

# 基于 FPGA 的无刷力矩电机伺服控制系统研究

刘兴中<sup>1,2</sup>, 张显亭<sup>1,2</sup>, 魏旭来<sup>1,2</sup>

(1. 贵州航天林泉电机有限公司, 贵州 贵阳 550008;

2. 国家精密微特电机工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550008)

**摘要:** 设计了基于 FPGA 平台无刷力矩电机的导弹用电动舵机控制系统方案。试验和应用证明该系统具有体积小、无需减速机构、响应速度快、输出转矩大、控制精度高等特点, 适合制导炸弹用舵系统控制。

**关键词:** 现场可编程门阵列; 制导; 无刷力矩电机

中图分类号: TM 301.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)06-0051-06

## Study of Brushless Torque Servo Motor Control System Based on FPGA

LIU Xingzhong<sup>1,2</sup>, ZHANG Xianting<sup>1,2</sup>, WEI Xulai<sup>1,2</sup>

(1. Guizhou Aerospace Linquan Motor Co., Ltd., Guiyang 550008, China;

2. National Precision Micro Motor Engineering Research Center, Guiyang 550008, China)

**Abstract:** Designed the electric steering gear control system of brushless torque motor based FPGA platform, the test and application showed that the system was small, no reduction mechanism, fast response, the bigger output torque and high accuracy control. It was fitted for guided bomb in the rudder control system.

**Key words:** field programmable gate array (FPGA); guided bombs; brushless torque motor

## 0 引言

随着电机技术、集成功率驱动技术、计算机控制技术等技术迅速发展, 基于无刷力矩电机的伺服控制技术得到了应用。力矩电机是一种具有软机械特性和宽调速范围的特种电机。这种电机的轴不是以恒功率输出动力而是以恒力矩输出动力。当负载增加时, 电动机的转速能自动的随之降低, 而输出力矩增加, 保持与负载平衡。力矩电机的堵转转矩高, 堵转电流小, 能承受一定时间的堵转运行。

力矩电机的机械特性可以在现代伺服驱动装置的控制下实现较高的刚度, 因此可以代替原来机械传动装置实现直接驱动 (Direct Drive, DD)。目前已经有采用力矩电机为核心动力元件的数控回转工作台和数控摆角铣头等产品。这些产品由于没有传动间隙, 没有磨损, 具有传动精度和效率高优势, 已经开始在精密装备上推广使用。

导弹用电动舵机<sup>[1]</sup>是实现导弹智能化的一个关键指标。目前电动舵机的性能越来越完善, 并

朝着数字化、多余度、大功率、高精度和智能化的方向发展。电动舵机的控制策略<sup>[2]</sup>也多种多样, 根据不同应用场合的要求运用了不同的算法和设计平台, 如基于 DSP、FPGA 或单片机等。本文设计了一套全数字导弹用舵机伺服系统。该系统以无刷力矩电机作为伺服电机, 采用三闭环的控制策略, 基于 FPGA 的 NIOS II 软核为开发平台, 利用 C 语言的优良特性, 在 NIOS II 内实现基于 C 语言的算法设计, 实现了舵机位置伺服的高性能跟踪, 以满足导弹舵机的高精度、高灵敏度和高可靠性要求。

## 1 系统构成及工作原理

位置伺服控制器是一个闭环的控制系统。其执行元件是无刷力矩电机。由于力矩电机具有低转速、大扭矩、过载能力强、响应快、线性度好、力矩波动小等特点, 可直接驱动负载省去减速传动齿轮, 从而提高了系统的工作效率和响应速度。

