基于FPGA的永磁同步电机控制系统设计与实现

孙丹峰[1,2] 申友涛[1,2] 邵若薇[1,2] 刘忠国[1,2] 付培华[1,2]
(1.上海航天控制技术研究所 上海 201109;2.上海惯性工程技术研究中心 上海 201109)

摘 要:针对控制力矩陀螺外框架伺服系统的性能要求,选用了永磁同步电机作为控制电机,设计了电流环、速度环、位置环的控制方案,并在Simulink仿真环境中进行了相应的仿真实验,取得了良好仿真结果,仿真结果表明了所设计系统的准确性和可行性。同时设计了以FPGA为核心的硬件控制系统,编写了相应的软件,取得了良好的测试结果,测试结果表明了所设计的基于FPGA的永磁同步电机控制系统能够实现控制力矩陀螺外框架速度和位置的高精度控制,满足控制力矩陀螺的使用要求。

关键词:永磁同步电机;矢量控制;三环控制;电流环;FPGA
中图分类号:V441 **文献标识码**:A **国家标准学科分类代码**:510.5060

Design and implementation of the permanent magnet synchronous motor control system based on FPGA

Sun Danfeng[1,2] Shen Youtao[1,2] Shao Ruowei[1,2] Liu Zhongguo[1,2] Fu Peihua[1,2]
(1. Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 201109, China;
2. Shanghai Engineering Technology Research Center of Inertia, Shanghai 201109, China)

Abstract: According to the operating requirements of the SGCMG gimbal servo control system, permanent magnet synchronous motor(PMSM)is used as control motor, and the control scheme of current loop、speed loop and position loop is designed. The accuracy and the feasibility of the design are confirmed by the simulations that are performed based on Simlink. Then the hardware and software based on FPGA are designed, which yields satisfying results. And the speed and position precision control of SGCMG gimbal servo control system can be realized, which accords with the operating requirements of SGCMG.

Keywords: permanent magnet synchronous motor (PMSM); vector control; three-loop control; current-loop control; FPGA

1 引 言

卫星姿态控制在目前有很多方案,且各种方案各有优缺点。利用控制力矩陀螺对卫星姿态进行控制可以得到较大的力矩放大倍数和很好的线性度,因而被广泛应用于大中型敏捷机动性卫星[1]。控制力矩陀螺动量轮转子恒定高速旋转以形成角动量,外框架电机带动内框架转动以产生力矩,从而调整卫星姿态[2]。为实现卫星快速反应、精确控制,其外框架伺服系统需满足高精度的速度和位置控制。

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)由绕线转子同步电机发展而来[3]。它用强抗退磁的永磁转子代替了绕线式转子,淘汰了易出故障的电刷,同时它兼有体积小、重量轻、惯量低、效率高、转子无发热等特点,已广泛应用于高性能伺服系统[4-5]。因此,采用永磁同步电机来实现对控制力矩陀螺外框架的高精度速度和位置控制非常合适。

同时矢量控制算法和直接转矩控制算法是现代交流伺服系统中最常用的两种控制算法[6]。直接转矩控制技术由于缺少电流闭环,因此存在速度稳定性能差、转矩脉动大、调速范围不够宽的缺陷;相比而言矢量控制技术则相对成熟,电流闭环的存在克服了直接转矩控制低速转矩脉动大的缺陷[7-8]。所以控制力矩陀螺外框架电机的控制采用矢量控制技术,并采用典型的三环控制方案:电流(力矩)环、速度环、位置环。其中电流环为最内的一环,其性能直接影响速度环和位置环的性能。

收稿日期:2016-07

FPGA特别是反熔丝的FPGA由于其高的可靠性在航天产品中应用越来越多。此外FPGA并行数据的处理能力和时序控制能力特别适合控制系统的设计与实现[9]。因此,设计的控制力矩陀螺外框架电机控制系统采用FPGA来实现。

2 电流环设计

PMSM矢量控制的主要控制方法有 $i_d=0$ 控制、$\cos\varphi=1$ 控制、恒磁链控制、最大电流/转矩控制、弱磁控制、最大输出功率控制等。其中 $i_d=0$ 控制方法具有控制系统结构简单,转矩输出特性好,调速范围宽,没有电枢反应去磁问题。该控制方案的缺陷是当负载增大时,定子电流增大,由于电枢反应的影响造成气隙磁链和定子反电动势增大,迫使定子电压升高,所以该控制方法适合小容量的控制方法,控制力矩陀螺外框架系统采用该控制方案。

