

文章编号 1004-924X(2014)02-0397-09

空间光学遥感器扫描控制系统设计

杨维帆^{1,2*}, 徐抒岩¹, 曹小涛¹, 王 栋¹

(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 100039)

摘要:研究了正弦波永磁同步电机驱动的空间光学遥感器扫描控制系统。采用复合控制与微分负反馈相结合的控制策略,实现了扫描镜的低速高精度往复运动。分析了扫描镜运动的数学模型,建立了 $d-q$ 坐标系下的永磁同步电机数学模型;采用 $id=0$ 矢量控制策略,在 MATLAB/SIMULINK 环境下搭建了基于空间矢量脉宽调制技术的控制系统仿真模型,设计了电流环、速度环和位置环调节器,给出了仿真结果。实验验证显示:采用复合控制后,仿真得到恒速运行的平均速度误差由 1.27% 优化到 0.92%,扫描镜在恒速扫描过程中稳态平均角速度误差为 2.06%,满足扫描镜系统速度精度优于 5% 的设计要求。理论分析、仿真和实验证明:该控制方法能够较好地改善控制系统的动态特性,具有调节时间短、超调小和动态响应准确等优点。

关键词:光学遥感器;空间扫描镜;永磁同步电机;矢量控制策略;复合控制;微分负反馈

中图分类号:TP73;TM351 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142202.0397

Design of scanning control system for space optical remote sensor

YANG Wei-fan^{1,2*}, XU Shu-yan¹, CAO Xiao-tao¹, WANG Dong¹

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

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

* *Corresponding author, E-mail: yangweifan1987@sina.com*

Abstract: A scanning control system for space optical remote sensors based on the sinusoidal Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) was explored in this paper. By a control strategy combining composite control with differential negative feedback, the reciprocating motion of a scanning mirror with low velocity and high precision was achieved. The mathematical model of scanning mirror motion was analyzed, and a mathematical model of PMSM under the $d-q$ coordinate system was established. By using the $id=0$ vector control strategy, the simulation model of the control system based on space vector pulse width modulation was built using the MATLAB/SIMULINK, and the current, speed and the position loop were designed. A simulation and an experiment were performed, the results show that the velocity average error in the simulation has optimized from 1.27% to 0.92% and

收稿日期:2013-10-12;修订日期:2013-11-27.

基金项目:吉林省科技发展计划资助项目(No. 20090311);中科院科技创新基金资助项目(No. 201204)

the steady-state mean angular velocity error has arrived 2.06% when the scanning mirror is at a constant speed steady state after combing control. Theoretical analysis and simulation experiments show that the dynamic characteristics of control system can be improved by the proposed control method, and it shows the advantages of short regulation time, small overshooting and quickly accurate dynamic response.

Key words: optical remote sensor; space scanning mirror; permanent magnet synchronous motor; vector control strategy; compound control; differential negative feedback

1 引言

扫描镜是空间光学遥感器的关键部件之一,担负着对地扫描成像、对地物进行运动补偿、引入定标源、扩大视场范围等任务^[1]。为了获取具有一定地面分辨率的清晰、连续、高质量的图像,扫描镜的位置和速度控制需达到更高的精度。在已发射的光学遥感器中,ADOES_II 卫星上全球成像仪 (GLI) 扫描镜俯仰轴角速度工作转速为 16.716 r/min,误差为 $\pm 0.015(^{\circ})/s$ ^[2],全球臭氧监测实验仪器 (GOME) 扫描镜角速度误差为 1 mrad/s^[3],EOS-TERRA 卫星上的中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 扫描镜角速度误差为 ± 2.1 mrad/s^[4]。

目前,空间光学扫描镜多由步进电机驱动,文献[6-7]设计了在成像光谱仪上以步进电机加大减速比减速器驱动扫描镜的控制系统,得到了速度均方根误差为 5.3% 的控制精度;但由于步进电机自身的特点,电机做变速运动受到了制约,而且加入减速箱必然会导致整体结构质量的增加和谐振频率的降低。文献[10]采用 PID 控制器的三环控制结构设计了永磁同步电机驱动扫描镜的伺服系统,在 0.396 s 时间内以 5.808 rad/s 的速度扫描,仿真得到了 0.3% 的控制精度;由于扫描速度较大,易于提高控制精度,但未考虑摩擦和齿槽效应对系统精度的影响,且未得到工程应用。文献[11]提出了采用前馈控制和重复控制器的控制系统,仿真验证该系统能够提高位置控制精度;但仅做了理论和仿真分析,并未给出实际结果。文献[13]探讨了以专业空间处理器 TSC695 作为扫描运动控制芯片的方案,在相同条件下与常用的运动控制芯片 DSP F2812 进行比较,控制速度和精度均有所提高,虽然其作为星载计算机核心芯片已投入使用,但作为运动控制芯片尚处于初步阶段。

