

## 基于 DSP 和 FPGA 的望远镜伺服控制系统设计

邓永停<sup>1,2</sup>, 李洪文<sup>1</sup>, 王建立<sup>1</sup>, 阴玉梅<sup>1</sup>, 吴庆林<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 针对交流永磁同步电机驱动的大型望远镜的高精度、低速平稳运行问题, 研制了一套基于浮点数字信号处理器(DSP)和现场可编程逻辑门阵列(FPGA)的驱动控制器。该控制器以 DSP 作为主控制器, FPGA 作为协控制器, 主控制器完成控制算法、接受指令等功能, 协控制器实现 PWM 产生、电流采集、速度检测等功能。根据永磁同步电机矢量控制原理建立了永磁同步电机的数学模型, 进行了永磁同步电机控制器的硬件设计; 在硬件设计的基础上, 采用自适应 PI 对望远镜的低速控制性能进行了研究。实验结果表明: 当望远镜以 32.4 (″)/s 匀速运行时, 速度波动范围为 $\pm 0.648$  (″)/s; 当对望远镜做最大速度为 1 (°)/s, 最大加速度为 1 (°)/s<sup>2</sup> 的正弦引导时, 最大引导误差为 9.72 ″, 引导误差 RMS 值为 3.24 ″; 该驱动控制系统能够实现望远镜的低速平稳运行, 满足大型望远镜伺服控制系统的性能要求。

**关键词:** 永磁同步电机; 矢量控制; DSP; FPGA; 自适应 PI; 低速控制

**中图分类号:** TP391.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)03-0908-07

## Design of telescope servo system based on DSP and FPGA

Deng Yongting<sup>1,2</sup>, Li Hongwen<sup>1</sup>, Wang Jianli<sup>1</sup>, Yin Yumei<sup>1</sup>, Wu Qinglin<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A digital controller based on digital signal processor (DSP) and field programmable gate array (FPGA) was designed to solve the problem of high precision and low velocity of large telescope ac servo system drove by permanent magnet synchronous motor (PMSM). A DSP was used as primary controller to perform the function such as computing control algorithm and receiving instructions. A FPGA was used as secondary controller to achieve the function such as PWM generation, current sampling and speed acquisition. Mathematic model of PMSM was found based on vector control, and hardware of PMSM digital controller was designed. The large telescope table was tested at low speed through employing adaptive PI controller after completing the controller hardware design. The experiment results demonstrate that when the large telescope table run at 32.4 (″)/s, the range of velocity fluctuation is  $\pm 0.648$  (″)/s; when the large telescope run in the mode of sine guide, which is with the maximum velocity 1 (°)/s and maximum acceleration 1 (°)/s<sup>2</sup>. The maximum guide error is 9.72 ″, and the value of RMS error is 3.24 ″. The drive control system can realize high precision control of large telescope and meet the need of system performance.

**Key words:** PMSM; vector control; DSP; FPGA; adaptive PI; low speed control

收稿日期: 2013-07-20; 修订日期: 2013-08-15

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目(065X32CN60)

作者简介: 邓永停(1987-), 男, 博士生, 主要从事大口径望远镜精密跟踪控制方面的研究工作。Email: dyt0612@163.com

导师简介: 李洪文(1970-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事大口径望远镜系统控制方面的研究。Email: lihongwen1970@yahoo.com

## 0 引言

为了探测深空目标,需要研制分辨率更高、口径更大的地基望远镜。大口径望远镜是集光、机、电于一体的集成系统,其主要作用是对深空目标进行跟踪并测量目标的位置和参数<sup>[1]</sup>。由于深空目标比较遥远,为了使望远镜在克服风载的同时,对所探测目标进行低速平稳跟踪,要求望远镜伺服控制系统的跟踪精度达到角秒级<sup>[2]</sup>。影响望远镜伺服控制系统跟踪精度的主要因素有轴系的驱动方式、驱动电机的类型、驱动器的设计以及系统的控制策略等,文中重点介绍望远镜伺服控制系统驱动器的设计。

