

基于 ZYNQ 平台的嵌入式高性能驱动控制研究

崔慧敏, 马纪军, 王宇宁
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 针对传统的光电平台驱动控制方案闭环周期长和体积大的问题, 提出了一种基于 ZYNQ 平台的驱动控制方法。通过采用模块化设计思想, 充分发挥 ZYNQ 中 PL 部分的并行处理优势, 建立对应 CLARK 变化、PARK 变换、交直流电流 PI 校正、反 PARK 变换和 SVPWM 模块的 IP 核, 最终输出 PWM 信号控制驱动桥六个桥臂的开关状态。系统的 PWM 周期可达 18 kHz, 电流环的闭环周期可控制在 50 μ s 以内, 极大地缩减了系统的闭环时间。实验结果表明, 电交轴电流可以快速跟随方波和正弦波指令信号, 且对应电机的三相电流平滑无畸变, 纹波较小。不同频率的正弦输入信号证明了系统的闭环带宽可高于 318 Hz, 验证了方法的有效性, 对于实现小型化高精度的伺服驱动控制具有重要参考价值。

关键词: ZYNQ 平台; 高带宽; 驱动控制; 嵌入式系统

中图分类号: TN820.3; TM301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2023)02-0035-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20221129001

引用格式: 崔慧敏, 马纪军, 王宇宁. 基于 ZYNQ 平台的嵌入式高性能驱动控制研究[J]. 遥测遥控, 2023, 44(2): 35-41.

Research on embedded high-performance drive control based on ZYNQ platform

CUI Huimin, MA Jijun, WANG Yuning
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: Aiming at the problems of long closed loop period and large volume in the traditional drive control scheme of photoelectric platform, this paper proposes a drive control method based on ZYNQ platform. By adopting the modular design idea and fully exerting the parallel processing advantage of the PL part in ZYNQ, the IP cores corresponding to the CLARK transform, PARK transform, PI control of quadrature axis and direct axis, inverse PARK transform and SVPWM module respectively are established. PWM signals are finally output to control the on-off state of the six drive arms. The PWM period of the system can reach 18 kHz, and the closed-loop period of the current loop can be limited within 50 μ s, which greatly reduces the closed-loop time. The experimental results show that the response current of the quadrature axis can quickly follow the square wave and sine wave command signals, the three-phase current of the motor is smooth without distortion, and the ripple is small. The sinusoidal inputs with different frequencies are given to verify that the closed-loop broadband is higher than 318 Hz, which validates the effectiveness of the proposed drive control method in the paper. It has important reference value for realizing miniaturization and high-performance drive control.

Keywords: ZYNQ platform; High bandwidth; Drive control; Embedded system

Citation: CUI Huimin, MA Jijun, WANG Yuning. Research on embedded high-performance drive control based on ZYNQ platform[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(2): 35-41.

引 言

表贴式永磁同步电机凭借其结构简单、转动惯量小等优点, 广泛应用于高精度伺服控制领域, 如激光通信^[1]、机载吊舱、机器人^[2]等。对永磁同步电机进行高性能驱动控制是实现负载高精度

速度控制和位置控制的基础。

传统的伺服驱动系统和控制系统分离, 且拥有各自独立的机箱, 导致整个伺服驱动控制系统的体积和重量较大。方振丰^[3]为了提高扫描过程中的速度精度、平稳性和位置跟踪精度, 基于现场可编程门阵列 FPGA(Field Programmable Gate Ar-

