

基于模糊滑模控制器的伺服跟踪控制研究

解旭辉, 戴一帆, 李圣怡

(国防科技大学 机电工程与自动化学院 机电工程研究所, 湖南 长沙 410073)

摘要: 为了有效地消除精密机床伺服进给系统的参数变化和外部扰动对其跟踪性能的影响, 将滑模控制引入其伺服跟踪控制. 文章将模糊逻辑与滑模控制相结合提出了一种简捷的模糊滑模控制器设计的方法以减小滑模控制器的颤抖. 实验结果表明采用该方法设计的模糊滑模控制器与离散准滑模控制器相比具有较强的鲁棒性和跟踪性能. 最后将该控制器用于超精密机床伺服跟踪控制取得了良好的控制效果.

关键词: 模糊逻辑; 滑模控制; 伺服系统; 超精密机床

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Fuzzy sliding mode controller for servo tracking control in precision machine tools

XIE Xu-hui, DAI Yi-fan, LI Sheng-yi

(School of Mechantronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Hunan Changsha 410073, China)

Abstract: Detail research was given to servo tracking controller design that utilized the sliding mode control theory in order to achieve robust tracking performance in precision machine tools subject to parameter variations and external disturbance. A type of fuzzy sliding mode controller was presented by incorporating the fuzzy logic with the sliding mode control to alleviate the chattering of the sliding mode controller. Experimental results showed that this fuzzy sliding mode controller had more robustness and better tracking performance than the sliding mode controller and PID.

Key words: fuzzy logic; sliding mode control; servo control system; precision machine tools

1 引言(Introduction)

目前在精密机床伺服进给系统的高精度伺服控制中, 机械传动机构的非线性控制一直是一个棘手的问题. 由于难以用严格的数学手段进行精确数学描述、分析和处理, 因而在控制系统设计中经常将其作为一种可以忽略的现象加以处理. 然而, 机床伺服运动非线性所引起的一系列问题又与机床的定位、跟踪控制的精度有直接的联系, 如: 机床伺服系统的低速运动的“颤振”; 精密定位中的极限环以及运动换向所产生的较大跟踪误差等等问题.

本文在对精密机床伺服进给系统机构动力学模型以及系统非线性分析与测试的基础上提出了一种基于模糊滑模控制的自适应跟踪控制策略. 实验表明, 该控制策略可以有效地改善系统的定位和跟踪误差.

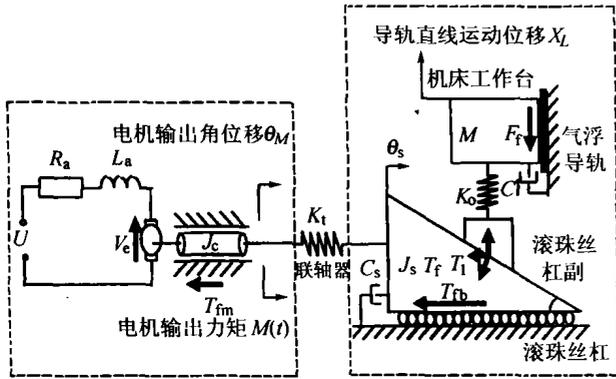
2 精密机床伺服进给系统动力学模型及非线性分析(Dynamic model of feed system in precision machine tool and its nonlinear characteristic analysis)

2.1 精密机床伺服进给系统的动力学模型结构 (Dynamic model of feed system in precision machine tool)

精密机床伺服进给系统的动力学模型由直流伺服驱动系统的动力学模型和机床机械传动机构的动力学模型两部分组成. 对于采用直流伺服驱动系统而言, 其自身即为一完整的电动力学系统, 其动力学模型可以用电机的电枢回路的电压平衡方程和电机力矩平衡方程描述^[1,2]. 动力学模型的结构如图1(a)所示. 同样, 机床机械传动机构也是一个完整的机械动力学系统, 它承受的外力有电机的输出力矩、传动件及导轨的 stick/slip 摩擦力、切削抗力(对于精密加工而言, 一般可以忽略不计). 其相应的动力学模型如图1(b).