传统的大型光电测量设备伺服控制系统一般采用有刷直流电机作为执行机构<sup>[3]</sup>。但是,有刷直流电机存在结构复杂、噪声大和摩擦等问题,并且随着电机功率的增加,有刷直流电机的局限性更加明显。而交流永磁同步电机具有体积小、功率密度高、转矩电流比高、低速性能好等优点<sup>[4-6]</sup>,可以实现大型光电跟踪设备对目标的精密跟踪。国外大型望远镜已经成功采用了交流伺服控制技术,如西班牙 10.4 m 的 GTC 和日本 8.2 m 的 Subaru, 未来的更大的望远镜 TMT(30 m)、GMT(26 m)也都准备采用这种技术;目前,国内望远镜伺服控制技术也正在朝着交流化的方向发展,因此,基于交流永磁同步电机的伺服控制系统是设计下一代大型光电跟踪设备的发展趋势。

文中是在两米级望远镜的轴系采用直接驱动方式,电机采用交流永磁同步电机的条件下,对伺服控制器进行硬件设计;然后,在硬件设计的基础上对望远镜的低速性能进行测试。永磁同步电机控制器的设计通常采用定点数字信号处理器 DSP 并配合一些外围电路来完成电机的控制,定点 DSP 控制器的不足之处是:无法高速、高精度的完成复杂的控制策略;外围电路模块固定,无法进行系统升级,缺乏灵活性<sup>[7-8]</sup>。近年来,现场可编程逻辑门阵列 FPGA 已经逐步应用于电机控制中,应用 FPGA 可以增加系统的灵活性,简化系统结构<sup>[9-11]</sup>。根据望远镜低速控制的需要设计了基于高精度浮点 DSP 和 FPGA 的数字伺服控制器,并采用自适应 PI 控制算法对低速

性能进行了研究,实验结果表明,该控制方案能够实现望远镜转台的低速平稳运行,对望远镜交流伺服控制系统设计具有重要意义。

## 1 交流永磁同步电机控制原理

### 1.1 永磁同步电机数学模型

永磁同步电机的三相对称定子绕组与转子永磁体之间是通过气隙磁场耦合的,电机的定子和转子之间存在相对运动,定转子之间的位置关系是随时间变化的,因此,永磁同步电机控制系统是一个多变量、非线性、强耦合的控制系统<sup>[12]</sup>。为了比较准确的分析同步电机定转子各个参数的变化规律,需要建立现实可行的同步电机数学模型,现对模型做如下假设:(1)忽略铁芯饱和效应;(2)气隙磁场呈正弦分布;(3)不计涡流和磁滞损耗;(4)转子上没有阻尼绕组,永磁体也没有阻尼作用。

对于表面、隐极式永磁同步电机,经过 Park 变换后,在  $dq$  坐标系中的数学模型为:

$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + p\omega L_d i_d + p\omega\psi_f \quad (1)$$

$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - p\omega L_q i_q \quad (2)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p\psi_f i \quad (3)$$

$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + R_\Omega \omega + T_l \quad (4)$$

式中: $u_d$ 、 $u_q$ 为  $dq$  轴定子电压分量; $i_d$ 、 $i_q$ 为  $dq$  轴定子电流分量; $R_s$ 为定子相绕组; $L_d=L_q=L$ 分别为电机直、交轴电感; $p$ 为转子极对数, $\omega$ 为转速; $\psi_f$ 为转子磁链; $R_\Omega$ 为电机阻尼系数; $T_e$ 为电磁转矩; $T_l$ 为电机的负载力矩。

### 1.2 永磁同步电机矢量控制

磁同步电机是一种多变量、非线性、强耦合的对象,通常采用矢量控制的方法实现电流在  $dq$  轴坐标系中的解耦,从而对励磁分量和转矩分量进行独立控制,使交流电机的控制类似于他励直流电机的控制。矢量控制中需要利用矢量坐标变换将交流电机内部复杂耦合的非线性变量变换到与转子相对静止的坐标系中;如图 1 所示, $dq$  轴坐标系是随电机气隙磁场旋转的坐标系, $d$  轴是永磁同步电机转子

励磁磁链方向,  $q$  轴超前  $d$  轴  $90^\circ$ ,  $\theta_e$  为  $d$  轴轴线与电机  $a$  相绕组轴线之间的夹角,  $\omega_e$  为转子旋转的电角速度; 由  $abc$  坐标系的三相电流到  $dq$  同步旋转坐标系的交、直轴之间的变换为:

Clarke ( $abc$ )  $\rightarrow$  ( $\alpha\beta$ ) 坐标变换

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{2}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \quad (5)$$

Park ( $\alpha\beta$ )  $\rightarrow$  ( $dq$ ) 坐标变换

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_e & \sin\theta_e \\ -\sin\theta_e & \cos\theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

Park<sup>-1</sup> ( $dq$ )  $\rightarrow$  ( $\alpha\beta$ ) 坐标变换

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_e & -\sin\theta_e \\ \sin\theta_e & \cos\theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (7)$$

Clarke<sup>-1</sup> ( $\alpha\beta$ )  $\rightarrow$  ( $abc$ ) 坐标变换

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (8)$$

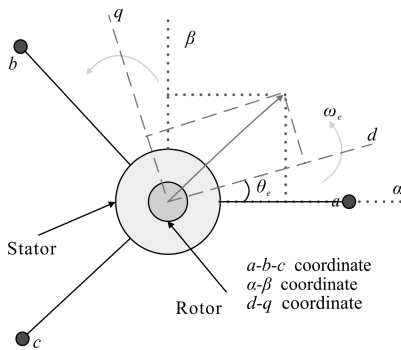


图 1 永磁同步电机矢量控制坐标系

Fig.1 Coordinate system of PMSM vector control

## 2 系统硬件组成

### 2.1 系统硬件结构

数字控制器采用基于浮点 DSP 和 FPGA 的结构, 并设计信号检测电路和功率驱动电路以完成永磁同步电机的控制, 系统的硬件结构如图 2 所示。其中 DSP 采用 TI 公司的浮点型 DSP-TMS320F28335, FPGA 采用 Altera 公司的 EP3C40F324, 功率驱动电路采用大功率智能 IPM-PS21A79 电压逆变器, 电流传感器采用 LEM 公司的霍尔闭环式传感器 LTS25-NP, 电机位置传感器采用高分辨率的圆光栅编码器。

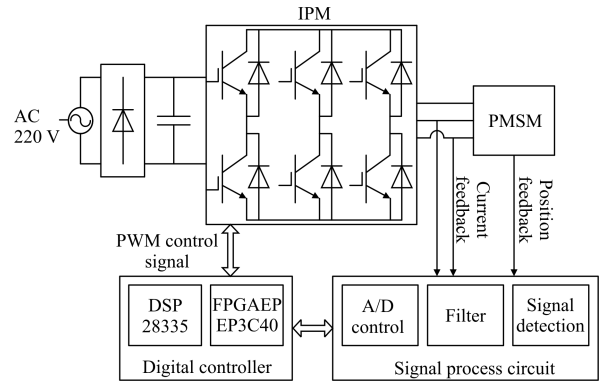


图 2 系统硬件结构框图

Fig.2 Block diagram of hardware system

### 2.2 数字控制器硬件结构

数字控制器主要由 DSP 模块和 FPGA 模块组成, FPGA 可以完成高速并行硬件操作, 但不适合浮点运算, 因为浮点运算占用大量的逻辑单元, 所以浮点运算采用 32 位的高速数字信号处理器 DSP 来完成, 其特点是 CPU 由 32 位的定点结构和一个单精度的 FPU 组成, 可以完成复杂的控制算法。根据 DSP 和 FPGA 各自的特点, 进行控制器的功能划分, 如图 3 所示, 其中 DSP 作为主控制器, 主要负责接收上位机速度指令, 完成速度环和电流环的计算; FPGA 作为协控制器, 负责完成与 DSP 的通信、转速计数、模数转换器的控制、系统故障处理和 PWM 控制信号的调制。

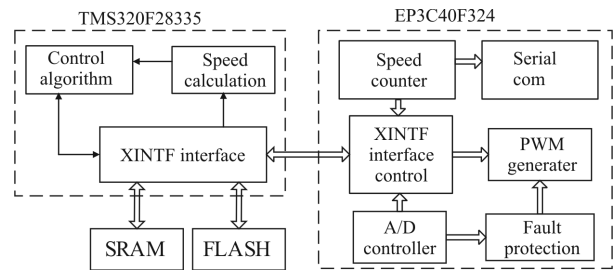


图 3 数字控制器功能框图

Fig.3 Hardware block diagram of digital controller

## 3 系统功能实现

### 3.1 DSP 功能实现

DSP 通过内部 XINTF 接口扩展了 SRAM 和 FLASH, SRAM 用作程序运行时内存和存储转速等控制信息以便对控制系统性能进行分析; FLASH 用于 DSP 启动时程序加载。DSP 与 FPGA 的通信通过

