

# 多轴运动控制器研制及其在机械手上的应用

刘松国<sup>1</sup>, 朱世强<sup>2</sup>, 王会方<sup>2</sup>

(1. 杭州市特种设备检测院, 浙江 杭州 310003; 2. 浙江大学 流体传动及控制国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要:**针对数控机床、机械手等系统的发展需要,设计了基于 DSP 的开放式运动控制器。控制器通过 PCI 总线与上位机通信,采用 DSP 和 CPLD 完成了运动控制功能,实现了机械手关节运动的伺服控制。考虑机械手的动力学特性,设计了单神经元自适应 PID 控制器,在开放式控制平台上实现了机械手的精确轨迹跟踪。试验结果表明,该系统具有良好的开放性、通用性和可扩展性,在其中移植先进控制策略,获得了比传统的 PID 控制更好的轨迹跟踪性能。

**关键词:**运动控制器;开放式结构;机械手;自适应比例-积分-微分控制

中图分类号:TH39;TH122

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)05-0556-04

## Design of multi-axis motion controller and its application on manipulators

LIU Song-guo<sup>1</sup>, ZHU Shi-qiang<sup>2</sup>, WANG Hui-fang<sup>2</sup>

(1. Hangzhou Special Equipment Inspection Institute, Hangzhou 310003, China;

2. State Key Lab of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** According to new developing requirements of CNC and manipulators, a motion controller with open architecture was designed based on DSP. The communication with the upper computer was realized through PCI bus, DSP and CPLD was used to achieve motion control of manipulator's joints. The dynamic model of the manipulator was deduced, the neuron adaptive PID controller was designed, and servo control with high accuracy was achieved. Experiment results show that, the proposed system has nice openness, generality and portability, and higher trajectory tracking accuracy is gained with the advanced control algorithm planted in it comparing to classical PID control.

**Key words:** motion controller; open architecture; manipulator; adaptive proportion-integral-derivative (PID) control

## 0 引言

运动控制是数控系统的关键技术之一。随着计算机技术的高速发展,运动控制器已经从以单片机、微处理器为核心的低端控制器发展到以 DSP、CPLD 和 FPGA 为核心的高端控制器<sup>[1]</sup>。控制模式也由传统的基于专用芯片的封闭式系统向基于 PC 的开放式控制系统发展<sup>[2-3]</sup>。灵活的系统集成方式和高速的指令执行速度提高了运动控制性能,改善了控制系统的精度,增强了系统构造的灵活性。例如,美国 Delta 公司生产的开放式运动控制器 PMAC,以摩托罗拉 DSP 为核心,具有 PC/104 总线,可与各种类型的伺服放大器配合使用,并提供了用户伺服算法接口<sup>[4-7]</sup>。

本研究设计一款基于 DSP 的开放式运动控制器,该

系统通过 PCI 总线与上位机通信,DSP 和 CPLD 完成运动控制功能,并根据机械手控制的实际应用,建立包含电机动力学的机械手单关节控制动力学模型,采用单神经元自适应 PID 控制算法实现机械手的精确运动控制。

## 1 系统总体结构

基于 DSP 的开放式运动控制器的结构如图 1 所示。上位机为 PC 机,通过 PCI 总线与下位机通信。为了满足大量的数据传输需要,PCI 控制芯片与 DSP 采用双口 RAM 实现数据传输。下位机集成了 DSP 最小系统、外围辅助电路、存储器扩展电路、CPLD 译码电路、正交编码处理电路、控制电压转换电路、PWM 发生电路等。

