第16卷第3期 控制与决策 2001年5月
Vol 16 No. 3 CONTROL AND DECISION May 2001

文章编号: 1001-0920(2001)03-380-03

无抖振离散准滑模控制

于双和, 强文义, 傅佩琛
(哈尔滨工业大学 控制工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘　要: 基于对常规离散准滑动模态及其抖振的分析, 提出将离散趋近律与等效控制相结合的控制策略, 既保证了趋近模态具有良好品质, 又降低了准滑动模态带。该控制策略可避免系统状态步步反向穿越滑动面的抖振运动, 从而消除了控制的抖振, 并以较少的控制能量获得较好的系统性能。

关键词: 离散趋近律; 准滑动模态; 等效控制; 抖振消除

中图分类号: TP 273　　　**文献标识码**: A

Chattering-free Discrete Quasi-sliding Mode Controller

YU Shuang-he, QIANG Wen-yi, FU Pei-chen
(Department of Control Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Based on the analysis of the conventional discrete quasi-sliding mode and its chattering, the control strategy combining discrete quasi-sliding mode control with discrete equivalent control is presented. Not only the good qualities of the reaching mode preserved are ensured, but also the undesired chattering of the system states and the control signal with crossing the surface again in every successive sampling period are avoided. A good performance of the system is achieved using reduced control effort.

Key words: discrete reaching law; quasi-sliding mode; equivalent control; chattering elimination

1 引　　言

变结构控制(VSC)系统具有一种独特的运动模式——滑动模态, 其突出优点是具有不变性[1]。当应用于计算机控制系统时, 有限的转换频率影响了VSC系统的不变性, 系统状态在滑动面附近运动, 从而形成了准滑动模态[2~4], 且存在系统状态和控制的抖振。

本文提出将离散趋近控制与离散等效控制相结合的控制策略, 在保持离散趋近律法优点的同时, 可消除系统状态和控制的抖振, 提高系统的稳态精度。

2 控制律设计及稳定状态分析

考虑不确定离散系统

$$x(k+1) = (A+\Delta A)x(k) + (B+\Delta B)u(k) + d(k) \quad (1)$$

式中, $x(k)\in R^n$, $u(k)\in R^m$, (A, B) 可控, ΔA 和 ΔB 表示系统参数变化, $d(k)$ 为外部干扰。ΔA, ΔB 和 $d(k)$ 的影响可等效为一个外部干扰[5]

$$\Phi_{eq}(k) = \Delta A\, x(k) + \Delta B\, u(k) + d(k) \quad (2)$$

离散系统的滑动面为

$$s(k) = C^{T}x(k) \quad (3)$$

文献[2]以等式形式提出了离散趋近律

收稿日期: 2000-01-07; **修回日期**: 2000-08-04
作者简介: 于双和(1968—), 男, 黑龙江巴彦人, 博士生, 从事变结构控制、智能控制等研究; 强文义(1937—), 男, 江苏无锡人, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、机器人控制等研究。

$$s(k+1)=(1-qT)s(k)-\epsilon T\,\mathrm{sgn}(s(k))$$
$$\epsilon>0,\quad q>0,\quad 1-qT>0 \tag{4}$$

在滑动面附近 $s(k)\to 0$, 结果 $s(k+1)\approx -\epsilon T\,\mathrm{sgn}(s(k))$, 形成步步反向穿越滑动面的抖振运动 —— 准滑动模态。由此看出, 离散趋近律在准滑动模态阶段一直有效, 并形成了抖振运动。

基于在连续系统中等效控制能够保持系统状态在滑动面上的观点, 本文提出了在准滑动模态阶段, 控制律由离散趋近控制转为离散等效控制的设计方法。由式(1)～(4) 得离散趋近控制为

$$u_r(k)=-(C^{\mathrm T}B)^{-1}[C^{\mathrm T}Ax(k)+C^{\mathrm T}\phi_{\mathrm{eq}}(k)-C^{\mathrm T}x(k)+qTC^{\mathrm T}x(k)+\epsilon T\,\mathrm{sgn}(C^{\mathrm T}x(k))] \tag{5}$$

2.1 名义系统($\phi_{\mathrm{eq}}(k)=0$)

文献[3] 推得准滑动模态带

$$|s(k)|<\frac{\epsilon T}{1-qT} \tag{6}$$

离散趋近控制(5) 使系统状态在第 k_0 采样时刻进入准滑动模态后, 应转为等效控制

$$u_{\mathrm{eq0}}=-(C^{\mathrm T}B)^{-1}C^{\mathrm T}Ax(k)$$

使得　$s(k+1)=0,\quad k=k_0,k_0+1,\cdots$

在控制(5) 和(6) 作用下, 名义系统的状态在有限时间内能准确到达并保持在滑动面上。

2.2 有界不确定性系统($d_l\le d_{\mathrm{eq}}(k)=C^{\mathrm T}\phi_{\mathrm{eq}}(k)\le d_u$)

