

单神经元 PID 在多电机同步控制中的应用*

李俊丽, 何 勇*, 王生泽
(东华大学 机械工程学院, 上海 201600)

摘要:针对多电机同步控制系统在动载荷扰动情况下各电机之间的传动比会发生变化这一问题, 设计了具有自学习和自适应能力的单神经元 PID 同步控制算法, 建立了多电机同步控制系统的单神经元 PID 控制规则。系统仿真结果表明, 运用单神经元自适应 PID 控制算法能有效实现多电机同步控制, 该算法收敛速度较快, 鲁棒性较好, 具有较强的抗干扰能力。最后, 将该控制算法应用于精梳机四轴同步控制系统, 其结果表明单神经元自适应 PID 同步控制算法能大大增强系统的动态性能, 有效缓解负载带来的同步误差。在相同扰动情况下, 该方法能更好的使多电机以一定速度同步运行。

关键词:多电机; 同步控制; 单神经元 PID 控制; Matlab 仿真; 嵌入式操作系统

中图分类号: TH39; TP273. 3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2010)08-0014-06

Application of single neuron PID in multi-motor synchronous control

LI Jun-li, HE Yong, WANG Sheng-ze

(College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201600, China)

Abstract: Aiming at the problem that the speed ratio of the motors is changed when the load was dynamic in the multi-motor synchronous control system, a single neuron PID synchronous control algorithm with the self-learning and adaptive abilities was designed. Then the single neuron PID synchronous control rules were set in multi-motor synchronous control system. System simulation results indicate that the single neuron adaptive PID control algorithm effectively realizes multi-motor synchronous control with high convergence speed, better robustness and strong anti-jamming ability. Finally, the algorithm was used in Comber four-axis simultaneous control system. The results indicate that the single neuron adaptive PID synchronous algorithm can greatly enhance system dynamic performance, effectively alleviate synchronization error caused by the load. In the same disturb circumstance; the method could make synchronous performance of the motors better in certain speed.

Key words: multi-motor; synchronization control; single neuron adaptive PID control; Matlab simulation; embedded operating system

0 引 言

在造纸、印染、纺织等高精度、高转速传动系统中, 传统机器往往是机械结构复杂, 体积庞大, 配件多, 因而更换工艺品种时, 需要变换大量齿轮、皮带轮等, 操作费时、费力。随着机电一体化技术的发展、工业自动化程度的提高和人们对产品小批量、多品种的要求提高, 现在采用多电机驱动系统来代替复杂的机械传动系统, 而多电机驱动系统的关键技术就是如何保证多

电机驱动系统各轴间的同步协调, 同步控制算法的好坏直接影响着系统的可靠性和产品的质量^[1]。

神经元^[2]作为神经网络的基本单位, 具有自学习和自适应能力, 且结构简单, 易于计算。本研究设计了精梳机四轴同步控制系统, 将单神经元 PID 控制算法应用于该系统。仿真和实验结果表明, 单神经元 PID 控制算法可以在一定程度上解决传统 PID 控制不易在线实时整定参数的问题, 能有效地实现多电机同步控制性能。

收稿日期: 2010-03-05

基金项目: 国家科技支撑计划(“973”)重点资助项目(2007BAF24B02-2)

作者简介: 李俊丽(1984-), 女, 河北邯郸人, 硕士研究生, 主要从事机电集成控制、嵌入式计算机控制、多电机同步控制方面的研究. E-mail: lijunli_021@163.com

通信联系人: 何 勇, 男, 教授, 博士生导师. E-mail: heyong@dhu.edu.cn

1 多电机同步控制

对于多电机同步控制系统来说,多电机间运动是按照一定的传动比进行的,实现电动机转速和相对位置的跟随,始终保持工艺要求的传动比关系。但受到扰动载荷影响的电动机转速是会变化的,动载荷情况下,如何确保多电机在转速变化的同时还能保持各电机之间的传动比关系,是本系统要研究和解决的问题。

