

文章编号 1004-924X(2016)05-1104-08

## 空间高精度扫描伺服系统的驱动控制

翟少雄\*, 王长胜, 谭立, 高波

(兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**研究了空间飞行器扫描伺服系统的高精度驱动控制技术。针对有效载荷对地面目标进行扫描时多要求其伺服系统提供高精度的低速性能, 本文提出采用交流永磁同步电机直接驱动伺服系统, 省去中间的减速器传动环节来提高伺服系统的驱动控制精度。伺服驱动控制系统用现场可编程门阵列(FPGA)作为高速信号处理芯片, 提高信号的处理速度和控制精度; 用高精度的绝对式光电编码器检测转动位置, 提高位置检测和速度的精度; 主电路采用功率线性放大技术, 得到光滑, 力矩脉动小的驱动波形。系统实验表明, 由于该方法采用模拟正弦信号驱动, 在低速时避免了脉宽调制(PWM)驱动信号开关和死区造成的速度波动, 实现了高精度的速度控制, 速度波动范围在 1% 以内; 得到的电压、电流测试曲线光滑, 无高次谐波干扰。该扫描伺服系统满足动态和静态要求, 为实现空间低速高精度扫描提供了一种新的方法。

**关键词:**空间飞行器; 扫描伺服系统; 驱动控制; 交流永磁同步电机; 线性放大; 低速性能

**中图分类号:**V475; TP273 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162405.1104

## Driving and controlling of high accuracy scanning servo-system in space

ZHAI Shao-xiong\*, WANG Chang-sheng, TAN Li, GAO Bo

(Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Technology and Physics,  
Lanzhou Institute of Physics, Chinese Academy of Space Technology, Lanzhou 730000, China)

\* Corresponding author, E-mail: zsx1101@sina.com

**Abstract:** A high accurate servo control technology was explored for the scanning servo-system of a spacecraft. When payloads such as space communication, observation and reconnaissance scan the targets on the ground, the servo system of payloads usually is required to provide high accuracy and low speed performance. So, this paper proposes a control scheme by using a Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) as the servo driving system. It avoids the middle processing of a reducer and improves the control accuracy of servo system. A Field Programming Gate Array (FPGA) was used in the servo driving control system as the signal processing chip to improve the process speeds and control accuracy, and a higher precise absolute photoelectric encoder was taken to detect the rotation position to increase the detection accuracy of the speed and position. Furthermore, a power linear amplification was used in the main circuit to obtain smoother and smaller fluctuation wave forms. As the control scheme uses simulation sinusoidal signal driving and it avoids speed fluctuation come from switching and dead zones of the pulse width modulation (PWM) signals in low speeds, the experiments indicate that the control scheme realizes the speed control with high accuracy. The speed

收稿日期: 2015-12-11; 修订日期: 2016-01-20.

基金项目: 国防科技工业民用专项资金资助项目 (No. C4220060328)

is smooth, and the speed fluctuation is within 1% when the operating is in an even speed. Moreover, the testing curves of the voltage and current are smoother without harmonic disturbance. The scan servo system meets the requirements of dynamic and static experiments, and provides a new solution for low speed and high precision scanning servo systems.

**Key words:** spacecraft; scanning servo-system; driving and control; PMSM; linear amplifying; low speed performance

## 1 引言

扫描伺服系统在空间飞行器(卫星、飞船等)探测领域具有广泛的应用。近年来,随着航天领域的不断发展,对实现空间飞行器探测任务要求越来越高,不仅对探测器实现的功能增加,而且对探测器的性能要求也逐渐提高。例如卫星有效载荷的雷达、天线、光学仪器等,对地实现扫描探测,特别是雷达探测器,质量和转动惯量较大,探测时速度相对较低。作为驱动有效载荷工作的扫描伺服系统,能够实现快速跟踪、稳速(或变速)扫描等功能;为了获得更加准确和稳定的探测信号,同时,避免对整星姿态造成影响,实现上述功能时,扫描伺服系统工作的速度具有高精度、高稳定度的特点。

目前,国内空间用扫描伺服系统,大多由传统的步进电机、减速器(齿轮、谐波等)传动装置构成,开环控制方式;逐渐转变为电机直接驱动负载,省去中间的减速器传动环节,实现“近零传动”<sup>[1-2]</sup>,电机的驱动力矩直接作用于负载,闭环控制方式,达到对速度和位置指向的精确控制。伺服电机主要是三相正弦波交流永磁同步电机(PMSM),国外空间飞行器的应用比较普遍<sup>[3-12]</sup>。