已知常数 d_l 和 d_u, 平均干扰 d_0 及最大允许偏差 δ_d 分别为

$$d_0=\frac{d_l+d_u}{2},\quad \delta_d=\frac{d_u-d_l}{2}$$

有

$$d_0+\delta_d\,\mathrm{sgn}(s(k))=\begin{cases}d_u, & s(k)>0\\ d_l, & s(k)<0\end{cases} \tag{7}$$

为实现控制(5), 以 $d_0+\delta_d\,\mathrm{sgn}(s(k))$ 代替 $C^{\mathrm T}\phi_{\mathrm{eq}}(k)$, 得到离散趋近律

$$s(k+1)=(1-qT)s(k)-\epsilon T\,\mathrm{sgn}(s(k))-d_0-\delta_d\,\mathrm{sgn}(s(k))+d_{\mathrm{eq}}(k) \tag{8}$$

在式(8) 中, 等号后第 1 项与 $s(k)$ 符号相同, 第 2 项与 $s(k)$ 符号相反, 后 3 项之和与 $s(k)$ 符号相反。所以, 满足 $\mathrm{sgn}(s(k+1))=-\mathrm{sgn}(s(k))$ 的准滑动模态区域为

$$|s(k)|<\frac{2\delta_d+\epsilon T}{1-qT} \tag{9}$$

系统状态将于某采样时刻 k_0 进入准滑动模态(9) 后, 转为离散等效控制

$$u_{\mathrm{eq1}}=-(C^{\mathrm T}B)^{-1}[C^{\mathrm T}Ax(k)+d_{\mathrm{eq}}(k)]$$
$$k=k_0,k_0+1,\cdots \tag{10}$$

由于 $d_{\mathrm{eq}}(k)$ 未知, 故以 d_0 代替式(10) 中的 $d_{\mathrm{eq}}(k)$, 系统的稳定状态为

$$|s(k+1)|=|d_{\mathrm{eq}}(k)-d_0|\le\delta_d \tag{11}$$

与文献[3] 相比, 系统准滑动模态的宽度降低了一半以上。

2.3 未知不确定性界系统

在不确定性的界未知时, 如果系统不确定性在每一段连续的采样间隔内变化的界已知, 即

$$\Delta_l\le d_{\mathrm{eq}}(k)-d_{\mathrm{eq}}(k-1)=C^{\mathrm T}\phi_{\mathrm{eq}}(k)-C^{\mathrm T}\phi_{\mathrm{eq}}(k-1)\le\Delta_u \tag{12}$$

$$\Delta_0=\frac{\Delta_u+\Delta_l}{2},\quad \Delta_d=\frac{\Delta_u-\Delta_l}{2}$$

$$\Delta_0+\Delta_d\,\mathrm{sgn}(s(k))=\begin{cases}\Delta_u, & s(k)>0\\ \Delta_l, & s(k)<0\end{cases} \tag{13}$$

式(2) 表示的系统等效干扰 $\phi_{\mathrm{eq}}(k)$ 是未知的, 但 $\phi_{\mathrm{eq}}(k-1)$ 可计算如下

$$\phi_{\mathrm{eq}}(k-1)=\Delta Ax(k-1)+\Delta Bu(k-1)+d(k-1)=x(k)-Ax(k-1)-Bu(k-1) \tag{14}$$

为实现控制(5), 以 $\Delta_0+\Delta_d\,\mathrm{sgn}(s(k))+d_{\mathrm{eq}}(k-1)$ 代替 $C^{\mathrm T}\phi_{\mathrm{eq}}(k)$, 得到离散趋近律

$$s(k+1)=(1-qT)s(k)-\epsilon T\,\mathrm{sgn}(s(k))-\Delta_0-\Delta_d\,\mathrm{sgn}(s(k))+d_{\mathrm{eq}}(k)-d_{\mathrm{eq}}(k-1) \tag{15}$$

同理, 满足 $\mathrm{sgn}(s(k+1))=-\mathrm{sgn}(s(k))$ 的准滑动模态区域为

$$|s(k)|<\frac{2\Delta_d+\epsilon T}{1-qT} \tag{16}$$

系统状态将于某采样时刻 k_0 进入准滑动模态(16) 后, 转为离散等效控制, 使得

$$u_{\mathrm{eq2}}=-(C^{\mathrm T}B)^{-1}[C^{\mathrm T}Ax(k)+\Delta_0+d_{\mathrm{eq}}(k+1)]$$
$$k=k_0,k_0+1,\cdots \tag{17}$$

以 $\Delta_0+d_{\mathrm{eq}}(k-1)$ 代替 $d_{\mathrm{eq}}(k)$, 系统的稳定状态为

$$|s(k+1)|=|d_{\mathrm{eq}}(k)-d_{\mathrm{eq}}(k-1)-\Delta_0|\le\Delta_d \tag{18}$$