单神经元自适应 PID 控制算法可以通过自动调整神经元加权系数以适应被控对象的状态变化。本系统在等状态耦合多电机控制结构中加入单神经元自适应 PID 控制算法对多电机同步误差进行调节,使得这种控制不仅结构简单,启动时不存在速度滞后问题,跟踪性能好,而且还可以确保多电机在动载荷扰动情况下保持各电机之间的传动比关系。

在连续加工过程中,根据工艺上的不同要求,各传动轴之间以一定的速度关系保持协调运行。其关系可表示为:

$$k_i \cdot V_i = k_{i+1} \cdot V_{i+1} \quad (1)$$

以 4 台电机为研究对象,虚拟轴作为输入参考轴,其他各传动轴按传动关系跟随运动,虚拟轴的速度作为同一给定速度参考指令,控制方案如图 1 所示。

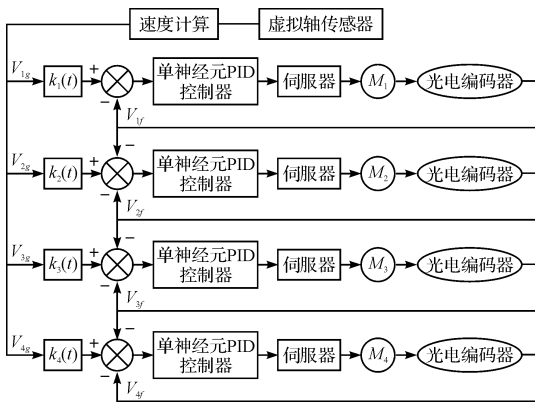


图 1 多电机同步控制系统的方案

$V_{1r}, V_{2r}, V_{3r}, V_{4r}$ 和 $V_{1g}, V_{2g}, V_{3g}, V_{4g}$ —电机的反馈速度和给定速度; $k_1(t), k_2(t), k_3(t), k_4(t)$ —电机的协调系数。 M_1, M_2, M_3, M_4 —4 台电机,且 M_1 为主令电机, M_2, M_3, M_4 为从动电机。

本系统采用嵌入式 32 位单片机 MCF5235^[3] 做控制系统 CPU,同时应用嵌入式实时操作系统^[4] Vx-Works 以满足系统对高精度和实时性的要求。在系统运行中,各电机的反馈信号一方面作为自身的转速反馈信号,另一方面经转换作为下一台电机的比较器输入信号,单片机 MCF5235 实时读取同一时刻各电机的光电编码器信号,对主动电机与从动电机之间的角度位置误差进行不间断比较,并采用单神经元自适应

PID 控制算法对多电机同步误差进行调节。

2 单神经元 PID 控制原理

2.1 单神经元数学模型

神经元数学模型如图 2 所示。该神经元是一个多输入、多输出的非线性信息处理单元。

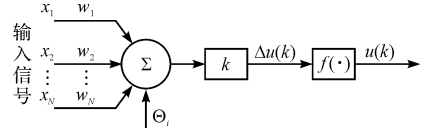


图 2 人工神经元模型结构

x_1, x_2, \dots, x_N —神经元输入; w_1, w_2, \dots, w_N —神经元对 x_1, x_2, \dots, x_N 的权系数(称突触权重); Θ_i —神经元的阈值; $f(\cdot)$ —输出非线性函数; $u(k)$ —神经元输出

由上图可得输出量为:

$$u(k) = f(\Delta u(k))$$

$$\Delta u(k) = \sum_{i=1}^n (w_i(k)x_i(k) - \Theta_i) \quad (2)$$

2.2 控制结构

单神经元自适应 PID 控制系统如图 3 所示。

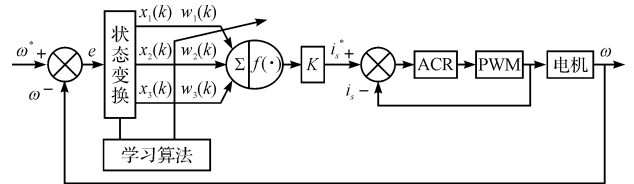


图 3 单神经元 PID 控制结构图

图 3 中,神经元有 3 个输入量 $x_i(k) (i=1,2,3)$,转换的输入反映的是期望输出及控制给定的偏差状态。若设给定为 $y_r(k)$,输出为 $y(k)$,偏差为 $e(k)$,经转换后转换为神经元学习控制所需要的状态 x_1, x_2, x_3 ,在这里性能指标为:

$$\begin{cases} x_1(k) = e(k) \\ x_2(k) = e(k) - e(k-1) = \Delta e(k) \\ x_3(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) = \Delta^2 e(k) \end{cases} \quad (3)$$

神经元通过关联搜索来产生控制信号,即自适应神经元的输出信号 $u(k)$ 为:

$$u(k) = K \sum_{i=1}^3 w_i(k)x_i(k) + u(k-1) \quad (4)$$

式中 K —神经元比例系数, $K > 0$ 。

2.3 控制算法

为了反映神经元对外界信号的响应能力,神经元

重要的特征就是要通过不断的学习使获得的知识结构适应周围环境的变化。神经元的学习是按某一性能指标为最小,通过修改自身的权系数来进行的,作者采用了有监督的 Hebb 学习算法,其神经元的学习过程为:

$$w_i(k+1) = (1-c)w_i(k) + \eta r_i(k) \quad (5)$$

$$r_i(k) = z_i(k)u(k)x_i(k)$$

式中 $r_i(k)$ —递进信号, $r_i(k)$ 随过程进行渐衰减; $z_i(k)$ —误差信号, $z_i(k) = y_i(k) - y(k)$; η —学习速率, $\eta > 0$; c —常数, $c \geq 0$ 。

为了保证学习算法的收敛性和控制的鲁棒性,对其进行规范化处理,则控制学习算法为:

$$u(k) = K \sum_{i=1}^3 w'_i(k)x_i(k) + u(k-1) \quad (6)$$

$$w'_i(k) = w_i(k) / \sum_{i=1}^3 |w_i(k)| \quad (7)$$

$$\begin{cases} w_1(k+1) = w_1(k) + \eta_p z(k)u(k)x_1(k) \\ w_2(k+1) = w_2(k) + \eta_i z(k)u(k)x_2(k) \\ w_3(k+1) = w_3(k) + \eta_d z(k)u(k)x_3(k) \end{cases} \quad (8)$$

η_p, η_i, η_d 为积分、比例、微分系数的学习速率。

对积分 I 、比例 P 和微分 D 分别采用了不同的学习速率 η_p, η_i, η_d , 以便对不同的权系数分别进行调整。神经元比例系数 K 的选择非常重要。 K 越大, 则快速性越好, 但超调量大, 甚至可能使系统不稳定。当被控对象时延增大时, K 值必须减少, 以保系统稳定。 K 值选择过小, 会使系统的快速性变差。综合考虑, 本系统选定 $K=0.12$ 。

2.4 Matlab 仿真试验

为了验证单神经元 PID 控制算法的性能, 本研究进行以下仿真实验^[5-7]。仿真所用到的参数确定为: $k_p = 120, k_i = 4, k_d = 159$ 。PMSM 额定功率为 4 kW, 电动机的极对数 $P_m = 4$, 直、交轴主电感 L_d, L_q 分别为 8.5 mH, 8.5 mH; 转子与负载的转动惯量 $J = 0.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 转子电阻 $R_r = 1.2 \Omega$, 转子磁钢在定子上的耦合磁链 $\Psi' = 0.175 \text{ Wb}$, η_p, η_i, η_d 的初始值分别为 0.34, 0.32, 0.33。输入为单位阶跃信号, 其结果如图 4 所示。

通过仿真结果可以看出, 单神经元自适应控制算法是通过自动调整神经元加权系数以适应被控对象的状态变化, 实现自适应、自组织功能。开始的时候主要是常规 PID 控制起作用, 经过对常规控制输出的不断学习, 逐渐由单神经元输出起控制作用。单神经元的加入使得控制效果比单独的 PID 控制要好的多。阶跃信号输入时, 大大减少了超调, 加快了控制响应速度。