ray)开发了一套航天扫描天线转台的高精度驱动控制系统, 实验结果表明, 航天扫描天线转台的速度波动减小至 1.2%, 位置跟踪误差减小至 $-0.05^\circ \sim 0.175^\circ$ 。相对于单个控制芯片方案, 以 ARM+FPGA、DSP+FPGA 作为核心的多芯片方案, 在伺服系统开发中更具有优势。如刘川等设计搭建了以 TMS320C6748 型 DSP 及 SPARTAN6 型 FPGA 为核心的控制器, 并结合 RT-LAB 半实物实验平台, 验证了对内嵌式永磁同步电机的最大转矩电流比和弱磁控制理论的正确性^[4]。崔熠^[5]提出了一种基于 FPGA 和 DSP 的三片式液晶光阀投影驱动控制系统设计方案, 能够实现 2K 分辨率、60 Hz 帧频的视频信号显示。支萌辉等采用了 ARM+FPGA 的硬件架构, 并结合集中控制模块化的思想对新型驱动器的功能、控制算法进行设计, 该方案不仅能够充分发挥数字控制在控制精度和控制方法上的优势, 还能够保证伺服驱动器的稳定性。测试结果表明, 基于 ARM+FPGA 的交流伺服驱动器具有动态响应快、可靠性高、实时性好、抗干扰能力强等特点^[6]。采用 ARM+FPGA 的设计架构虽然节约了空间, 但驱动和控制是在分立的元器件上进行设计, 导致通信成本较高。李俊颖^[7]以高度集成的单芯异构 ZYNQ SoC 芯片为核心搭建了永磁同步电机伺服驱动实验平台, 对驱动系统进行了电流环、速度环和位置环实验, 实验表明驱动系统具有良好的动态响应和稳态性能, 验证了基于 ZYNQ 开发永磁同步电机伺服驱动系统的可行性。另外, 目前常用的驱动控制方法包括空间电压矢量脉宽调制 SVPWM(Space Vector Pulse Width Modulation)驱动控制^[8]和正弦脉宽调制 SPWM(Sinusoidal Pulse Width Modulation)驱动控制^[9]等, 其中空间矢量脉宽调制将电压型逆变器输出的基本空间电压矢量合成需要的参考空间电压矢量, 在电机驱动和控制技术等领域中有重要应用。SVPWM 技术通过对逆变器各桥臂开关控制信号的不同组合, 使逆变器的输出电压空间矢量的运行轨迹尽可能接近圆形, 与 SPWM 调制技术相比, 其逆变电路的电流输出波形的谐波成分更小, 对直流母线的电压利用率也高出 15% 左右, 更加适用于电机控制。在 SVPWM 控制算法下, 电机的转矩更加平稳, 脉动减少, 其旋转磁场更加逼近于圆形^[10]。传统的 SVPWM 控制采用基于七段式基本电压矢量合成期望电压矢量的方式, 常采用期望电压矢量所

在扇区的两个基本电压矢量进行合成。该方法虽然减少了驱动管的开关次数, 但导致流过检测电阻的电流出现较大波动, 从而导致采集的电流噪声较大, 最终导致电机的转矩波动较大。

本文提出基于 ZYNQ 平台的高性能驱动控制, ZYNQ 平台分为 PL 和 PS 两部分, 在架构方面结合了 ARM 嵌入式处理核心和 FPGA 可编程逻辑电路两方面的优势, 相对于 DSP+FPGA 或者 ARM+FPGA 分立元器件组合, ZYNQ 平台不仅可以缩小整个硬件电路的体积, 而且通过 AXI (Advanced Extensible Interface) 接口进行 FPGA 和 ARM 之间的连接, 可以实现高带宽、低延迟的数据信息交互^[11]。同时, 针对使用传统脉冲宽度调制方法时电机转矩脉动较大的缺点, 提出基于六段式基本电压矢量的 SVPWM 驱动控制策略, 并基于单电阻法分时采集电机的三相电流, 使得在一个 PWM 周期里分时采集的三相电流, 可以很好地避免电流为零时刻的出现, 提高电流采样准确度, 降低电机的电流纹波, 从而减少电机转矩波动。

1 永磁同步电机工作原理

永磁同步电机主要由定子、转子以及测量转子位置的传感器构成。其中定子上一般采用三相对称绕组结构, 三相绕组一般采用正弦绕组且轴线在空间位置上彼此相差 120° 。转子上贴有多对磁性体, 根据永磁体的分布位置, 可以将永磁同步电机分为表贴式和内置式。

定子电压:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_l \psi_q \\ u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} - \omega_l \psi_d \end{cases} \quad (1)$$

定子磁链:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

电磁转矩:

$$T_e = \frac{3}{2} n_p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3)$$

上式中 u_d 、 u_q 分别为直轴和交轴电压分量, i_d 、 i_q 分别为直轴和交轴电流分量, ψ_d 、 ψ_q 分别为定子磁链 dq 轴分量, R_s 为定子电阻, ω_l 为转子电角速度, L_d 、 L_q 分别为定子绕组电感 dq 轴分量, ψ_f 为转子永磁体磁链, n_p 为电机极对数, T_e 为电磁转矩。