XINTF 接口进行的, DSP 通过 PWM 波定时器中断周期性读取来自 FPGA 的转速计数值和电流采样值, 并执行速度环控制算法和电流环的矢量控制算法, 最后, DSP 发送电流环控制指令给 FPGA。

### 3.2 FPGA 功能实现

FPGA 作为协控制器, 其功能实现采用自顶向下的模块设计方法, 将 FPGA 需要完成的功能分为独立的功能模块, 单独进行测试和验证, 最后在顶层实体中直接进行调用。根据 FPGA 所实现的功能, 功能模块可以划分为: A/D 采样模块、PWM 产生模块, 通信模块、转速计数模块及故障保护模块。

#### 3.2.1 A/D 采样模块

A/D 采样模块通过有限状态机来实现, 状态机根据 16 位模数转换芯片 AD7656 的时序进行编写。A/D 采样控制器的触发信号由 DSP 周期中断程序产生的, AD7656 的采样频率与 PWM 的载波频率相同, 都是 15 kHz, A/D 采样结束时产生结束标志信号给 DSP 以启动电流环的计算。由于永磁同步电机的矢量控制算法需要 A、B 两相电流值, 因此 AD7656 只需采集电流传感器的两相电压即可。有限状态机如图 4 所示, 分为开始、等待触发信号、开始转换、等待转换结束、读取通道 1 电压、读取通道 2 电压、给 DSP 转换结束标志。

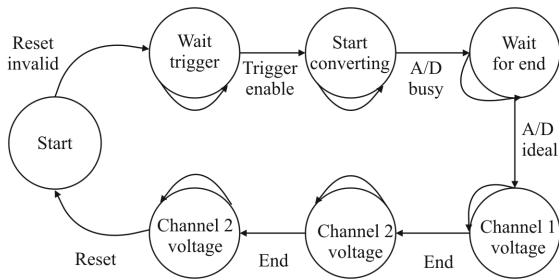


图 4 A/D 转换的有限状态机  
Fig.4 State machine of A/D module

#### 3.2.2 PWM 产生模块

根据永磁同步电机矢量控制原理, 需要 6 路 PWM 信号驱动 IPM 电压逆变器, 该控制器中的 PWM 信号是通过三角波比较法产生的。DSP 在完成电流环的计算后, 将三组 PWM 控制信号以数字量的形式通过 XINTF 接口发送到 FPGA 中 PWM 波产生器的比较寄存器 CMPx, PWM 波产生器的时间基准计数器 CTR 与比较寄存器 CMPx 进行比较产生所需占空比的 PWM 控制信号。为了防止智能 IPM

中上、下桥臂的 IGBT 直通造成短路, 需要在 PWM 信号中加入死区, 死区时间由死区寄存器设定, 通常为 5 μs。DSP 周期中断是由 PWM 模块产生的, 当时间基准计数器计数值 CTR 等于零时产生 DSP 外部中断信号, PWM 产生模块如图 5 所示。

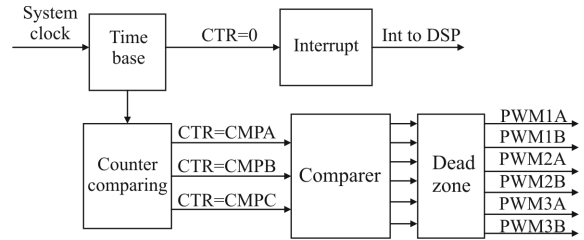


图 5 PWM 产生模块

Fig.5 Module of PWM generator

#### 3.2.3 通信模块

通信模块包括 XINTF 接口控制和串口通信, DSP 内部的 XINTF 可以配置各种系统参数, 以便能够与不同的外部扩展设备无缝接口, FPGA 以外部存储器的形式被 XINTF 接口访问。为了达到时序匹配, FPGA 中的 XINTF 接口控制需要利用 XINTF 接口的数据、地址总线和读、写信号建立双向 RAM; 双向 RAM 负责读取编码器转速计数值和电流传感器的 A/D 采样值, 以及向 PWM 产生模块输出 DSP 电流环的数字控制量。在 FPGA 中利用 Verilog 语言设计 14 个字节深度 FIFO 的串口通信模块, 通过串口通信可以将电机转速数据快速、实时的发送到上位机, 以便对控制系统性能进行分析。

