了 Delta 算子变速趋近律,其形式为

$$\delta x(k) = -\epsilon \|x(k)\| \text{sgn } s(k) \quad (5)$$

其中, $\|\cdot\|$ 表示向量 $\cdot$ 的 2-范数。该趋近律能够趋近于平衡状态,但趋近过程有较大的颤振。这样可以组合两种趋近律:离平衡状态较远处,采用指数趋近律(4);离平衡状态较近处,采用 Delta 算子变速趋近律(5)。这种组合趋近律能快速趋近切换面,又削弱了颤振,但不易准确判断变结构的切换时刻及如何实施切换。

为了解决指数趋近律(4)最终无法稳定于平衡状态的问题,可利用饱和函数 $\text{sat } s(k)$ 替换符号函数 $\text{sgn } s(k)$,基于 Delta 算子采样原理,给出了 Delta 算子饱和趋近律:

$$\delta x(k) = -qs(k) - \epsilon \text{sat } s(k) \quad (6)$$

该饱和趋近律使得系统状态轨线最终稳定于平衡状态,但该趋近律需要精确的数学模型,不再具有完全鲁棒性。

人工神经网络中的 sigmoid 函数是一类重要的激励函数,具有光滑性、严格单调性和饱和性^[13],其表达式为

$$\text{sig}(x, \alpha, \theta) = (1 + e^{-\alpha x + \theta})^{-1}$$

其中,参数 α 为增益量,要求 $\alpha > 0$,决定了该函数的变化速率, θ 为偏移量。该函数的变化区域为 $(0, 1)$ 。将上述函数的偏移量取为零,通过非奇异性变换,使得函数的变化区域为 $(-1, 1)$,则有

$$\text{sig}(\alpha x) \stackrel{\Delta}{=} 2\text{sig}(x, \alpha, 0) - 1 = \frac{1 - e^{-\alpha x}}{1 + e^{-\alpha x}}$$

针对指数趋近律(4)和变速趋近律(5)的各自特点,利用 sigmoid 函数,提出了 Delta 算子 S-变速趋近律:

$$\delta x(k) = -qs(k) - \epsilon \text{sig}(\alpha \|x(k)\|) \text{sgn } s(k) \quad (7)$$

当系统状态轨线离平衡状态较远时,有

$$\lim_{\|x(k)\| \rightarrow +\infty} \text{sig}(\alpha \|x(k)\|) = \lim_{\|x(k)\| \rightarrow +\infty} \frac{1 - e^{-\alpha \|x(k)\|}}{1 + e^{-\alpha \|x(k)\|}} = 1$$

因此,此时 Delta 算子 S-变速趋近律(7)近似于

$$\delta x(k) = (s(k+1) - s(k))/T = -qs(k) - \epsilon \text{sgn } s(k)$$

当系统状态轨线离平衡状态较近时,据等价无穷小量理论,由 L'Hospital 法则,有

$$\lim_{\|x(k)\| \rightarrow 0} \frac{\text{sig}(\alpha \|x(k)\|)}{\|x(k)\|} = \frac{\alpha}{2}$$

所以, $\text{sig}(\alpha \|x(k)\|)$ 与 $\alpha \|x(k)\|/2$ 是等价无穷小量,因此,此时 Delta 算子 S-变速趋近律(7)近似于

$$\delta x(k) = -qs(k) - \epsilon_1 \|x(k)\| \text{sgn } s(k)$$

其中 $\epsilon_1 = \alpha \epsilon / 2$ 。此时,系统在平衡状态的小区域范围内形成一个扇形的切换区域,最终趋近于平衡状态。

3.2 Delta 算子滑模软切换控制器的设计

选取线性切换函数 $s(k) = Cx(k)$,其中矩阵 $C \in R^{m \times n}$ 为待定矩阵。构造的切换面为 $S_p = \{x(k) | Cx(k) = 0\}$,切换带为 $S_\omega = \{x(k) | \|Cx(k)\| < \omega\}$,其中 2ω 为切换带的带宽。在趋近运动阶段,系统状态轨线要保证在有限时间快速到达切换面。据文献[17],利用线性矩阵不等式技术,由引理 1 给出切换函数的系数矩阵 C 的合理计算方法。