2 基于ZYNQ平台的磁场定向控制

磁场定向控制即是通过坐标变换，把交流电机中交流电流的控制，变换成类似于直流电机中直流电流的控制，可以获得和直流电机相似的高动态性能。基于ZYNQ平台的磁场定向控制框图如图1所示。

由图1可以看出，整个驱动控制算法部分在ZYNQ平台中完成。ZYNQ平台分为PS和PL两部分，由于PS核心实际为ARM处理器，擅长处理复杂算法运算，因此陀螺角速度采集、速度环指令输入和速度环校正环节均在ZYNQ平台中的PS部分实现。速度环指令输入与基于陀螺传感器测量出的电机实际速度相比较，所得速度误差经过速度环校正环节运算后作为电流环交轴指令值。由于所选择电机为表贴式永磁同步电机，交轴和直轴的电感相同，为了获得最大的启动转矩电流比，提高电机运行效率，本文在设计驱动控制算法时，给直轴的电流输入值为0。

角度采集、角度转换、CLARK变换、PARK变换、交轴PI运算、直轴PI运算、反PARK变换和SVPWM模块均在PL中完成，这些模块可以充分发挥PL中FPGA的处理优势，进行并行运算，从而缩减系统的闭环周期。CLARK变换是将电机静止坐标系下的三相电流变换到两相旋转坐标系下，PARK变换是将两相旋转坐标系下的电流变换到两相静止坐标系下，反PARK变换是将两相静止坐标系下的电流变换到两相旋转坐标系下。这些变换的目的是实现对电机交、直轴电流的分解和准确控制，从而使得电机的力矩控制效率迅速达到最优。由电流采集模块测量出电机绕组电流 i_a 和 i_c ，结合三相电流之间的关系 $i_a+i_b+i_c=0$ 求出 i_b 。由 i_a 、 i_b 和 i_c 经过CLARK变换可以求出 i_α 和 i_β 。采

集圆光栅机械角度，结合电机极对数可以实时转换成电角度信息，作为PARK变换和反PARK变换的输入。PARK变换的输出 i_d 、 i_q 作为电流反馈量与指令电流 i_{dref} 、 i_{qref} 比较，产生的误差经过PI运算后输出电压值 u_d 与 u_q ，再经反PARK变换输出电压 u_α 与 u_β 。SVPWM模块将 u_α 与 u_β 转换成功放模块中6个功率管的开关控制信号，从而控制电机带动负载旋转。

2.1 CALRK变换

以电机三相绕组所在位置定义为三相静止坐标系 (a, b, c) ，每两相之间相差 120° 。令 α 轴与 a 轴重合， β 轴与 α 轴相差 90° ，组成两相静止坐标系 (α, β) 。两坐标系下电流之间的转换关系可以表示为：

$$\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (4)$$

2.2 PARK变换

假设两相静止坐标系旋转了 θ 角到达两相旋转坐标系，该转换称为PARK变换，两种坐标之间转换的基础是保持磁动势矢量始终不变，则可以推导出两坐标系之间的变换关系为：

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} \quad (5)$$

2.3 反PARK反变换

由两相旋转坐标系到两相静止坐标系之间的转换称为反PARK变换。该变换可由下式表示：

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

2.4 改进SVPWM

本文对永磁同步电机的空间矢量控制是基于三相逆变器，如图2所示。其中 a 和 \bar{a} ， b 和 \bar{b} ， c 和 \bar{c} 分别组成一组桥臂，连接到电机的A、B和C三相上。