#### 3.2.4 转速计数模块

当永磁同步电机处于极低转速运行时, T 法和 M/T 法测速造成较大的采样时间延迟, 而 M 法测速有固定的采样时间延迟, 适合极低速度运行时的速度检测<sup>[12-13]</sup>; 因此 FPGA 的转速计数模块采用 M 法测速。转速计数模块包括鉴向、四倍频和计数三部分电路, FPGA 接收来自信号检测电路的 A、B、Z 脉冲, 经过转速计数模块得到 32 位转速计数值, 供 DSP 周期中断通过 XINTF 接口读取。M 法测速转速公式为:

$$n = \frac{60M}{T_s Z} \tag{9}$$

式中:  $n$  为电机转速, 单位是 r/min;  $M$  是一个速度采样周期  $T_s$  内的脉冲计数值;  $Z$  是电机旋转一圈产生的脉冲数 ( $Z = \text{倍频系数} \times \text{编码器光栅数}$ )。

### 3.2.5 故障保护模块

为了增强控制系统的可靠性,需要实时检测系统的故障信号,并对故障信号做出及时的保护处理。故障保护模块需要扫描来自功率驱动电路的母线过流、过压和过温信号,以及来自 A/D 采样模块的相电流过流信号,如果上述其中任意一个故障信号产生,FPGA 通过组合逻辑电路立即封锁 PWM 驱动信号,使功率驱动电路的 IGBT 全部关断,保护电机控制系统。

## 4 控制算法实现

永磁同步电机控制结构如图 6 所示,控制算法主要由电流环和速度环组成。为了获得最大的电磁力矩,电流环采用直轴电流分量  $I_d=0$  的控制方法;电流环需要实时、快速、准确地跟踪电流指令信号,因此电流控制器采用系统响应快,能够消除静态误差的 PI 控制器<sup>[14]</sup>。

速度环的作用是增强系统的抗负载扰动的能力,抑制速度波动,实现稳态无静差。大型望远镜属于大惯性系统,当处于极低转速运行时,转台的摩擦等非线性因素造成低速跟踪的抖动和爬行,影响系统低速跟踪精度,引起较大跟踪误差<sup>[15-16]</sup>。常规的 PI 控制算法并不能很好解决望远镜低速平稳运行问题,而自适应 PI 控制器在永磁同步电机控制中具有较高的效果,因此在常规 PI 速度控制器的基础上,采用单神经元自适应 PI 控制器对望远镜低速进行控制。

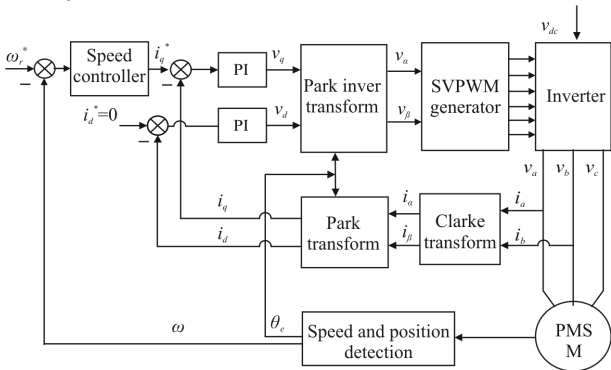


图 6 永磁同步电机控制结构

Fig.6 Structure of permanent magnet synchronous motor control

单神经元自适应 PI 控制算法为<sup>[17]</sup>: 控制器输入为  $r(k)$ , 输出为  $y(k)$ , 控制所需的状态变量为  $x_1(k)$ 、 $x_2(k)$ ,