交流永磁同步电机伺服系统中,伺服驱动控制多用全数字技术,驱动电机的功率主电路拓扑采用空间矢量方法,用脉冲宽度调制波(PWM)模拟正弦驱动信号,驱动电机转动,这种方式驱动功率管(如 MOSFET),电源效率高,易于实现数字化;但是,电机速度相对较低时,由于开关控制和死区控制的固有特性,驱动电机电流有波动,导致电机力矩波动,力矩波动会带来速度波动,影响速度精度,严重时会影响系统功能<sup>[13-16]</sup>。

本文主要对空间扫描伺服系统功能和性能进行研究,对速度相对较低,但是精度要求高的系统,研究使用永磁同步电机实现的直接驱动控制方法,提高伺服系统的驱动控制精度。伺服驱动控制系

统用 FPGA 做为高速信号处理芯片,达到快速高精度速度闭环控制;高精度的测角传感器检测转动位置,使得位置精度和速度精度更高;主电路采用线性放大的驱动方法,驱动交流永磁同步电机工作,由于该方法采用模拟正弦信号驱动,在低速度时,避免了 PWM 驱动信号开关和死区造成的速度波动,电机运行平稳,提高速度的精度<sup>[17-22]</sup>,适用于空间飞行器有效载荷高精度、长寿命工作。

## 2 伺服系统介绍

本文研究的是一种天线扫描伺服系统,负载为微波天线,伺服系统实现周期性扫描运动,对地探测扫描时的速度精度要求小于 1%。伺服电机直接与负载联接,省去中间的减速器传动装置环节,从而提高伺服系统的传动精度。

伺服系统主要包括伺服驱动控制器和伺服机构,如图 1 所示。

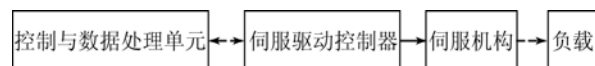


图 1 天线伺服系统构成图

Fig. 1 Antenna servo system structure diagram

伺服驱动控制器主要由控制板、控制软件和电机驱动主电路等组成,接收控制与数据处理单元指令,并回传状态信号,按照指令要求实现伺服系统控制和电机驱动;伺服机构主要是完成负载的支撑及传动,主要由伺服电机、角度编码器、输出轴、壳体和支撑轴承等组成。

高精度的扫描伺服系统的实现,主要取决于伺服驱动控制系统的精度(同时包括伺服电机、支撑轴承等精度)。从稳态和动态两个方面考虑:

### a. 稳态措施

伺服系统在稳定运行时,根据机械运动方程  $\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{T_e - T_L}{J}$ , 其中  $\omega_r$  是转动角速度,  $T_L$  为电机

机械摩擦阻力、黏滞阻力等在内的全部负载阻力矩,  $T_e$  为电机产生的电磁转矩,  $J$  为系统转动惯量。

提高系统的控制精度, 要求  $\frac{d\omega}{dt}$  减小, 则需要增大  $J$  和  $T_e - T_L = \text{常数}$ 。一般伺服系统确定后, 转动惯量  $J$  为固定常数; 如果负载力矩  $T_L = \text{常数}$ , 则需保证  $T_e = \text{常数}$ ; 保证  $T_e = \text{常数}$  的措施主要有:

- (1) 高精度的电流闭环控制;
- (2) 电机设计时要保证其齿槽等原因产生的磁阻转矩尽可能小(可采用斜槽等方法)。

b. 动态措施

关键是在  $T_L$  变化时能及时调节  $T_e$ , 使得  $T_e - T_L = \text{常数}$ ; 措施主要包括:

- (1) 高精度速度检测技术;
- (2) 快速高精度速度闭环调节, 使速度变化率在规定范围使  $T_e - T_L = \text{常数}$ ;
- (3) 辨识负载转矩  $T_L$  的脉动, 使  $T_e - T_L = \text{常数}$ 。

### 3 系统组成

采用三相正弦波交流永磁同步电机作为驱动源, 测角传感器用 16 bit 绝对式光电编码器, FPGA 进行数据处理与高速采集的驱动控制系统, 如图 2 所示。

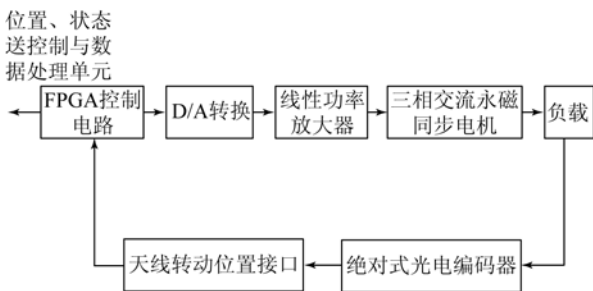


图 2 天线伺服系统原理框图

Fig. 2 Antenna servo system principle diagram

#### 3.1 FPGA 控制单元

高精度伺服系统, 对位置、速度、电流的信号精度和处理速度提出更高的要求, 此外, 空间应用背景对系统可靠性提出特别要求, 普通的处理芯片已无法满足要求, 采用基于现场可编程门阵列