为了得到在工程上易于实现且控制精度和稳定度高的控制系统,本文针对永磁同步电机直驱扫描镜控制系统,建立了控制系统数学模型,采用 $i_d = 0$ 矢量控制策略,完成了基于 MATLAB/SIMULINK 的矢量控制仿真验证。提出了位置环采用复合控制、速度环和电流环引入微分负反馈的控制策略,以获得高性能的速度稳态精度和位置定位精度。在 DSP F2812 为运动控制芯片的硬件系统上完成了电机直驱扫描镜的扫描运动,并对位置和速度进行了误差分析。实验结果表明,本文所采用控制方式能够提高系统的控制精度,满足系统使用要求。

2 扫描镜控制系统模型分析

2.1 扫描镜控制系统技术要求

某空间紫外臭氧探测仪用于在轨观测大气,需要在卫星沿轨道运行时改变俯仰扫描镜的角度,使星下点大气辐射经俯仰镜成像于探测仪上来进行对地大气观测测量。在此模式下,俯仰扫描镜跨轨扫描 33° ,扫描范围 ± 500 km,扫描时间为 3 s,回扫时间为 0.7 s。为满足成像需求,要求扫描镜在恒速运行时的速度精度优于 5%。一个扫描周期的速度曲线如图 1 所示。

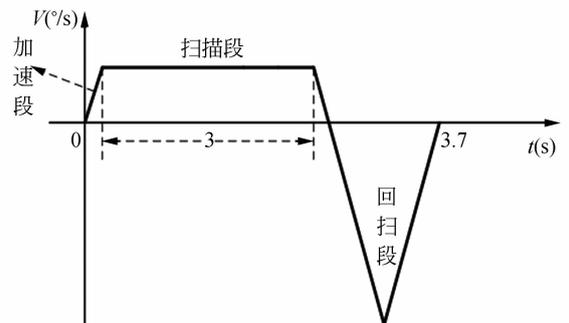


图 1 扫描镜速度曲线

Fig. 1 Curve of velocity for scanning mirror

由图1可知,运动过程分为加速段、扫描段和回扫段。各阶段的速度方程为:

加速段:

$$v(t) = 332.2449t \quad (0 \leq t < 0.0331), \quad (1)$$

扫描段:

$$v(t) = 11 \quad (0.03311 \leq t < 3.03311), \quad (2)$$

回扫段:

$$v(t) = \begin{cases} -332.2449t + 1018.7359 & (3.03311 \leq t < 3.38311) \\ 332.2449t - 1229.3061 & (3.38311 \leq t \leq 3.7) \end{cases} \quad (3)$$

2.2 永磁同步电机选型分析

由式(1)可知,俯仰电机最大角速度为 $105.2851 \text{ (}^\circ/\text{s)}$,最大角加速度为 $332.2449 \text{ (}^\circ/\text{s}^2)$ 。根据已提供的转动惯量,求得电机最大力矩为 0.1 Nm 。为了实现扫描镜在一定角度内的扫描运动,速度恒定稳态精度高,能够快速回扫且定位准确,对驱动电机提出了以下的要求:(1)能够在低速甚至堵转情况下运行;(2)转矩-电流特性线性度好,输出力矩大且波动小;(3)转子转动惯量小,动态响应快;(4)寿命长,免维护性高,能够满足可靠性和要求的无故障时间。正弦驱动永磁无刷电机又称永磁同步电机(PMSM),具有结构简单、体积小、质量轻、效率高、转动惯量低、转子无发热、易于维护保养等优点,还具有力矩波动小、响应速度快、峰值转矩高、过载能力强的特点,能承受频繁启停、制动和正反转。

选择永磁同步电机最大电流为 1 A ,最大转矩为 0.2 Nm 。由于齿槽效应对低速时转矩的影响,电机采用斜槽或斜极结构,以降低由齿槽效应产生的转矩波动。

2.3 永磁同步电机 PMSM 的数学模型

2.3.1 坐标变换

三相定子坐标系是建立在三相定子绕组上的自然坐标系,A相轴线作为A-B-C轴系的空间参考轴线,三相轴线在空间上互差 120° 。 $\alpha\beta$ 定子坐标系是两相定子绕组坐标系, α 轴与A轴重合, β 轴超前 α 轴 90° 。转子同步旋转坐标系位于电动机转子上,同转子一起旋转, d 轴为转子横轴,与 α 轴之间的夹角即转子位置角 θ , q 轴为转子纵轴,超前 d 轴 90° 。图2所示为PMSM的3种坐标系示意图。

(1) Clarke变换实现将三相定子坐标系A-B-C等价转换为两相定子坐标系 $\alpha\beta$ 。PMSM中

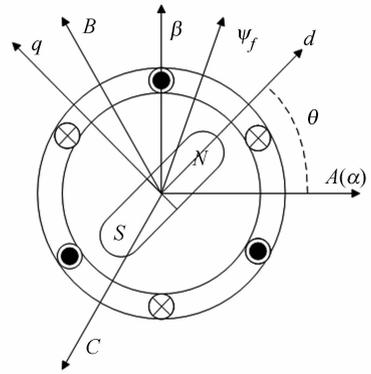


图2 永磁同步电动机定转子坐标系示意图

Fig. 2 Diagram of stator and rotor coordinate systems for PMSM

三相定子呈彼此相差 120° 空间电角度分布,当三相定子中通入彼此相差 120° 的三相交流电流时,将会产生一个旋转磁场使电机匀速转动。经Clarke变换后,只需要向两相虚拟绕组中通入彼此相差 90° 的交流电流,即可达到与之完全一致的控制效果。