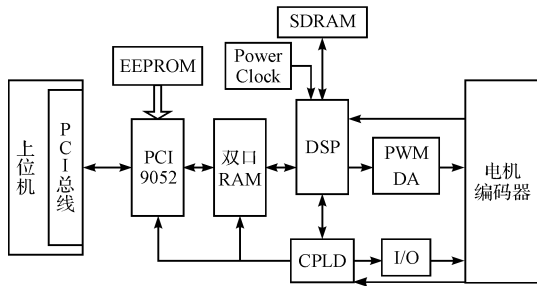


图1 基于DSP的开放式多轴运动控制器结构图

机械手运行过程中,PC机把规划的位置、速度、加速度等运动数据通过PCI总线传递给DSP,DSP完成精确运动控制。在运动控制的每一个伺服周期内,DSP和CPLD处理伺服电机反馈的正交编码信号,以实时计算关节位置和速度,采用闭环控制算法得到期望的控制信号,通过DA或PWM方式输出到伺服驱动器。当伺服驱动器工作在力矩模式或速度模式下,运动控制器采用DA输出。当伺服驱动器工作在位置模式下,运动控制器采用PWM输出。外部的伺服就绪、故障输出、制动释放、限位等信号引入DSP和CPLD,作为系统的状态。DSP和CPLD输出伺服使能、报警清除、模式选择等控制信号,控制电机的启停和运动模式。

## 2 系统硬件结构

系统硬件可以分为DSP及CPLD核心处理模块、通信模块和外设模块。

### 2.1 核心处理模块

核心处理模块完成整个运动控制系统的任务调度、轨迹插补、运动控制、状态监控等功能。处理器采用DSP芯片TMS320F2812。在运动控制过程中,本研究需要实时记录关节位置、速度、加速度信息。为执行复杂的控制算法,需要很大的程序空间和数据空间。本研究选用CY7C1041外扩数据存储空间和程序存储空间,并将其映射到DSP的Zone2存储区域。

CPLD选用EMP240T100,主要实现以下功能:①地址译码,内部专门设计的译码电路可根据DSP的地址信号进行地址译码,产生相应的片选信号,选通SDRAM、DA或双端口RAM;②外部中断逻辑判断,对伺服电机的伺服报警信号、回零信号以及双端口RAM的BUSY信号进行检测和判断,并向DSP发出中断请求;③作为DSP的外扩I/O,并可实现QEP(正交编码脉冲)处理,对电机的正交编码输入信号4倍频后进行计数,反馈给DSP,以计算电机运动速度和位置。

### 2.2 通信模块

通信模块主要完成与上位机的数据交换、任务传

输、状态通告等功能。由于传输数据量大、实时性要求高,为了满足通讯需求,采用PLX公司的PCI9052实现PCI总线通讯。为了提高数据传输速度,满足实时控制要求,在DSP和PCI总线间加入 $2\text{K} \times 16\text{bits}$ 高速双端口静态RAM CY7C133,作为缓存区存储数据。CPLD根据DSP的地址信号进行地址译码,产生片选信号CER,选通双口RAM,并通过控制OE和R/W来访问双端口静态RAM的内部存储单元,完成数据的读取和写入。

### 2.3 外设模块

外设模块包括DA模块、PWM模块、电平转换及光电隔离模块、通用I/O模块等,其中DA模块和PWM模块输出伺服电机的控制电压或脉冲,完成伺服电机的运动速度或位置控制。电平转换和光电隔离模块主要完成不同电压信号的转换和系统抗干扰能力的提升。通用I/O的主要功能是控制电机的模式,检测电机的运动状态。

## 3 系统软件结构

### 3.1 PCI总线驱动开发

对PCI总线进行配置主要是配置PCI9052的配置寄存器(64 Bytes)和局部配置寄存器(84 Bytes)。设备ID、制造商ID、版本号、类别代码、指令寄存器和状态寄存器等配置寄存器在所有的PCI设备中都必须实现<sup>[8-9]</sup>。

PCI总线最重要的功能之一是通过基地址寄存器和局部配置寄存器在地址空间重定位PCI设备。PCI配置寄存器提供有6个基地址寄存器(BASE0~BASE5),BASE0是映射到内存的基地址,BASE1是映射到I/O的基地址,4个空间(BASE2~BASE5)最多可以实现4个局部地址空间的PCI总线访问。该系统的PCI9052的配置寄存器采用默认值,双口RAM挂在局部空间0上,使用片选0作为芯片的选通信号。配置2KB的地址空间,并使能中断输入引脚UNT0。