(Field Programmable Gate Arrays, FPGA) 实现快速数字信号处理, 作为控制的闭环伺服系统, 实现 PID 控制算法和矢量控制。

用 FPGA 芯片配合一些辅助外围电路实现角度检测、速度计算、速度控制、电机驱动信号、编码器反馈信号、串行通讯等功能; FPGA 控制系统通过接口与上位机控制与数据处理单元相互通讯, 接收指令信号, 发送电机的位置、速度等信息, 如图 3 所示。

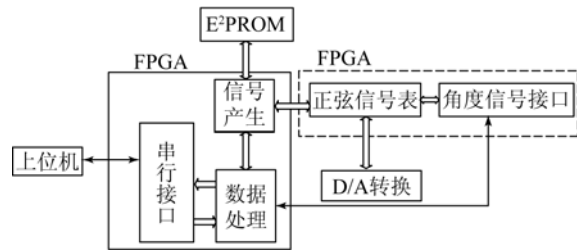


图 3 FPGA 控制原理图

Fig. 3 FPGA control principle diagram

从角度信号计算得到高精度的速度、加速度指令, 它对算法的计算精度及响应速度都提出了较高要求, 特别是在低速、超低速及速度阶跃等情况下, 精确的、快速的速度计算处理, 可以使伺服系统获得平稳低速信号和良好的动态响应。

#### 3.2 位置检测及速度测量

系统实现闭环控制需要将控制量(位置、速度等)检测出来, 以便和设定量进行比较, 控制系统在根据比较得到偏差量来修正控制量, 达到控制目的。

##### 3.2.1 位置检测

系统中速度由位置微分得到, 由于微分易产生噪声, 因此, 位置检测的精度不仅直接关系到整个系统的精度, 而且影响着速度检测性能, 为此, 系统位置检测采用 16 位绝对式光电编码器, 提高位置检测精度降低速度计算噪声。

##### 3.2.2 速度测量

因为速度是位置的微分, 所以用测量到的位置信号就可以得到相应的速度信号。绝对式光电编码器作位置传感器, 输出信号为脉冲, 通过处理, 可以得到速度信号。

系统采用 M/T 法测速, 检测在一个时间段内编码器输出的脉冲个数  $m_1$ , 又检测同一时段内的高频时钟脉冲个数  $m_2$ , 用检验得到  $m_1$ 、 $m_2$  来

计算速度,测速原理如图 4 所示。

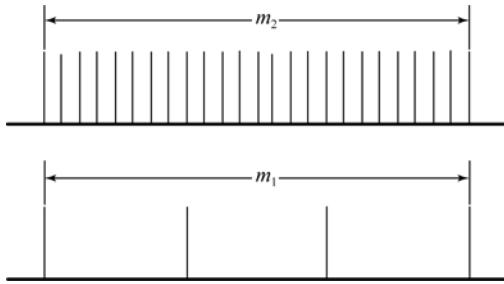


图 4 测速原理

Fig. 4 Speed measuring principle

设高频时钟脉冲的频率为  $f_c$ , 在检测时间内的高频时钟脉冲的个数为  $m_2$ , 速度为:

$$n = \frac{60 m_1}{N T_1} = \frac{60 m_1 f_c}{N m_2} \text{ (rpm)}. \quad (1)$$

M/T 测速的相对误差来源于  $m_2$  的一个计数误差, 其分辨率为:

$$R = \frac{60 m_1 f_c}{N m_2} - \frac{60 m_1 f_c}{N (m_2 + 1)} = \frac{60 m_1 f_c}{N m_2 (m_2 + 1)} \text{ (rpm)}. \quad (2)$$

绝对式光电编码器 M/T 法测速为:

$$\omega_r = \frac{2\pi \Delta P_{os}}{2^N T_d} = \frac{2\pi}{2^N T_d} \Delta P_{os} = k_d \Delta P_{os}, \quad (3)$$

式中:  $N$  表示光电编码器的分辨率位数,  $\Delta P_{os}$  表示 2 次采样的绝对位置差,  $T_d$  是采样时间间隔,  $k_d = \frac{2\pi}{2^N T_d}$  表示  $\omega_r$  和  $\Delta P_{os}$  的比例系数。速度单位为 rad/s。