(2) Park变换用于将两相定子坐标系 $\alpha\beta$ 等价转换为两相转子旋转坐标系 $d-q$ 。当PMSM处于恒速旋转时,需要向两相虚拟静止绕组中通入相位差 90° 的交流电流。经Park变换后,只需向两相旋转绕组中通入两组直流电流即可。此时,电机的控制可以等效成直流电机控制。

2.3.2 永磁同步电机的数学模型

当永磁同步电动机结合矢量控制法作为被控对象时,用 $d-q$ 坐标系下的数学模型进行分析,该模型用于分析正弦波永磁同步电动机的稳态、瞬态性能的前提是^[5]:

- (1)忽略铁心饱和,不计磁饱和与磁滞损耗;
- (2)定子绕组呈严格三相对称分布,各绕组轴线在空间上互差 120° 电角度;
- (3)感应反相电动势为正弦波,气隙磁场按正弦分布;
- (4)电机转子上没有阻尼绕组。

基于上述假设,建立PMSM在转子同步旋转坐标系下 $d-q$ 轴的数学模型:

$$\begin{cases} u_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} \psi_q + \omega_r \psi_d \\ u_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} \psi_d - \omega_r \psi_q \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} \psi_q = L_q i_q \\ \psi_d = L_d i_d + \psi_f \end{cases}, \quad (5)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p_n (\psi_d i_q - \psi_q i_d) , \quad (6)$$

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = T_e - T_L - B\Omega_r , \quad (7)$$

式中： i_q 、 i_d 为 q 、 d 轴电流， L_q 、 L_d 为 q 、 d 轴电感， Ψ_f 为永磁体产生的等效磁链。 R_s 为定子相电阻， ω_r 为转子电角速度， p_n 为转子极对数， Ω_r 为转子机械角速度，与电角速度关系为 $\omega_r = p_n \cdot \Omega_r$ ， T_L 为负载转矩， J 为电机与负载转动惯量之和， B 为黏滞摩擦系数。

3 扫描镜控制系统建模与仿真

3.1 扫描镜控制系统控制策略

矢量控制的目的是改善转矩控制性能，其基本思想是：通过坐标变换将定子电流分解成与磁链同方向的直轴励磁分量 i_d 和与磁链方向正交的交轴转矩分量 i_q ，分别进行独立控制，通过维持励磁电流不变而控制转矩电流，使交流电机获得像直流电机一样良好的动态特性。本文采用 $i_d = 0$ 控制策略，此控制方法的优点是可以保证用最小的电流幅值得到最大的输出转矩且转矩波动小。此时的输出力矩为：

$$T_e = \frac{3}{2} p_n \psi_f i_q . \quad (8)$$

扫描镜控制系统结构如图 3 所示，为电流、速度和位置三闭环结构，采用复合控制以提高控制精度。电流环的作用是实现电流的快速跟踪，减少转矩脉动和电流环内部产生的扰动影响，增强系统快速性，使系统产生足够大的加速度转矩；速度环的作用是增强系统抗负载扰动能力，抑制速度波动，需具有小速度脉动率、快频率响应以及宽调速范围等性能；位置环是最外环，作用是保证系

统的稳态精度和动态跟踪性能，对速度环和电流环进行补偿。

按照多环系统设计先内环后外环的原则，在三闭环系统设计中，首先设计电流环，其次把整个电流环看成是转速环调节系统中的一个环节，再针对转速环进行设计，最后把整个速度环作为位置环调节系统中的一个环节，设计位置调节器。

3.2 基于 MATLAB/SIMULINK 控制系统建模与仿真

MATLAB/SIMULINK 包括各种功能模块，容易实现永磁同步电机矢量控制系统的仿真建模，直观且无需编程，使系统设计更为便捷。PMSM 系统建模仿真的整体结构包括 PMSM 本体和三相电压型逆变器模块、坐标变换模块、SVPWM 生成模块以及扫描镜负载模块，控制系统模型如图 4 所示。

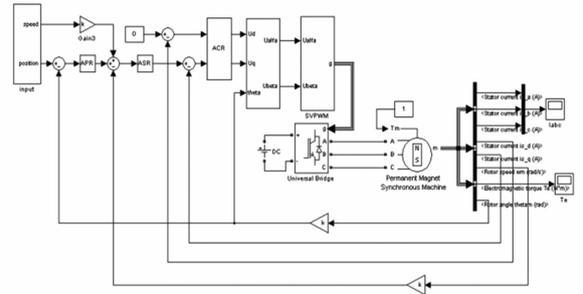


图 4 控制系统仿真模型

Fig. 4 Emulational model of control system

3.2.1 电流环与速度环设计

对式(4)进行拉氏变换，得到 q 轴的传递函数：

$$\frac{I_q(s)}{U_q(s) - \psi_f \omega_r(s)} = \frac{1}{L_q s + R_s} . \quad (9)$$