本研究采用DriverStudio开发PCI总线驱动程序,声明KIoRange类、KMemoryRange类和KInterrupt类来实现对内存空间、I/O空间和中断的操作;用KMemoryRange类创建一个内存资源实例m\_MemoryRange,并在OnStartDevice程序中初始化,使之与双口RAM连接。本研究采用KInterrupt类和KDeferredCall类来实现中断,采用向导在中断服务程序和DPC中增加功能代码。KDeferredCall类封装有DPC的操作;采用KInterrupt类实现硬件中断处理,其成员函数包括中断初始化,以及将一个中断服务程序连接到另一个中断等。

### 3.2 双口 RAM 数据访问设计

上位机软件主要负责运动控制数据的产生以及通过 PCI 总线向下位机传输数据。本研究利用多线程技术,实现上、下位机的实时通讯。为了避免上位机和下位机同时访问同一地址单元,本研究把 2 KB 存储空间分为两个 1 KB 的数据区,PC 端写第 1 个数据区时,DSP 读第 2 个数据区,PC 端机写第 2 个数据区时,DSP 读第 1 个数据区,通过软、硬件的配合,使两个端口的写数据操作和读数据操作分别在两段不同的地址空间内进行,避免 PMAC 卡存在的“闭环控制时伺服控制器需要停止下来等待上位机数据”的问题,提高了控制系统的实时性。

### 3.3 电机控制功能实现

当 DSP 控制系统读取到来自主控 PC 的运动数据后,其核心工作就是执行伺服控制算法,完成高精度的运动控制。主控 PC 产生的粗插补数据周期较大,一般为 20 ms。伺服运动控制需要完成数据的精插补运算,常见的插补算法有直线插补、圆弧插补、样条曲线插补。插补周期一般为 200  $\mu\text{s}$  ~ 800  $\mu\text{s}$ 。为了保证运动平稳和准确定位,要对运动控制中的速度进行规划,也就是对多段插补线段间运行速度与加减速的优化,使插补线段之间的过渡部分尽可能平滑。常见的加减速算法有直线加减速、指数加减速、S 曲线加减速等。伺服控制器根据规划好的运动位置及速度,采用单神经元自适应 PID 控制算法实现期望轨迹的跟踪。

## 4 机械手动力学及控制器设计

具有  $n$  个关节的机械手系统,其动力学方程可表示为:

$$\mathbf{M}(q)\ddot{q} + \mathbf{V}_m(q, \dot{q})\dot{q} + \mathbf{G}(q) + \mathbf{F}(\dot{q}) + \mathbf{F}_d = \boldsymbol{\tau} \quad (1)$$

式中: $q, \dot{q}, \ddot{q}$ —机械手的位置、速度和加速度,  $q, \dot{q}, \ddot{q} \in \mathbf{R}^n$ ;  $\mathbf{M}(q)$ —惯性矩阵,  $\mathbf{M}(q) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ ;  $\mathbf{V}_m(q, \dot{q})$ —离心力和哥氏力矩阵,  $\mathbf{V}_m(q, \dot{q}) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ ;  $\mathbf{G}(q)$ —作用在关节上的重力项,  $\mathbf{G}(q) \in \mathbf{R}^n$ ;  $\mathbf{F}(\dot{q})$ —摩擦力矩,  $\mathbf{F}(\dot{q}) \in \mathbf{R}^n$ ;  $\mathbf{F}_d$ —系统未建模力矩,包括干扰力矩,  $\mathbf{F}_d \in \mathbf{R}^n$ ;  $\boldsymbol{\tau}$ —关节控制力矩,  $\boldsymbol{\tau} \in \mathbf{R}^n$ 。

当机械手采用交流伺服电机驱动,并工作在力矩模式时,运动控制器的控制电压与控制力矩成正比,有:

$$\boldsymbol{\tau} = k\mathbf{u} \quad (2)$$

由于系统受到  $\mathbf{F}_d$  的干扰,常规 PID 控制<sup>[10]</sup>不能满足轨迹跟踪精度要求。本研究采用单神经元自适应 PID 控制实现高精度轨迹跟踪。

