第 4 卷　第 2 期　　光学　精密工程　　Vol. 4, No. 2
1996 年 4 月　　OPTICS AND PRECISION ENGINEERING　　April, 1996

一类基于输入—输出模型的离散变结构准滑模控制器及应用

刘新群
（中国科学院长春光学精密机械研究所，长春 130022）

摘要　讨论了一类基于离散控制对象输入—输出模型的离散变结构准滑模控制器，并将该控制器的设计应用于一全数字 PWM 直流伺服系统中，取得了满意的结果。

关键词：离散控制对象，输入—输出模型，离散变结构控制，准滑模

1　引　　言

变结构滑模控制对参数变化和扰动具有极强的鲁棒性以及具有优良的控制性能，因而受到国内外学者的高度重视。以往研究的变结构滑模控制器中，对象状态信息的获取和处理以及控制信号的产生都是以模拟形式出现的，滑模是这种系统的重要运动方式，这种变结构控制可称为模拟变结构控制（AVSS）[1,2]。数字信息及计算机的大量使用促使人们对全部离散或部分离散信息的变结构控制进行研究，这种变结构控制可称为离散变结构控制（DVSS）。

在离散变结构控制中，由于信号的离散化必然引入一些结构变换延时，因此得不到理想滑模，在这种情况下，只能称之为准滑模—动点在切换超平面的小邻域内波动。对离散变结构控制问题，迄今国内外文献中已有一些讨论[3,4,5]，取得了一些成果。但这些研究有一个共同特点，就是离散变结构准滑模控制器是对应的连续系统变结构滑模控制器的一种离散化等价形式，因此，为实现离散变结构准滑模控制，就需要取得系统的全部状态变量，这在许多情况下是困难的。

本文讨论一种离散变结构准滑模控制器的设计方法，使用该种方法，只要已知对象的脉冲传递函数，就可以进行控制器的设计。该方法的特点是，控制器的实现只需要获得系统偏差的当前值和过去值，而不是需要偏差的各阶导数值。

2　离散变结构准滑模控制器设计

设控制对象的脉冲传递函数为

收稿日期：1995 年 8 月 2 日

$$H(q)=\frac{y(k)}{u(k)}=\frac{b_1q^{n-1}+b_1q^{n-2}+\cdots+b_n}{q^n+a_nq^{n-1}+a_{n-1}q^{n-2}+\cdots+a_1} \tag{1}$$

系统偏差 $e(k)=r(k)-y(k)$。

不失一般性，设系统统定输入 $r(k)$为恒值，控制对象含有一个以上积分环节。取状态变量为

$$x_n(k)=e(k),\quad x_{n-i}(k)=e(k-i),\quad i=1,2,\cdots,n-1$$

则得系统状态方程为

$$\begin{bmatrix}x_1(k+1)\\x_2(k+1)\\\vdots\\x_n(k+1)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0&1&0&\cdots&0\\0&0&1&\cdots&0\\\vdots&\vdots&\vdots&\vdots&\vdots\\0&0&0&\cdots&1\\-a_1&-a_2&-a_3&\vdots&-a_n\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1(k)\\x_2(k)\\\vdots\\\vdots\\x_n(k)\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}0\\0\\\vdots\\0\\1\end{bmatrix}V(k) \tag{2}$$

式中

$$V(k)=\sum_{i-1}^{n}b_u(k-i+1) \tag{3}$$

设切换函数为

$$s(k)=\sum_{i-1}^{n}c_ix_i(k) \tag{4}$$

式中，c_i＝常数，$C_1=1$

切换超平面 $s(k)=0$ 的设计按离散系统控制理论进行，即选取 c_i 以得到具有期望特性的准滑模，如可用极点配置等方法。

关于离散变结构控制系统准滑模存在的条件，一个有用的结论已由文献〔4〕给出，即离散变结构控制系统切换超平面上准滑模存在的充要条件为

$$\left.\begin{aligned}&[s(k+1)-s(k)]s(k)<0\\&[s(k+1)+s(k)]s(k)>0\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

下面对系统进行离散变结构控制器设计。

1)取变结构控制器为

$$V(k)=\sum_{i=1}^{n}\psi_ix_i(k)\quad(1<1\leqslant n) \tag{6}$$

$$\psi_1=\left.\begin{aligned}&\alpha_i,s(k)x_i(k)\geqslant0\\&\beta_i,s(k)x_i(k)<0\end{aligned}\right\}$$

则沿系统运动的轨迹，有

$$\begin{aligned}s(k+1)-s(k)=&-(c_1+c_na_1)s(k)+\sum_{i=2}^{l-1}[c_{i-1}-c_i-a_ic_n+c_i(c_1+c_na_l)]x_i(k)\\&+\sum_{i=1}^{n}[c_{i-1}-c_i-a_ic_n+c_i(c_1+c_na_1)-c_n\psi_i]x_i(k)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}s(k+1)+s(k)=&(c_1-c_na_1)s(k)+\sum_{i=2}^{i-1}[c_{i-1}+c_i-a_ic_n-c_i(c_1-c_na_1)]x_i(k)\\&+\sum_{i=1}^{n}[c_{i-1}+c_i-a_ic_n-c_i(c_1-c_na_1)-c_n\psi_i]x_i(k)\end{aligned}$$

