

对象参数摄动定位系统中离散滑模控制器的设计及其应用*

李永华

(武汉汽车工业大学电子与信息学院·武汉, 430070)

徐枋同

方 军

(湖北省多媒体通信局·武汉, 430022)

摘要: 由直流脉宽调速系统(PWM)和位置环构成的定位系统中,速度环的参数随负载特性;电网电压;给定工况而摄动是不容忽视的.作者通过系统辨识建模也证实了这一事实^[1,2].因此在设计位置环的离散滑模控制时,必须针对速度环(即位置环的控制对象)的参数摄动范围采用“对象参数摄动离散滑模控制器的设计方法”,以确保系统在参数摄动时的稳定性和快速、无超调、准确定位的优良动态品质.为剖析该设计方法的控制效果,本文作了对比性研究,并将该设计方法用于工业试验中,取得了满意的结果.

关键词: 定位系统; 离散滑模控制; 参数摄动

Design and Applications of Discrete Sliding Mode Controller for Positioning Servo-Systems with Parameter Perturbance

Li Yonghua

(College of Electronic and Information, Wuhan Automobile Polytechnic University · Wuhan, 430070, P. R. China)

Xu Fangtong

(College of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering · Wuhan, 430072, P. R. China)

Fang Jun

(Hubei Multimedia Telecommunication Bureau · Wuhan, 430022, P. R. China)

Abstract: In the positioning servo-system, which generally is configured by the D. C. pulse width modulator (PWM) velocity governing system and position servo-loop, the parameter perturbation of PWM velocity loop really exist by reason of such as the load behavior; power voltage supply; operating setting value, etc.^[1,2], and it cannot be ignored. By using the identification technique to form the mathematical model of the system, authors have confirmed the facts. Therefore, to design the discrete sliding mode controller (DSMC) of the positioning servo-system, the perturbed parameters value bounds of the PWM velocity loop, which is as the controlled plant of position servo-loop, should be accounted. Consequently, the design principle of DSMC for accounting system with parameter perturbation is proposed by the authors. The proposed method can ensure the stability of system with parameter perturbation and the behavior of non-overshoot, fast precise positioning. In order to reveal the effects of the design method, the comparative research work is done by the authors. Also, it has been tested in an industrial experiment, the results proved it is satisfactory.

Key words: positioning servo-system; discrete sliding mode controller; parameter perturbation

1 考虑对象参数摄动离散滑模控制器设计 (Design of discrete sliding mode controller for plant with parameter perturbation)

1.1 确定性模型离散滑模控制器的设计——方法 1 (Design of discrete sliding mode controller for determinate model —— Method 1)

一单输入输出离散控制系统,其状态方程和输出方程可用(1)式来描述.

$$\begin{cases} X(k+1) = \Phi X(k) + \Gamma u(k), \\ y(k) = CX(k). \end{cases} \quad (1)$$

其中 $X(k)$ 为 n 维状态变量, $u(k)$ 为单输入, $y(k)$ 为单输出. 设滑模超平面为:

$$s(k) = \{X | GX(k) = 0\}. \quad (2)$$

下面将控制器参数设计分为两部分. 首先考虑系统已处于滑模超平面上, 此时应满足 $s(k+1) = s(k)$ 关系. 由(1)式和(2)式可以导出等价控制 $u_e(k)$ 如(3)式所示:

* 湖北省自然科学基金(96J003)资助项目.

本文于 1996 年 8 月 6 日收到, 1998 年 3 月 5 日收到修改稿.

$$u_e(k) = -(GF)^{-1}G(\Phi - I)X(k), \quad (3)$$

将(3)式代入(1)式,有

$$X(k+1) = [\Phi - \Gamma(GF)^{-1}G(\Phi - I)]X(k). \quad (4)$$

此时系统实质上为线性状态反馈控制. 矢量 $G = (g_1, g_2, \dots, g_n)$ 的设计应能保证下述离散系统稳定.

$$\begin{cases} X(k+1) = [\Phi - \Gamma(GF)^{-1}G(\Phi - I)]X(k), \\ GX(k) = 0. \end{cases} \quad (5)$$

其次,研究到达滑模超平面的条件. 即在状态空间系统的任一状态向量,可通过滑模控制器的控制作用使其到达滑模超平面. 选取李亚普诺夫函数 $v(k) = s^2(k)$, 则滑模运动存在的条件是:

$$v(k+1) < v(k). \quad (6)$$

令滑模控制器的输出形式为:

$$u(k) = (\Psi_e + \Psi)X(k) - \phi_0 s(k). \quad (7)$$

其中, $\Psi_e = -(GF)^{-1}G(\Phi - I)$;

$\Psi = (\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n)$ 为开关控制向量, ϕ_0 为增量. 当矢量 G 确定后, Ψ_e 即被确定. 而 Ψ 和 ϕ_0 的选择应满足滑模存在条件(6).