PID 控制模型为:

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3)$$

用矩形法数值积分近似代替积分,用一阶后向差分代替微分,得到离散式 PID 表达式:

$$\Delta u(k) = k_p (error(k) - error(k-1)) + k_i error(k) + k_d (error(k) - 2error(k-1) + error(k-2)) \quad (4)$$

单神经元自适应 PID 控制器实质上为一变系数的比例、积分、微分复合控制器。通过加权系数的调整来实现自适应、自组织功能,权系数的调整按照有监督 Hebb 学习规则实现,其基本规则是:如果两个神经元同时被激活,则它们连接强度的增强与它们激励的乘积成正比。因此,控制算法为:

$$u(k) = u(k-1) + K \sum_{i=1}^3 w'_i(k) x_i(k) \quad (5)$$

学习算法为:

$$w'_i(k) = w_i(k) / \sum_{i=1}^3 |w_i(k)| \quad (6)$$

$$w_1(k) = w_1(k-1) + \eta_p z(k) u(k) x_1(k) \quad (7)$$

$$w_2(k) = w_2(k-1) + \eta_i z(k) u(k) x_2(k) \quad (8)$$

$$w_3(k) = w_3(k-1) + \eta_d z(k) u(k) x_3(k) \quad (9)$$

式中: $x_1, x_2, x_3$ —单神经元的输入,  $x_1(k) = e(k) - e(k-1)$ ,  $x_2(k) = e(k)$ ,  $x_3(k) = \Delta^2 e(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)$ ;  $w_i$ —加权系数;  $z(k)$ —输出误差信号,  $z(k) = e(k) = y_r(k) - y(k)$ ;  $\eta_p, \eta_i, \eta_d$ —比例、积分、微分的学习速率;  $K$ —神经元比例系数,且  $K > 0$ 。

实验中,先设定 PID 参数的初始值,  $w_i(k)$  可以通过神经网络的自学习功能进行自适应调整,从而提高控制器的鲁棒性,保证控制系统稳定。

## 5 实验结果及分析

为了验证基于 DSP 的多轴运动控制器的性能,本研究在自行研制的 SCARA 型机械手上进行运动控制试验,如图 2 所示,采用自行研制的运动控制卡控制其中的两个旋转关节。

轨迹跟踪控制算法为单神经元 PID 控制,伺服控制周期为 400  $\mu\text{s}$ ,采用 IQmath 包,在定点 DSP2812 上实现精确的浮点运算,提高控制器的运算精度。设置控制参数为:  $w_1 = 0.4$ ,  $w_2 = 0.2$ ,  $w_3 = 0.4$ ,  $\eta_p = 0.4$ ,  $\eta_i = 0.8$ ,  $\eta_d = 0.1$ ,  $K = 10$ 。机械手期望运动轨迹如图 3 所示,其中 1.6 s 前按照梯形加减速轨迹运动,1.6 s 后按照余弦轨迹运动,运动轨迹的最大关节速度为 3 rad/s。实际轨迹跟踪误差如图 4 所示,运动控制器



图2 SCARA 机械手

的输出控制电压如图5所示。从图中可以看出,两轴的轨迹跟踪误差均在0.01 rad以内,满足机械手运动控制的要求。由图5可以看出,1.6 s 及以后,控制电压发生了较大的变化,这是因为1.6 s 处的加速度发生突变,为了准确跟踪目标轨迹,在自适应PID控制算法的调整下,控制电压也随之变化。实验中还发现,参数 $\eta_D$ 对系统的响应影响较大,经过微分环节,放大了系统噪声,因此 $\eta_D$ 设置应较小。

由实验结果可知,所研制的多轴运动控制器满足机械手这类复杂、非线性系统的运动控制的要求,通过嵌入单神经元自适应PID控制算法,使控制参数在线调整,提高了系统的稳定性,获得了理想的轨迹跟踪效果。

