

基于 DSP 和 CPLD 的伺服运动控制器

计时鸣, 陈承钢

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要:针对机器人控制问题,以数字信号处理器(DSP)和复杂可编程逻辑器件(CPLD)为核心设计了交流伺服控制系统,达到优化控制结构、提高系统效率的目的。介绍了控制器硬件构成以及工作原理,详细阐述了 CPLD 电路设计,用状态机的思想实现了脉冲信号发送单元并定量给出了脉冲参数与电机运行状态的关系。最后对控制器进行了上机试验。研究表明,该方案达到了控制伺服放大器的要求,为进一步提高控制器性能奠定了基础。

关键词:数字信号处理器;复杂可编程逻辑器件;状态机;伺服放大器

中图分类号:TP242.6;TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)02-0136-05

Servo motion controller based on DSP and CPLD

JI Shi-ming, CHEN Cheng-gang

(The MOE Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the problem of robot control, a servo motion controller based on digital signal processor(DSP) and complex programmable logic device(CPLD) was presented. After architecture optimization, the performance of controller was improved. The hardware and principle of the motion controller were introduced. The details about the CPLD design which pulse sending unit was achieved with FSM were reported, and the relationship between pulse and motion was given as well. Finally, the experiment and simulation results were given. The results indicate that the design can meet the need of servo control and lay the foundation for the further controller optimization.

Key words: digital signal processor(DSP); complex programmable logic device(CPLD); finite state machine(FSM); servo amplifier

0 引 言

在机器人学领域,如何有效地提高机器人系统的性能始终是学者们十分关注的内容。其中,机器人运动控制器是机器人系统的核心部分,机器人性能的优劣、功能的强弱与控制器密切相关^[1]。

随着集成电路技术、微电子技术、计算机技术的不断发展,机器人运动控制器的研究已经由硬件过渡到软件,由具体控制器过渡到通用开放式体系结构,由单独控制过渡到多机协调控制^[2]。

与早期的基于通用处理器(如 8081、8031)和基于专用微控制器(如 LM628、HCPL1100)的机器人控制器相比,基于 PC 平台的 DSP 和 CPLD 协处理器的开

放式运动控制器具有信息处理能力强、开放程度高、运动轨迹控制准确和通用性好的特点^[3,4]。但是,在以往的设计中^[5],DSP 还要直接控制执行机构,不利于运算能力的发挥。最大程度地发挥 CPLD 协处理器的作用、减轻 DSP 的负担,是提高控制性能的重要途径,也有利于改善系统通用性^[6]。

笔者开发的控制系统基于三级 CPU 控制的控制器模型,即 PC 为第一级 CPU,负责系统管理、人机界面、轨迹规划等复杂运算;DSP 为第二级 CPU,它与协处理器 CPLD 一起负责全部关节的运动控制算法的实现和控制量的给定以及误差跟踪等功能;交流伺服放大器为第三级 CPU,实现交流伺服电机的三闭环数字控制。

1 伺服控制器硬件组成和工作原理

控制系统总体框图如图 1 所示。

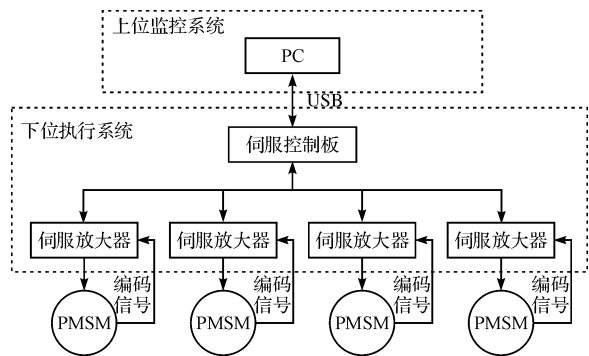


图 1 控制系统总体框图

下位执行系统包括伺服控制板和交流伺服放大器,主要实现机器人各关节电机(PMSM)的精确控制。该系统以基于 DSP 和 CPLD 的伺服控制板为核心,能对各关节电机协调处理。控制板接收上位机指令,并对电机正交编码器返回的编码信号实时处理后得到位置、速度信息,反馈给上位机。交流伺服放大器负责电机的三环数字控制。