状态变量的形式与常规 PI 相同:

$$x_1(k) = r(k) - y(k) = e(k) \quad (10)$$

$$x_2(k) = e(k) - e(k-1) \quad (11)$$

控制器的输出  $u(k)$  为:

$$u(k) = u(k-1) + K \sum_{i=1}^2 \omega_i(k) x_i(k) \quad (12)$$

式中:  $K$  为神经元比例系数;  $\omega_i(k)$  为对应  $x_i(k)$  的加权系数, 单神经元正是通过对加权系数的调整来实现自适应和自功能学习的。对系数的调整采用输出误差平方为性能指标的搜索算法, 引入性能指标函数:

$$J = \frac{1}{2} [r(k+1) - y(k+1)]^2 = \frac{1}{2} Z(k+1)^2 \quad (13)$$

使加权系数  $\omega_i(k)$  的修正沿着  $J$  的减小方向, 对  $\omega_i(k)$  的负梯度方向搜索调整。

$J$  关于  $\omega_i(k)$  的梯度为:

$$\frac{\partial J}{\partial \omega_i} = -z(k+1) \frac{\partial y(k+1)}{\partial u(k)} \cdot \frac{\partial u(k)}{\partial \omega_i(k)} \quad (14)$$

$\omega_i(k)$  的调整量为:

$$\Delta \omega_i(k) = \omega_i(k+1) - \omega_i(k) = -\eta_i \frac{\partial J}{\partial \omega_i(k)} = \eta_i z(k+1) \frac{\partial y(k+1)}{\partial u(k)} \cdot 2 \frac{\partial u(k)}{\omega_i(k)} \quad (15)$$

式中:  $\eta_i$  为比例、积分作用的学习率, 通常  $\partial y(k+1)/\partial u(k)$  未知, 可以近似通过符号函数  $\text{sgn} \partial y(k+1)/\partial u(k)$  代替, 由此带来的计算不精确的影响, 可以通过学习率进行补偿。对上述算法进行规范整理后得到:

$$u(k) = u(k-1) + K \sum_{i=1}^2 \overline{\omega_i(k)} x_i(k) \quad (16)$$

$$\overline{\omega_i(k)} = \frac{\omega_i(k)}{\sum_{i=1}^2 |\omega_i(k)|} \quad (17)$$

$$\omega_1(k+1) = \omega_1(k) + \eta_1(k) x_1(k) \text{sgn} \partial y(k+1)/\partial u(k) \quad (18)$$

$$\omega_2(k+1) = \omega_2(k) + \eta_2(k) x_2(k) \text{sgn} \partial y(k+1)/\partial u(k) \quad (19)$$

$$\text{sng}(x) = \begin{cases} +1, & x \geq 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \quad (20)$$

在实际应用中, 通过现场调试或系统仿真的方法调整比例系数  $K$  和学习率  $\eta_i$ , 以获得较佳的运行效果。

### 5 实验结果

根据前面所述的原理、硬件结构和控制算法,搭建两米望远镜伺服控制系统,系统通过串口与上位机进行数据和指令的通信,采用上位机软件对望远镜转台数据进行分析。永磁同步电机 TK795 参数如下:定子相绕组  $R_s=17.176 \Omega$ ,定子电感  $L=320 \text{ mH}$ ,磁极对数  $p=30$ ,转动惯量  $J=3.884 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  电机的位置传感器是带有细分盒的分辨率为  $40\,000\,000 \text{ ppr}$  的编码器,对应的速度分辨率为  $0.0324 \text{ (}^\circ\text{)/s}$ ,实验装置如图 7 所示。

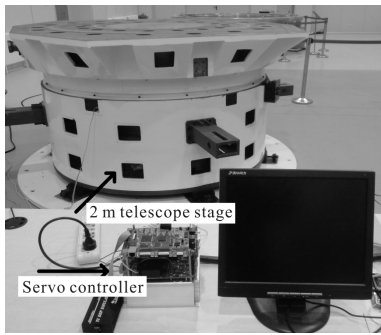


图 7 2 m 望远镜伺服系统实验装置

Fig.7 Experimental installation of 2 m telescope servo system

为了验证永磁同步电机驱动器的控制效果,控制系统的速度环采用单神经元自适应 PI 算法,速度环的反馈值是通过位置信号差分获得的,差分得到的速度值,通过一阶低通滤波器反馈到速度控制器的输入端。低通滤波器的截止频率直接影响速度的波动,为了尽可能地滤除高频噪声,滤波器需要具有较低的截止频率,但截止频率太低会造成较大的相位延迟,因此,在实验中需要合理调整截止频率以获得平稳的速度。