忽略黏滞摩擦系数 B 的影响，对式(7)进行拉式变换，得到传递函数：

$$\frac{\omega_r(s)}{1.5 p_n \psi_f I_q(s) - T_L(s)} = \frac{1}{J s} . \quad (10)$$

建立速度、电流双闭环控制结构如图 5 所示。电流环为电流随动系统，按照调节器工程设计方法，将电流调节器选 PI 调节器，校正后的电流环为典型 I 型系统。作为速度环内一个环节，在满足一定条件下，电流环可以降阶为一阶惯性环节，则速度环的控制对象为一阶惯性环节和积分环节的串联。为实现转速无静差，并使系统具有较好的抗扰动性能，将速度环校正为典型 II 型

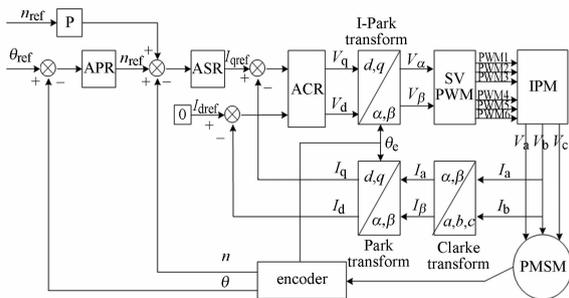


图 3 控制系统结构示意图

Fig. 3 Diagram of control system structure

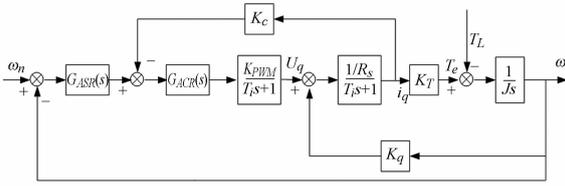


图 5 速度和电流双闭环控制系统结构图

Fig. 5 Diagram of control system of speed and current loops

系统, 调节器采用 PI 调节器。

PI 控制器引入积分环节的目的在于消除稳态误差, 提高控制精度。但在大幅度增减给定值时, 短时间内系统的输出与输入存在很大偏差, 积分环节对偏差的积累作用使调节器进入深度饱和状态, 将引起输出过大、超调, 甚至剧烈振荡。因此, 采用积分分离 PI 控制策略, 当系统给定值与输出值存在较大偏差时, 取消积分环节的作用, 避免因积分作用使系统稳定性降低、超调量增大; 当输出值接近给定值时, 引入积分控制, 消除静差, 进而提高控制精度。

3.2.2 微分负反馈双闭环设计与仿真

系统中, 扫描镜的定位不允许超调出现。PI 控制器因其固有的特性, 系统的输出易出现超调现象。而微分环节有利于改善系统的动态性能, 但易引入高频噪音, 使得高阶系统易受干扰, 系统变得不稳定。采用带有微分负反馈的 PI 控制, 可以使得调节器的退饱和点向前移动, 使系统能够快速进入稳态, 降低甚至消除超调量。引入微分负反馈, 符合现代控制理论中的全状态反馈最优控制思想, 可显著改善反馈控制系统的动态响应性能。

以电流环为例, 电流环微分负反馈结构图如图 6 所示。

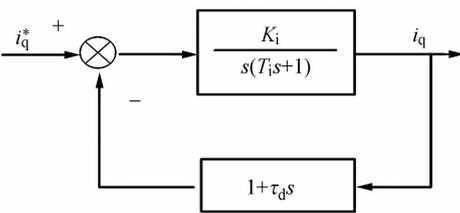


图 6 电流环微分负反馈结构图

Fig. 6 Diagram of differential negative feedback for current loop

电流环未加微分负反馈时闭环传递函数为:

$$\frac{K_i}{T_i s^2 + s + K_i} = \frac{\omega_i^2}{s^2 + 2\zeta\omega_i s + \omega_i^2} \quad (11)$$

为提高调节速度, 需增大开环增益, 但较大的增益会造成系统动态响应过程中出现超调, 甚至会造成系统的不稳定。加入微分负反馈后的闭环传递函数为:

$$\frac{K_i}{T_i s^2 + (1 + K_i \tau_d s) + K_i} = \frac{\omega_i^2}{s^2 + 2\zeta'\omega_i s + \omega_i^2} \quad (12)$$