从而由(5),(6)式可得系统在 $s(k)=0$ 上准滑模存在的一个条件为下面两式同时满足

$$\left.\begin{array}{l} c_1+c_na_1>0 \\ c_{i-1}-c_i-a_ic_n+c_i(c_1+c_na_1)=0 \quad (i=2,3\cdots l-1) \\ c_{i-1}-c_i-a_ic_n+c_i(c_1+c_na_1)-c_n\alpha_i\leqslant 0 \quad (i=l,l+1\cdots n) \\ c_{i-1}-c_i-a_ic_n+c_i(c_1+c_na_1)-c_n\beta_i>0 \quad (i=l,l+1\cdots n) \end{array}\right\} \tag{7}$$

$$\left.\begin{array}{l} c_1-c_na_1>0 \\ c_{i-1}+c_i-a_ic_n-c_i(c_1-c_na_1)=0 \quad (i=2,3\cdots l-1) \\ c_{i-1}+c_i-a_ic_n-c_i(c_1-c_na_1)-c_n\alpha_i\geqslant 0 \quad (i=l,l+1\cdots n) \\ c_{i-1}+c_i-a_ic_n-c_i(c_1-c_na_1)-c_n\beta_i<0 \quad (i=l,l+1\cdots n) \end{array}\right\} \tag{8}$$

故由(3)式和(6)式得此时变结构控制为

$$u(k)=\frac{1}{b_1}\sum_{i=1}^{n}\psi_ix_i(k)-\frac{1}{b_1}\sum_{i=2}^{n}b_iu_i(k-i+1) \tag{9}$$

2)取变结构控制器为

$$V(k)=\sum_{i=1}^{n}\psi_ix_i(k) \tag{10}$$

$$\psi_1=\left.\begin{array}{l}\alpha_i, s(k)x_i(k)\geqslant 0\\ \beta_i, s(k)x_i(k)<0\end{array}\right\}$$

与上述同理,可得系统在 $s(k)=0$ 上准滑模存在的一个条件为下面两式同时满足

$$\left.\begin{array}{l} c_{i-1}-c_i-c_na_i-c_n\alpha_i\leqslant 0 \\ c_{i-1}-c_i-c_na_i-c_n\beta_i>0 \end{array}\right\} \tag{11}$$

$$\left.\begin{array}{l} c_{i-1}+c_i-c_na_i-c_n\alpha_i\geqslant 0 \\ c_{i-1}+c_i-c_na_i-c_n\beta_i<0 \end{array}\right\} \tag{12}$$

故由(3)式和(10)式得此时变结构控制为

$$u(k)=\frac{1}{b_1}\sum_{i=1}^{n}\psi_ix_i(k)-\frac{1}{b_1}\sum_{i=2}^{n}b_iu_i(k-i+1) \tag{13}$$

3 在 PWM 直流伺服系统中的应用

3.1 全数字 PWM 直流伺服系统

全数字 PWM 直流伺服系统基本硬件结构如图 1 所示。

系统用一片 8031 单片机控制。数字调宽(PWM)信号产生电路由一片 12 位计数器、一片 12 位寄存器、一片 12 位比较器和一个 R—S 触发器组成,计数器的时钟频率为 10MHz,从而计数器的溢出频率也就是 PWM 信号的频率为 2.4414KHz。当单片机向 12 位寄存器输出一调宽数字量 T_W 时,R—S 触发器便输出一相应宽度的 PWM 信号。由于采用了桥式 PWM 功放电路,为防止同侧桥臂上两只大功率晶体管同时导通,又加了逻辑延时保护环节。电机转角位置和转速的检测由一 10 位增量式编码器完成,编码器输出的两路 90°相差信号经过四倍频和辨向电路产生正向和反向脉冲信号,分别送给单片机上的两个 16 位计数器。控制系统的采样周期由外部中断 INT。和相应的软件决定,这里采样周期 h 是 PWM 信号周期的 10 倍,即 $h=0.004096$ 秒。图 2 给出了控制系统传递函数结构图。图中有关参数如下

$$K_1=4096, K_d=4.16667, K_{PWM}=0.01171875, T_m=0.08$$

3.2 离散变结构控制实验结果

由前述知 PWM 直流伺服系统控制对象传递函数为

$$G(s)=\frac{200}{s(0.08s+1)}$$

采样周期 $h=0.004096$ 秒，所以对有的脉冲传递函数为

$$H(q)=\frac{b_1q+b_2}{q^2+a_2q+a_1}$$

式中

$$a_1=0.9500886,$$

$$a_2=-1.9500886,$$

$$b_1=0.0206181, b_2=0.0202693$$

取状态变量为 $x_2(k)=e(k), x_1(k)=e(k-1)$；

选切换函数　$s(k)=x_1(k)-1.23x_2(k)$；

变结构控制取 $V(k)=\psi x_2(k)$ 即　$u(k)=\frac{1}{b_1}\psi x_2(k)-\frac{1}{b_1}b_2u(k-1)$

$$\psi=\begin{cases}\alpha, s(k)x_2(k)\geqslant 0\\ \beta, s(k)x_2(k)<0\end{cases}$$

