

基于 FPGA 的空间光学遥感器的步进电机控制^{*}

张博威¹ 曹小涛¹ 徐文生² 何云丰¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033; 2. 中国卫星导航定位应用管理中心 北京 100088)

摘要: 遥感技术是空间观测的技术, 航天光学遥感器在国家安全保障、气象预报、灾害监测等方面正发挥着巨大的作用。在轨飞行过程中, 为了更高质量地完成工作任务, 不可避免地要对活动部件进行调节。步进电机具有较高的开环控制精度, 控制简单, 输出力矩稳定。为了满足精度较高和稳定的力矩, 实验提出四相八拍的控制方案, 采用 FPGA 作为步进电机的控制器, 设计斩波调整的方案调整电压和硬件电流闭环的方案调整电流, 设计驱动板的硬件电路, 最后通过软件实现参数测量。系统提高了步进电机控制的精度, 改善了力矩的稳定性, 为遥感器的活动部件控制提出了新的方案。

关键词: 空间光学遥感器; FPGA; 四相八拍

中图分类号: TN79 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.801

Stepper motor control of space optical remote sensor based on FPGA

Zhang Bowei Cao Xiaotao Xu Wensheng He Yunfeng

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

2. China National Administration of GNSS and Applications, Beijing 100088, China)

Abstract: Remote sensing technology is a space observation technology, aerospace optical remote sensor is playing a huge role in the national security, weather forecasting, disaster monitoring and so on. In-flight flight, in order to complete the task with higher quality, we inevitably will adjust the moving parts. Stepper motor has a high open-loop control accuracy, simple control, stable output torque. In order to meet the accuracy of high precision and stability of the torque, the experiment proposed four-phase eight-step control scheme, using FPGA as a stepper motor controller. Design chopping adjustment program to adjust the voltage and hardware current closed-loop scheme to adjust the current, board hardware circuit, and finally through the software to achieve parameter measurement. The system improves the precision of the stepping motor control and improves the stability of the torque, and puts forward a new scheme for the control of moving parts of the remote sensor.

Keywords: space camera; FPGA; four-phase and eight-step

1 引言

随着科技的发展, 航天事业的腾飞, 对于数字控制技术的要求变得越来越高。在航天遥感器在轨飞行过程中, 在高空复杂环境下, 会遇到飞行姿态、轨道变化等情况, 为了能够降低或消除这些情况造成的像移, 最佳焦面变化等影响, 必须要对一些活动部件进行调节, 电机作为最主要的活动部件驱动元件, 如音圈电机、伺服电机、步进电机在航天遥感器领域得到了广泛的应用。

步进电机是将电脉冲信号^[1-5]变成机械角位移的驱动

装置。相比于其他电机, 它不易受损, 在不超载的情况下可以按照设定的速度运行, 没有累计误差, 步距角又不受周围的环境影响。

为了能够较为精准稳定地调整步进电机, 设计四相八拍的控制方法, 通过 FPGA 把一定功率的时序脉冲按照设定的逻辑赋给各个控制绕组并控制时序脉冲的频率的方法控制电机, 把电机的控制精度提高一倍; 同时通过调整时序脉冲内的占空比控制步进电机的电流, 达到控制电机转矩的目的^[6-8]。基于以上目标, 使用 AD 软件设计电机驱动电路^[9-11], 再通过 EDA 软件由硬件描述语言 VHDL

收稿日期: 2016-11

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(41175028)项目资助

编写代码,搭建系统实现了精度的要求和力矩的控制。

2 步进电机的控制方案

2.1 实验方案

实验方案如图1所示。

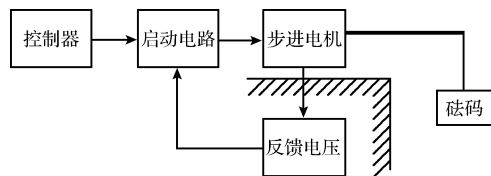


图1 步进电机运动控制系统

实验中选择 Spartan 6 作为控制器产生步进电机驱动时序,采集编码器返回的位置信息,对整个系统进行控制。

为了适应航天探测环境的特殊要求,实验中选取了德国 Phyttron 公司的宇航级两相混合式步进电机,通常电机的接线方式有双极串联、双极并联、单极串联和单极并联。

在同样的驱动电压下,双极并联方式相电阻小,相电流平均值大,可以保持较大的有效转矩,提升驱动性能,为此选用双极并联接线方式,如图2所示。

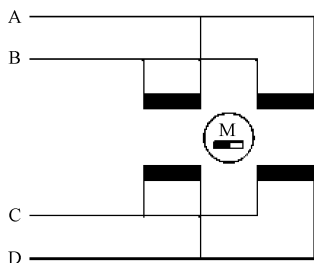


图2 双极并联连接方式

步进电机的步进方式分为全步、半步和细分3种方式,半步方式使得步距角减小一半(0.9°),能够满足调整需要且无需复杂的细分软件算法设计,为此选用半步方式。半步方式步进电机以八拍方式工作,电机绕组电流方向及通电顺序如表1所示。