系统结构如图 1 所示。

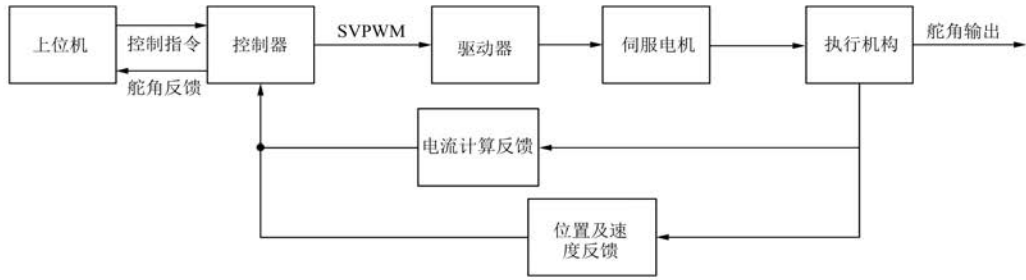


图1 系统结构框图

## 2 硬件设计

系统硬件电路设计主要包括以下几个部分：FPGA 主控芯片及外围电路设计，A/D 转换及调理电路设计，驱动及电流采样电路设计，旋变解算电路设计等。

### 2.1 FPGA 主控及外围电路设计

本系统采用的是 Altera 公司的 Cyclone III 系列低成本器件中的新产品 EP3C25E144I7N。该芯片为 144 管脚，拥有更多的 I/O 端口，EP3C25E144I7N 容量 24624LE、Memory 容量

608 256 bit,集成嵌入式处理器 NOIS II ,I/O 口 83 个,I/O 口电平兼容 1.2 V、1.8 V、2.5 V、3.0 V、3.3 V,满足设计要求。更多的通用 I/O 接口,可同时控制多个电机,且 FPGA 内部采用并行运行,保证了控制系统的高速运算能力。

FPGA 外围电路主要包括:电源管理电路、程序配置芯片电路、下载调试口电路等。本项目采用的配置芯片是 EPCS16SI16N,电源管理芯片是 TI 公司的 TPS78601、TPS78625 和 TPS78633。这三路电源分别产生 1.2 V、2.5 V 和 3.3 V,提供给 FPGA 工作所需,电源管理部分电路如图 2 所示。

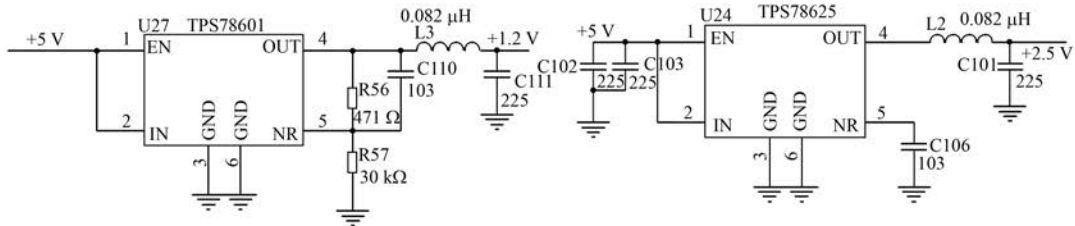


图2 电源管理电路

### 2.2 驱动及电流采样电路设计

由于该型号导弹用舵机功率不大、电压较小,功率逆变电路采用通用的三相桥式主电路结构,可以由 IGBT 模块、智能功率模块 (IPM)、MOSFET 等构成。这里综合考虑,本系统采用功率 MOSFET 驱动方案。

驱动单元采取隔离驱动的方式,驱动芯片均

采用 IR 公司的 IR2110 集成模块驱动。该驱动电路使用简单、可靠,如图 3 所示。

电流采样电路分为调理电路和 A/D 采样电路两部分。通过电流传感器采集电机两相绕组的电流进行矢量运算和过流检测,对采样及调理电路进行了设计,具体电路如图 4 所示。