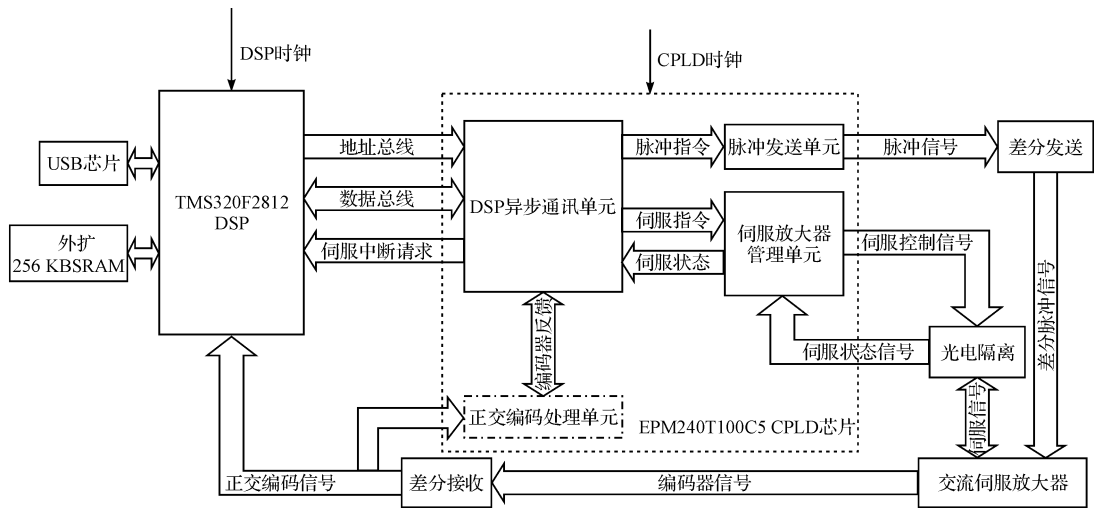


图 2 DSP 伺服运动控制器结构框图

下面以四关节机械臂为例说明该控制器的工作原理:

PC 机把轨迹信息通过 CY7C68013 USB2.0 芯片送入 DSP,后者通过固化的算法计算出每个关节的运动量。DSP 将计算结果以脉冲指令的方式发送给 CPLD,随后以查询方式读取伺服状态。CPLD 按脉冲指令发送脉冲信号到伺服放大器完成电机驱动。

在一个伺服周期中,DSP 的 QEP 单元与 CPLD 的编码处理单元各自负责两路正交编码信号的处理。对 DSP 来说,两路反馈信号的计数器工作在增减计数模

DSP 伺服运动控制器结构框图如图 2 所示,该控制器可实现两路编码反馈和电机控制。其核心是 TI 公司的 TMS320F2812 DSP 芯片和 ALTERA 公司的 MAXII 系列 EPM240T100C5 CPLD 芯片。DSP 通过 USB 芯片完成与上位机的实时通讯,并完成运动量计算、误差补偿等工作。DSP 将计算得到的运动量(位置、速度)转换成脉冲指令发送到 CPLD。后者通过异步通讯单元解析指令^[7-8],送入脉冲发送单元完成脉冲发送,然后通过一系列外围元件最终送入伺服放大器完成电机运动。脉冲个数代表角位移量,频率代表角速度。同时,为了节约 DSP 有限的 GPIO 资源,CPLD 内置伺服放大器管理单元,并通过异步通讯单元与 DSP 交换伺服放大器数据。当伺服放大器出现紧急情况时,CPLD 可向 DSP 发起外部中断请求以保证意外及时得到处理。由于一片 DSP 内置了 2 个 QEP 单元,因而对两路编码反馈直接将正交编码信号送入 QEP 即可。若要处理多于两路编码反馈,可在 CPLD 中加入正交编码处理单元(图中点划线部分),通过异步通讯单元向 DSP 反馈数据。因此,该方案具有很大的灵活性。