对于不确定 Delta 算子系统(2),假定系统内部参数摄动与外部扰动满足如下匹配条件:

$$\Delta A = B\tilde{A}, D = B\tilde{D} \quad (8)$$

假定滑模可控矩阵 CB 非奇异,采用 Delta 算子 S 变速趋近律(7),计算得到 Delta 算子滑模软切换控制律为

$$u(k) = -(CB)^{-1} [CAx(k) + qCx(k) - CB\tilde{A}x(k) - CB\tilde{D}f(k) + \varepsilon \text{sig}(\alpha \|x(k)\|) \text{sgn } s(k)] \quad (9)$$

滑模软切换控制律(9)中带有不确定项,无法直接实现,不能保证系统的完全鲁棒性。为此需要限制系统不确定项的范围在有界区域,然后将该控制律的不确定项用其上、下确界代替。这样,该控制律就成为可直接实现的控制律。

这里约定:矩阵 $A \geq B$, 表示矩阵 A 中的任意元素大于或等于矩阵 B 中行列位置对应的元素。

对于 Delta 算子系统(2),将其不确定项限制在有界区域,不妨假设

$$\begin{cases} A_m(k) \leq C\Delta Ax(k) \leq A_M(k) \\ f_m(k) \leq CDf(k) \leq f_M(k) \end{cases} \quad (10)$$

其中, $A_m(k), A_M(k), f_m(k), f_M(k)$ 为 m 维列向量。定义 m 维内部参数摄动平均向量 $\bar{A}(k)$, m 维内部参数摄动偏差向量 $\underline{A}^*(k)$, 以向量 $\underline{A}^*(k)$ 中的各元素构成的对角矩阵 $\underline{A}(k)$; m 维外部扰动平均向量 $\bar{f}(x)$, m 维外部扰动偏差向量 $\underline{f}^*(k)$, 以向量 $\underline{f}^*(k)$ 中的各元素构成的对角矩阵 $\underline{f}(k)$, 各符号构造如下。

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

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

$$= (A_1(k), A_2(k), \dots, A_m(k))^T$$

$$\underline{A}(k) = \text{diag}(A_1(k), A_2(k), \dots, A_m(k))$$

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

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

$$= (f_1(k), f_2(k), \dots, f_m(k))^T$$

$$\underline{f}(k) = \text{diag}(f_1(k), f_2(k), \dots, f_m(k))$$

因此,考虑以上平均量与偏差量符号,则有,

$$CB\tilde{A}x(k) \begin{cases} \leq \bar{A}(k) + \underline{A}(k) \text{sgn } s(k), & s(k) > 0 \\ \geq \bar{A}(k) + \underline{A}(k) \text{sgn } s(k), & s(k) < 0 \end{cases}$$

$$CB\tilde{D}f(k) \begin{cases} \leq \bar{f}(k) + \underline{f}(k) \text{sgn } s(k), & s(k) > 0 \\ \geq \bar{f}(k) + \underline{f}(k) \text{sgn } s(k), & s(k) < 0 \end{cases}$$

进一步考虑将 Delta 算子滑模软切换控制律(9)中的不确定项 $CB\tilde{A}x(k)$ 用确定项 $\bar{A}(k) + \underline{A}(k) \text{sgn } s(k)$ 替换,而不确定项 $CB\tilde{D}f(k)$ 用确定项 $\bar{f}(k) + \underline{f}(k) \text{sgn } s(k)$ 替换。实际上,该滑模软切换控制器的逻辑结构可分为两部分:

1) 优化调节时间和响应速度的趋近律切换结构

$$qCx(k) + \varepsilon \text{sig}(\alpha \|x(k)\|) \text{sgn } s(k)$$

2) 优化控制器中不确定项的符号切换结构

$$\bar{A}(k) + \underline{A}(k) \text{sgn } s(k) + \bar{f}(k) + \underline{f}(k) \text{sgn } s(k)$$

计算得到可直接实现的滑模软切换控制律:

$$u(k) = -(CB)^{-1} [CAx(k) + qCx(k) + \bar{A}(k) + \underline{A}(k) \text{sgn } s(k) + \bar{f}(k) + \underline{f}(k) \text{sgn } s(k) + \varepsilon \text{sig}(\alpha \|x(k)\|) \text{sgn } s(k)] \quad (11)$$

对于不确定 Delta 算子系统(2),考虑匹配条件(8)、有界条件(10)和滑模软切换控制律(11),有

$$\begin{aligned} \Delta s(k) = & -qCx(k) - \varepsilon \text{sig}(\alpha \|x(k)\|) \text{sgn } s(k) + \\ & (CB\tilde{A}x(k) - \bar{A}(k) - \underline{A}(k) \text{sgn } s(k)) + \\ & (CB\tilde{D}f(k) - \bar{f}(k) - \underline{f}(k) \text{sgn } s(k)) \end{aligned}$$

当 $s(k+1) > 0$ 时,有

$$\Delta s(k) \leq -qCx(k) - \varepsilon \text{sig}(\alpha \|x(k)\|) \text{sgn } s(k)$$

当 $s(k+1) < 0$ 时,有

$$\Delta s(k) \geq -qCx(k) - \varepsilon \text{sig}(\alpha \|x(k)\|) \text{sgn } s(k)$$

据引理 2 及上述分析,表明 Delta 算子系统(2)在不确定项保持有界和满足匹配条件的前提下,滑模软切换控制律(11)使得系统在整个动态过程具有完全鲁棒性。

注 1 Delta 算子 S 变速趋近律(7)仍然具有切换结构形式 $\text{sgn } s(k)$,随着系统状态轨线不断地趋近于平衡状态,系数 $\varepsilon \text{sig}(\alpha \|x(k)\|)$ 逐渐减小,颤振幅度不断减弱。随着时间的推移,系统状态轨线最终稳定于平衡状态。

注 2 文献[10]基于 sigmoid 函数设计连续软变结构控制系统,未考虑系统存在内部摄动和外部干扰的情形。文献[13]基于 sigmoid 函数构造了移位算子滑模控制系统,未考虑快速采样引起的病态问题。本文基于 Delta 算子 S 变速趋近律(7)设计的不确定 Delta 算子系统,较好地解决了快速采样系统的高频颤振问题,而且考虑了系统存在内部摄动和外部干扰的情形,整个过程具有良好的完全鲁棒性。

4 算例仿真

考虑如下不确定 Delta 算子系统,其中:

$$A = \begin{bmatrix} 50 & 50 \\ -50 & 30 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -10 \\ -130 \end{bmatrix}$$

这里 Delta 算子采样周期 $T = 0.001, t = kT$ 。选取切换函数系数向量为 $C = [5 \ 1]$, Delta 算子 S 变速趋近律和指数趋近律的系数为 $q = 20, \varepsilon = \alpha = 1$ 。初始状态 $x(0) = [0.3 \ 0.3]^T$ 。为比较利用两种趋近律设计控制律的异同,选取不确定项为 $\Delta Ax(k) + Df(k) = [0 \ 10 + 10\cos(k\pi/25)]^T$,利用 Matlab 中的 Simulink 工具箱给出了基于 Delta 算子 S 变速趋近律(7)设计的滑模软切换控制系统的状态轨线,如图 1(a)所示。若利用前向移位算子采样,则给出的采样系统为

$$x(k+1) = \hat{A}x(k) + \hat{b}u(k) + \hat{d}f(k)$$

$$\text{其中, } \hat{A} = \begin{bmatrix} 1.05 & 0.05 \\ -0.05 & 0.97 \end{bmatrix}, \hat{b} = \begin{bmatrix} -0.01 \\ -0.13 \end{bmatrix}, \hat{d}f(k) = T(\Delta Ax(k) + Df(k)) \text{ 为不确定项。}$$

