

# 基于 dsPIC33F 的高可靠步进电机细分驱动系统

刘玉章 李贤涛

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

**摘要:**本文基于 dsPIC33F 高性能单片机,以 42HS03 步进电机作为驱动对象,设计了一种高可靠细分驱动系统。系统通过上位机对步进电机运行速度和位置进行设置。底层硬件通过定时计算出当前电机运行所需的电流值,查表输出调制脉宽宽度。相对于目前工业场所使用的成熟步进电机驱动系统,本文设计的系统体积小巧,结构简单。同时控制界面简洁,便于人员操作。本文详细介绍了细分系统硬件电路设计过程和程序流程,最后通过实验验证理论分析的步进电机细分驱动方法,实验结果与理论分析相符,系统运行稳定。

**关键词:**PWM; 步进电机; 细分驱动

**中图分类号:** TM383.6 TN431.2 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:** 510.80

## Stable and reliable stepping motor subdivision system based on dsPIC33F MCU

Liu Yuzhang Li Xiantao

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** Taking 42HS03 stepping motor as the control and drive object, a highly reliable stepper motor subdivision driver system is designed based on dsPIC33F MCU. The system could set the stepper motor's speed and position with the upper computer software. Lower machine calculate the current value of the motor and pulse width modulation (PWM) with looking up to the table. With respect to the existing mature stepper motor driver, this drive system is smaller and has a simpler structure, and the interface is simple, easy to operate. This paper introduces the system hardware circuit design and program flow. Results show that the experimental is consistent with theoretical analysis, and the system is stable.

**Keywords:** PWM; stepping motor; subdivision drive

### 1 引言

步进电机作为一种常用的执行器件,具有价格低廉、控制简单的特点。同时在控制过程中,步进电机由于不需要位置传感器作为反馈元件,大大降低了控制系统的设计难度。因此被广泛应用在各种自动控制场合<sup>[1]</sup>。但是步进电机在开环低速运动控制场合产生失步并存在低频振荡现象<sup>[2]</sup>。同时,由于步距角一般较大,使得步进电机很难被应用到精度要求较高的场合。从简单的单电压驱动开始,经过科研人员的研究,步进电机的驱动方式已经进行了多次的演变。在传统的驱动方式下,步进电机只能以整步距角或半步距角运行。要想进一步提高步进电机运行精度,只能对其结构进行改进。而采用对步进电机运动过程进行细分,理论上可以使电机运行在任何精度下,提高步进电机的运动分辨率。同时也可以使步进电机运动

过程更平稳,因此步进电机细分驱动得到了广泛的应用<sup>[3-4]</sup>。

目前工业场合所使用的步进电机驱动系统的结构相对复杂,使用模块化的设计概念导致驱动器的体积很大,占用了宝贵的空间。

本文利用 Microchip 公司 dsPIC33F 系列单片机设计的步进电机驱动系统,仅仅对步进电机细分驱动所需要的功能进行拓展,这样做可以大大减小驱动器的尺寸,节约了系统所占的空间。同时,细分驱动系统还包括基于 C# 开发的上位机控制软件,用户可通过上位机更改步进电机转速和位置。

### 2 步进电机细分驱动原理

传统步进电机的工作方式分为单四拍、双四拍等,其中单四拍工作情况下电流驱动波形如图 1 方波所示。

收稿日期:2015-12

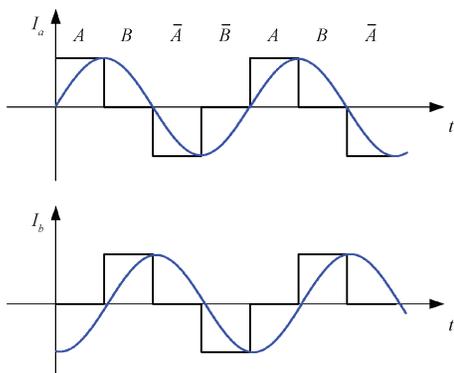


图1 两相步进电机正弦细分原理

正余弦细分就是将图中的方波波形用正余弦波形代替,使得步进电机在理论上连续平滑的运动。由图可知,步进电机 A、B 两相的电流可用公式(1)表示:

$$\begin{cases} i_a = I_m \sin\theta \\ i_b = I_m \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i_a$  和  $i_b$  为 A 相与 B 相的电流; $I_m$  为电流幅值; $\theta$  为转子偏离参考点的角度。用图 2 中的矢量  $i_a$ 、 $i_b$  表示步进电机 A、B 两相电流,即可得到步进电机的电流矢量  $I$ 。由图可知,当  $I_a$ 、 $I_b$  电流按照正弦规律变化时,合成的电流矢量  $I$  就可以以恒定的幅值在坐标空间连续旋转,即磁场矢量以恒定的幅值在坐标空间连续旋转。直观体现是步进电机的转子以恒定的力矩连续旋转。