电流传感器采样完成后,其输出的模拟信号

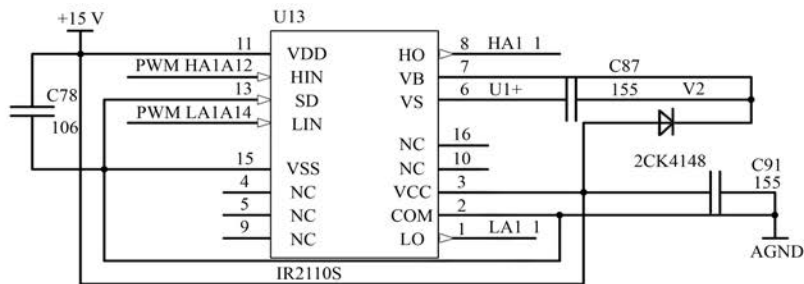


图3 单路驱动电路

经过一阶有源滤波后送入 74HCT4066 采样保持器, FPGA 发出信号会使模拟信号被保持在该芯片的输出端口;该信号再次经过运放缓冲后送入

74HCT4052。该芯片是一个模拟通道多路开关, 可同时对多个通道进行使能, 由 FPGA 控制信号进行通道选择。

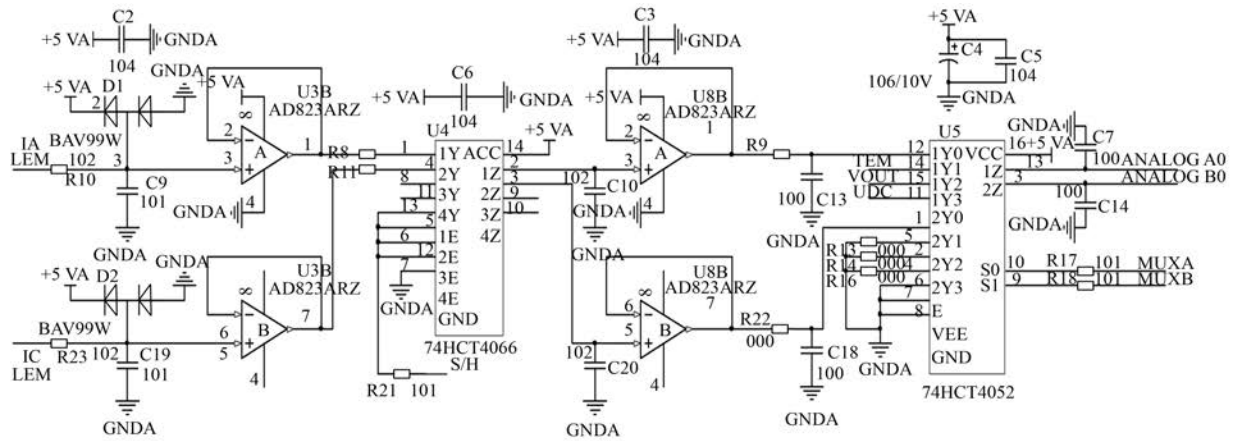


图 4 采样及调理电路

### 2.3 A/D 转换及调理电路设计

信号调理单元主要是通过放大器进行电压、阻抗匹配, 以满足数字芯片 FPGA 的 I/O 口的设计, 主要包括两相电流 (A、B)、母线电压、位置反馈等。调理电路的设计思路皆一致。图 5 是一路调理电路的设计, 输入、输出皆采用仪表用运放 F147, 电路设计中增加了钳位电路, 已调理输出的电压幅值以保护 FPGA 的 I/O 口, 同时调理电路通过电阻分压、放大, 以使输出的电压满足 FPGA 数字芯片的要求, 因为 FPGA 数字 I/O 口电压值超过 3.3 V 后, 解算变化非线性, 从而导致控制出错。图 5 为 A/D 转换调理电路单元, 以某一路为

例进行仿真, 具有一定噪声抑制效果。

### 2.4 旋变解算及处理电路设计

位置解算单元主要是将旋变的正弦、余弦解算成表征电机磁极位置电气角度的数字量数据, 目的是获取电机的换向控制信息。该单元以解算芯片 AD2S1210 为核心设计。

AD2S1210 是一款最高可配置成 16 位分辨率的旋变数字转换器, 集成片上可编程的正弦波振荡器 (其信号作为励磁基信号提供给励磁信号放大单元), 为旋转提供正弦波激励; 转换器的正弦、余弦输入端允许输入 3.15 VP-P±0.85、频率为 10 Hz ~ 1 MHz 范围内的信号, 最大跟踪速率