图中 U 为电枢电压; L_a 为电枢电感; R_a 为电枢电阻; V_e 为伺服电机的反电动势; T_{fm} 为伺服电机支承轴承的摩擦转矩; K_t 为弹性联轴结刚度; J_e 为丝杠与电机之间连接件的折算转动惯量; J_s 为丝杠的

折算转动惯量; θ_s 为丝杠的输出角位移; T_{fb} 为丝杠副摩擦转矩; C_s 为丝杠副的阻尼系数; T_1 为丝杠的输出转矩; T_f 为摩擦转矩; K_o 为丝杠刚度; C_1 为气浮导轨的阻尼系数; F_f 为气浮导轨的摩擦力; M 为机床工作台质量.



(a) 伺服驱动系统动力学模型 (b) 传动机构动力学模型

图1 精密机床伺服进给系统动力学模型

Fig. 1 Dynamic model of feed system in precision machine tool

2.2 精密机床伺服进给系统非线性分析 (Nonlinear characteristic analysis)

图2为作者对机床的伺服进给系统 X 轴的非线性进行测试的结果. 由图所示结果结合机床的伺服进给系统的动力学模型分析, 可以将系统在低速进给时产生较大的爬行非线性的主要原因归结为:

- 1) 伺服进给系统的丝杠副运动存在机械间隙;
- 2) 在机械传动机构的支承轴承和丝杠副运动时, 存在 stribek 摩擦^[5];
- 3) 机床丝杠传动机构与伺服电机之间的弹性联轴结使系统存在一自由度使进给系统缺乏足够的机械刚度来抑制进给系统的 stribek 摩擦运动.

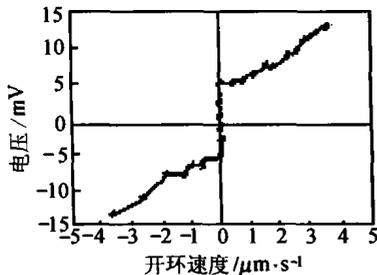


图2 机床伺服进给系统开环速度特性

Fig. 2 Velocity characteristic of feed system in open loop

3 模糊滑模控制器设计 (Design of fuzzy sliding mode controller)

3.1 精密机床伺服进给系统滑模控制的系统描述 (Description of sliding mode control for feed system)

根据以上分析, 精密机床伺服进给系统的状态

可以用一单输入单输出的 n 阶非线性离散系统描述为

$$\begin{cases} x_i(k+1) = Tx_{i+1}(k) + x_i(k) & (i = 1, 2, \dots, n-1), \\ x_n(k+1) = Tf(x(k)) + Tb(x(k))u(k) + x_n(k). \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$x^T = [x_1(k) \quad x_2(k) \quad \dots \quad x_n(k)]$$

为系统的状态空间变量, $u(k)$ 为系统的输入, T 为控制器的采样间隔, 输出 $y = x_1(k)$.

伺服跟踪控制的目标是在系统存在参数变化、外部扰动等不确定性条件下确定系统反馈控制输入 $u(k)$ 使闭环系统的状态 x^T 跟踪系统的期望状态

$$x_d^T = [x_{d1}(k) \quad x_{d2}(k) \quad \dots \quad x_{dn}(k)],$$

使系统的状态误差

$$e^T = x^T - x_d^T = [e_1(k) \quad e_2(k) \quad \dots \quad e_n(k)]$$

渐趋于零. 因此, 本文可以根据系统的控制目标, 以系统的状态跟踪误差作为系统的状态空间变量将系统重新描述为

$$\begin{cases} e_i(k+1) = Te_{i+1}(k) + e_i(k) & (i = 1, 2, \dots, n-1), \\ e_n(k+1) = Tf(e(k)) + Tb(e(k))u(k) + e_n(k). \end{cases} \quad (2)$$