式,另外两路反馈信号经过 CPLD 处理后变成脉冲个数暂存在寄存器中。DSP 通讯得到 CPLD 的寄存器数值,根据周期内计数器值的变化分别得到 4 路电机的角位移,并根据 M/T 法算出角速度。结束后计数器和寄存器被清零。

2 CPLD 电路

CPLD 主要包括 DSP 异步通讯单元、伺服放大器管理单元、脉冲发送单元、正交编码处理单元几个部分。下面分别予以介绍。

2.1 DSP 异步通讯单元

根据 DSP 外设读写时序,将读操作设置为上升沿触发,写操作为下降沿触发。

控制板上外扩了 USB、SRAM、FLASH 芯片等其他资源,需要对片选信号 CS0/1 进行细分。查阅 TI 手册^[9]可得到如下电路:

wire CS = !CS0_n & XA13 & !XA14_n;

2.2 伺服放大器管理单元

由于伺服放大器连接着交流伺服电机,不可避免地引入了抖动信号,为了保证系统的稳定,有必要进行去抖处理。

此处采用了工程上常用的延时去抖法,即只有当电平稳定超过一定时间后才认为该电平有效。限于篇幅就不再赘述。

该单元还有一个功能是将 DSP 发送的指令信息解读为控制信号(如伺服开关,行程限位开关等)。此外还要将伺服状态反馈给 DSP,如定位完毕信号、速度到达信号等。具体可参照伺服放大器说明书^[10]。

2.3 正交编码处理单元

正交编码处理电路的方向检测逻辑决定了输入序列中的先导序列,接着产生方向信号作为计数器的计数方向输入。如果 QEP 1 是先导序列,则所选的定时器增计数;如果 QEP 2 是先导序列,则所选的计数器减计数。正交编码处理电路对输入的两列脉冲的两个边沿都计数,因此,由它所产生的时钟频率是每个输入脉冲序列频率的 4 倍。

2.4 脉冲发送单元

该单元采用状态机设计方法,状态转移图如图 3 所示。

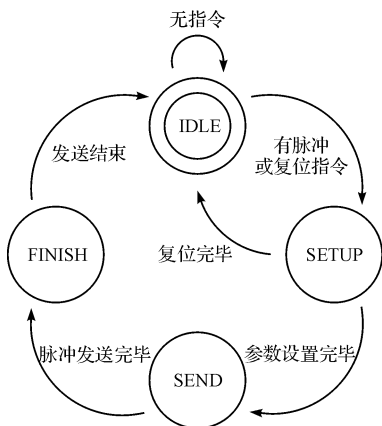


图 3 脉冲发送单元状态转移图

状态说明:

(1) 空闲状态(IDLE):单元等待接收脉冲或复位

指令。

(2) 参数设置状态(SETUP):如 reset 电平为低,则清零所有相关寄存器;如收到脉冲指令,则设置 count(决定脉冲频率)和 times(决定脉冲个数)寄存器为通讯单元接收的数据。

(3) 发送状态(SEND):根据设置好的参数发送脉冲。

(4) 结束状态(FINISH):清零相关寄存器,拉低输出电平。

3 脉冲控制在伺服电机控制中的应用

对工作在位置控制模式的伺服放大器来说,输入脉冲的个数决定了电机角位移,频率决定了电机角速度,频率变化率决定了电机角加速度。因此,找出 CPLD 的脉冲参数 count 和 times 与电机运转的对应关系极为重要。

3.1 脉冲频率计算方法

$$f_{\text{pulse}} = \frac{f_{\text{CPLD}}}{2 \times \text{count}} \quad (\text{单位:Hz}) \quad (1)$$

式中: f_{pulse} —输出脉冲频率, f_{CPLD} —CPLD 时钟频率,此处为 50 MHz,count—计数器值, $2 \times \text{count}$ —脉冲的占空比为 1。