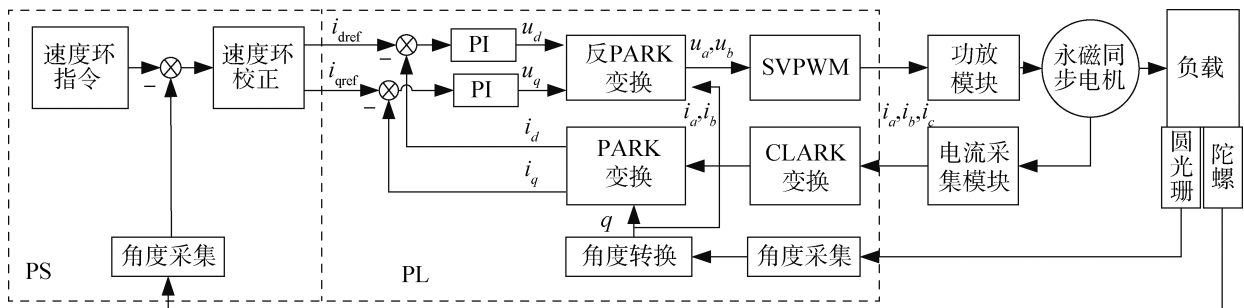


图1 基于ZYNQ平台的磁场定向控制框图

Fig.1 The block diagram of magnetic field orientation control based on ZYNQ platform

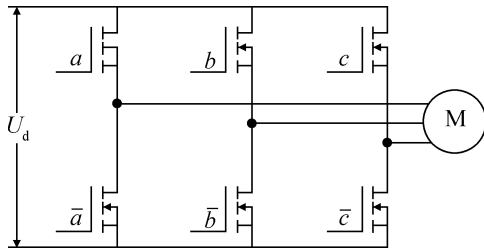


图 2 三相逆变器拓扑结构

Fig.2 Topology of three-phase inverter

通过控制 a 、 \bar{a} 、 b 、 \bar{b} 、 c 和 \bar{c} 的通断, 可以得到八个基本空间电压矢量, 它们将复平面分成 6 个扇区。传统的矢量合成方法如图 3 所示, 即用期望空间电压矢量 U_{out} 所在扇区的两个基本电压矢量 U_4 和 U_6 , 以及零矢量 U_0 进行合成。

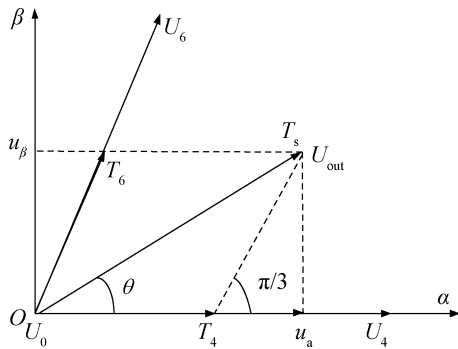


图 3 空间矢量合成示意图

Fig.3 The synthesis schematic diagram of space vector

本文基于平均值等效原理 (在一个开关周期内通过对基本电压矢量加以组合, 使其平均值与给定电压矢量相等), 提出采用六段基本电压矢量合成期望电压矢量的方法, 空间矢量合成公式如下所示:

$$T_s U_{out} = T_1 U_1 + T_2 U_2 + T_3 U_3 + T_4 U_4 + T_5 U_5 + T_6 U_6 \quad (7)$$

$$T_s = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 \quad (8)$$

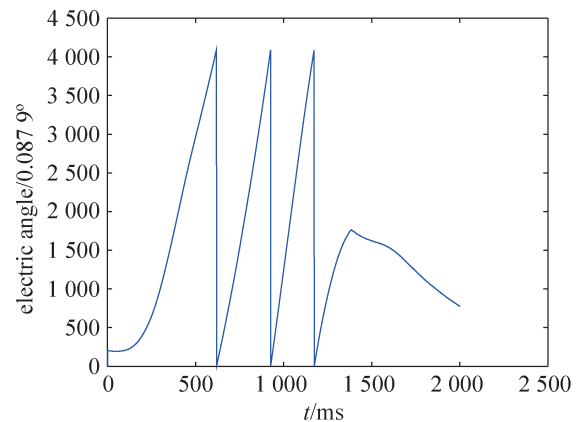
其中, T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 、 T_6 分别为 U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 、 U_5 、 U_6 基本电压矢量的作用时间, 舍弃了零基本电压矢量。与传统矢量合成方法相比, 该合成策略可以保证流过测量电阻的电流是连续变化的, 可以降低电流采集的噪声, 提高电流测量的准确度。