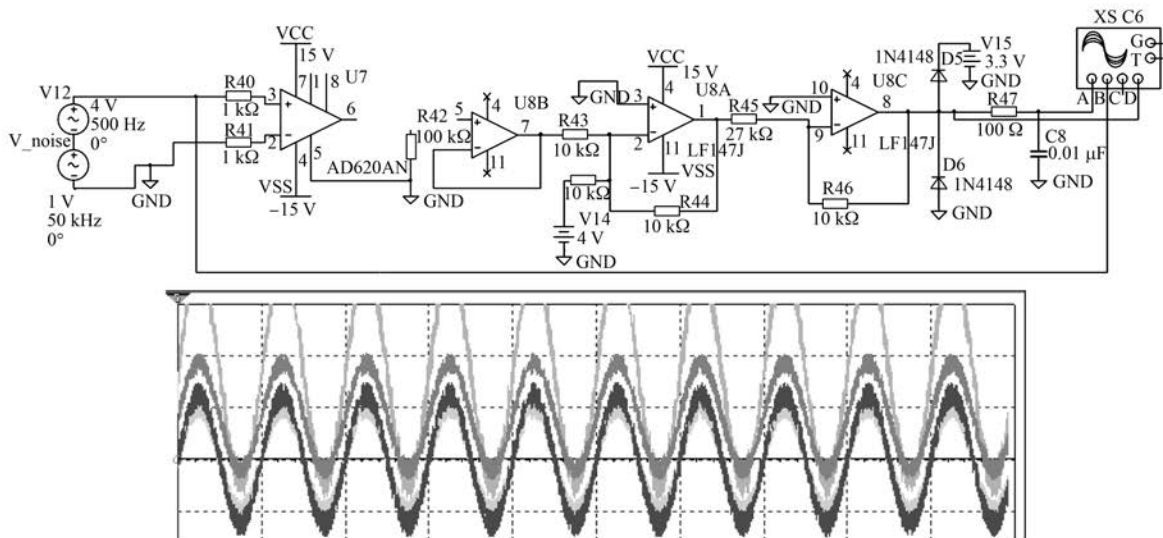


图 5 A/D 转换调理单元电路

3 125;该芯片具备系统故障检测功能,故障检测电路可以检测旋变的信号丢失、超范围输入信号、输入信号失配或位置跟踪丢失,故障检测阈值可以由用户单独编程,以便针对特定应用进行优化;数据传输通过 16 位端口并行传输,电平与 FPGA 和 SPI 接口标准兼容;具有静电保护功能。

解算单元的硬件设计遵循 AD2S1210 的使用手册。为了降低因幅值波动造成的误码,在正弦、余弦输入进行阻抗匹配处理和限幅设计。

此外,为了提升信号抗干扰的能力,在信号输入前端进行了有源滤波。

对于不同的旋变,励磁信号和变比不一样,所有反馈回来的旋变位置信号幅值也大不相同。为了满足 ADS1210 输入端的要求,提高旋变信号的信噪比。采用合适的旋变处理电路能有效满足要求。本方案主要采用差分输入的形式,首先将信号用电阻衰减后差分放大,而后二阶低通滤波处理,最后再差分放大两倍信号。整个电路的放大倍数约为 0.5。仿真及结果如图 6 所示。