滑模控制设计的基本思路是定义控制器的切换函数 $s(k) = C^T e$, 其中 $C^T = [c_1, c_2, \dots, c_n]$, $c_i > 0$. $s(k) = 0$ 将系统的状态空间分割为 2 个区域, 每个空间具有不同的控制结构. 当系统的状态 e^T 在位于切换曲面 $s(k) = 0$ 的邻域内时, 若系统反馈控制输入 $u(k)$ 使系统的状态趋向于切换曲面时, 系统的状态将到达切换曲面 $s(k) = 0$ 并保留在该曲面内滑动, 其中 $u(k)$ 为不连续控制. 其定义如下:

$$u(k) = \begin{cases} u^+, & s(k) > 0, \\ u^-, & s(k) < 0. \end{cases}$$

式中 $u^+ \neq u^-$; $s(k) = 0$ 是切换函数.

根据以上分析, 可以看出精密机床的伺服跟踪控制问题可以等价于保持滑模控制器的切换函数 $s(k) = 0$ 的问题.

根据上述控制目标, 滑模控制器设计的第二步是合理选择反馈控制输入 $u(k)$ 使系统满足滑模的能达性条件: $s(k) \cdot \Delta s(k) < 0$. 即满足:

$$s(k) \cdot \Delta s(k) = T \left(\sum_{i=1}^{n-1} c_i e_{i+1}(k) - f(e(k)) - b(e(k))u(k) \right) s(k) < 0. \quad (3)$$

滑模控制器应满足的第二个条件是滑模运动的稳定性, 即使滑模控制系统在满足 $s(k) \cdot \nabla s(k)$

< 0 的同时应使系统的任意状态轨迹沿系统的滑模表面趋向于系统状态空间的原点,从而实现机床进给系统的稳定跟踪。

根据 Lyapunov 第二方法,本文定义如下离散 Lyapunov 函数:

$$V[s(k)] = \frac{1}{2}s^2(k) > 0, s(k) \neq 0. \quad (4)$$

该离散 Lyapunov 函数的 ΔV 定义为

$$\Delta V[s(k)] = V[s(k+1)] - V[s(k)] = s(k)\Delta s(k) + \frac{1}{2}\Delta s(k)^2.$$

其中

$$\Delta s(k) = s(k+1) - s(k). \quad (5)$$

由 Lyapunov 稳定性判据可以得出如下结论:滑模控制系统在满足 Lyapunov 稳定性,即: $\Delta V[s(k)] < 0$ 和 $s(k) = 0$ 为稳定滑模表面的条件下,控制系统的任意状态轨迹将沿系统的滑模表面趋向于系统状态空间的原点,即实现系统的稳定跟踪。

3.2 模糊滑模控制器设计 (Design of fuzzy sliding mode controller)

基于以上分析,在假设对于任意的 $e(k)$ 有 $b(e(k)) > 0$ 成立的前提下,本文可以直观地得出如下两条结论:

- 1) $\Delta s(k) = T(\sum_{i=1}^{n-1} c_i e_{i+1}(k) - f(e(k)) - b(e(k))u(k))$ 随 $u(k)$ 的减小而增大,反之亦然;
- 2) 由式(3)可以看出,若 $s(k) > 0$,增大 $u(k)$ 将使 $s(k) \cdot \Delta s(k)$ 减小;反之,若 $s(k) < 0$,增大 $u(k)$ 将使 $s(k) \cdot \Delta s(k)$ 增大。