由于使用 FPGA 实现控制算法, 为了避免浮点运算, 实际实现过程中直接使用在一个控制周期  $200 \mu s$  内的  $\Delta P_{os}$  数值作为速度数值参与计算。考虑到光电编码器每周 65 536 脉冲, 因此程序中位置单位为  $\frac{2\pi}{65\ 536} = 9.58 \times 10^{-5} \text{ rad}$ , 速度单位为  $\frac{9.58 \times 10^{-5}}{0.000\ 2} = 0.479 \text{ rad/s}$ 。

### 3.3 PMSM 数学模型及速度控制

#### 3.3.1 PMSM 数学模型

三相永磁同步电机的定子上有 A、B、C 三相对称绕组, 转子上装有永久磁钢。定子和转子间通过气隙磁场耦合, 由于电机定子与转子间有相对运动, 电磁关系复杂。考虑到空间磁场的高次谐波, 三相永磁同步旋转电机本身即是一个多变量、非线性的系统, 为了实现转矩线性化控制, 就

必须要对转矩的控制参数实现解耦<sup>[23-24]</sup>。

取永磁同步电机转子励磁磁链方向为  $d$  轴,  $q$  轴超前  $d$  轴  $90^\circ$ , 此坐标系随电机转子以同步速  $\omega_r$  旋转, 则在此  $d$ - $q$  坐标系上的三相永磁同步电机的矢量如图 5 所示。

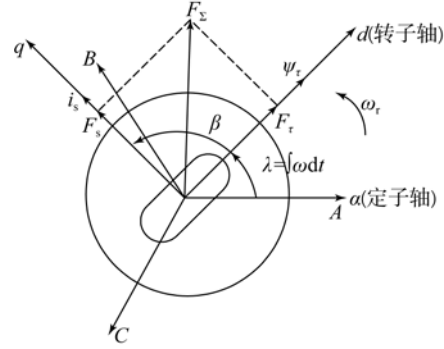


图 5 PMSM 矢量图

Fig. 5 PMSM vector diagram

基于转子坐标系 ( $d$ - $q$  轴系) 中的永磁同步电机数学模型方程为:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} (-R_s i_d + p \omega_r L_q i_q + U_d) \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} (-p \omega_r L_d i_d - R_s i_q - p \omega_r \Psi_{PM} + U_q) \end{cases}, \quad (4)$$

式中:  $i_d$ 、 $i_q$  为定子电流矢量  $i_s$  在  $d$ - $q$  轴上的分量,  $U_d$ 、 $U_q$  是定子电压矢量在  $d$ - $q$  轴上的分量,  $\Psi_{PM}$  为转子磁钢在定子上的耦合磁链,  $L_d$ 、 $L_q$  为永磁同步电机的直轴、交轴主电感,  $R_s$  为定子绕组电阻;  $p$  为转子极对数, 仅考虑磁场一次谐波作用, 电磁转矩方程为:

$$T_e = \frac{3}{2} p [\Psi_{PM} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]. \quad (5)$$

#### 3.3.2 速度控制

PMSM 的电磁转矩取决于定子  $d$  轴电流和  $q$  轴电流分量, 在永磁同步电机中, 由于转子磁链恒定不变, 采用转子磁链定向方式来控制永磁同步电机, 当  $i_d = 0$ , PMSM 的电磁转矩仅取决于  $q$  轴电流分量, 采用定子电流矢量位于  $q$  轴, 无  $d$  轴分量的控制方式, 即定子电流全部用于产生转矩, 此时 PMSM 的机械运动方程为:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \left[ \frac{3}{2} p \Psi_{PM} i_q - T_L \right]. \quad (6)$$

采用位置、速度和电流闭环控制时, 通过速度

环的速度调节器输出转矩指令  $T^*$ , 由于  $T^* \propto F_s \propto i_s^*$ , 所以  $T^*$  指令可直接作为综合电流大小的数字指令  $i_s^*$ ;

利用可连续检测角度位置信号的位置传感器, 测得励磁磁极轴线 ( $d$  轴) 与  $A$  相绕组轴线 ( $a$  轴) 之间的夹角  $\lambda$  (转子位置角), 即可得  $i_s^*$  与  $a$  轴的夹角  $\theta = \lambda + 90^\circ$ 。

根据  $\lambda$  角的大小, 把  $i_s^*$  分解成三相绕组电流的指令  $i_A^*$ 、 $i_B^*$ 、 $i_C^*$  (这三个相电流指令是电流的瞬时值指令):

$$\begin{cases} i_A^* = i_s^* \cos \lambda = i_s^* [-\sin(\theta + \varphi_{em})] \\ i_B^* = i_s^* \cos(\lambda - 120^\circ) = i_s^* [-\sin(\theta - 120^\circ + \varphi_{em})] \\ i_C^* = i_s^* \cos(\lambda - 240^\circ) = i_s^* [-\sin(\theta - 240^\circ + \varphi_{em})] \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\varphi_{em}$  为电磁相位差, 实际调试中通过在  $[0, 2\pi)$  内, 使得对应给定的电流  $i_s^*$ , 电磁转矩最大或者电机以最大速度连续旋转 (电磁转矩与摩擦/空气阻力平衡)。