表1 电机八拍工作模式

STEP		电机相电流方向				电机接线端电压			
正转	反转	A	B	C	D	A	B	C	D
1	8	→			无	+	-	-	-
2	7	→		→		+	-	+	-
3	6	无	→			-	-	+	-
4	5	←	→			-	+	+	-
5	4	←		无		-	+	-	-
6	3	←	←			-	+	-	+
7	2	无	←			-	-	-	+
8	1	→	←			+	-	-	+

2.2 斩波控制

由于实验中的电机电阻值较小,这里采用恒流斩波的控制方式,通过一定的占空比对电路进行驱动控制,以其中的AB两相为例,如图3所示。

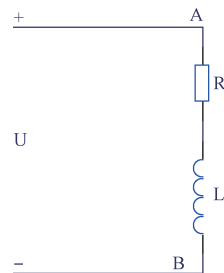


图3 步进电机AB相电路

$$U = iR + L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

以式(1)来确定到达额定电流所需时间 t_0 。驱动波形及电流如图4所示。

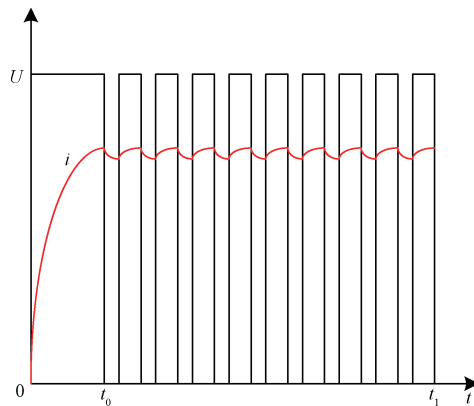


图4 斩波升压后的电流示意

示例中,如采用+15 V电压驱动试验用电机,在 t_0 时间内电压上升,随后以一定的占空比对电机进行驱动。

2.3 硬件闭环

在电机转动过程中为了合理地控制电机的转矩大小,设计了控制电流的闭环控制电路,如图5所示。实验中对步进电机绕组电流进行实时采集,与程序设定的恒定电流信号进行比较(设定合理的阈值),当控制电流值大于硬件电路设定的电流大小时,对驱动电路进行关断处理。

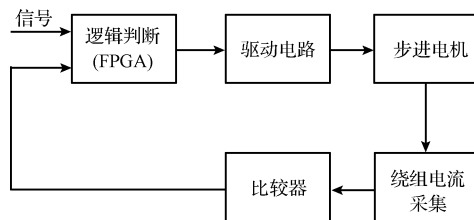


图5 硬件闭环控制示意

3 硬件电路设计

3.1 驱动电路 MSK4201

MSK4201 由 DCDC 提供的 12 V 电压供电。输出端的 A 信号和 B 信号互为反向信号, 8 脚为采样电压, 通过后续的硬件比较器调节电机内部电流, 如图 6 所示。