若 Ψ 和 ϕ_0 的取值满足下述条件^[3]:

$$1) \quad 0 < \rho < 1, \quad (8)$$

式中, $\rho \triangleq \phi_0(GF)$;

$$2) \quad \psi_i = \begin{cases} f_0, & \text{if } GFx_i(k)s(k) < -\delta_i, \\ 0, & \text{if } |GFx_i(k)s(k)| \leq \delta_i, \\ -f_0, & \text{if } GFx_i(k)s(k) > \delta_i. \end{cases} \quad (9)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, n$.

$$\delta_i = \frac{f_0(GF)^2}{2(1-\rho)} |x_i(k)| \sum_{j=1}^n |x_j(k)|, \quad (10)$$

$$0 < f_0 < \frac{2(1-\rho)|s(k)|}{|GF| \sum_{j=1}^n |x_i(k)|}, \quad (11)$$

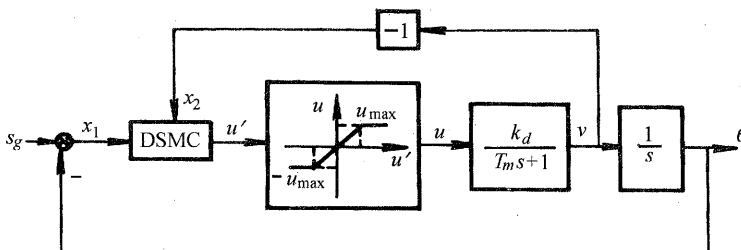


图1 位置伺服系统框图

Fig. 1 Block scheme of positioning servo-system

则滑模运动存在条件(6)能得到满足(证明从略).

1.2 考虑对象参数摄动的离散滑模控制器设计——方法2 (Design of discrete sliding mode controller for model with parameter perturbation——Method 2)

当对象参数摄动时,设离散状态方程(1)中状态矩阵 Φ 的增量为 $\Delta\Phi$, 且有以下形式:

$$\Delta\Phi = \Gamma D \quad (12)$$

$$D = [d_1 \quad d_2 \quad \dots \quad d_n], \quad |d_i| < \bar{d}, \quad (13)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n).$$

则方程式(1)变成了方程式(14).

$$\begin{cases} X(k+1) = (\Phi + \Delta\Phi)X(k) + \Gamma u(k), \\ y(k) = CX(k). \end{cases} \quad (14)$$

从而(9),(10),(11)式应相应地作如下修改^[4]:

$$\psi_i = \begin{cases} f_0, & \text{if } GFx_i(k)s(k) < -\delta'_i, \\ 0, & \text{if } |GFx_i(k)s(k)| \leq \delta'_i, \\ -f_0, & \text{if } GFx_i(k)s(k) > \delta'_i, \end{cases} \quad (15)$$

式中, $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

$$\delta'_i = \frac{(GF)^2}{2(1-\rho)} |x_i(k)| \sum_{j=1}^n |x_j(k)(f_0 + \bar{d})|, \quad (16)$$

$$\bar{d} < f_0 < \frac{2(1-\rho)|s(k)|}{|GF| \sum_{j=1}^n |x_i(k)|} - \bar{d}. \quad (17)$$

2 两种设计方法的对比仿真研究 (Simulation research of two design methods for comparison)

对同一参数摄动的被控对象,采用上述两种设计方法进行对比性研究,发现采用考虑对象参数摄动的离散滑模控制器设计方法所设计的系统,无论在品质鲁棒性方面还是在稳定鲁棒性方面都优于前者.

仿真研究的位置伺服系统如图1所示.