通过测试转台在低速运行、位置跟踪和正弦引导模式下的跟踪精度,来验证控制器对 2 m 望远镜的控制效果。图 8 所示为速度给定  $32.4 \text{ (}^\circ\text{)/s}$  (10 个编码/采样周期),速度采样周期  $1 \text{ ms}$ ,低通滤波器截止频率  $2\,000 \text{ Hz}$ ,模糊比例系数  $K=100$ ,模糊控制器比例学习率  $\eta_1=20$ ,积分学习率  $\eta_2=0.02$  时的低速跟踪曲线。系统速度阶跃响应调节时间为  $0.4 \text{ s}$ ,速度波动控制在  $\pm 0.628 \text{ (}^\circ\text{)/s}$  (2 个编码器码值)范围内。

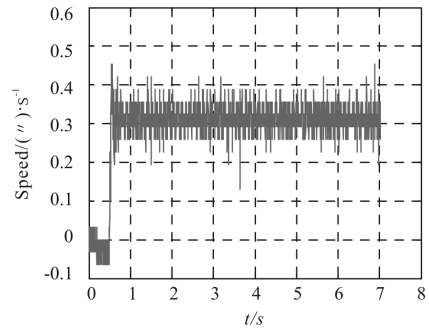


图 8 32.4 (°)/s 时的速度阶跃响应曲线

Fig.8 Step curve of the velocity at 32.4 (°)/s

由于低速运行时,摩擦等非线性因素影响比较明显,为了进一步评价控制器的低速控制效果,上位机以  $100 \text{ Hz}$  的频率记录转台的位置数据得到以  $32.4 \text{ (}^\circ\text{)/s}$  运行时位置数据曲线,如图 9 所示。根据位置输出曲线,作曲线的拟合方程: $y=32.4x+0.11$ ,曲线的斜率即是运行速度  $32.4 \text{ (}^\circ\text{)/s}$ 。

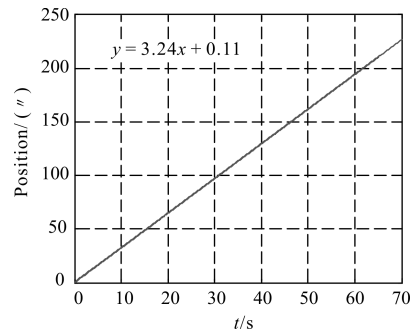


图 9 32.4(°)/s 时的位置输出曲线

Fig.9 Curve of position at the velocity 32.4(°)/s

为了测试系统的动态跟踪性能,控制器中加入位置环 PI 控制器,在位置环中加入模拟等效正弦引导;正弦引导的最大速度为  $1 \text{ (}^\circ\text{)/s}$ ,最大加速度为  $1 \text{ (}^\circ\text{)/s}^2$ ,等效正弦曲线为  $y=\sin t+2$ 。等效正弦引导曲线如图 10 所示,误差求曲线如图 11 所示,正弦引导的最大误差为  $9.72 \text{ (}^\circ\text{)}$ ,标准差为  $3.24 \text{ (}^\circ\text{)}$ 。