表 2 模糊滑模控制查询表

Table 2 Control table of fuzzy sliding mode controller

| 控制量 U | ΔS | | | | | | | | | | | |
|---------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|--|
| | -1.0 | -0.8 | -0.6 | -0.4 | -0.2 | 0.0 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1.0 | |
| -1.0 | -1.0 | -1.0 | -1.0 | -1.0 | -0.9 | -0.8 | -0.7 | -0.6 | -0.4 | -0.2 | 0.0 | |
| -0.8 | -1.0 | -1.0 | -1.0 | -0.9 | -0.8 | -0.7 | -0.6 | -0.4 | -0.2 | 0.0 | 0.2 | |
| -0.6 | -1.0 | -1.0 | -0.9 | -0.8 | -0.7 | -0.6 | -0.4 | -0.2 | 0.0 | 0.2 | 0.4 | |
| -0.4 | -1.0 | -0.9 | -0.8 | -0.7 | -0.6 | -0.4 | -0.2 | 0.0 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | |
| -0.2 | -0.9 | -0.8 | -0.7 | -0.6 | -0.4 | -0.2 | 0.0 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.7 | |
| 0.0 | -0.8 | -0.7 | -0.6 | -0.4 | -0.2 | 0.0 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | |
| 0.2 | -0.7 | -0.6 | -0.4 | -0.2 | 0.0 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | |
| 0.4 | -0.6 | -0.4 | -0.2 | 0.0 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.0 | |
| 0.6 | -0.4 | -0.2 | 0.0 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 1.0 | |
| 0.8 | -0.2 | 0.0 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | |
| 1.0 | 0.0 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | |

由上述结论结合 Lyapunov 稳定性判据,本文设计了一套模糊逻辑规则直接确定滑动模态控制量,即直接把 $s(k)$ 和 $\Delta s(k)$ 作为输入,通过模糊推理获得滑模控制的控制量 $u(k)$ 。控制系统的结构框图如图 3 所示。

模糊控制器将 $s(k)$, $\Delta s(k)$ 和 $u(k)$ 经过归一化处理模糊化为: $S, \Delta S, U$, 其归一化系数分别为: $K_S, K_{\Delta S}$ 和 K_U , 与此同时在其论域上定义 7 个模糊子集: NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB. 为了简单起见,模糊滑模控制器的模糊变量的隶属度函数采用三角形隶属度函数^[7],其控制规则表如表 1 所示。

表 1 模糊滑模控制规则表

Table 1 Control rule table for fuzzy sliding mode controller

| 控制量 U | ΔS | | | | | | |
|---------|------------|----|----|----|----|----|----|
| | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
| NB | NB | NB | NB | NB | NM | NS | ZE |
| NM | NB | NB | NB | NM | NS | ZE | PS |
| NS | NB | NB | NM | NS | ZE | PS | PM |
| ZO | NB | NM | NS | ZE | PS | PM | PB |
| PS | NM | NS | ZE | PS | PM | PB | PB |
| PM | NS | ZE | PS | PM | PB | PB | PB |
| PB | ZE | PS | PM | PB | PB | PB | PB |

将 $S, \Delta S$ 在 $[-1, 1]$ 归一化域内量化为 11 个等级,经过模糊运算得到表 2 所示的模糊控制查询表,模糊滑模控制系统通过 $s = C^T e$, 和 $\Delta s(k) = s(k+1) - s(k)$ 计算 $s(k)$ 和 $\Delta s(k)$ 并将其输入模糊滑模控制系统查表得到 U , 然后将 U 进行非模糊化处理得到被控对象的输入信号: $u(k)$ 。

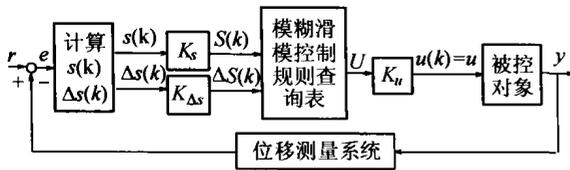
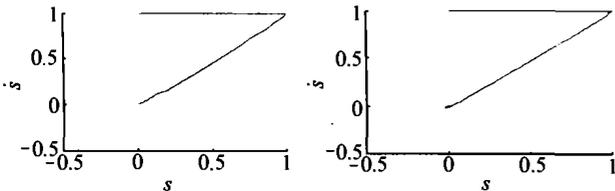


图3 精密机床伺服进给系统模糊滑模控制

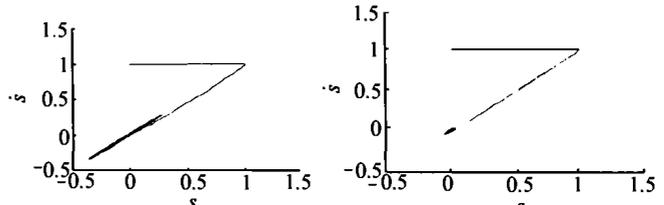
Fig. 3 Fuzzy sliding mode control scheme for feed system in precision machine tool