注 1　对于慢变不确定性($\Delta_d\ll\delta_d$), 该方法较利用不确定性的界所得到的稳定性大为降低。由于 $\Delta_0-\Delta_d\le d(k)-d(k-1)\le\Delta_0+\Delta_d$, 当 $d_{\mathrm{eq}}(k)=d_{\mathrm{eq}}(k-1)$ 或 $d_{\mathrm{eq}}(k)=d_{\mathrm{eq}}(k-1)+\Delta_0$ 匀速变化时, 系统状态将准确到达并保持在滑动面上。

注 2　离散等效控制 u_{eq0}, u_{eq1} 和 u_{eq2} 中都不含有转换项, 从而消除了准滑动模态阶段控制的抖振。

3 仿真分析

考虑与文献[2]相同的系统及滑动面。等效干扰为 $d_{eq}(k) = 0.5\sin(2\pi k/K) + 0.5, K = 50$; 转换为离散等效控制的区域分别为 $|s(k)| \le 0.667$, $|s(k)| \le 2$, $|s(k)| \le 0.833$。图1～图3分别为名义系统、有界不确定性系统和未知不确定性界系统的仿真结果。其中, 虚线为仅采用离散趋近律方法, 实线为本文提出的离散趋近律与离散控制相结合的控制方法。

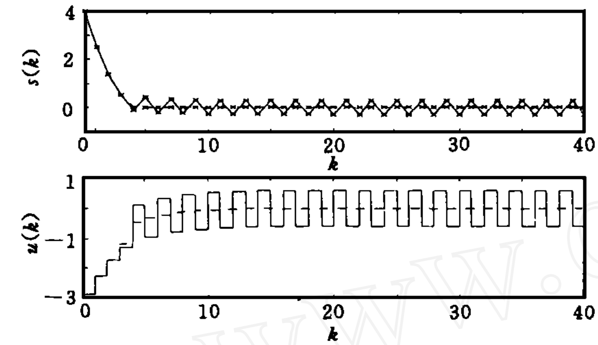

图 1 名义系统响应特性

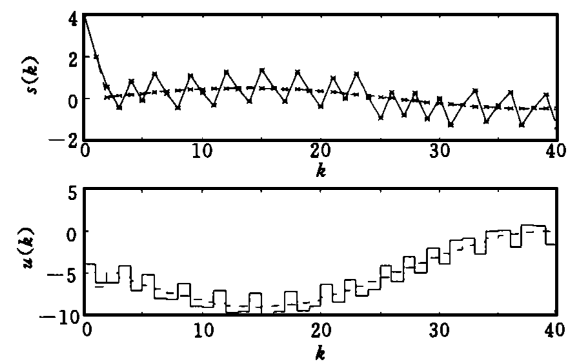

图 2 有界不确定性离散系统的响应特性

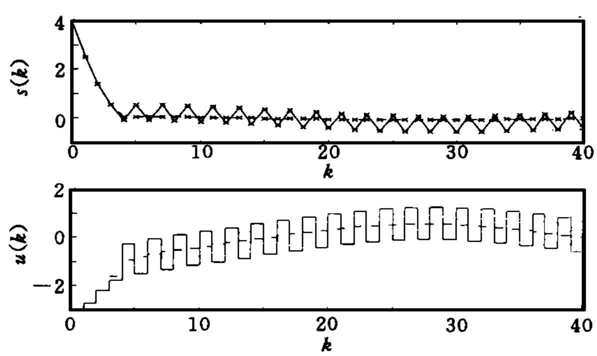

图 3 未知不确定性界的离散系统的响应特性

仿真结果表明, 当系统的等效不确定性变化率较低时, 即使等效不确定性的界已知, 图 3 的方法也优于图 2 的方法; 对于同样的不确定性, 利用较低控制能量可获得较高的稳态精度。

4 结 语

在离散滑模控制系统中, 离散趋近律仅在趋近阶段起作用。当系统状态到达准滑动模态阶段, 应采用离散等效控制, 以保证趋近过程的品质, 提高系统的稳态精度, 同时消除状态轨迹和控制的抖振。理论分析和仿真结果证明了该方法具有良好的控制品质。

参考文献:

[1] 高为炳. 变结构控制理论与设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1996.

[2] 高为炳. 离散时间的变结构控制[J]. 自动化学报, 1995, 21(2): 154-161.

[3] W Gao, Y Wang, A Homaifa. Discrete-time variable structure control systems[J]. IEEE Trans on Ind Electr, 1995, 42(2): 117-122.

[4] A Drzej Bartoszewicz. Discrete-time variable structure control systems[J]. IEEE Trans on Ind Electr, 1996, 43(1): 235-238.

[5] Elmali H, Olgac N. Sliding mode control with perturbation estimation (SMCPE): A new approach[J]. Int J Control, 1992, 56(4): 923-941.