图1中,DSMC表示离散滑模控制器,其输出控制作用 u' 通过限幅环节 $\pm u_{\max}$ 转换为 u , u 作用于 PMW 调速系统. PWM 调速系统用 $\frac{K_d}{T_m s + 1}$ 来描述^[5]. 设其时间常数 T_m 有 50% 的参数的摄动,即 $\Delta T_m = \pm 0.5 T_m$. 设状态变量

$$x_1 = s_g - \theta; \quad (\text{位置误差}) \quad (18)$$

$$x_2 = \dot{x}_1 = -\dot{\theta} = -v; \quad (\text{速度(负值)}) \quad (19)$$

连续系统状态方程为

$$\dot{X} = AX + Bu. \quad (20)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T_m} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{K_d}{T_m} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

设采样周期为 T_s , 对(20)式进行离散化, 得离散状态方程:

$$X(k+1) = \Phi X(k) + \Gamma u, \quad (22)$$

其中

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & T_m - T_m e^{-\frac{T_s}{T_m}} \\ 0 & e^{-\frac{T_s}{T_m}} \end{bmatrix};$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} -K_d T_s + K_d T_m (1 - e^{-\frac{T_s}{T_m}}) \\ -K_d (1 - e^{-\frac{T_s}{T_m}}) \end{bmatrix}.$$

$G = [g_1 \ 1]$, 如前所述, 其中 g_1 的选择应保证式(5)的稳定性. 代入该系统的具体参数 $T_m = 0.083s$, $\Delta T_m \doteq \pm 0.5 T_m$ (对应于 $D = [0, \pm 0.2]$), $K_d = 5.488$, $T_s = 0.008s$, $\pm u_{\max} = \pm 0.205$, 系统特征值取 $z = 0.9, \rho = 0.5$. 分别用方法1和方法2设计离散滑模控制器. 用系统的动态响应 $v(t)$ 曲线, $\theta(t)$ 曲线, 相平面图和表1来说明方法2的优越性.

表 1 两种设计方法及其控制效果比较

Table 1 Comparison of two design methods with control effects

对象原始参数	参数摄动 D	设计方法 1 设计公式(9),(10),(11), $\bar{d} = 0$			设计方法 2 设计公式(15),(16),(17), $\bar{d} = 0.5$		
		速度和位移图	相平面图	控制效果	速度和位移图	相平面图	控制效果
$T_s = 0.008s$ $T_m = 0.083s$ $K_d = 5.488$	$D = [0 + 0.2]$	图 2 (a)		定位时 速度抖动	图 2 (b)		定位时 速度平滑
	$D = [0 - 0.2]$		图 3 (a)	不稳定 相平面发散	图 3 (b)		稳定 相平面收敛

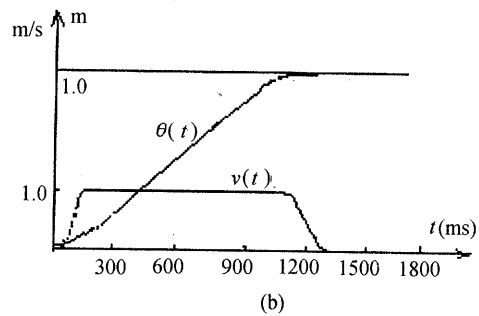
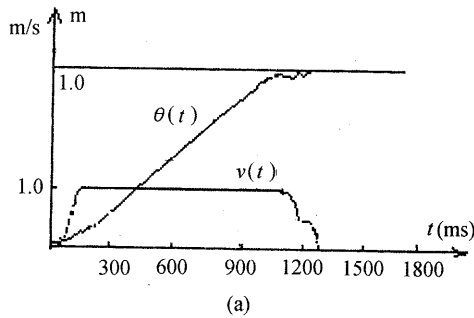


图 2 速度和位移图

Fig. 2 Velocity and displacement

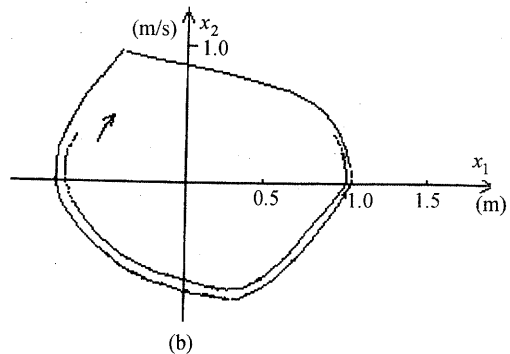
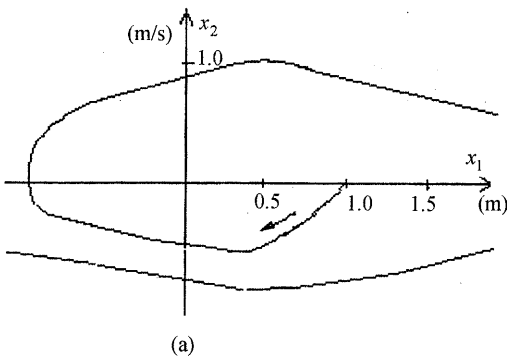


图 3 相平面图

Fig. 3 Phase plane

3 离散滑模控制器的工业试验 (Industrial test of discrete sliding mode controller)