由上式可知, 加入微分负反馈环节后电流环阻尼比增大, 为实现电流的快速响应无超调, 适当调节反馈系数, 增大阻尼比至接近于 1。

在仿真模型上对电流环进行调节, 分别得到电流在有无微分负反馈时的阶跃响应如图 7 所示。

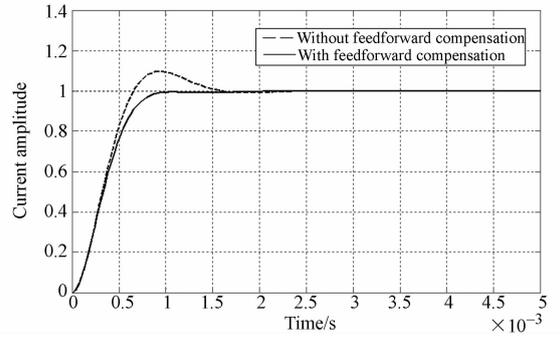


图 7 电流阶跃响应

Fig. 7 Step response of current

对加入微分负反馈后的电流环进行频域分析, 开环传递函数的截止频率和相角裕度均增大, 既有利于快速性, 又有利于稳定性。

速度环控制器设计同样采用微分负反馈原理, 不仅可以抑制甚至消除转速超调的现象, 还能降低负载扰动引起的动态速降, 增强速度环抗负

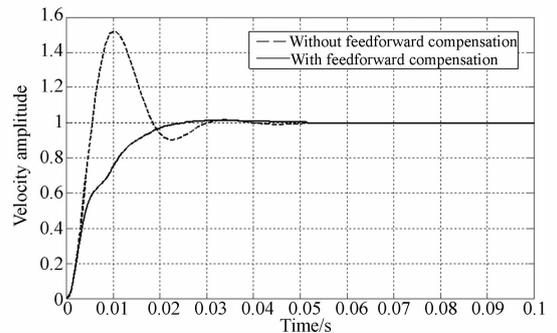


图 8 速度阶跃响应

Fig. 8 Step response of speed

载扰动。对速度环进行调节,分别得到在有微分负反馈时的速度阶跃响应,如图 8 所示。

可以看出,加入微分负反馈后,速度阶跃响应基本无超调。图 9 所示为加入微分负反馈时的速度响应局部放大曲线,选择合适的控制参数能够减小超调、加快响应时间且增大稳态精度。

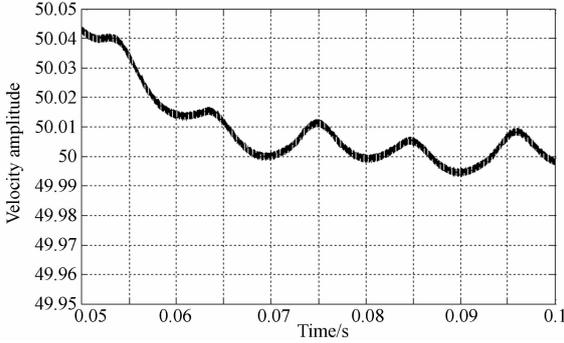


图 9 速度阶跃响应局部放大

Fig. 9 Partial enlarged detail of speed step response

3.2.3 位置环设计与仿真

速度环经校正后,系统为一个高阶、非线性的系统,在采用双滞—超前校正环节作为位置调节器时,需对其做降阶或用反映速度环主要特性的环节来等效处理。分别在有无前馈补偿复合校正两种情况下对系统进行仿真,仿真结果如图 10~13 所示。