三相电流给定  $i_A^*$ 、 $i_B^*$ 、 $i_C^*$  与实际反馈值  $i_A$ 、 $i_B$ 、 $i_C$  的差值经过电流调节器运算得到给定电压信号  $u_A^*$ 、 $u_B^*$ 、 $u_C^*$  送线性放大器。使放大器输出的三相电流  $i_A$ 、 $i_B$ 、 $i_C$  完全跟踪  $i_A^*$ 、 $i_B^*$ 、 $i_C^*$ , 也就最终实现了对  $i_s$  大小及方向控制的目的, 控制原理如图 6 所示。

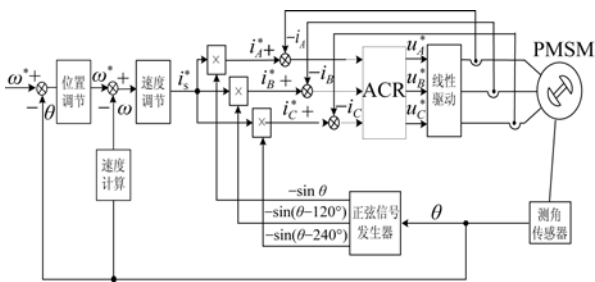


图 6 控制原理图

Fig. 6 Control principle diagram

### 3.4 线性放大主电路

线性放大主电路具有输出波形谐波含量低、电磁兼容性好等优点, 在小功率的电机驱动中易于实现。线性放大电路主要是通过给定信号和反馈信号比较, 对差值通过模拟电路实现 PI 调节输出; 输出信号驱动 MOSFET 管工作, 线性放大电路工作时主要考虑防止上下管共态保护导通、线性驱动信号控制及散热处理。

#### 3.4.1 Mosfet 管共态导通

永磁同步电机三相绕组为“Y”连接, 与驱动功率管 MOSFET 连接如图 7 所示。

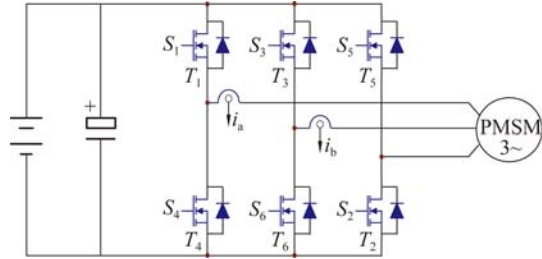


图 7 PMSM 与 Mosfet 连接示意图

Fig. 7 PMSM and Mosfet connection diagram

在 MOSFET 管顺序通电过程中, 要避免上下管共态导通, MOSFET 电流过大而导致器件失效。采取的方法是上下管的驱动信号互锁, 上管信号工作时, 保证下管信号不会同时工作, 防止上下管共态保护导通。电路仿真波形如图 8 所示。

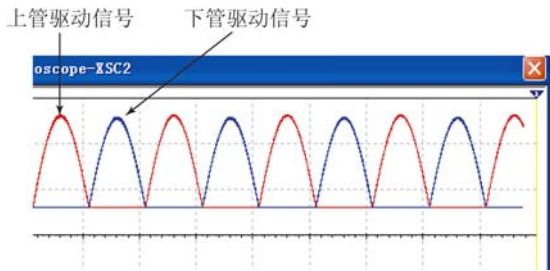


图 8 共态导通信号仿真

Fig. 8 Conduction signal simulation diagram

#### 3.4.2 线性放大驱动信号

功率管的线性放大要考虑静态工作点 (直流偏置信号) 和动态工作点 (交流信号)。动态工作点分析时, 可将 MOSFET 管看成一个两端口网络, 采用小信号模型计算动态工作点  $Q$ 。

要使 MOSFET 工作在线性放大状态, 首先在驱动信号  $V_{GS}$  端设置直流工作点信号, 使静态工作点  $V_{GSQ}$  在转移曲线的  $Q$  点, 经过直流偏置后的驱动信号正弦波, 输出的电流  $i_D$  为正弦波, 合理设定直流偏置值, 避免出现信号失真。

动态工作点分析小信号, 跨导  $g_m$  计算值为:

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial V_{GS}} \right|_{V_{DS}} = \frac{2 I_D}{V_{GS(th)}} \left( \frac{V_{GS}}{V_{GS(th)}} - 1 \right) \Bigg|_{V_{DS}} = \frac{2}{V_{GS(th)}} \sqrt{I_D i_D} \quad (8)$$

在小信号作用时,可用  $I_{DQ}$  来近似  $i_D$ :

$$g_m \approx \frac{2}{V_{GS(th)}} \sqrt{I_D I_{DQ}}, \quad (9)$$

式中:  $g_m$  与 Q 点紧密相关, Q 点越高,  $g_m$  越大。因此,场效应管放大电路 Q 点不仅影响电路是否会失真,而且影响着电路动态参数。输出回路等效成一个受控电流源:

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\dot{I}_D R_D}{\dot{U}_{gs}} = -\frac{g_m \dot{U}_{gs} R_D}{\dot{U}_{gs}} = -g_m R_D. \quad (10)$$

在输出曲线上,可以看到放大的正弦波信号,此时的输入输出信号成线性放大关系,如图 9 所示。

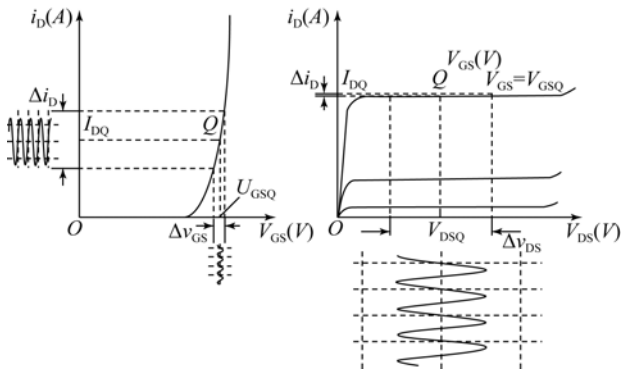


图 9 线性放大驱动信号

Fig. 9 Linear amplification drive signal diagram

### 3.4.3 Mosfet 管散热

MOSFET 工作在线性放大时,吸收电源功率,除驱动电机外,部分功率会转化为自身的热量,进而增加 Junction 温度,该温度会影响 MOSFET 的特性和寿命,这是线性放大电路与 PWM 驱动电路相比的缺点。所以,必须将热量释放出来以降低 Junction 温度。影响 MOSFET 散热能力的参数就是热阻,合理的设计功率管的散热方式,增加散热面积, Junction 温度满足使用环境要求。

根据上述的分析和计算,实际测试 MOSFET 管驱动信号如图 10 所示。

由前述分析可以看出,相较功率三极管以及由功率三极管构建的 AB 类等线性放大器, MOSFET 管具有较高的电压波动能力而能够实现较高电流动态能力;此外, MOSFET 管的耐压能力以及较低

的导通电阻,能够提高整个功率放大单元的可靠性。相较 MOSFET 管实现的 PWM 放大器,工作在线性区的功率放大的单元具有较小的辐射、传导噪声,这对具有精简结构的飞行器的其它单元正常高性能工作来说,至关重要。

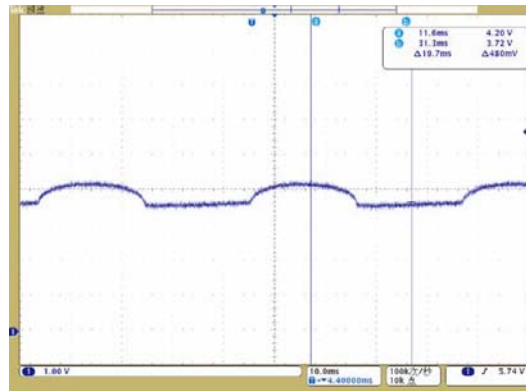


图 10 Mosfet 驱动信号

Fig. 10 Mosfet drive signal diagram

MOSFET 工作在线性放大输出信号如图 11 所示。

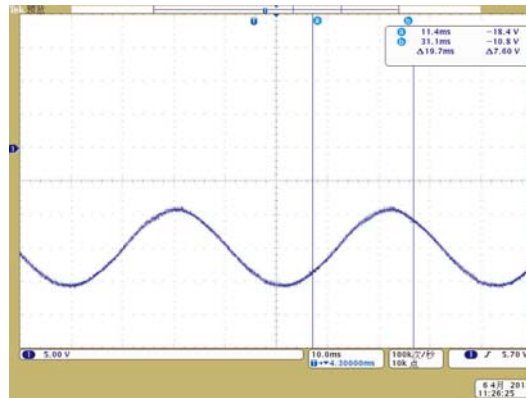


图 11 Mosfet 线性放大波形

Fig. 11 Mosfet drive signal simulation

## 4 试验测试结果

试验中三相正弦电压信号通过读正弦表的方法产生,驱动电机是永磁同步电机,电机参数为:额定电压  $U_e = 27 \text{ V}$ ,额定转矩  $T_e = 1.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,额定速度  $n_e = 11 \text{ rpm}$ ,额定电流  $I_e = 0.7 \text{ A}$ ,最大电流  $I_{\max} = 2 \text{ A}$ ,负载用  $0.03 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  的惯量盘模拟天线。测试电机在匀速转动时 U-V 向的电压波形。如图 12 所示。