仿真分析可以看出, 单神经元自适应 PID 控制算法不仅结构简单, 而且能适应环境变化, 有较强的鲁棒性。

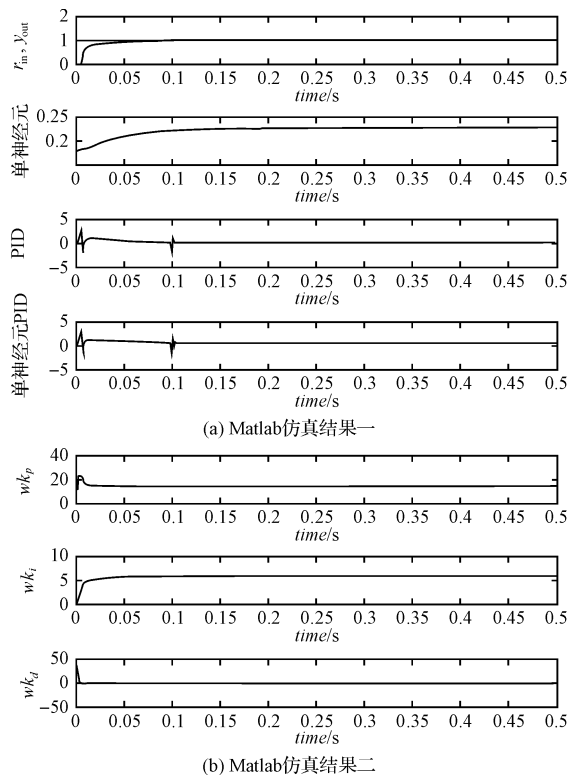


图 4 Matlab 仿真结果

3 单神经元 PID 在精梳机多电机控制中的应用

传统精梳机机械传动系统十分复杂, 精度较差。为了适应不同工业高速、多变的需求, 本研究提出了精梳机多轴驱动、同步控制方案。

3.1 精梳机多电机同步控制系统

传统的精梳机由一台主电机和一台毛刷电机组成, 主电机传动由于要完成退卷运动、锡林运动、钳板运动、分离运动、引出罗拉运动、牵伸运动及圈条成形等任务, 整个机械传动系统十分复杂, 适纺品种受到限制; 而且精梳机的给棉、梳棉和棉网的分离结合等各项工作都必须周期性的间歇进行, 限制了整机车速的提升。笔者在传统捻线机基础上, 结合现代机电一体化技术, 将锡林运动、钳板运动、分离罗拉运动、分离合成运动各自按照工艺独立驱动, 形成多轴驱动设备。这使得机械结构简单, 有利于得到分离工艺曲线, 提高品种的适纺性, 方便整体工艺结构的改变, 适应棉纺生产的需求。由于精梳机的转速较高, 因此要求控制系统必须具有较高的计算能力、数据处理能力、执行速度和稳定性。Freescale 公司生产的 32 位单片机 MCF5235