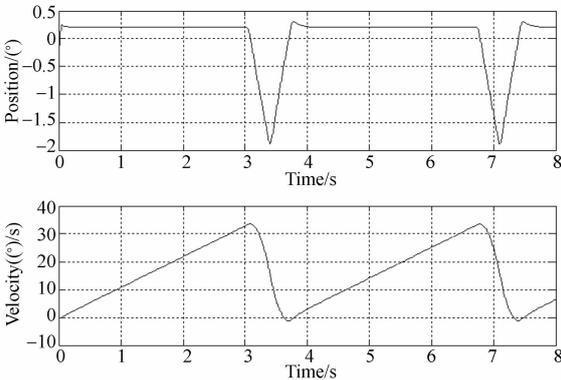


图 10 无前馈补偿时速度与位置曲线

Fig. 10 Curves of velocity and position without feedforward compensations

增加复合校正后误差和超调均减小,恒速运行时稳速精度得到提高。经计算,采用复合校正

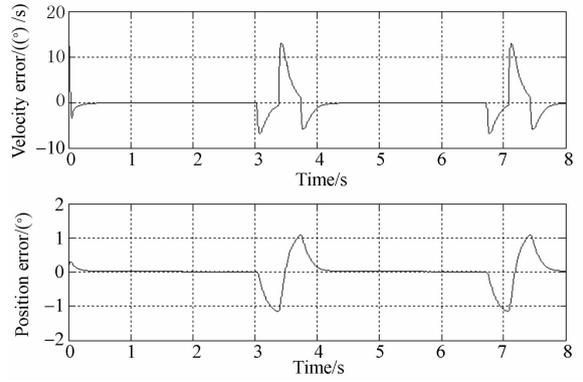


图 11 无前馈补偿时速度与位置误差曲线

Fig. 11 Curves of errors without feedforward compensations

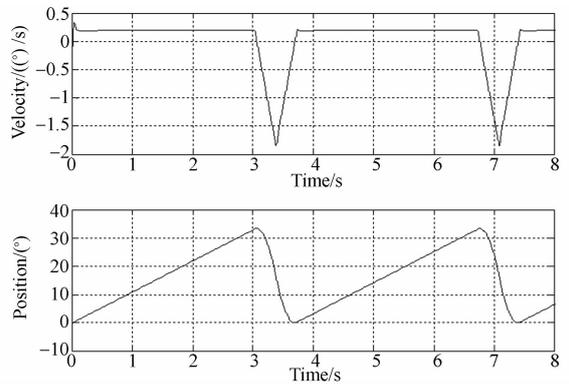


图 12 有前馈补偿时速度与位置曲线

Fig. 12 Curves of velocity and position with feedforward compensations

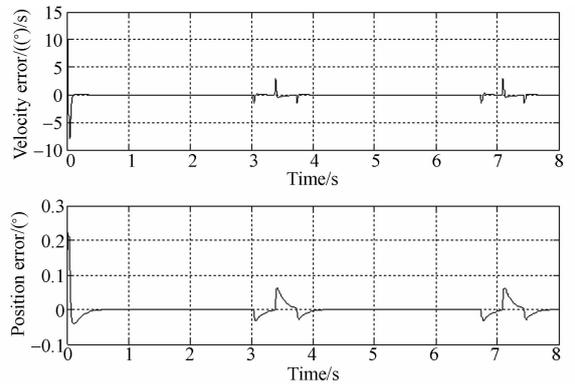


图 13 有前馈补偿时速度与位置误差曲线

Fig. 13 Curve of error with feedforward compensations

后,恒速运行时平均速度误差由 1.27% 提高到 0.92%。

3.2.4 齿槽转矩对速度性能的影响分析及仿真

永磁同步电机在低速或超低速运行时,会引发低速控制的一些特殊问题,特别是齿槽效应所

产生的齿槽力矩作用会凸显出来。齿槽力矩是电机永磁磁场的幅值和空间位置的函数,可以使系统产生周期性的转矩波动,影响控制系统特别是低速系统的低速性能和高定位精度^[14]。

假设电机轴以角速度 ω_0 匀速旋转,由齿槽效应引起的齿槽力矩是关于转子角位置 θ_0 的函数, θ_0 是对时间的积分。所以当 ω_0 为常数时,近似地认为齿槽力矩 T_1 仅仅是时间的函数,可以用 T_1 的基波来近似,即

$$T_1(t) = A \sin(\omega_z t), \quad (13)$$

式中:基波角频率

$$\omega_z = \omega_0 Z, \quad (14)$$

Z 为电机定子槽数。基波振幅:

$$A = \frac{\omega_z}{\pi} \int_0^{2\pi/\omega_z} T_1(t) \sin(\omega_z t) dt. \quad (15)$$