3.2 脉冲与角位移的关系

$$f_p = f_{\text{pulse}} \times EG \quad (\text{单位:Hz}) \quad (2)$$

式中:EG(Electronic Gear)—电子齿轮比, f_p —等效脉冲数。

那么,电机角位移为:

$$\theta = 2\pi \frac{p \times EG}{Res} \quad (\text{单位:rad}), p \leq \text{times} \quad (3)$$

式中:Res—编码器分辨率,p—脉冲个数。

3.3 脉冲与角速度的关系

$$\omega' = \frac{60}{Res/f_p} = \frac{60 \times \frac{f_{\text{CPLD}}}{2 \times \text{count}} \times EG}{Res} = 30 \frac{f_{\text{CPLD}} \times EG}{\text{count} \times Res} \quad (\text{单位:rpm}) \quad (4)$$

为了编程方便,转化成关于 count 的表达式:

$$\text{count} = \pi \frac{f_{\text{CPLD}} \times EG}{\omega \times Res} \quad (\omega \text{ 单位:rad/s}) \quad (5)$$

3.4 脉冲与加速度的关系

在机械臂关节轨迹规划中,一般取加速度为线性函数(包括常数)。设角加速度为:

$$\dot{\omega} = at + b \quad (6)$$

$$\omega = \frac{1}{2}at^2 + bt + c \tag{7}$$

$$\theta = \frac{1}{6}at^3 + \frac{1}{2}bt^2 + ct + d \tag{8}$$

若考虑加速度为常数的分段加速(θ 没有累加)情况,则 $a=0, d=0$,由式(8)得:

$$t = \frac{-c + \sqrt{c^2 + 2b\theta}}{b} \tag{9}$$

将式(3)和式(9)代入式(7),得:

$$\omega = \sqrt{c^2 + 4\pi b \frac{EG \times p}{Res}} \text{ (单位:rad/s)} \tag{10}$$

代入式(5),得:

$$count = \pi \frac{f_{CPLD} \times EG}{\sqrt{Res^2 \times c^2 + 4\pi b Res \times EG \times p}} \tag{11}$$

式中: b —给定角加速度, c —初始角速度。

3.5 Matlab 仿真

在实际应用中,设计人员关心的是给定角位移下以恒定加速度加速到给定角速度的情况(仿真参数如表 1 所示)。

表 1 仿真参数设置

f_{CPLD}/MHz	EG	Res	c	$times$	$\omega_{\max}/\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$
50	1	8 192	0	8 192	30

这组参数代表了初始速度为 0,电机在一圈内加速到 $30 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ (为了直观,转速单位转换为 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$) 的情况。

角速度随脉冲的变化情况如图 4 所示,从图中可以看到角速度在加速初期变化较快。从物理意义上解释:当初段速度较小,脉冲频率也小,单位脉冲的间隔时间长,因此单位脉冲的角速度变化较大。另外,从图中可以看到,该变化过程十分平缓,这符合控制的要求。

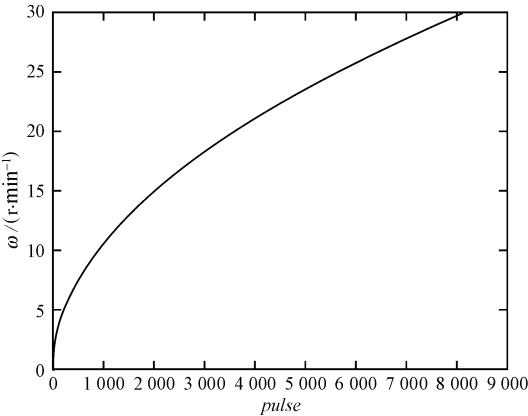


图 4 脉冲-角速度关系图

$pulse$ 和 $count$ 的关系(即脉冲个数和脉冲频率的关系)如图 5 所示, $count$ 跟脉冲频率(角速度)成反比。脉冲频率在初期变化很快,后逐渐平缓,这跟图 4