矢量控制技术实质上是对电机定子电流矢量的幅值和相位进行控制。其基本的思想是将PMSM模拟直流电机的转矩控制规律,在磁场定向的坐标系下将电流矢量分解成两个相互垂直,彼此独立的电流分量,即产生磁通的励磁电流分量 i_d,和产生力矩的转矩电流分量 i_q,然后分别对其进行调节实现解耦控制。永磁同步电机的永磁体转子产生恒定的磁场。当定子中通以三相对称的正弦波交流电时,则产生旋转的磁场。两种磁场相互作用产生电磁力,推动转子旋转。通过改变定子三相电源的频率和相位改变转子的转速和位置,通过矢量控制,可以减少转矩脉动[10]。

PMSM矢量控制技术以坐标旋转变换为主要方法,在转子 dq 旋转坐标系下面实现了解耦控制,得到了类似直流电机的控制性能。在 dq 坐标系下电机的数学模型:

$$u_d = L_d p i_d + p\psi_f - \omega L_q i_q + R_s i_d \tag{1}$$

$$u_q = L_q p i_q + \omega L_d i_d + \omega\psi_f + R_s i_q \tag{2}$$

$$T_e = p_n[\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \tag{3}$$

式中:ψ_d、ψ_q 为定子磁链在 d、q 轴上的分量;ψ_f 为转子磁钢在定子上的耦合磁链,它与 d 轴同向;L_d、L_q 为永磁同步电机 d、q 轴的主电感,ω 为电气角速度。

对于凸极式转子,$L_d=L_q$,转矩方程变为:

$$T_e = p_n\psi_f i_q = p_n\psi_f i_s \sin\beta \tag{4}$$

力矩平衡方程为:

$$\omega_r = \frac{\omega}{p_n} \tag{5}$$

式中:ω_r、T_l、J、R_Ω 分别为机械角速度($\omega_r=\frac{\omega}{p_n}$)、负载阻力矩、电机转动惯量、阻尼系数。

因为永磁转子 ψ_f 是个常量,由式(4)看出只要保持 $\beta=90°$,也就是 i_s 与 d 轴垂直,就可以像控制直流电动机那样,通过调整直流量 i_q 来控制转矩,实现对PMSM转矩的线性化控制。正弦波驱动的永磁同步电机电磁转矩和电流幅值呈线性关系,理论上力矩波动为零,可以很好地降低电机的低速转矩脉动[11]。

PMSM矢量控制系统如图1所示,通过坐标变换 *Clarke* 变换,*Park* 变换以及 $Park^{-1}$ 最终在 dq 旋转坐标系实现解耦控制。采用 $i_d=0$ 控制方法,d 轴电流给定值 $i_d^*=0$,q 轴电流给定值 i_q^* 时给定转速 ω_r^* 和实际转速 ω_r 之间的差值经过PI调节得到。采用空间矢量调制(SVPWM)的方法主要是因为其具有电压利用率高,输出谐波失真小、转矩脉动小等优点。

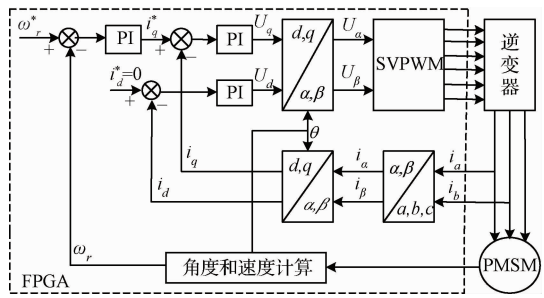

图1 PMSM矢量控制系统

3 速度环和位置环的设计

为实现对控制力矩陀螺外框架的速度、位置的精确控制,需要设计实现三闭环控制系统,即电流环、速度环、位置环。如图2所示,其中电流环为最内一环,速度环为中间一环,位置环为最外一环,位置信号有光电编码器采样得到。对控制力矩陀螺外框架的控制可以采用位置模式也可以采用速度模式。采用位置模式时,系统输入为位置信号,位置误差经过PI调节器后得到速度给定值作为速度环的输入,速度误差经过PI调节器后得到电流环 q 轴电流参考值作为电流环输入。相对电流环的设计而言速度环和位置环结构相对简单,不需要设计复杂的解耦算法。速度环和位置环的设计关键在于PI调节器合理参数的选择上。对于PI调节器参数的选择上合理的理论计算和仿真验证是很有必要的。