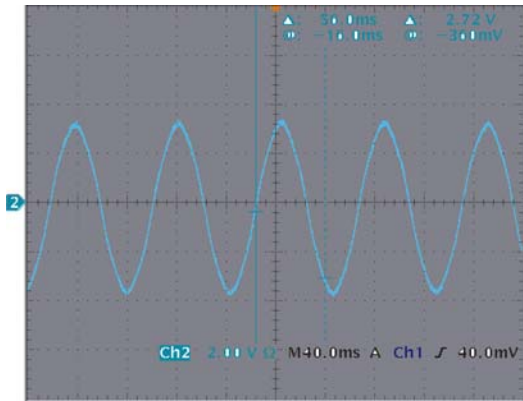


图 12 电机 U-V 相电压波形

Fig. 12 Motor U-V Phase voltage wave shape

速度测试曲线如图 13 所示。

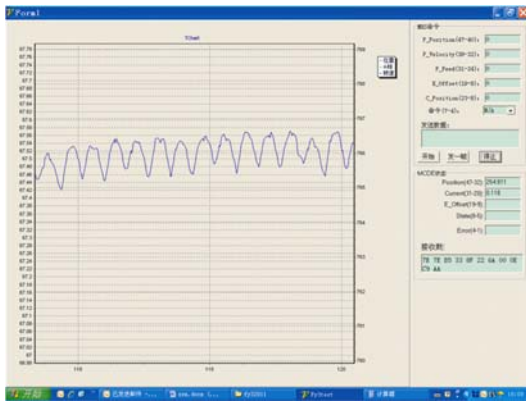


图 13 速度测试曲线

Fig. 13 Speed test curve

从测试的电压波形和速度曲线可以看出, 运转平稳, 速度在设定值上下波动, 波动的幅度为

#### 参考文献:

- [1] 王淦泉, 陈桂林. 地球同步轨道二维扫描红外成像技术[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 429-433.  
WANG G Q, CHEN G L. Two dimensional scanning infrared imaging technology on geosynchronous orbit [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 429-433. (in Chinese)
- [2] 边志强, 蔡陈生, 吕旺, 等. 遥感卫星高精度高稳定性控制技术[J]. 上海航天, 2014, 31(3): 24-38.  
BIAN ZH Q, CAI CH SH, LV W, et al. High accuracy and high stability control technology of remote sensing satellite [J]. *Aerospace Shanghai*, 2014, 31(3): 24-38. (in Chinese)
- [3] 高钟毓. 机电控制工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

0.74%, 满足伺服系统对速度精度 1% 的要求;

速度测试曲线的转速波动, 主要是由于系统中负载有较大的转动惯量, 转动过程不同位置具有不同的转动摩擦力矩, 由于磁场高次谐波带来的电磁转矩与电流之间的非线性以及控制存在采样滞后等, 是造成速度波动的主要原因。

由图 6、式(6)、式(10)可以看出, 全系统主要表现为较高的线性; 如将电流环节的电流指令到转矩输出用二阶环节近似, 转矩到到天线的转动速度与角度用积分环节描述, 整个闭环控制系统动态特性写成传递函数形式, 稳定控制器(如极点配置法、超前滞后校正等)方法在相关文献均有具体论述, 这里不再详细叙述具体的 PID 控制器设计与稳定性分析。

## 5 结 论

通过对实现高精度的扫描伺服系统驱动控制技术的研究, 采用 FPGA 作为控制芯片, 提高处理速度和响应时间, 提高控制精度; 交流永磁同步电机直接驱动负载, 提高系统传动精度; 主电路采用线性放大驱动, 在小功率伺服系统中可以提高速度精度和稳定度。

根据高精度伺服系统的工作特点, 提出了达到高精度控制的稳态措施和动态措施。在理论分析并结合扫描伺服系统实际工作的基础上, 根据永磁同步电机数学模型和矢量控制原理, 研究了永磁同步电机直接驱动控制技术, 提出了达到高精度的控制措施, 并给出了控制原理图。

GAO Z Y. *Mechanical and Electrical Control Engineering* [M]. Beijing: Tinghua University Press, 2002. (in Chinese)

- [4] 胡崇岳. 现代交流调速技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.  
HU CH Y. *Modern AC Speed Regulation Technology* [M]. Beijing: Machinery industry Press, 2001. (in Chinese)
- [5] Cyclone FPGA Family Data Sheet: Altera, 2013: 163-165.
- [6] 马志源. 电力拖动控制系统[M]. 北京: 科学出版社, 2004.  
MAI Z Y. *Electric Driver Control System* [M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- [7] 李华德. 交流调速控制系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.