在存在齿槽力矩情况下,系统在有前馈补偿时速度和位置误差曲线如图 14 所示。

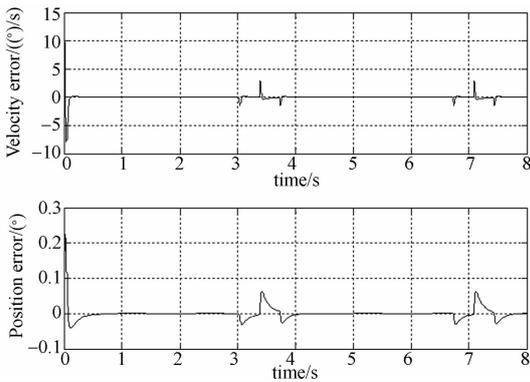


图 14 存在齿槽力矩波动时速度与位置误差曲线
Fig. 14 Curves of errors with cogging torque ripples

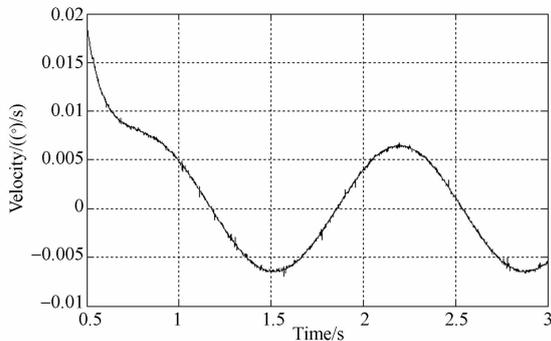


图 15 速度误差局部放大图

Fig. 15 Partial enlarged detail of velocity error

对恒速段曲线放大(图 15),可以看到电机输出速度与给定速度相比有波动,恒速运行时平均

速度误差降为 1.65%。由此可见,齿槽力矩对控制系统低速性能影响很大。

4 实验验证

4.1 硬件实现

扫描镜控制系统主要由伺服驱动器、驱动电机 PMSM 和扫描镜负载组成。伺服驱动器主要包括数字控制电路、数据采集与模/数转换电路和功率驱动电路。数字控制电路采用主、从双控制器策略:主控制器 DSP 采用工程上应用成熟的 TMS320F2812 作为运动控制芯片,负责矢量控制算法的实现和与上位机之间的通讯;从控制器 FPGA 采用 Actel 公司的 APA600,负责产生驱动电路所需的 PWM 波及其保护信号,控制外围电路的通断。数据采集与模/数转换电路负责采集电机转子的位置和电流值;传感器包括 20 位绝对式编码器和霍尔电流传感器,分别对转子的当前角位置和其中两相电流值进行采样与反馈。功率驱动电路基于 IR2130 构建而成,具有快速响应、过压过流保护、泄放母线电流等特点。扫描镜控制系统硬件如图 16 所示。

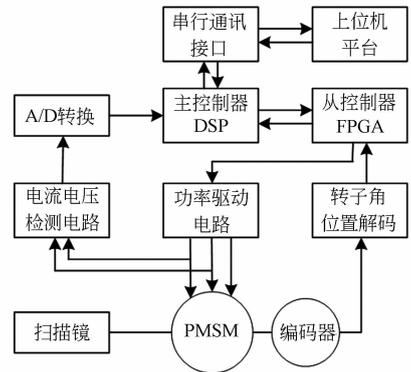


图 16 控制系统硬件结构框图

Fig. 16 Diagram of hardware structure for control system

4.2 实验结果与控制性能

永磁同步电机实测参数:单相绕组电阻 $R = 8.15 \Omega$;电感 $L = 5.08 \text{ mH}$;转子转动惯量 $J = 3.24 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$;反电势系数 $K_e = 0.0167 \text{ V/r} \cdot \text{min}^{-1}$;力矩系数 $K_T = 0.13811 \text{ N} \cdot \text{m/A}$;

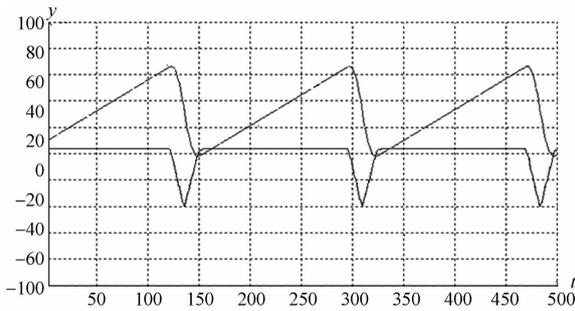


图 17 扫描镜位置和速度曲线

Fig. 17 Curves of position and velocity of scanning mirror

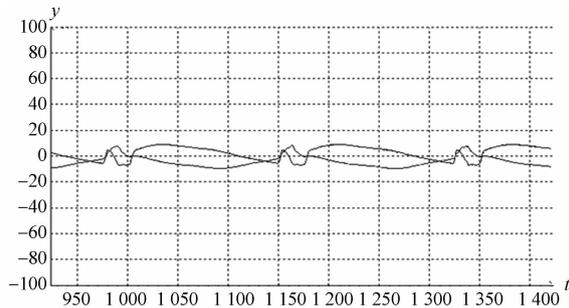


图 18 电机定子 A、B 相电流曲线

Fig. 18 Curves of A and B phase currents of stator

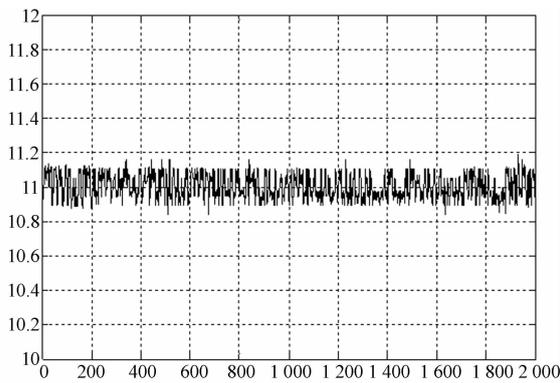


图 19 速度曲线局部放大

Fig. 19 Partial enlarged detail of speed

扫描镜负载转动惯量 $J_l = 7.465 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$;
齿槽力矩最大值为 $0.00589 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

对硬件系统进行实验调试,实现扫描镜既定往复运动,在上位机上得到扫描镜位置与速度实测曲线和电机相电流实测曲线,如图 17~19 所示。

从图中可以看出,稳态运行时速度基本恒定和回扫位置定位准确。对实测数据进行分析,恒速运行时未对电机齿槽力矩进行补偿,得到扫描镜的平均速度误差为 2.06%。而硬件系统电流采样与编码器测速的误差约为 1% 左右,扫描镜控制系统满足要求精度。

5 结 论

本文采用正弦永磁同步电机直驱扫描镜的方式设计了扫描镜控制系统,采用基于空间电压矢量脉宽调制(SVPWM)的 $i_d = 0$ 矢量控制策略实现了位置、速度和电流的三闭环控制,并采用前馈补偿加闭环控制的复合控制技术提高了电机恒速运行时角速度的稳态精度速度,使扫描镜能够按照既定的运动模式高稳定性和高精度的运行,并能输出高动态范围的控制力矩。采用复合控制后,仿真得到恒速运行时平均速度误差由 1.27% 提高到 0.92%,齿槽力矩引起的速度波动使恒速状态下的平均速度误差降至 1.65%。实验结果表明平均速度误差约为 2.06%,满足扫描镜系统速度精度优于 5% 的设计要求。

[J]. *SPIE*, 1988, 834: 55-62.