3 实验结果及分析

3.1 电角度测试

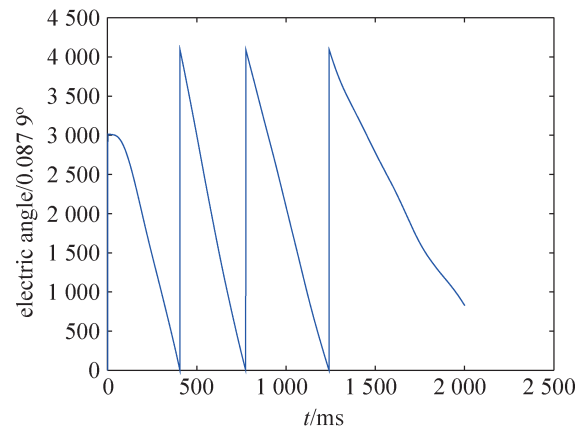
由图 1 可知, 在整个驱动控制过程中需要知道电机转子当前的电角度值。而实际工程中由圆光栅传感器仅能感知电机当前的机械角, 需要结合电机的极对数将机械角度转换成电角度。为了定位电机的初始位置, 本文提出将电机三相线中的蓝线接电源的正极端, 黄线接电源的负极端, 读取当前电机所在位置并将该位置初始化为电角度 -30° 。

为了测试转换方法的正确性, 给系统上电, 关闭电机使能, 手动转动平台使其朝向一个方向转动, 同时在 ZYNQ 平台中每隔 1 ms 存储一次电角度的值。同理, 手动转动平台使其朝向另一个方向转动, 同时每隔 1 ms 存储一次电角度的值。将存储电角度进行作图, 结果如图 4 所示。从图中



(a) 方位轴电角度变化

(a) Electrical angle change of azimuth axis



(b) 俯仰轴电角度变化

(b) Electrical angle change of pitch axis

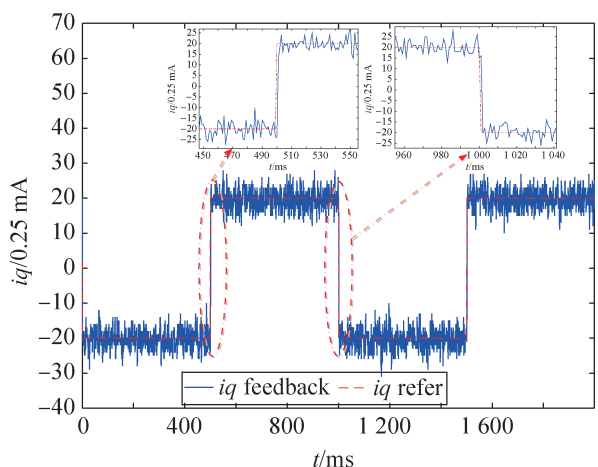
图 4 电角度变化曲线

Fig.4 Change curves of electric angle

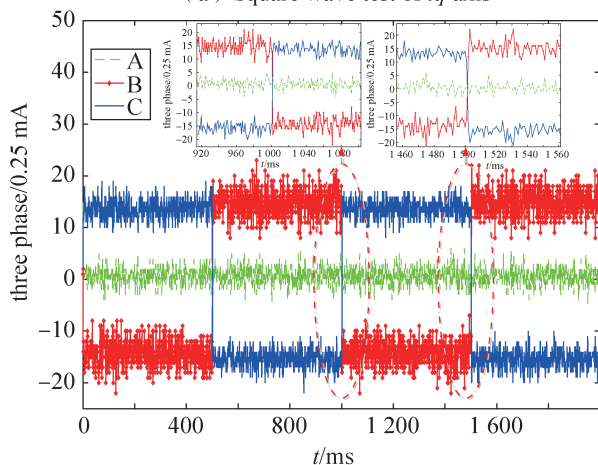
可以看出，无论平台是正向转动还是反向转动，随着机械角度的连续增大或减小，电角度呈现为 $0^\circ\sim 4096^\circ$ 之间的连续锯齿波变化，说明了本文由机械角度转换为电角度方法的有效性。