3.2 硬件比较器

反馈的采样电压通过放大器合理的放大之后, 与预设的电压只进行比对, 通过比较器的打开与关断控制电压输出的大小, 如图 7 所示。

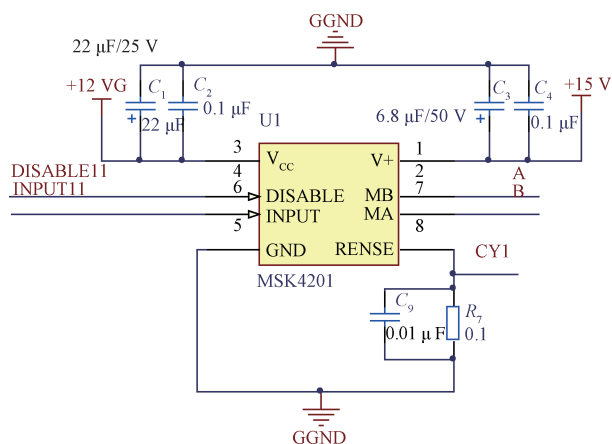


图6 电机驱动器及外围电路

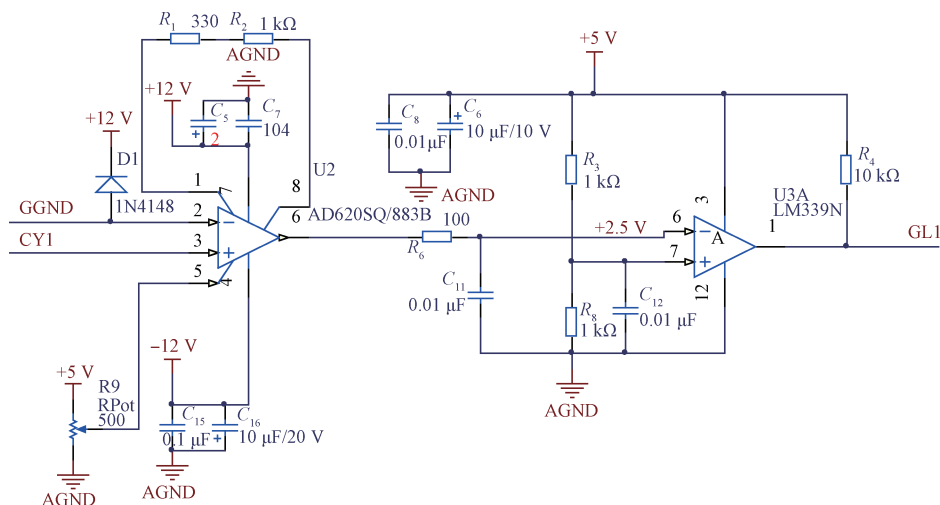


图7 硬件比较器的设计

4 软件控制设计

4.1 实现原理

基于FPGA的四相八拍步进电机的控制模块是在ISE的软件里采用VHDL语言编程实现的。控制器主要实现的功能是上电复位后以恒定的电流驱动MSK4201驱动器对电机控制, 通过读回经放大器后采样电压与预设电压比对后输出的信号对该状态内电流的大小进行控制。

4.2 斩波频率产生模块

实验中的外接晶振为40 MHz, 为了控制AB两相和CD两相之间的电流, 通过对时钟信号的分频, 对电流的大小进行控制。将斩波周期频率设为2 000分频, 则斩波频率为20 kHz。而调整周期内斩波的占空比可以调整两项之间的电压大小。

斩波频率实现模块的部分源代码(VHDL)如下:

```
process (clk)——斩波电流控制
```

```
variable rate: integer range 0 to 2000 := 0; begin
  if (clk'event and clk = '1') then
    case rate is
```

```
when 149 =>
  clk_465 <= '0';
  clk_535 <= '1';
  rate := rate + 1;
when 1999 =>
  clk_465 <= '1';
  clk_535 <= '0';
  rate := 0;
when others =>
  rate := rate + 1;
end case;
end if;
end process
```

4.3 四相八拍电机运动脉冲产生模块

实验中的四相八拍电机与传统的电机控制有所区别, 有着特定的通电顺序, 分别对应绕组的AB相之间和CD相之间, 在正转的条件下, 其通电顺序为: A流向B, A流向B和C流向D, C流向D, B流向A和C流向D, B流向A, B流向A和D流向C, D流向C, A流向B和D流向

C. 若反转则顺序相反。四相八拍电机两相之间的电流流向由斩波升压模块控制,通过控制 AB 两相之间的占空比(如占空比大于 50%时,A 流向 B)。

四相八拍电机转动的实现由内部的有限状态机完成,图中 0 为步进电机的初始状态,电流的流向是 A 流向 B,1~7 状态分别代表对应的电流方向,当正向运动时下一个状态为 1,在电机连续驱动时,状态机持续输出 2、3、4、5、6、7、0,当反向运动时,状态机持续输出 7、6、5、4、3、2、1。

电机运转的部分源代码:

process (CLK,state_ctl)——电机相序

begin

if (CLK'event and CLK = '1') then

case state_ctl is

when 0 =>

inp1 <= clk_465 ;

inp2 <= clk_half ;

when 1 =>

inp1 <= clk_465 ;

inp2 <= clk_465 ;

when 2 =>

inp1 <= clk_half ;

inp2 <= clk_465 ;

when 3 =>

inp1 <= clk_535 ;

inp2 <= clk_465 ;

when 4 =>

inp1 <= clk_535 ;

inp2 <= clk_half ;

when 5 =>

inp1 <= clk_535 ;

inp2 <= clk_535 ;

when 6 =>

inp1 <= clk_half ;

inp2 <= clk_535 ;

when 7 =>

inp1 <= clk_465 ;

inp2 <= clk_535 ;

end case;

end if;

end process;

状态及顺序如图 8 所示;步进电机脉冲产生模块的仿真输出波形如图 9 所示;本文电机实验环境及装置如图 10 所示;对于不同的电流下,分析电机的矩频特性如图 11 所示,试验数据如表 2 所示。