具有强大的实时处理能力,可以满足控制系统的要求,因此选择 MCF5235 单片机作为系统的核心。精梳机多电机传动控制系统^[8-9]结构如图 5 所示。

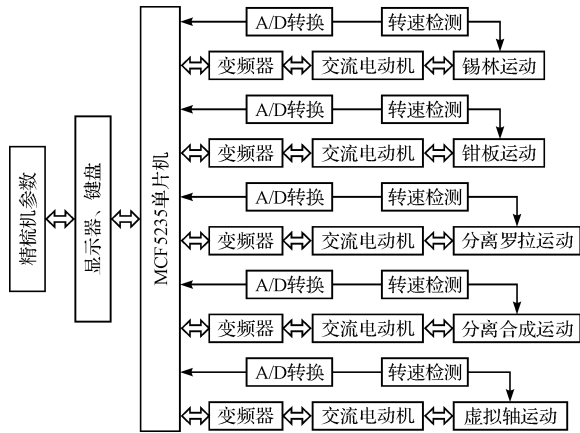


图 5 精梳机多电机传动控制系统框图

由图 5 可知,精梳机多电机传动控制系统主要由 MCF5235 单片机、伺服驱动器、电动机、速度传感器、数据采集芯片和显示器等组成。采用 4 台电动机在单片机的控制下,分别驱动锡林、钳板、分离罗拉和分离合成运动。虚拟轴作为输入参考轴,其他各传动轴按传动关系跟随运动,虚拟轴的速度作为同一给定速度参考指令。精梳机的初始工作参数,由单片机键盘输入给定。实际线速度由线速度传感器和转速编码器测出,通过数据采集芯片模/数转换后输入单片机组成速度闭环控制系统,并将数值显示在显示器屏幕上。当需要改变工艺参数时,可以通过单片机方便地调节。

3.2 单神经元 PID 电机控制结构

考虑驱动轴的动态特性参数难以辨识以及系统的非线性等因素,为了保证多电机高精度、高转速同步传动,本系统采用单神经元自适应 PID 同步控制算法^[10]对每台电机速度外环进行控制。永磁同步电机控制系统的整体设计^[11-12]如图 6 所示。

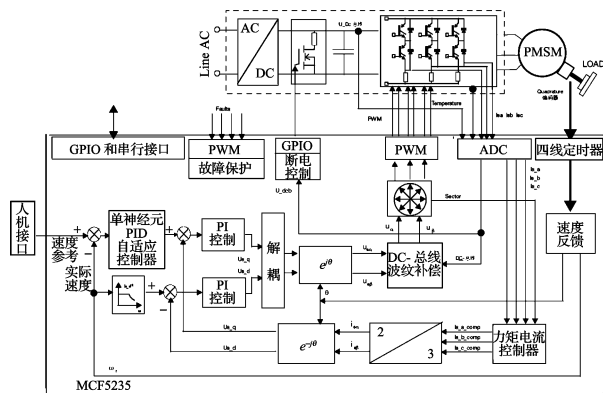


图 6 永磁同步电机控制系统结构

采用速度环、电流环双闭环控制方案。电流内环采用常规 PI 控制器,其作用在于提高系统的快速性、抑制电流环内的干扰、限制最大电流以保证系统的安全运行。速度外环采用单神经元 PID 前馈控制器,将控制方案施加于速度外环。这是由于系统性能主要由外环决定,良好的速度外环不但可以抑制外环干扰,还可以弥补内环扰动,从整体上提高系统性能。

3.3 硬件结构

基于单片机 MCF5235 精梳机四轴控制系统的硬件结构包括电源供给、人机交互、位置信号检测电路、过流保护电路以及光耦隔离电路等控制系统,如图 7 ~ 图 9 所示。

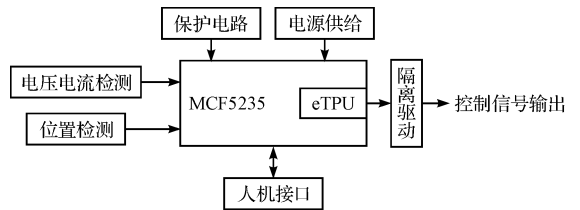


图 7 系统硬件示意图

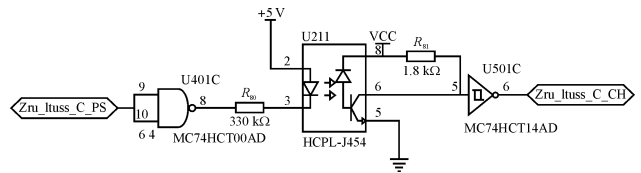


图 8 光耦隔离电路

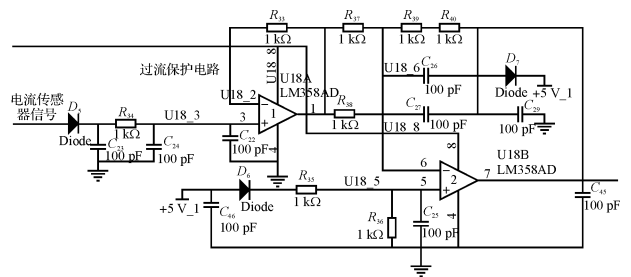


图 9 过流保护电路

3.4 软件框图

多电机同步控制的实现主要由 MCF5235 来完成。程序主要包括主程序和中断子程序两个部分。中断子程序主要包括了电流和位置检测子程序、单神经元 PID 权值修改子程序、转速计算子程序、转速调节