SMC的相轨迹图

FSMC的相轨迹图

(a) 理想条件 SMC 与 FSMC 的相轨迹



SMC的相轨迹图

FSMC的相轨迹图

(b) 模型参数波动10%并受白噪声干扰时 SMC 与 FSMC 的相轨迹

图4 滑模控制器的相轨迹图

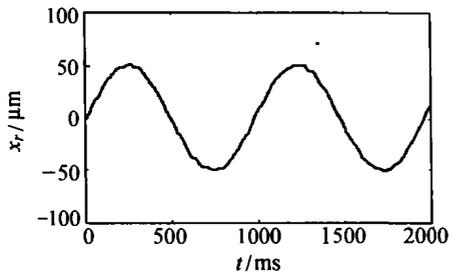
Fig. 4 Phase trajectory of fuzzy sliding mode controller

3.4 模糊滑模控制器跟踪控制仿真 (Tracking control simulation of fuzzy slide mode controller)

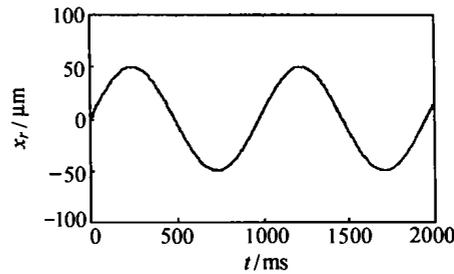
系统仿真的输入信号为: $x_r = 50 \sin(2\pi t) \mu\text{m}$, 系统的控制采样间隔为 1 ms. 系统的实验结果如图 5 所示.

由图 5 可以看出, 对于精密机床伺服进给系统而言, SMC 由于系统存在非线性如: 间隙和 stick/slip 摩擦非线性的影响^[5], 控制器不能有效地克服由此产生的系统进给运动的低速爬行. 因此在正弦

跟踪信号反程时, 即: 运动速度在零速度附近时, 存在突起和振荡. 而对于 FSMC, 对于机床伺服进给系统的非线性影响, 控制器通过不断地调整系统的控制信号使系统始终处于滑动状态, 即: slip 状态从而有效地克服了系统 stick/slip 摩擦非线性的影响. 由此可以看出, 模糊滑模控制器在保证系统跟踪性能的同时具有良好的自适应性和鲁棒性, 因此对于高精度的跟踪控制系统而言其是一种良好的伺服跟踪控制器.



SMC的跟踪控制结果



FSMC的跟踪控制结果

图5 滑模控制器在精密机床伺服进给系统中的跟踪控制仿真

Fig. 5 Control result of tracking control simulation for fuzzy sliding mode controller

4 系统实验(System experiment)

实验系统为图6所示的自行研制的两轴精密机床,该机床主要用于加工高精度的非球光学零件.该机床控制系统由控制计算机(PC586)、基于数字信号处理器ADSP2181的运动控制器实现进给系统的伺服控制和轨迹规划(伺服采样周期 $T_s = 0.5\text{ ms}$)、进给系统伺服电机为120 r/min的高精度直流力矩电机、进给系统位移检测装置采用德国HeidedHain生产的LIP401(量程:300 mm),其精度为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 、进给系统丝杠采用C0级精密丝杠、



图6 精密机床示意图

Fig. 6 Precision machine tool scheme

系统实验分为两组:①机床实验以一种红外反射镜的一段加工轮廓为加工实验对象,机床进给速率: $F = 0.2\text{ mm/s}$,插补周期 $T = 2\text{ ms}$;②实验采用圆弧运动以测试评价机床的轮廓运动精度,实验圆弧半径 $R = 50\text{ mm}$, $F = 0.05\text{ mm/s}$,其他同实验①.实验中的每一组实验均与原系统的PID控制算法进行比较,分别得到系统的实验结果如图7,8所示.