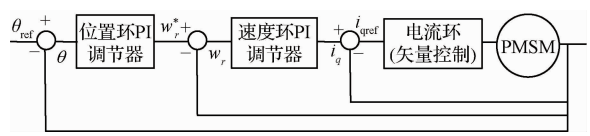

图2 速度环和位置环控制系统

4 仿真试验

在MATLAB/Simulink的仿真环境下建立永磁同步电机的数字系统仿真模型。电机参数如下,极对数 $p_n=16$,定子电阻 $R_s=10.3\ \Omega$,d 轴电感 $L_d=32$ mH,q 轴电感 $L_q=32$ mH,工作电压28 V,转动惯量 $J=3.28\times10^{-2}$ kg·m^2,力矩系数5.865 Nm/A,空载转速45 r/min。

对仿真结果作如下分析。

图3所示为 q 轴仿真电流曲线,分析曲线可以看出,

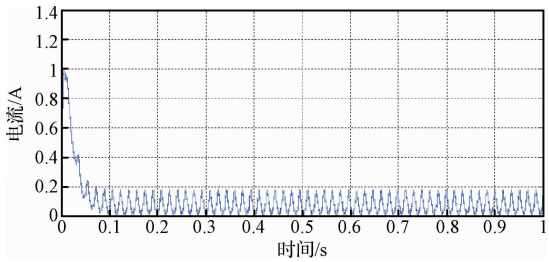

图3 q轴电流仿真曲线

电流环能在很短的时间内响应到给定值。由于所采用的PMSM力矩系数比较大(5.865 Nm/A),而且是空载运行,所以电机很快加速到额定转速;在转速增大的过程中反电动势随之增大,电机两端电压下降使得电流减小,即曲线中反映的电流曲线下降的阶段;转速稳定后反电动势不再增大,电流便会相对平稳,即曲线中相对平稳段所反映的。

如图4所示,d轴电流维持在零附近,符合$i_d=0$控制方案。

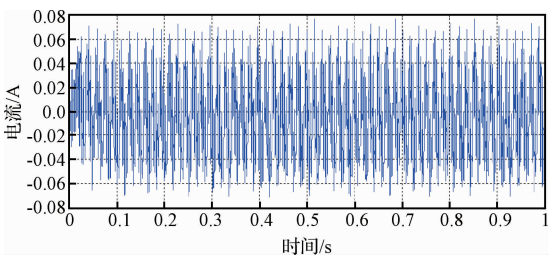

图4 d轴电流仿真曲线

图5所示为转矩曲线,电机的转矩曲线和q轴电流的变换曲线基本一致,它们之间存在线性的比例关系,通过图6所示的转矩与转矩系数和i_q乘积的差值曲线可以看出,它们之间的误差基本维持在2×10^{-3}范围内,表明输出转矩为力矩系数和q轴电流值的乘积,说明了所设计的电流环通过解耦控制实现了对转矩的线性控制。