[4] CALLIES J, CORPACCIO L E, EISINGER M, et al.. Ozone monitoring by GOME-2 on the metop satellites Proc [C]. *The 2000 EUMETSAT Meteorological Satellite Data Users' conference, Bologna*; 2000: 201-208.

[5] 许振伟. 永磁交流伺服系统及其控制策略研究 [D]. 杭州: 浙江大学博士论文, 2003.
XU Z W. *Research on AC PMSM Servo System and Control Strategy* [D]. Hangzhou: Graduate U-

参考文献:

- [1] YUAN L, GAO W J, W SH T. Research on design and manufacture of space remote sensor's big light-en scan mirror [J]. *Advanced Optical Manufacturing and testing Technology, Proceeding of SPIE*, 2000.
- [2] MOOG. Spacecraft mechanisms product catalog[G]. *MOOG Schaeffer Magnetics Division*, 2005: 74-75.
- [3] M D C. Aviris scan drive design and performance

- niversity of Zhejiang University, 2003. (in Chinese)
- [6] 汪逸群,刘伟,颜昌翔,等. 成像光谱仪运动补偿扫描镜的研制[J]. 光学精密工程, 2011, 19(11): 2373-2078.
WANG Y Q, LIU W, YAN CH X, *et al.*. Development of high-precision scanning mirror assembly of imaging spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11): 2373-2078. (in Chinese)
- [7] 汪逸群,颜昌翔,贾平. 成像光谱仪运动准确度测量[J]. 光子学报, 2012, 41(2): 185-189.
WANG Y Q, YAN CH X, JIA P. Motion precision measurement of imaging spectrometer's scanning Mirror [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(2): 185-189. (in Chinese)
- [8] 陈茂胜,金光,安源,等. 采用自适应PI控制的SGCMG角动量飞轮系统设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 1075-1081.
CHEN M SH, JIN G, AN Y, *et al.*. Design of angular momentum wheel in SGCMG using adaptive compensation PI control strategy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1075-1081. (in Chinese)
- [9] 陈茂胜,金光,张涛,等. 积分反馈自抗扰控制力矩陀螺框架伺服系统设计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2424-2432.
CHEN M SH, JIN G, ZHANG T, *et al.*. Design of gimbal servo system of CMG using active disturbance rejection control with integral feedback [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11): 2424-2432. (in Chinese)
- [10] 褚立新,林辉. 空间变速用高精度永磁同步电动机伺服系统仿真研究[J]. 微电机, 2009, 42(6): 59-62.
CHU L X, LIN H. Study on high-precision permanent magnet synchronous motor servo system for space speed-variable scanning system [J]. *Micro Motor*, 2009, 42(6): 59-62. (in Chinese)
- [11] LI S Y, ZHOU S C. Modeling and designing of pointing mirror control system [J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2010, 27(1): 76-82.
- [12] 贾英宏,徐世杰,陈统. 航天器扫描镜成像位置误差补偿技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(2): 153-159.
JIA Y H, XU SH J, CHEN T. Imaging position error compensation of scan mirror for spacecraft [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2012, 38(2): 153-159. (in Chinese)
- [13] 朱钰,付晶,韩昌佩. 基于TSC695-FPGA架构的空间扫描运动系统设计[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(20): 4965-4969.
ZHU Y, FU J, HAN CH P. Design of spatial scanning motion control system based on TSC695-FPGA structure [J]. *Science Technology and Engineering*, 2012, 12(20): 4965-4969. (in Chinese)
- [14] 夏加宽,盛丽君,刘纯江. 直接驱动环形永磁力矩电机低速齿槽转矩脉动补偿研究[J]. 电气技术, 2009, 3: 21-24.
XIA J K, SHENG L J, LIU C J. Research on cogging torque ripple compensation at low speed for direct drive ring permanent magnet torque motor [J]. *Electric Technology*, 2009, 3: 21-24. (in Chinese)

作者简介:



杨维帆(1987—),男,黑龙江大庆人,博士研究生,2009年于吉林大学获得学士学位,主要从事空间光学遥感器稳像控制方面的研究。E-mail: yangweifan1987@sina.com

导师简介:



徐抒岩(1963—),男,吉林人,研究员,博士生导师,1985年于天津大学获得学士学位,1989年于中科院长春光机所获得硕士学位,主要研究方向为空间光学遥感器计算机控制、图像处理。E-mail: xusy@ciomp.ac.cn