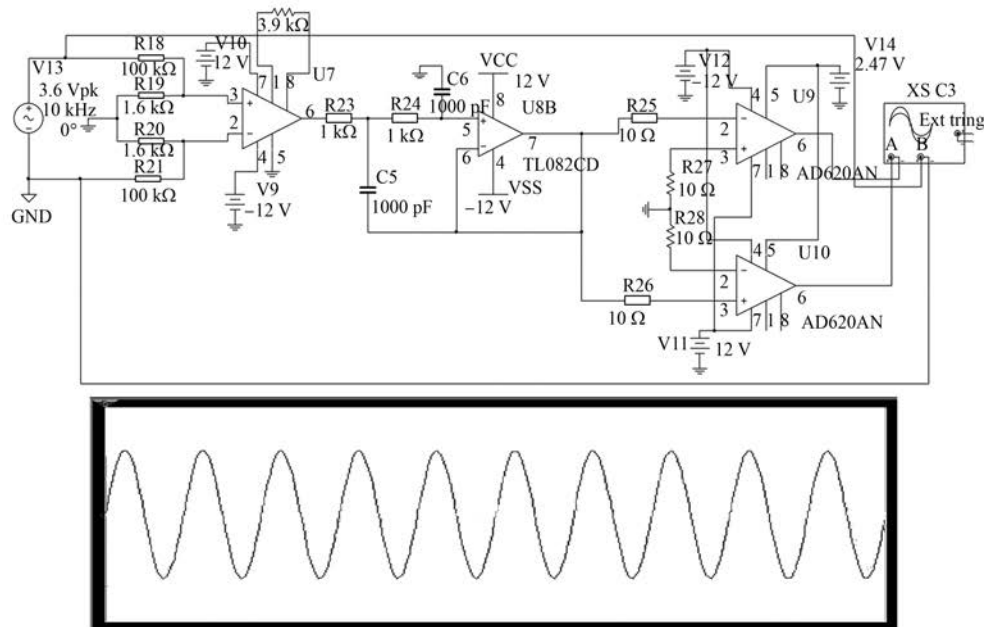


图 6 旋变处理电路及仿真

### 3 软件算法设计

伺服系统的软件是整个舵系统的核心,它的主要功能是实现舵系统接收上位机的指令后控制舵机输出相应的位移量,并实时的将舵机的当前位移值和状态参数反馈给上位机,所以优良的程序结构和良好的算法将是系统可靠运行的根本保证。FPGA 的应用非常灵活,有多种方式。本系统控制器的软件设计采用 VeriLog 语言编写,算法中通信及数据分析嵌入进 NIOS II 软核内部完成,用 C 语言实现,外部使用硬件语言 VeriLog 实现其余功能模块编程。图 7 是主程序算法流程。

#### 3.1 系统软件设计组成

上电开始后,系统进行初始化,从 EEPROM 中

读取存储的配置参数,包括电流环、速度环的 PI 参数及位置环 P 参数、电角度定标参数、位置定标参数、速度定标参数、电流定标参数等。系统初始化完成后,依据系统的时序基准,电流环、速度环及位置环各个模块开始按照基准执行。位置给定和位置反馈模块构成位置环,其输出作为速度给定和测速模块构成速度闭环;速度环的输出和采样电流构成电流闭环,软件系统结构框图如图 8 所示。