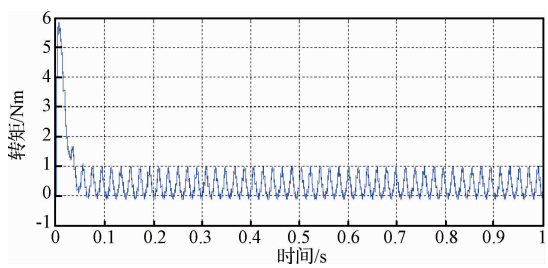

图5 转矩曲线

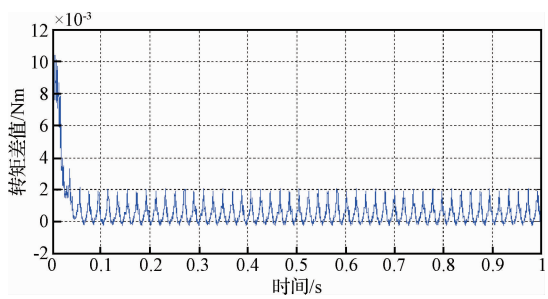

图6 转矩与转矩系数和i_q乘积的差值曲线

5 基于FPGA的控制系统实现与结果分析

控制力矩陀螺作为机电一体化的产品,外框架电机控制系统需要与星载计算机进行实时通讯和数据交互,这些功能的实现需要严格的时序控制,而时序控制的实现FPGA是最好的选择,此外FPGA强大的并行数据处理能力能够进一步缩短系统响应时间。反熔丝FPGA的高可靠性对于提高系统的可靠性也是重要的保障[12]。

根据系统的原理框图,搭建相应的硬件系统,系统的控制方式采用FPGA为核心控制器,采用Verilog语言完成了电流环、速度环、位置环以及外围通讯系统控制程序编写[13]。对软件进行了调试,得到了良好的实验结果。

图7所示为实验数据画出的SVPWM波形,数据采集在电机启动瞬间到稳定运行的阶段。横坐标为采样的数据点数,纵坐标为占空比。可以看出波形比较光滑无毛刺,波形和理论上分析的SVPWM波形一致,表明电机运行比较平稳,转矩和速度的波动较小。

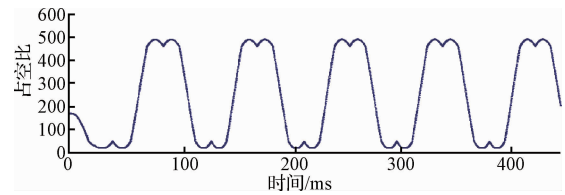

图7 SVPWM波形

图8所示为电流环q轴电流曲线i_q,横坐标为采样点,纵坐标对应的电流值,可以看出在350数据点时电流响应到了给定值,由此可以计算出所设计的电流环的相应时间:$t_s=350\times50\ \mu s=0.0175$ s,表明该电流环能快速地跟踪给定值。通过与图比较可以看出,实验测得的实际电流和仿真电流变化趋势是一致的,验证了论文设计的电流环的可行性。

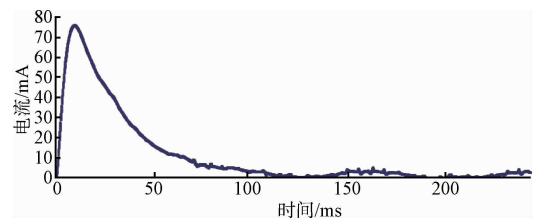

图8 q轴电流i_q曲线图

图9所示为d轴电流i_d曲线,由于采用$i_d=0$控制方案,要求电流i_d维持在零附近,通过曲线可看出i_d在±0.008 A合理范围之内,与仿真结果一致。

图10、11所示为速度环低速控制精度,给定转速分别为0.25°/s和0.05°/s,为了验证该方案的优越性进行了对

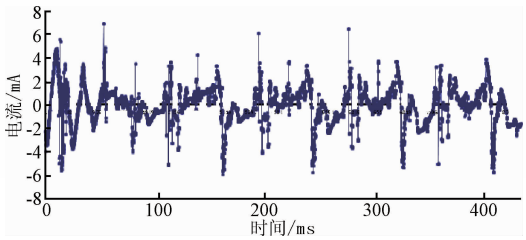

图 9　d 轴电流 i_d 曲线

比试验，如图所示分别为采用 DSP 方案以及本文采用的 FPGA 方案，通过数据比较可以得出在其它条件相同的情况下本文所采用的 FPGA 方案的控制精度要比 DSP 方案高。