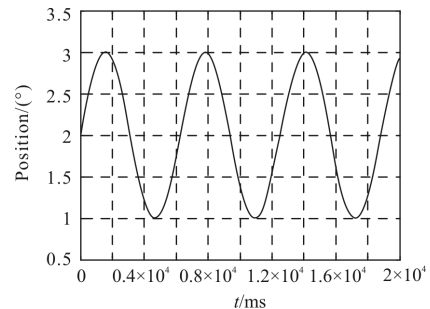


图 10 等效正弦引导曲线

Fig.10 Curve of equivalent sine guidance

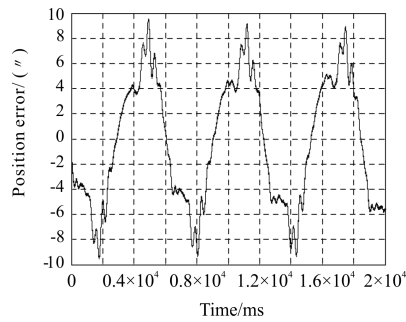


图 11 等效正弦引导误差曲线

Fig.11 Error curve of equivalent sine guidance

## 6 结论

针对永磁同步电机驱动的大型望远镜的高精度控制问题,给出了基于 DSP 和 FPGA 的数字伺服控制器设计方案,在设计硬件的基础上采用自适应 PI 控制算法,对望远镜的低速性能进行了测试。实验结果表明,该控制器设计方案具有良好的控制性能,望远镜在以  $32.4 (^{\circ})/s$  低速运行时,速度波动为  $\pm 0.648 (^{\circ})/s$ ;最大速度为  $1 (^{\circ})/s$ ,最大加速度为  $1 (^{\circ})/s^2$  条件下的等效正弦引导误差最大值为  $9.72 ^{\circ}$ ,RMS 值为  $3.24 ^{\circ}$ ;该控制方案满足大型望远镜控制系统的性能要求,对望远镜交流伺服系统设计具有重要的应用价值;设计的硬件控制器对交流永磁同步电机伺服控制系统具有通用性。

### 参考文献:

- [1] Zhang Bin, Li Hongwen, Guo Lihong, et al. Application of variable structure PID in velocity control for large telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(7): 1614–1619. (in Chinese)
- [2] Hu Wei, Wang Li, Zhang Zhenchao, et al. Design and implementation of servo control system of large aperture telescope based on DSP [J]. *Micro Motor*, 2010, 43 (8): 38–40. (in Chinese)
- [3] Jing Yuanchun, Tan Bitao, Zhu Qihai, et al. Servo performance of electro-optical telescope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35: 472–475. (in Chinese)
- [4] Zhu Q Z. Recent advances on permanent magnet machines[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2012, 27(3): 1–11.
- [5] Lee K B, Yoo J Y, Song J H, et al. Improvement of low speed operation of electric machine with an inertia identification using ROELO [J]. *IEE Proc-Electr Power Appl*, 2004, 151 (1): 116–120.
- [6] Wang Hong, Yu Yong, Xu Dianguo. The position servo system of PMSM [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(7): 151–155. (in Chinese)
- [7] Ying S K, Pin G H. High performance position controller for PMSM drives based on TMS320F2812 DSP [C]// International Conference on Control Applications, 2004: 290–295.
- [8] Wang Dayu, Guo Hong. A DSP and FPGA based drive control system for voice coil motor used in direct drive valve[J]. *Electric Machines and Control*, 2011, 15 (4): 8–12. (in Chinese)
- [9] Yu Kaiping, Guo Hong, Wu Haiyang. Multi motors speed-servo drive control platform based on DSP and FPGA [J]. *Electric Machines and Control*, 2011, 15 (9): 40–43. (in Chinese)
- [10] Cui Xutao, Yang Rijie, He You. Development of signal processing system based on DSP and FPGA [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 28(5): 918–922. (in Chinese)
- [11] Xu D, Wang T M, Wei H X. A digital high performance PMSM servo system based on DSP and FPGA [C]// 2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2011: 2742–2746.
- [12] Shu Wang, Zhao Rongxiang, Shang Zhe. Research of high precision drive system of PMSM [J]. *Electric Transmission*, 2007, 37(9): 8–10. (in Chinese)
- [13] Wu F, Wan S M, Huang S H, et al. Study on speed detection and control method of PMSM under ultra-low speed[C]// 42nd Universities Power Engineering Conference, 2007. UK: UPEC, 2007 : 178–183.
- [14] Ji Zhicheng, Chang Jun. Speed-sensorless control of PMSM based on an improved equivalent input disturbance estimator[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(10): 2139–2143. (in Chinese)
- [15] Wang Shuai, Wang Jianli, Chen Tao, et al. Application of nonlinear tracking differentiator in velocity estimator on optical encoder [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 850–853. (in Chinese)
- [16] Zhou Xiaoyao, Fan Dapeng, Zhang Zhiyong, et al. Analysis and design of multi-loop IMC controller for electro-optical servo control systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 2021–2027. (in Chinese)
- [17] Zhu Hairong, Li Qi, Gu Juping, et al. Single-neuron adaptive PI control of gyrostabilized platform based on disturbance compensation [J]. *Electric Machines and Control*, 2012, 3 (16): 66–77. (in Chinese)