图4所示的定位系统由一个16位工业控制机; PWM调速系统; 光电编码器; D/A转换器; 位置鉴相器和接口等组成. 采用方法2设计的离散滑模控

制器由计算机软件通过工业控制机实现. 位置和速度反馈量由光电编码器产生脉冲, 通过鉴相器, 位置接口、速度接口输入给工业控制机. 以取得离散滑模控制所需的位置误差信号和速度信号. 被试验的工业对象为某蛇型管弯管机定长送料系统. 软件用8088

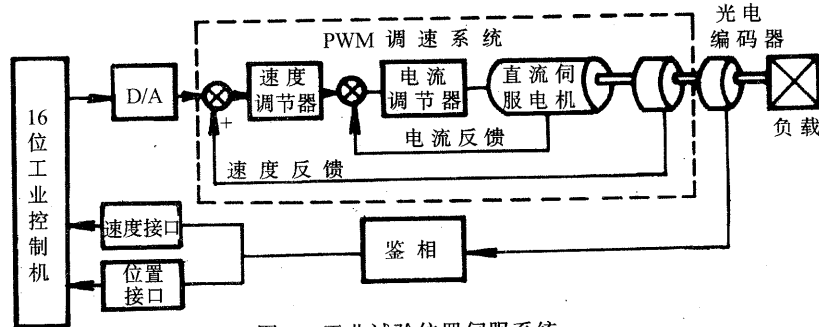


图4 工业试验位置伺服系统

Fig. 4 Industrial test of positioning servo-system

汇编语言编制. 工业试验结果如图5所示, 其中图5(a)为大给定 $s_g = 1.94\text{m}$ 时的速度和位移曲线. 此时速度为矩形波, 矩形的高度为系统所允许的最高速度. 位移变化均匀且无超调. 图5(b)为小给定 $s_g = 0.52\text{m}$ 的速度和位移曲线. 此时速度为三角波, 位移变化均匀且无超调.

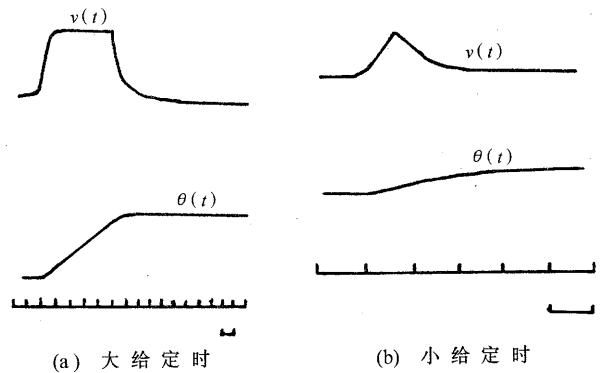


图5 实测速度和位移图

Fig. 5 Real testing diagram of velocity and displacement

4 结束语 (Conclusion)

用方法2设计离散滑模控制器, 当对象参数摄动时, 系统具有良好的品质鲁棒性和稳定鲁棒性.

参考文献 (References)

- 徐枋同等. 双环直流脉宽调速系统动态模型. 电气传动, 1993, 23(2): 36-41
- 李永华等. 调速系统变负载动态特性辨识. 电气自动化, 1994, 16(4): 43-44
- Chan C Y. Servo-systems with discrete variable structure control. systems & Control Letters, 1991, 17(1): 321-325
- Katsuisa Furuta. Sliding mode control of a discrete system. Systems & Control Letters, 1990, 14(1): 145-152
- 王离九等. 电力拖动自动控制系统. 武汉: 华中理工大学出版社, 1991

本文作者简介

李永华 女. 1938年生. 武汉汽车工业大学教授, 电子与信息学

院自动控制研究所所长, 湖北省自动控制学会常务理事. 1960年毕业于华中理工大学工业电气自动化专业. 1982年至1984年在东京工业大学制御工学科作访问学者. 1988年曾为东京工业大学客座研究员. 在国内外发表论文40余篇. 主要研究方向为计算机数控(CNC), 控制系统的分析与综合、建模与仿真. 主持的科研项目“CNC蛇型管弯管机”1995年获湖北省科技进步一等奖.

徐枋同 1933年生. 武汉水利电力大学教授, 博士生导师. 主要研究领域为系统辨识建模自控系统的分析与综合等. 发表相关专业的论文40余篇, 著书2本.

方军 1970年生. 武汉汽车工业大学硕士生. 湖北省邮电管理局一省多媒体通信局, 助工. 目前研究兴趣为数学多媒体通讯.