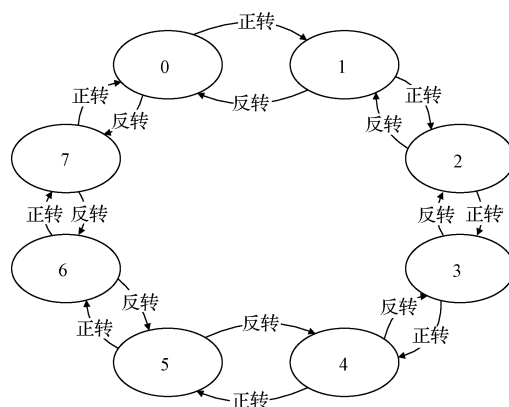


图 8 四相八拍步进电机脉冲产生模块的状态转换

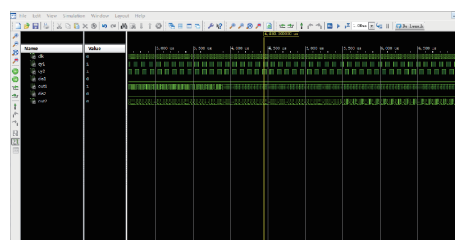


图 9 步进电机脉冲产生模块的输出仿真波形

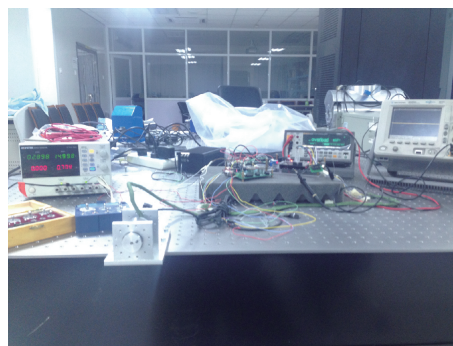


图 10 电机实验环境

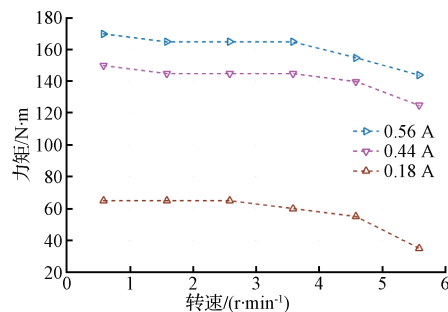


图 11 矩频特性分析

表2 矩频特性试验

电流/A	运动频率/Hz	最大力矩/Nm
0.18	320	35
0.18	160	55
0.18	80	60
0.18	40	65
0.18	20	65
0.18	10	65
0.44	320	125
0.44	160	140
0.44	80	145
0.44	40	145
0.44	20	145
0.44	10	150
0.56	320	140
0.56	160	155
0.56	80	165
0.56	40	165
0.56	20	165
0.56	10	170

由表2及图11所示的关系可以看出电机电力矩受转速的影响并不大,而电流的影响占主导作用。通过电流闭环的控制方案既避免电机内电流过大而造成损坏的影响,又能控制电机的力矩大小。

5 结论

本文主要设计基于FPGA的四相八拍电机控制系统,通过采用电流闭环控制方案、斩波升压产生电流、设计硬件闭环控制并编写软件,实验最后电机控制精度提高一倍且力矩可控。采用四相八拍的控制方案,可以让步进电机以半步方式行进,使电机控制精度提高一倍;电流闭环

和斩波升压可以很好地控制电机内部电流平稳运行,稳定了电机的力矩;同时由于采用FPGA控制的策略,提高了系统的运行效率,可调速的范围较大、灵活、精度高。

参考文献

- [1] 彭宇. 基于DSP和FPGA的通用数字信号处理系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(1): 17-21.
- [2] 赵凯辉, 陈特放. 永磁同步牵引电机无速度传感器转矩精确控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(1): 38-47.
- [3] 孔德杰. 高精度中频双极性PWM信号发生器的FPGA实现[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(11): 32-34.
- [4] 陈燕, 刘守山. 基于CPLD的光电编码器四倍频电路[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(11): 45-48.
- [5] 徐伟. 基于CPLD的高精度程控移相器[J]. 电子测量技术, 2014, 37(12): 5-9.
- [6] 俞小露. 航天光学遥感器步进电机控制与实现[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012.
- [7] 姚雪峰, 孙慈. 高精度角位移平台的研制[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(5): 961-967.
- [8] 郭丹蕊. 基于DSP的无刷电机控制系统研究[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(2): 98-101.
- [9] 朱剑波. 无刷直流电机控制系统的仿真与分析[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(12): 25-30.
- [10] 朱俊杰, 栗梅. 无刷直流电机反电势过零检测新方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 441-447.
- [11] 荀倩, 吴勇, 王培良, 等. 霍尔位置传感器无刷直流电机起动控制策略[J]. 中国测试, 2016, 42(8): 118-122.

作者简介

张博威, 1988年出生, 工学硕士, 研究实习员, 主要研究方向为空间光学遥感器电子学系统设计。
E-mail: avkatdongda@163.com