基于传统指数趋近律(4)设计的滑模控制系统的状态轨线如图 1(b)所示。基于 Delta 算子 S 变速趋近律(7)和指数趋近律(4)设计的控制系统的输入曲线分别如图 2(a)和图 2(b)所示。

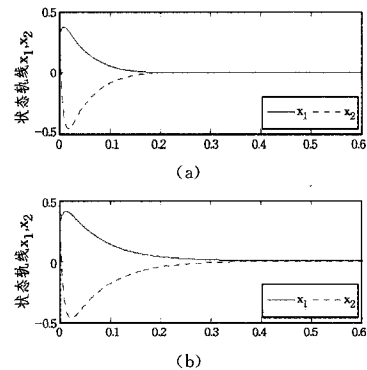


图 1 系统状态轨线对比图

评价值的大小对纱线质量实体元素排序: $W_5 > W_3 > W_4 > W_2 > W_1$ 。

经过 Step1 到 Step6, 依照该质量评价模型对 5 条待评价的纱线质量数据做出质量评价。经对比, 该模型得出的评价数据与最初评价模式的评结果一致, 且该模型实现简单, 不依赖专家经验仅依靠自身数据即可挖掘出对纱线质量影响较大的属性指标, 更具科学性和准确性。

结束语 针对现有纺织企业纱线质量评价体系的不足, 将粗糙集理论应用到纱线质量评价中, 提出一种新的纱线质量评价模型, 借助于文中提出的离散化算法和评价度量函数, 实现对纱线质量实体的综合评价。与传统的方法相比, 该方法简单易用, 仅依靠自身所提供的信息来进行评价, 其结果更加客观准确。实验分析表明所提出的模型在误差允许范围内是有效可行的, 而且实现简单, 并有效降低了时间复杂度。

(上接第 541 页)

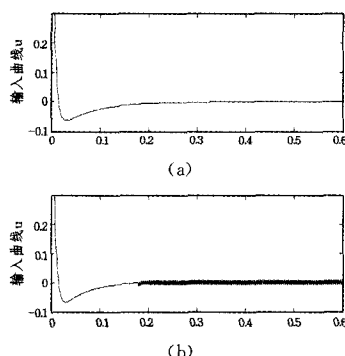


图 2 控制输入曲线对比图

从仿真图中可以看出, 采用 Delta 算子 S 变速趋近律(7)设计的滑模软切换控制系统, 闭环极点趋近于对应的连续系统的闭环极点, 系统仍然渐近稳定。该系统既能快速趋近切换面, 又最终稳定于平衡状态, 颤振幅度小于采用指数趋近律的情形。若采用 Delta 算子变速趋近律(5), 在趋近过程中, 系统有较大的颤振, 不利于控制器的长期运行。若采用 Delta 算子饱和趋近律(6), 虽然系统也能较好的运行, 但改变仿真中的不确定项参数时, 由于系统不具有鲁棒性, 会导致控制器无法实现。而基于 Delta 算子 S 变速趋近律(7)设计的滑模软切换控制系统则在趋近运动过程有一定的偏差, 在滑模运动过程内, 与上述仿真几乎一样。

结束语 本文利用具有光滑性、严格单调性和饱和性的 sigmoid 函数, 提出了一种 Delta 算子 S 变速趋近律, 设计了不确定 Delta 算子系统的滑模软切换控制器, 消除了前向移位算子在采样频率很高时易产生的病态问题, 优化了快速采样控制系统, 具有良好的动态性能。另外, 具有随机和时滞的 Delta 算子采样系统是进一步研究的工作重点。