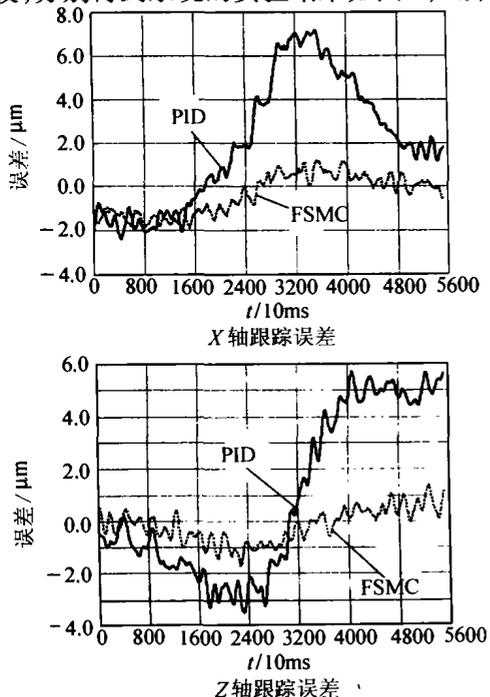


图7 机床跟踪误差

Fig. 7 Tracking error for precision machine tool

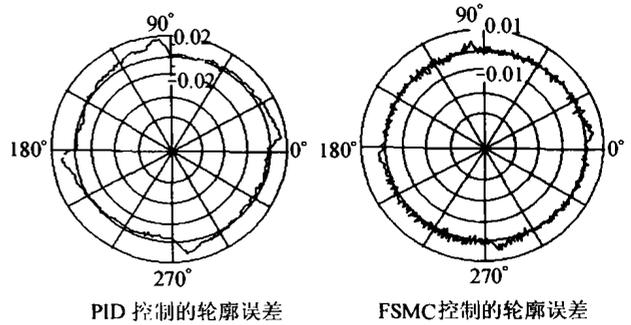


图8 机床圆弧运动测试的轮廓误差

Fig. 8 Contour error for circular motion

5 结论(Conclusion)

- 1) 模糊滑模控制器对系统扰动、不确定性以及扰动具有自适应性和较强鲁棒性;
- 2) 从仿真实验和机床运动实验结果可以看出,该控制器可以有效的改善系统的运动跟踪误差,提高机床运动的轮廓精度;
- 3) 采用模糊逻辑和滑模控制理论相结合设计的直接模糊滑模控制器具有系统设计简单、易于实现和调整的优点.

参考文献(References):

- [1] 赵松年,张奇鹏,主编.机电一体化机械系统设计[M].上海:同济大学出版社,1990.
(ZHAO Songnian, ZHANG Qipeng, ed. *Mechantronics System Analysis and Design* [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1990.)
- [2] 秦继荣,沈安国,编著.现代直流伺服控制技术及其系统设计[M].北京:机械工业出版社,1993.
(QING jirong, SHEN Anguo, ed. *Modern DC Servo Control System Design* [M]. Beijing: China Machine Press, 1993.)
- [3] SLOTINE J J E. Sliding controller for non-linear systems [J]. *Int J of Control*, 1984,40(2):421 - 434.
- [4] 金耀初,蒋静坪.一类非线性系统的模糊变结构控制及其应用[J].控制与决策,1992,7(1):36 - 40.
(JING Yaochu, JIANG Jingping. Fuzzy variable structure control and application for a nonlinear system [J]. *Control and Decision*, 1992, 7(1):36 - 40.)
- [5] BRIAN ARMSTRONG-HELOUVRY. *Control of Machines with Friction* [M]. California: Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [6] 姚琼荟,黄继起,吴汉松,编著.变结构控制系统[M].重庆:重庆大学出版社,1997.
(YAO Qionghui, HUANG Jiqi, WU Hansong, ed. *Variable Structure Control System* [M]. Chongqing: Zhongqing University Press, 1997.)
- [7] WANG Lixin. *A Course in Fuzzy Systems and Control* [M]. New Jersey: Prentice-Hall Int, Inc, 1997.
- [8] 刘新群.一类基于输入/输出模型的离散变结构滑模控制器及其应用[J].光学精密工程,1996,4(2):62 - 66.