程序设计中,串行执行和并行执行同时依据系统时序进行,系统时序是整个软件的基准和脉络,对于软件整体的稳定性、可靠性和高效性有着至关重要的作用。

#### 3.2 电流环设计

无刷力矩电机在  $dq$  坐标系下的传递函数为

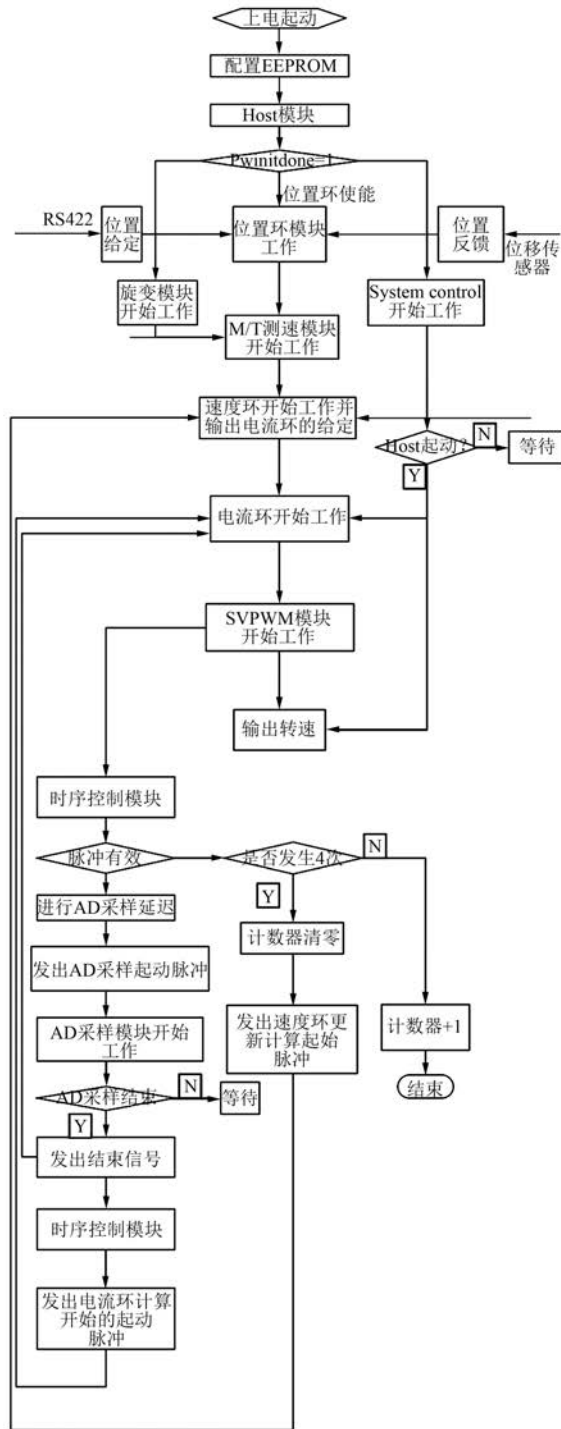


图7 系统软件算法流程图

一阶惯性环节<sup>[3]</sup>，为了改善电流（转矩）响应的动态性能，需要引入PI调节器将其校正为典型I型系统<sup>[4]</sup>。考虑到硬件电路的电流采样频率相当高，完全可以采用连续域的设计方法。另外，数字控制系统的PI调节器是由数字电路实现的，因此需要进行双线性变换及有关物理量纲的转化。

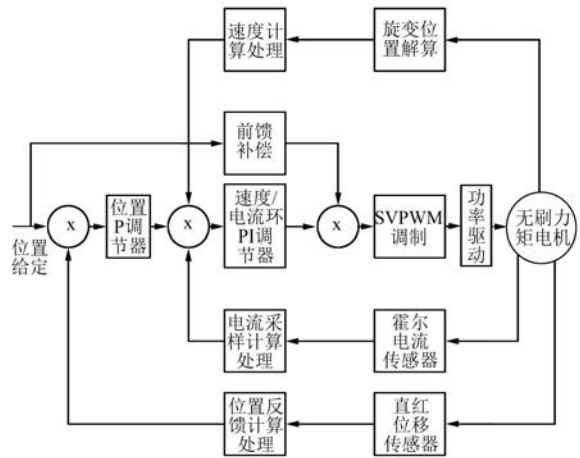


图8 软件系统结构框图

根据电流环所要求的带宽估算数字PI调节器的两个参数的大致范围，以便确定逻辑电路的寄存器数据格式。为了使电流快速跟随指令变化，应该使带宽 $\omega_i$ 尽量大，但带宽过大易降低抗噪声能力，一般选择 $\omega_{si} > 10 \omega_i$ ，其中 $\omega_{si}$ 为电流环采样角频率。在实际应用中，根据现场试验情况对参数进行了整定，以获得最佳的性能。

电流环传递函数框图如图9所示。

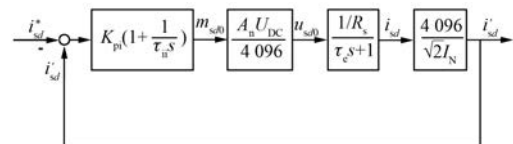


图9 电流环传递函数框图

### 3.3 速度环设计

电机的运动方程<sup>[5]</sup>为

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (1)$$

式中： $\omega_m$ ——机械角速度，且 $\omega_e = p\omega_m$ 。

如果将负载转矩看作扰动项，则其传递函数为一个积分环节。速度环的给定和反馈均为数字化的转速，且用16位补码数表示，相应的换算关系如下：

$$n_d = \frac{2^{15}}{n_m} n \quad (2)$$

式中： $n$ ——转子实际转速，r/min；

$n_d$ ——数字化的转速，且最高转速 $n_m$ 对应数字 $\pm 2^{15}$ 。

由式(1)求解得到的机械角速度 $\omega_m$ 的单位

为 rad/s, 将其转化为以 r/min 为单位的转速:

$$n = \frac{60}{2\pi} \omega_m \quad (3)$$

因此, 可以得到图 10 所示的速度环传递函数模型, 其中的  $K_{pv}$  和  $\tau_{iv}$  分别为数字 PI 调节器的比例系数和积分时间常数。