3.2 方波测试

为测试电流环的方波动态响应性能，在ZYNQ平台直接给定交轴电流输入端频率1 Hz，幅值20的方波信号，采集电机的A、B、C三相电流，并进行CLARK变换和PARK变换后，得到反馈的交轴电流，如图5(a)中蓝线所示，红线为交轴电流输入端的指令信号。对方波的上升沿和下降沿分别进行放大，可以看出阶跃响应调节时间为5 ms左右。采集的电机三相电流如图5(b)所示，其中绿线为A相电流，红线为B相电流，蓝线为C相电流。可以看出，电机三相电流纹波较小，波动范



(a) i_q 轴方波测试
(a) Square wave test of i_q axis



(b) 电机三相电流方波测试
(b) Square wave test of motor's three-phase current

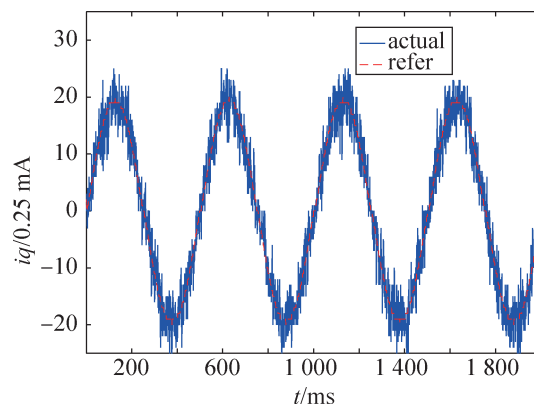
图5 方波信号测试结果
Fig.5 Test results of square wave signals

围约为0.1 mA，工程应用中电流大约在10 A左右，因此该纹波可以忽略不计。

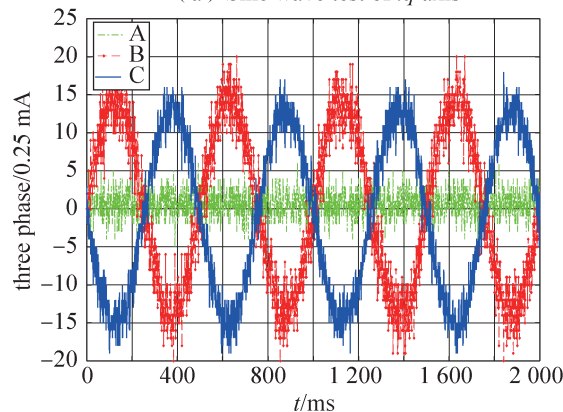
3.3 正弦信号测试

为测试电流环的正弦信号响应性能，给交轴电流输入端周期2 Hz、幅值20的正弦波指令信号，同时采集电机的A、B、C三相电流，并进行CLARK变换和PARK变换后，得到反馈的交轴电流，如图6(a)中蓝线所示，红线为交轴电流输入端的指令信号。采集的电机三相电流如图6(b)所示。由于设置电角度为固定值，所以A相电流为0，B相和C相电流为平滑的正弦信号，且相位相差 120° 。上述实验结果表明，本文所提驱动方法可以实现电机三相电流快速跟随交轴正弦波指令，且响应电流平滑无畸变。

为测试驱动器的闭环带宽，给定交轴电流输入端不同频率的正弦指令信号，同时采集电机三相电流，经过变换后得到反馈的交轴电流信号。



(a) i_q 轴正弦测试
(a) Sine wave test of i_q axis



(b) 电机三相电流正弦测试
(b) Sine wave test of motor's three-phase current

图6 正弦信号测试结果
Fig.6 Test results of sine wave signals

图 7 (a) 为给定交轴正弦信号和反馈的交轴信号对比, 图 7 (b) 为对图 7 (a) 的局部放大图。可以看出, 在给定交轴频率 106 Hz, 幅值 5 000 的正弦波指令输入信号下, 系统反馈的交轴信号可以很好地跟随指令信号, 且幅值几乎无衰减。图 7 (c) 为给定交轴频率 318 Hz, 幅值 5 000 的正弦波指令信号下, 系统反馈的交轴信号情况。图 7 (d) 为图 7 (c) 的局部放大。可以看出, 系统响应曲

线可以跟随指令信号, 曲线幅值在 4 500 左右, 说明系统响应带宽高于 318 Hz。如果按照 -3 dB 的幅值衰减进行估算, 大致可以估算出系统的电流环闭环带宽约为 590 Hz。