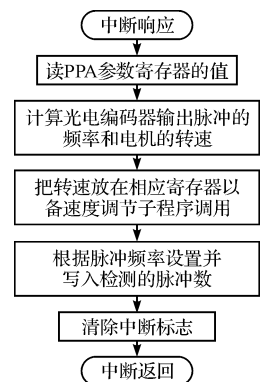


图 10 PPA 测速子程序流程图

子程序、PWM 调制子程序以及系统的监测和故障处理模块等。程序流程图如图 10、图 11 所示。

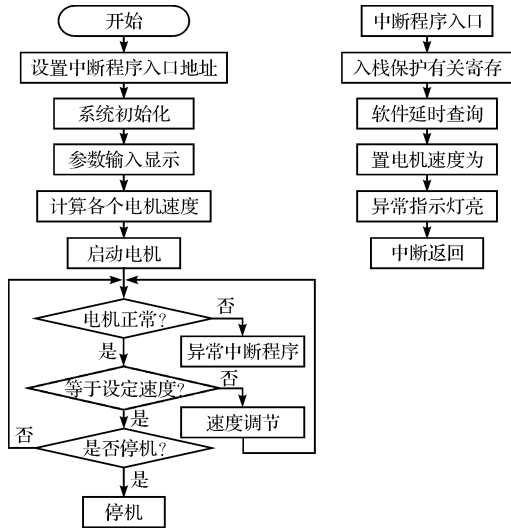


图 11 程序流程框图

本系统是在 Tornado 开发环境下,应用 C 语言编程的,其程序如下:

(1) 参数设定:

```
uint8_t PWM_master_channel = 7;
uint8_t PWM_phaseA_channel = 8;
uint8_t PWM_phaseB_channel = 10;
uint8_t PWM_phaseC_channel = 12;
.....
```

```
uint32_t PWM_freq_hz = 20000;
uint32_t etpu_a_tcr1_freq = 37500000;
uint32_t PWM_dead_time_ns = 1000;
```

(2) 系统初始化:

```
int32_t my_system_etpu_init()
void my_system_etpu_start()
```

(3) 初始化 PWM 发生器:

```
err_code = fs_etpu_pwm_pmsm_init_3ph();
```

(4) 使能 PWM 发生器信号:

```
hsrr = fs_etpu_pwm_pmsm_enable_3ph(PWM_master_channel,
FS_ETPU_PWM_PMSM_ACTIVE_HIGH,
FS_ETPU_PWM_PMSM_ACTIVE_LOW);
```

(5) 禁止 PWM 发生器信号:

```
hsrr = fs_etpu_pwm_pmsm_disable_3ph(PWM_master_channel,
FS_ETPU_PWM_PMSM_PIN_LOW,
FS_ETPU_PWM_PMSM_PIN_LOW);
```

(6) 调用单神经元 PID 算法子程序:

```
error_code = fs_DSJY_PID_init
( ts = 0.001;
kp = 0.34;
ki = 0.32;
kd = 0.33; )
.....
```

(7) 调用 PPA 反馈信号采集子程序:

```
error_code = fs_etpu_ppa_init(PPA0_CHANNEL,
FS_ETPU_PRIORITY_MIDDLE,
```

```
FS_ETPU_PPA_INIT_TCR1,
FS_ETPU_PPA_HIGH_PULSE,
2,
0x100000);
.....
```