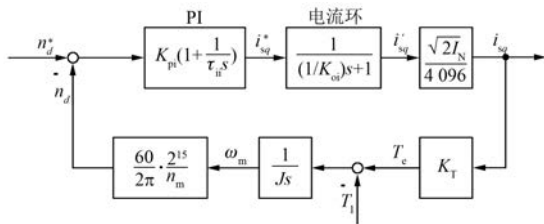


图 10 速度环传递函数框图

### 3.4 位置环设计

本次控制算法中的位置环采用 P 调节器设计, 输入输出数据预先进行了符号位剔除处理, 以实现在 FPGA 硬件中无符号数的有符号处理方法。位置信号反馈由系统输出终端位置采集元件精密直线位移传感器输出, 反馈位置信号通过一级低通滤波和射随运放处理后, 经 A/D 转换器转变成数字信号送入 FPGA, 参与位置环计算。位置给定信号是通过上位机由 RS-422 串口接收而来, 通过数据格式转换后送入位置环。

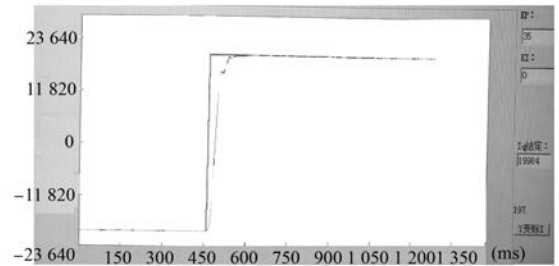
为了提高位置跟随性能, 位置环采用 P 调节方式, 响应灵敏。位置环的输出即为速度环的输入, 作为后续速度电流环 PI 调节器的给定。

## 4 试验情况

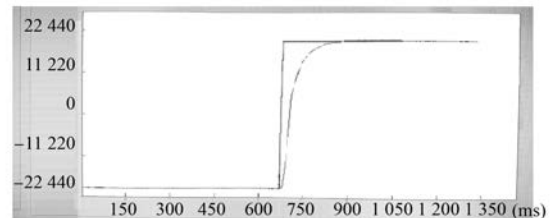
对舵机系统进行了测试。位置输入通过上位机给定, 位置反馈通过旋转变压器测量电机轴端绝对位置角度。从测试效果和测试曲线来看, 位置输出精度为  $0.35^\circ$ , 满足指标  $0.5^\circ$  要求, 如表 1 所示。从图 11 位置伺服测试曲线可以看到位置伺服响应速度  $\geq 3000^\circ/s$ , 满足指标中  $\geq 1500^\circ/s$  的要求, 位置伺服响应速度、精度等技术指标均高于目前同类产品技术指标; 可以实现任意角度绝对位置直驱正反转测试。

表 1 位置伺服指标完成情况

项目	指标要求	实际完成情况
轴位置输出精度/ $(^\circ)$	0.5	0.35
轴伺服响应速度/ $(^\circ \cdot s)$	$\geq 1500$	$\geq 3000$



(a) 空载时轴位置伺服测试曲线图



(b) 加载时轴位置伺服测试曲线图

图 11 空载、加载时轴位置伺服测试曲线图

算法中, 电机旋转一圈, 解码芯片输出 16 384 个数, 图 11 中左侧数字量即为数字化的电角度。从图 11 中可以看到, 空载时当发送数字量从  $-20000$  到  $20000$  时, 对应电机角度为  $40000 \times 360/16384 = 878.9^\circ$ , 所用时间约  $160\text{ ms}$ , 所以轴伺服响应速度为  $878.9/0.19 = 4625^\circ/s$ ; 负载时当从  $-20000$  运行到  $20000$  时, 根据图中曲线计算可得轴伺服响应速度约为  $878.9/0.28 = 3138^\circ/s$ 。

## 5 结 语

从以上测试曲线图及分析结果可得, 实现了基于 FPGA 平台无刷力矩电机伺服控制系统设计, 系统达到了预期的技术指标, 实现了力矩电机直驱控制技术。系统具有灵敏度高、动态响应速度快、稳态精度高等特点。

### 【参考文献】

- [1] 汪军林, 解付强, 刘玉浩. 导弹电动舵机的研究现状及发展趋势[J]. 飞航导弹, 2008(3): 42-46.
- [2] 王生明. 制导炮弹舵机控制器设计与分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
- [3] 周兆勇. 面向军事用途的片上型伺服系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [4] 金立峰, 邓歌明. 航空深弹在现代反潜战中的作用与发展[J]. 国防科技, 2009, 30(4): 22-25.
- [5] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

收稿日期: 2016-11-25