经计算，可取 $\alpha=-0.1, \beta=3$。

实验结果如图 3 所示，为比较起见，图中同时给出了 PI 控制的结果。

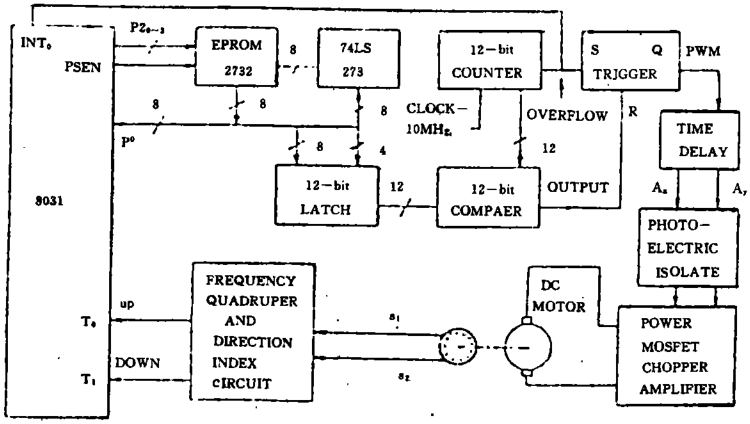

图 1　基本硬件结构框图

Fig. 1　Block diagram of system hardware representation

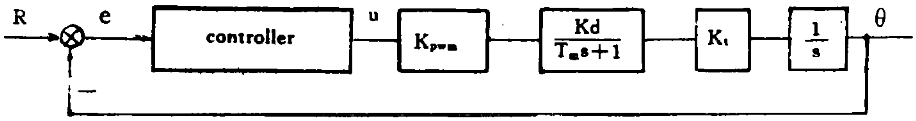

图 2　控制系统传递函数结构图

Fig. 2　Block diagram of the servo system

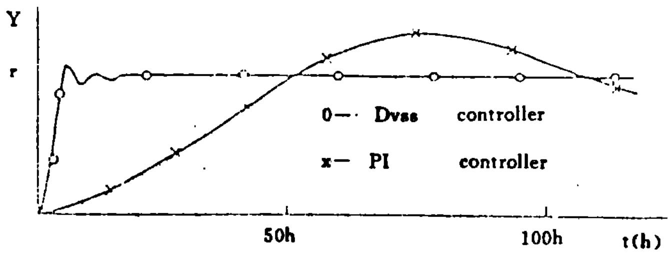

图 3　系统阶跃响应

Fig. 3　Step responses of the system

参考文献

〔1〕Utkin, V. I., Variable Structure Systems with Sliding Modes. IEEE Trans. Automat. Contr., 1977, **22**: 212—222

〔2〕Itkis, U., Control System of Variable Structure. Wile, New York, 1976

〔3〕Milosavljevic, C., General Conditions for the Existence of a Quasi—Sliding Mode on the Switching Hyperplane in Discrete Variable Strusture Systems. Automatic Remote Control, 1985, **46**: 307—314

〔4〕Sarpturk, S. Z., et al., On the Stability of Discrete Time Sliding Mode Control Systems. IEEE Trans. Automat. Contr., 1987, **32**: 930—932

〔5〕罗宁苏，冯纯伯，"Z"滑动模态分析与离散时间变结构控制器的设计．全国控制理论及应用年会论文集，西安：1989

Design and Application of a Kind of Discrete Variable Structure Controllers with Quasi-sliding Mode Based on Input-output Models

Liu Xinqun

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Changchun 130022)

Abstract

In this paper, we propose and discuss a new kind of discrete variable structure controllers. The design of this kind of controllers is based on input-output models. Satisfactory results are obtained in its application to a fully digital PWM DC servo system.

Key words: Discrete controlled objective, Input-output Models, Discrete variable structure control, Quasi-sliding mode

刘新群 男，生于1964年，副研究员。毕业于吉林工业大学电子工程系，1985年和1988年分别获得学士和硕士学位。1988年分配到中科院长春光机所，一直从事自动控制和计算机应用方面的工作，作为分系统负责人和课题骨干先后参加了三个重大军工项目的研制工作。感兴趣的领域：滑模变结构控制理论及应用，自适应控制，高精度全数字控制伺服系统，计算机控制系统。