(8) 调用 DmaTimer 定时中断子程序:

```
void DmaTimerInt( void)
{ sysClkRateSet(4 * FREN);
my_system_etpu_start();
err = my_system_etpu_init0(0, FREN);
err = my_system_etpu_init0(1, FREN);
err = my_system_etpu_init0(2, FREN);
err = my_system_etpu_init0(3, FREN); }
.....
```

4 应用测试结果分析

MCF5235 微控制器 eTPU 的周期/脉冲宽度累加器(PPA)功能可以计算指定脉冲个数的周期累加时间、高电平累加时间或低电平累加时间。当累加周期数到达时,eTPU 就向 CPU 产生一次中断。利用 PPA 功能实时采集编码器信号,对精梳机四轴同步控制系统进行实验,计算中断间隔时间内的脉冲个数,可方便得到各电机的实时速度数据。设定虚拟轴速度为 1000 rad/s,4 台电机在同一给定参考速度指令下,测得速度误差数据统计结果如图 12、如图 13 所示。

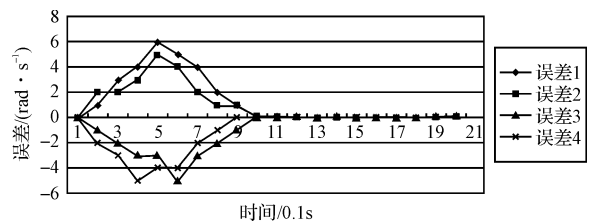


图 12 有干扰时各电机的同步误差

从图中可以看出,在启动过程中,系统的同步误差最大为 13.3 rad/s,同步控制精度为 1.33%,稳态时的最大同步误差为 0.18 rad/s,同步控制精度为 0.018%,能够达到高速同步控制系统的性能指标要求。

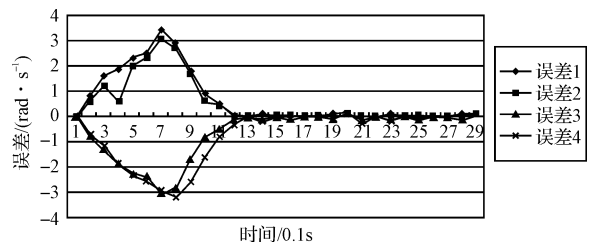


图 13 无干扰时各电机的同步误差

测试结果表明,在无外部扰动和有外部扰动两种情况下,控制系统都能以较快的速度收敛且稳定运行,具有较好的动态性能和同步性能。(下转第 63 页)

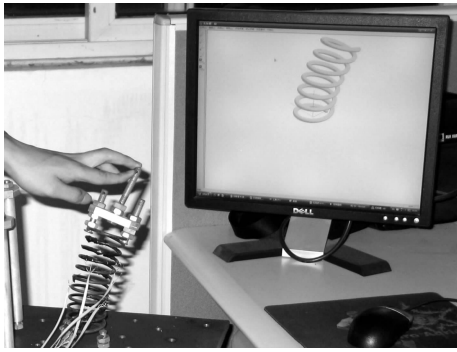


图 5 螺旋弹簧弯曲形状重构图

4 结束语

本研究采用电测应变和计算机处理的方法实现了一种基于螺旋弹簧的柔性杆形状感知方法,成功地实现了弹簧杆变形形状感知、三维实时重构和可视化显示,并通过实验得到了验证。采用电测应变的方法具有硬件系统原理简单,易于实现,算法的程序代码易于编制等优点。柔性杆形状感知技术在虚拟现实和计算机辅助设计输入设备研制、医疗器械研制、人体姿态记录设备研制等技术领域具有较大的实用价值。

(上接第 18 页)

5 结束语

本研究设计了单神经元 PID 精梳机四轴同步控制系统,利用神经元内在的自学习和自适应能力,将神经元与传统 PID 算法的优点相结合,给出了单神经元 PID 控制算法,仿真和实验结果表明,单神经元 PID 控制算法能有效实现多电机的同步控制功能,系统具有较快的收敛度,较好的鲁棒性和较强的抗干扰能力。同时,该系统充分发挥了 MCF5235 在电机控制方面特有功能和优势,体现了 VxWorks 实时嵌入式操作系统卓越的实时性和极高的可靠性;该系统的设计,为实现多电机同步控制的高速运转、高精度定位提供了很好的借鉴。