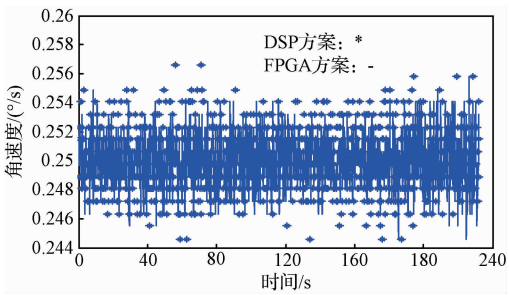

图 10　速度环低速(0.25°/s)控制精度

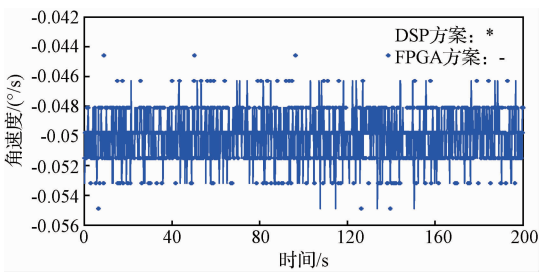

图 11　速度环低速(0.05°/s)控制精度

图 12 所示为位置环控制精度，给定位置指令为 90°时，本文所采用的 FPGA 控制方案的位置控制精度要比 DSP 方案的控制精度高，这主要体现在 FPGA 方案的稳态误差要比 DSP 方案的小。说明本文所设计的基于 FPGA 的电机控制系统具有一定的优越性，能够实现控制力矩陀螺外框架速度和位置的高精度控制，满足控制力矩陀螺的使用要求。

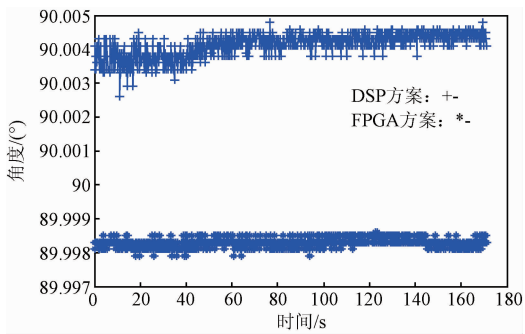

图 12　位置环控制精度

6　结　论

论文针对控制力矩陀螺外框架伺服系统的性能要求，选用了永磁同步电机作为控制电机，设计了电流环、速度环、位置环的控制方案，并通过在 Simulink 环境下仿真，验证了控制方案的准确性和可行性。随后又设计了以 FPGA 为核心的软、硬件系统，通过测试结果表明了所设计的基于 FPGA 的永磁同步电机控制系统能够实现控制力矩陀螺外框架速度和位置的高精度控制(速度误差0.005°/s、位置误差 0.004°)，满足控制力矩陀螺的使用要求。

参 考 文 献

[1] 章仁为. 静止卫星的轨道和姿态控制[M]. 北京：科学出版社，1994：62-71.
[2] 屠善澄，成器. 卫星姿态动力学与控制[M]. 北京：中国宇航出版社，2006.
[3] 刘军. 永磁同步电机电机若干问题的研究[D]. 上海：华东理工大学，2010.
[4] 王成元，夏加宽，杨俊友. 电机现代控制技术[M]. 北京：机械工业出版社，2006.
[5] 温嘉斌，赵成，张羽. 螺杆泵用无刷直流电机控制系统的设计[J]. 哈尔滨理工大学学报，2012，17(2)：80-83.
[6] 刘洋，王帅，杨晓霞，等. 一种永磁同步电动机的宽调速范围控制方法[J]. 国外电子测量技术，2016，35(4)：50-54.
[7] 唐小琦，白玉成，陈吉红. 永磁同步电机高性能电流解耦控制的研究[J]. 电气传动，2009，29(10)：18-22.
[8] 邱忠才，肖建，郭冀岭，等. 永磁同步电机速度预测电流解耦控制[J]. 电子测量与仪器学报，2015，29(5)：648-654.
[9] 贺卫东，段哲民，龚诚. 基于 FPGA 的大点数 FFT 算法研究[J]. 电子测量技术，2007，30(11)：14-16.
[10] 刘亮，何攀峰，台鑫. 矢量调制在相干多通道信号发生中的应用研究[J]. 国外电子测量技术，2015，34(11)：48-52.
[11] 马立新，范洪成，黄阳龙. 永磁伺服电机模糊 PID 自整定 SVPWM 控制研究[J]. 电子测量技术，2016，39(6)：20-23.
[12] 赵品志，崔乃政，刘亚静，等. 基于 FPGA 的单芯片交流伺服驱动系统[J]. 哈尔滨工业大学学报，2008，40(3)：428-431.
[13] 夏宇闻. Verilog 数字系统设计教程[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2008.

作 者 简 介

孙丹峰，工学硕士，工程师，主要研究方向为空间惯性执行机构技术。
E-mail：steven_sdf@163.com