(LIU Xinqun. Discrete variable structure controller and its application based on input/output model of a system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1996, 4(2): 62 - 66.)

作者简介:

解旭辉 (1967—),男,1994年和1997年在国防科技大学获机电控制与自动化专业硕士和博士学位.现任国防科技大学机电工程与自动化学院机电工程研究所副研究员,主要研究方向是:超精密机

床数控,高精度伺服控制以及运动控制技术. E-mail: xiexuhui@vip.sina.com;

戴一帆 (1965—),男,1994年莫斯科航空学院获博士学位,现任国防科技大学机电工程与自动化学院机电工程研究所教授,主要研究方向:超精密加工及控制技术. E-mail: dyf@nudt.edu.cn;

李圣怡 (1946—),男,浙江大学获硕士学位,现任国防科技大学机电工程与自动化学院教授,主要研究方向:精密工程与计算机控制,智能机构,微机电系统及应用. E-mail: syli@nudt.edu.cn.

第23届中国控制会议 征文通知

中国控制会议是由中国自动化学会控制理论专业委员会组织召开的国际性学术会议,每年举办一次.其宗旨是为海内外系统控制领域的专家、学者、研究生及工程设计人员提供一个学术交流的机会,以便推动系统与控制科学的发展.第23届中国控制会议定于2004年8月10~15日在中国上海举行.借此机会,我们热忱欢迎世界各地的同仁参加本届大会,征文范围如下:

- | | | |
|-------------------|-----------------|---------------|
| S1 系统理论与控制理论 | S11 分布参数系统 | S21 分布式控制系统 |
| S2 非线性系统 | S12 混合系统与 DEDS | S22 运动控制 |
| S3 复杂性与复杂系统理论 | S13 大系统理论与方法 | S23 智能机器人 |
| S4 建模、辨识与估计 | S14 神经网络与控制 | S24 电力系统 |
| S5 优化控制与优化方法 | S15 模糊系统与控制 | S25 环境与生物工程 |
| S6 鲁棒控制与 H-inf 控制 | S16 故障诊断 | S26 人机系统 |
| S7 学习控制 | S17 CIMS 与制造系统 | S27 智能仪表 |
| S8 稳定性与镇定 | S18 仿真与控制系统 CAD | S28 智能交通系统 |
| S9 自适应控制 | S19 智能信息处理系统 | S29 社会经济系统与控制 |
| S10 变结构控制 | S20 遗传算法与智能系统 | S30 各种应用 |

征文要求:

1. 稿件内容包括:

- ① 首页:论文所属方向(选自征文范围)、论文题目、摘要、3~5个关键词,联系人的姓名、职称、邮编、电话、E-mail.
- ② 论文题目、摘要、3~5个关键词、正文(中、英文均可).
- ③ 凡邀请组论文,请将①中的首页和论文的详细摘要交组织者,由组织者统一投稿.

2. 投稿可以直接邮寄至组织委员会秘书处,也可以通过 E-mail. 直接邮寄论文需一式2份.

3. 大会设立关肇直优秀论文奖,申请办法和条例请查看会议网页: <http://ccc.iss.ac.cn/>

4. 拟组织邀请组的组织者,需提供1000字的组织建议书及该组全部拟邀请论文的首页和详细摘要.同一邀请组的论文的主题应鲜明、集中,邀请组一般有6篇论文.

重要日期:

提交论文的截止日期:2004年3月30日.

录用/不录用通知日期:2004年4月30日前.

提交最终论文截止日期:2004年5月31日.

投稿地址:

组织委员会秘书处:

李少远 上海华山路1954号,上海交通大学自动化系200030

电话/传真: +86-21-62932114 E-mail: ccc04@sjtu.edu.cn

中国控制会议网址: <http://ccc.iss.ac.cn>