综上所述, 从方波和正弦响应曲线上可以看出本文设计的驱动控制系统具有低纹波和高带宽的性能。

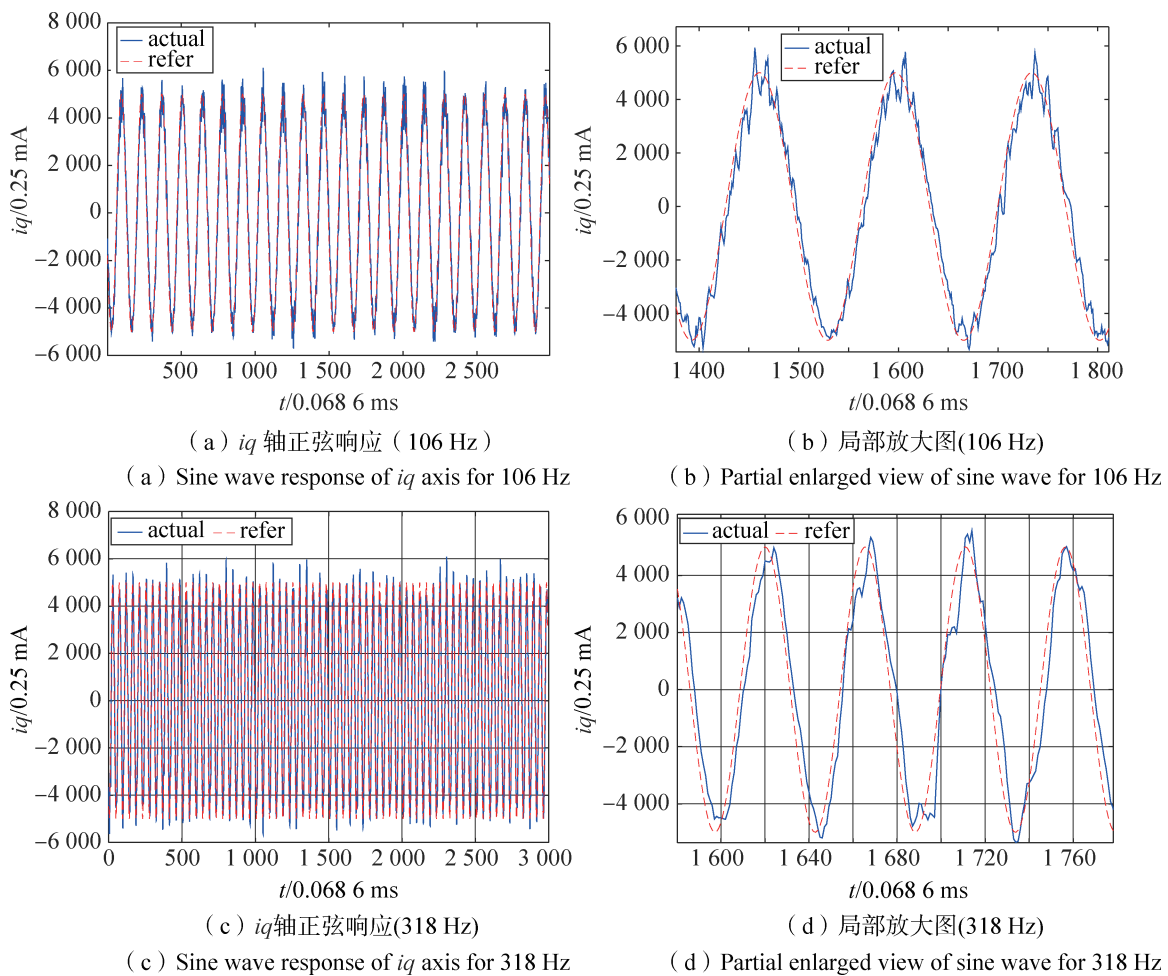


图 7 带宽测试

Fig.7 Test of bandwidth

4 结束语

本文针对传统光电平台驱动控制装置体积大, 不利于小型化和轻型化设计的问题, 提出基于 ZYNQ 平台进行驱动控制一体化设计的方法, 可以充分发挥 ZYNQ 片上系统 ARM 和 FPGA 的优势, 缩减电流环闭环周期, 实现电流环的高带宽设计。针对传统 SVPWM 控制中空间矢量合成方法的缺