参考文献 (References):

- [1] 张承慧,石庆升,程 金. 一种基于相邻耦合误差的多电机同步控制策略[J]. 中国电机工程学报,2007,27(15): 59-63.
- [2] 傅 平,郭吉丰,丁 敬,等. 基于神经元自适应 PID 的超声波电机速度位置控制[J]. 电工技术学报,2007,22(2):28-33.
- [3] BANNOURA M, BETTELHEIM R, SOTA R. ColdFire Microprocessors and Microcontrollers[M]. Beijing: Publishing

参考文献 (References):

- [1] 张伦伟,钱晋武,沈林勇,等. 光纤光栅大曲率传感器的试验研究[J]. 仪表技术与传感器,2003(8):1-2.
- [2] ASARI V K, KUMAR S, KASSIM I M. A fully autonomous microrobotic endoscopy system[J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*,2000,28(4):325-341.
- [3] 陈建军,沈林勇,钱晋武,等. 已知离散点曲率的曲线拟合递推方法[J]. 上海大学学报:自然科学版,2003,9(2):123-126.
- [4] 钟文彬,李柏林,晏星凡. 预应力圆柱螺旋弹簧弯曲弹性特性分析[J]. 机械设计,2008,25(1):24-27.
- [5] 杨 峰,许明恒. 基于 COSMOSWORKS 的圆柱螺旋弹簧的应力分析[J]. 机械,2008,35(8):36-37,46.
- [6] 张英会. 弹簧[M]. 北京:机械工业出版社,1982:162-178.
- [7] 吴家麟,杨东英,沈林勇,等. 基于曲率数据的曲线拟合方法研究[J]. 应用科学学报,2003,21(3):258-262.
- [8] 张文杰. 自由曲线、自由曲面的高精度自动测量、数据处理及误差分析方法的研究[D]. 天津:天津大学精密仪器与光电子工程学院,1995:58-69.
- [9] 王嘉力. 微型六维力/力矩传感器及其自动标定的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机器人研究所,2007:28-34.
- [10] 张伦伟. 基于光纤光栅传感器的智能内窥镜形状感知系统[D]. 上海:上海大学机电学院,2005:18-28.
- [11] 陶 薇,王 涛. 再现轨迹平面四杆机构的优化[J]. 轻工机械,2008,26(6):42-43. [编辑:张 翔]

House of Electronics Industry,2008.

- [4] 张 杨,于银涛. VxWorks 内核、设备驱动与 BSP 开发详解[M]. 1 版. 北京:人民邮电出版社,2009.
- [5] 李国勇. 智能控制及其 MATLAB 实现[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社,2005.
- [6] 刘金昆. 先进 PID 控制及 MATLAB 仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2003.
- [7] CHANG W D. Robust adaptive single neural control for a class of uncertain nonlinear systems with input nonlinearity[J]. *Information Sciences*,2005,171(1-3):261-271.
- [8] 高钟毓. 机电控制工程[M]. 3 版. 北京:清华大学出版社,2002.
- [9] LIN F J, WAI R J, CHEN M P. Wavelet neural network control for linear ultrasonic motor drive via adaptive sliding-mode technique[J]. *IEEE Transactions UFFC*,2003,50(6):686-698.
- [10] LIN F J. A fuzzy neural network controller for parallel-resonant ultrasonic motor drive[J]. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*. 1998,45(6):928-937.
- [11] FUNG R F, KUNG Y S, WU G C. Dynamic analysis and system identification of an LCD glass-handling robot driven by a PMSM[J]. *Applied Mathematical Modelling*,2010,34(5):1360-1381.
- [12] BOLOGNANI S, PERETTI L, ZIGLIOTTO M, et al. Commissioning of electromechanical conversion models for high dynamic PMSM drives[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2010,57(3):986-993.

[编辑:柴福莉]