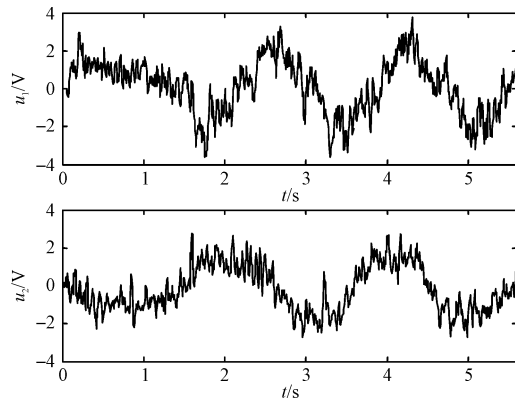


图5 运动控制器输出控制电压

## 6 结束语

本研究研制了一种基于DSP的开放式多轴运动控制器,分析了系统的软、硬件设计与实现。根据多自由度机械手系统的控制特性,建立包含电机动力学的机械手控制模型,采用单神经元自适应PID控制算法实现精确轨迹跟踪。实验结果证明了系统软硬件方案和控制算法的有效性,这对多自由度系统的开放式控制具有借鉴意义。

### 参考文献(References):

- [1] 钱志恒,周亚军. 基于DSP和FPGA的运动控制器[J]. 机电工程,2009,26(1):38-41.
- [2] GU J S, SILVA C W. Development and implementation of a real-time open-architecture control system for industrial robot systems[J]. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**,2004,17(5):469-483.
- [3] 范永,谭民. 机器人控制器的现状与展望[J]. 机器人,1999,21(1):25-31.
- [4] 聂素华,余芸珍. 运动控制器的概述及应用[J]. 科技信息,2006(5):196-198.
- [5] 郗志刚,周宏甫. 运动控制器的发展与现状[J]. 电气传动自动化,2005,27(3):10-14.
- [6] 胡燕,蒋霞玲. 多轴运动控制器的研究[J]. 仪器仪表用户,2006,13(2):102-103.
- [7] 何国军,陈维荣,刘小强,等. 基于DSP与FPGA的运动控制器设计[J]. 电子技术应用,2009(7):35-37.
- [8] 李贵山,陈金鹏. PCI局部总线及其应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2003.
- [9] 王修岩,李宗帅. 基于PCI总线和MCX314的多轴电机伺服控制器设计[J]. 机床与液压,2009,37(6):144-146.
- [10] CERVANTES I, ALVAREZ-RAMIREZ J. On the PID tracking control of robot manipulators[J]. **Systems & Control Letters**,2001,42(1):37-46. [编辑:李辉]

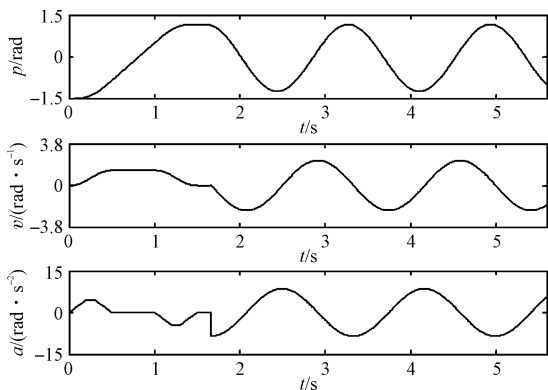


图3 机械手期望运动轨迹

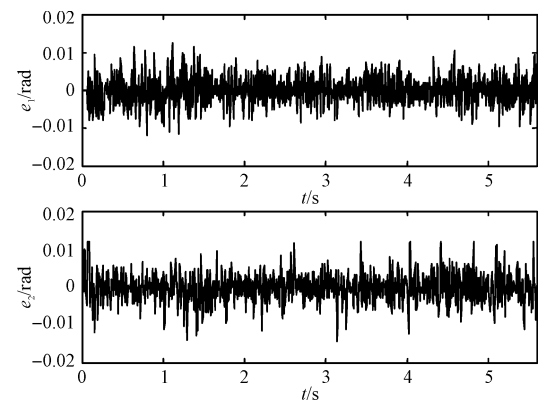


图4 机械手位置跟踪误差