- LI H D. *AC Speed Control System* [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [8] 李华德. 电力拖动控制系统(运动控制系统) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- LI H D. *Electric Driver Control System* [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [9] 王中. 基于 DSP 和 FPGA 的高精度交流伺服系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- WANG ZH. *Research on High Precision AC Servo System based on DSP and FPGA* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2006. (in Chinese)
- [10] BRIAN J. Workman and Eric Schwartzbaum, The SeaWinds Scatterometer Antenna Subsystem on the Quick Scat Spacecraft [C]. *Proceedings of the 34th Aerospace Mechanisms Symposium, Goddard Space Flight Center*, 2013(10-12): 275-286.
- [11] 侯姗姗, 雷莉萍, 关贤华. 温室气体观测卫星 GOSAT 及产品[J]. *遥感技术与应用*, 2013, 28(2): 269-275.
- HOU S S, LEI L P, GUAN X H. A general introduction to Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT) and its products [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013, 28(2): 269-275. (in Chinese)
- [12] MANFRED S, LI J, CHRISTIAN H. Scanning mechanism of the FY-3 microwave humidity sounder [J]. *Proceedings of the 40th Aerospace Mechanisms Symposium, NASA Kennedy Space Center*, 2010(12-14): 87-98.
- [13] 翟少雄, 黄声华, 王长胜, 等. 适于特殊场合的步进电机驱动电源技术研究[J]. *微电机*, 2008, 41(12): 33-35.
- ZHAI SH X, HUANG SH H, WANG CH SH, *et al.*. Study of step motor driver power technology applied in special environment [J]. *Micromotors*, 2008, 41(12): 33-35. (in Chinese)
- [14] RAHMAN M A. Analysis of brushless permanent magnet synchronous motor [J]. *IEEE Trans on Electronics*, 2013, 43(2): 256-267.
- [15] CHRISTION D, VINCENT L, JEAN B, *et al.*. Closed-loop control of virtual FPGA-coded permanent magnet synchronous motor drives using a rapidly prototyped controller [J]. *13th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 2008: 1077-1083.
- [16] LOW K S, KECK M T. Optimum predictive and feedforward control of a precision linear stage using genetic algorithm [J]. *The 35th Annual Conference of the IEEE*, 2009(3): 1289-1294.
- [17] CHANWOO M, SUNGHO L, CHUNG, *et al.*. Precise position control of a linear stage integrated with an inchworm type actuator. *SICE [J]. Annual Conference*, 2004(1): 572-576.
- [18] JUNG D H, HA I J. An efficient method for identifying the initial position of a PMSM with an incremental encoder [J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2008, 45(4): 682-685.
- [19] HENRIKSEN S J, BETZ R E, COOK B J. Digital hardware implementation of a current controller for IM variable-speed drives [J]. *IEEE Trans on Industrial Application*, 2014, 35(5): 1021-1029.
- [20] BRAD S. "Total" Current Control of Brushless DC Motors with Sinewave Drive, 2014: 216-220.
- [21] SERGEY E L, TREVOR C S. Tracking control of direct-drive servos [J]. *50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC) Orlando, FL, USA, December*, 2011(12-15): 1602-1607.
- [22] KONATE C, KOSONEN A, AHOLA J, *et al.*. Induction motor speed control using power line communication [J]. *IEEE, France*, 2013. 261-266.
- [23] 周腊吾, 石书琪. 一种新型的 PMSM 直接转矩控制 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2011, 138(8): 40-44.
- ZHOU L W, SHI SH Q. A new direct torque control of PMSM [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2011, 138(8): 40-44. (in Chinese)
- [24] 杨维帆, 徐抒岩, 曹小涛, 等. 空间光学传感器扫描控制系统设计 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(2): 397-405.
- YANG W F, XU SH Y, CAO X T, *et al.*. Design of scanning control system for space optical remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 397-405. (in Chinese)

#### 作者简介:



翟少雄(1971—),男,甘肃兰州市人,博士,高级工程师,2012年兰州空间技术物理研究所获博士学位。主要从事空间机电一体化驱动控制技术的研究。  
E-mail: zsx1101@sina.com

(版权所有 未经许可 不得转载)