点, 设计基于六段式基本电压矢量的空间矢量合成方法, 可以实现流经测试电阻的电流是连续变化的, 从而提高电流反馈的精度, 降低电机纹波, 从而抑制电机力矩波动。在光电平台上的实验结果表明, 本文所提出的基于 ZYNQ 平台和改进 SVPWM 波的驱动控制方案, 可以实现高于 318 Hz 的电流环闭环带宽, 电流纹波较小, 这对于实现小型化高精度的伺服驱动控制具有重要参考价值。

参考文献

- [1] 王文杰, 徐伟, 朴永杰, 等. 卫星间激光通信粗跟踪转台控制系统[J]. 光学精密工程, 2021, 29(12): 2797-2805.
WANG Wenjie, XU Wei, PIAO Yongjie, et al. Control system for coarse tracking turntable of laser communication between satellites[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(12): 2797-2805.
- [2] 李荣, 许晶波, 孙贤备, 等. 机器人关节用双定子永磁同步电机设计[J]. 微特电机, 2021, 49(11): 14-18.
LI Rong, XU Jingbo, SUN Xianbei, et al. Design of double stator permanent magnet synchronous motor for robot joint[J]. Small&Special Electrical Machines, 2021, 49(11): 14-18.
- [3] 方振丰. 基于FPGA的航天扫描天线转台高精度驱动控制系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
FANG Zhenfeng. Research on high-precision drive control system of aerospace scanning antenna turntable based on FPGA[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [4] 刘川, 唐涛, 王娜, 等. 基于DSP-FPGA永磁同步电机MTPA弱磁控制研究[J]. 电力电子技术, 2021, 55(4): 16-19, 25.
LIU Chuan, TANG Tao, WANG Na, et al. Research on MTPA field weakening control of permanent magnet synchronous motor based on DSP-FPGA[J]. Power Electronics, 2021, 55(4): 16-19, 25.
- [5] 崔熠. 基于FPGA+DSP的三片式液晶光阀投影仪驱动控制系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2022.
CUI Yi. Research on drive control system of three-chip liquid crystal light valve projector based on FPGA+DSP [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2022.
- [6] 支萌辉, 尹泉, 吕松垒, 等. 基于ARM+FPGA的数字交流伺服驱动器设计[J]. 电气传动, 2020, 50(9): 35-41.
ZHI Menghui, YIN Quan, LÜ Songlei, et al. Design of digital AC servo driver based on ARM and FPGA[J]. Electric Drive, 2020, 50(9): 35-41.
- [7] 李俊颖. 基于ZYNQ的永磁同步电机伺服驱动系统设计[D]. 广州: 广东工业大学, 2021.
LI Junying. Design of permanent magnet synchronous motor servo system based on ZYNQ[J]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2021.
- [8] 刘宏宇. 永磁同步电机直接转矩控制的MTPA控制系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.
LIU Hongyu. Research on MTPA control system of direct torque control of permanent magnet synchronous motor[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2017.
- [9] 曹萱, 关文卿, 罗蕊. 基于SVPWM算法及ADRC算法的无刷电机转矩脉动抑制控制系统研究[J]. 测控技术, 2021, 40(1): 150-156.
CAO Xuan, GUAN Wenqin, LUO Rui. Brushless motor torque ripple suppression control system based on SVPWM and ADRC algorithm[J]. Measurement & Control Technology, 2021, 40(1): 150-156.
- [10] 许军, 董江波, 方丹, 等. 电压空间矢量脉宽调制SVPWM数字化算法及实现[J]. 微电机, 2021, 54(4): 89-93.
XU Jun, DONG Jiangbo, FANG Dan, et al. Digital algorithm and realization of voltage space vector pulse width modulation SVPWM[J]. Micromotors, 2021, 54(4): 89-93.
- [11] 王晓鹏. 基于Zynq的红外小目标检测系统设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
WANG Xiaopeng. A design and implementation of infrared small target detection system based on Zynq[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.

[作者简介]

崔慧敏 1990年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为高精度光学伺服控制和无人系统。

马纪军 1986年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为伺服控制系统设计。

王宇宁 1975年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为伺服控制系统设计。

(本文编辑: 杨秀丽)