相对应。图 5 直接给出了程序运行时应给出的参数值,对编程有明显的指导意义。

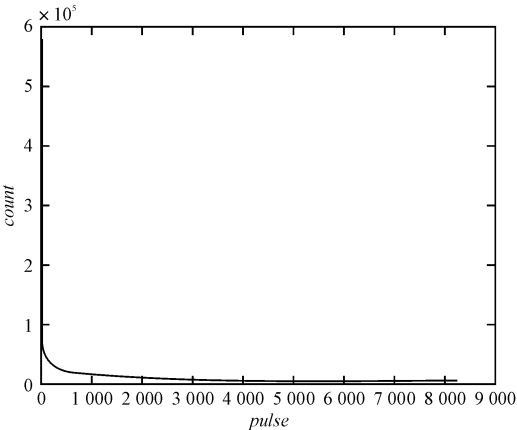


图 5 脉冲-计数器值关系图

角速度对时间(即角加速度)的变化情况如图 6 所示,可以看到,角速度的确以直线上升,这验证了上述结果的正确性。此时的角加速度为 $0.785 4 \text{ rad/s}^2$ 。

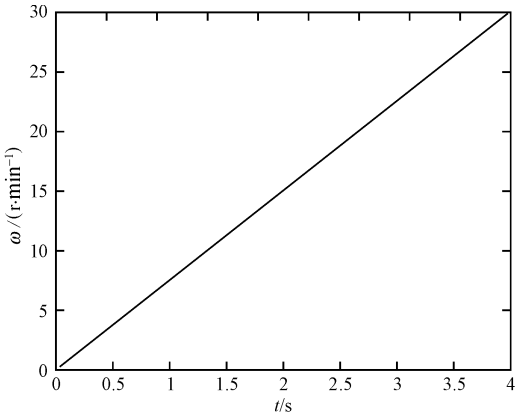


图 6 时间-角速度关系图

4 上机实验

4.1 实验平台及程序

平台为一套三菱 MR-J2 10 A 交流伺服放大器和配套电机,工作在位置控制模式,通过自制电缆与控制板连接。测试程序框图如图 7 所示。

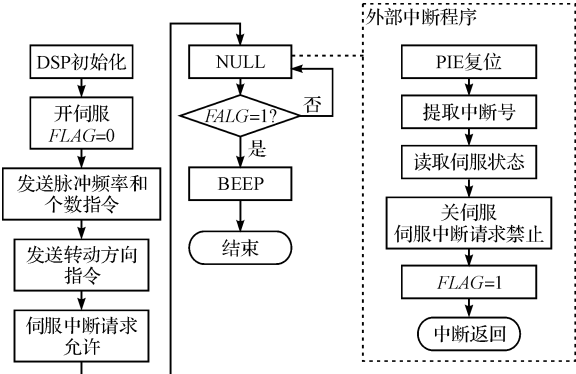


图 7 测试程序框图

该测试程序目的在于测试伺服控制板工作是否正常。在 DSP 端编写测试程序,先发送 65 535 个计数值为 1 000 的脉冲数据。则输出脉冲频率为:

$$f_{\text{pulse}} = \frac{50 \times 10^6}{2 \times 1\,000} = 25 \times 10^3 = 25 \text{ kHz}$$

用伺服放大器返回的定位完毕信号作为外部中断源,触发后进入中断程序读取伺服状态,确认为正常中断后关闭伺服放大器并置标志位。返回到主程序跳出空循环响蜂鸣器后退出程序。

在实际运行中, NULL 空指令将被控制算法取代,这样 DSP 从重复劳动中解放出来,充分发挥其强大的运算能力。

4.2 实验结果

发送至伺服放大器的脉冲如图 8 所示,可以看到脉冲为频率 25 kHz 占空比 1 的方波,与预期相符。图中的抖动属轻微抖动,在正常范围内。

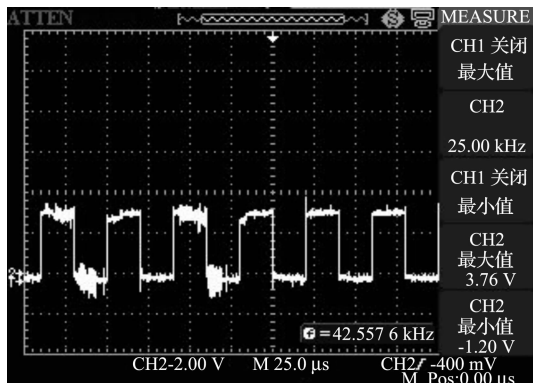


图 8 发送脉冲

正交编码信号的 A、B 相如图 9 所示。可以看到 A 相超前 B 相 90°,这是典型的正交信号。该信号经 SN74LVC4245A 作 5 V ~ 3.3 V 电平转换后便可直接送入 DSP QEP 端口作为编码器反馈^[11-12]。