参考文献

- [1] Suchomski P. Numerically robust delta-domain solutions to discrete-time Lyapunov equations[J]. System & Control Letters, 2002, 47(4): 319-326
- [2] 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
- [3] 林瑞全, 陈四连, 丁旭玮. 基于 Delta 算子的永磁直线同步电机非脆弱保性能速度控制器设计[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(11): 1443-1447

参考文献

- [1] 罗书强, 何玉林, 贾彦民, 等. 基于数据仓库的集成质量决策支持系统的研究[J]. 计算机工程与应用, 2001, 37(6): 1-3
- [2] 周丹晨. 融合粗糙集和商空间的企业级信息系统日志挖掘方法[J]. 计算机科学, 2014(S1): 421-422
- [3] 詹俊, 费树岷. 基于数据挖掘的纺织企业质量管理系统[J]. 江苏纺织, 2013(1): 42-46
- [4] Sai Y, Yao Y Y, Zhong N. Data analysis and mining in ordered information tables[C]//Proc. IEEE Int'l Conf. on Data Mining. 2001: 497-504
- [5] 庞南生, 张洪青. 一种基于 Spearman 秩相关系数与熵的多属性决策方法[J]. 运筹与管理, 2003, 12(5): 52-56
- [6] 刘振华, 刘三阳, 王珏. 基于信息量的一种属性约简算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2003, 30(6): 835-838
- [4] Won W, Lee K. Identification of a multivariable Delta operator stochastic state-space model with distributed time delays; application to a rapid thermal processor[J]. Computers & Chemical Engineering, 2012, 40(11): 223-230
- [5] 刘云龙. 变结构控制策略及在广义系统和 δ 算子系统中设计研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012
- [6] 代小红. 一种非线性离散动态投入产出系统的最优控制[J]. 计算机科学, 2012, 39(8): 256-272
- [7] 肖会敏, 赵林, 王春花. 不确定时滞切换系统的鲁棒滑模控制[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(11): 1621-1626
- [8] 李炜, 曹慧超. 不确定 NCS 动态输出反馈鲁棒 H_∞ 保性能容错控制[J]. 计算机科学, 2012, 39(7): 305-312
- [9] 刘云龙, 高存臣, 任启峰, 等. 水下机器人基于 sigmoid 函数的软变结构控制[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(2): 90-95
- [10] Liu Y, Gu S, Kao Y, et al. Soft variable structure controller design for constrained systems based on S-class functions[J]. Neural Computing & Applications, 2015, 26(3): 705-711
- [11] Liu Y, Zhang C, Gao C. Dynamic soft variable structure control of singular systems[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2012, 17(8): 3345-3352
- [12] Liu Y, Kao Y, Gu S, et al. Soft variable structure controller design for singular systems[J]. Journal of the Franklin Institute, 2015, 352(4): 1613-1626
- [13] 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
- [14] 姚郁, 张瑞. Delta 算子不确定系统扩展参数依赖 H_∞ 控制[J]. 控制与决策, 2009, 24(2): 293-296
- [15] 王武, 郭祥贵, 冉华军, 等. Delta 算子描述系统的非脆弱 H_∞ 滤波器设计[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(6): 1072-1076
- [16] 肖民卿, 苏宏业, 徐巍华. Delta 算子时滞系统的可靠 D-镇定[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(1): 77-83
- [17] 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
- [18] 刘云龙, 韩星海, 唐述宏. 基于趋近律方法的 Delta 算子滑模变结构控制系统[J]. 计算机应用, 2013, 33(8): 2397-2400
- [19] 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
- [20] Yang H, Xia Y, Shi P. Observer-based sliding mode control for a class of discrete systems via Delta operator[J]. Journal of the Franklin Institute, 2010, 347(7): 1199-1213