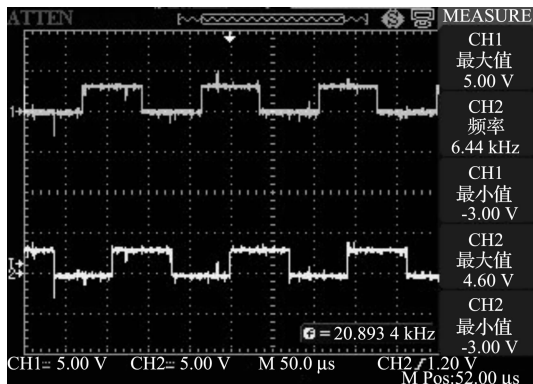


图 9 正交编码信号(上 A 相,下 B 相)

以上实验结果表明,使用本方案可以充分发挥 CPLD 的处理能力,达到预期设计目标。

5 结束语

采用“DSP + CPLD”的结构,有效避免了 DSP 的资源浪费,保证其运算能力的有效发挥;同时,利用 CPLD 稳定、高效的外设管理能力,将其设计为一块伺服放大器管理芯片,提高了系统稳定性。接着,从实际应用出发推导出了脉冲与角位移、角速度、角加速度的关系并予以 Matlab 仿真。最后通过实验验证了该方案的可行性,以及脉冲计算公式的正确性,得到了满意的结果。

该研究提供了一种改进的机器人控制器方案,能够在不改变原有架构的基础上挖掘系统潜力、提高控制性能。得益于该方案良好的扩展能力,未来可用于多关节机械臂的控制。

限于篇幅,笔者并未在先进电机控制策略方面展开研究,今后可主攻该方向。

参考文献(References):

- [1] 毛春利,周国荣. 基于 USB 的通用机器人控制器[J]. 工业控制与应用,2005,24(1):43-50.
- [2] ALTINTAS Y, ITO M, EROL N A. Open system architecture modular toolkit for motion and machining process control [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics,2003,5(3):281-291.
- [3] 范庆彬. 基于 DSP 的伺服运动控制器研究与开发[J]. 工业控制与应用,2008,27(6):32-34.
- [4] 杨 军,孙志辉. 基于 DSP 的位置伺服系统[J]. 机电工程技术,2008,37(1):65-67.
- [5] 毛春利. 基于 DSP 和 FPGA 的四关节实验室机器人控制器的研制[D]. 长沙:中南大学信息科学与工程学院,2005.
- [6] 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.
- [7] 王忠勇,石申同,李清池. 基于 DSP 和 CPLD 的双通道数字正弦机[J]. 火炮发射与控制学报,2008(3):52-59.
- [8] 魏明林,徐向纭,钟亮平. 嵌入式网络化运动控制器的设计[J]. 机电工程,2008,25(6):78-81.
- [9] Texas Instruments. TMS320F28x External Interface (XINTF) Reference Guide[M]. Texas Instruments Incorporated,2003.
- [10] MITSUBISHI. General-Purpose Interface MR-J2-xA Specifications and Installation Guide[M]. MITSUBISHI ELECTRIC,2000.
- [11] 罗惠谦,伍骏闯. 基于 TMS320F2812 的矢量控制系统的研究[J]. 机电技术,2009(4):49-50.
- [12] 陈俊青,马钧华. 基于 Vxworks 实时操作系统与多路 DSP 伺服系统的网络通信[J]. 轻工机械,2008(6):80-83.

[编辑:张 翔]