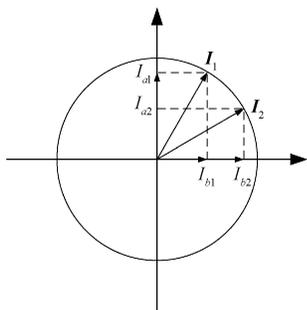


图2 两相电流矢量合成示意

把图 3(a)所示的正弦半波若干等分,用同样数量的幅值相同、脉宽不等的矩形脉冲代替,得到与图 3(b)所示的波形序列。即将宽度相同,幅值按照正弦规律变化的波形用幅值相同,宽度按照正弦规律变化的波形代替(二者冲量等效)。因此,要想得到与正弦波图 3(a)具有相同控制效果,只要按照一定的规律改变 PWM 波的脉冲的宽度即可。

### 3 系统构成与实现

两相混合式步进电机细分驱动就是为了使得步进电机两相绕组的相电流能够按照式(1)的规律,在规定的细分要求下输出。本文涉及的系统中,按照式(1)计算步进

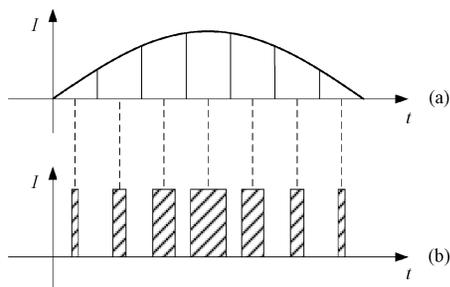


图3 正弦波的等效 PWM 波

电机两相相电流的值,根据计算值采用查询 PWM 脉宽表,再根据查表得到的脉宽控制量生成系统需要的 PWM 脉冲,达到控制电机两相电流的目的。同时用户能够通过上位机软件对步进电机进行速度、位置控制。设计的步进电机细分驱动系统结构如图 4 所示。

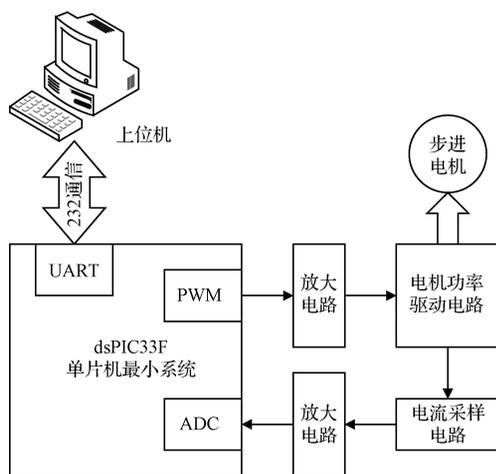


图4 步进电机细分驱动系统结构图

#### 3.1 电路设计部分

如图 4 可知,系统控制芯片选择的是最多支持两个专用 PWM 模块的 Microchip 公司 dsPIC33F 系列单片机。两个 PWM 模块中,PWM1 模块是一个 6 通道 PWM 发生器,而 PWM2 模块是一个 2 通道 PWM 发生器。单片机根据公式计算出当前驱动电流值,查遍输出相应 PWM 驱动波形,经过放大电路送给步进电机驱动电路。

步进电机功率驱动电路是由 MOS 管搭建的两个全桥逆变的 H 电路。MOSFET 栅极信号由 15 V 供电触发,而全桥逆变器最大输出电压可以达到 80 V。为了保护大功率直通独立 PWM 模式下的电流,所选的 MOSFET 驱动器还具有内置直通保护和一个小固定死区时间。在独立 PWM 模式下,驱动电路可以控制两个可反向直流电机、单向控制 4 个直流电机,或者双向控制一个两相步进电机。如图 5 所示为电机功率驱动一组 H 电路桥原理。

系统设计中,通过功率驱动电路与模拟地之间串联一个采样电阻得到系统的反馈电流。在电路设计过程中,为了防止采样电阻产生较大的分压而影响系统的稳定性,电

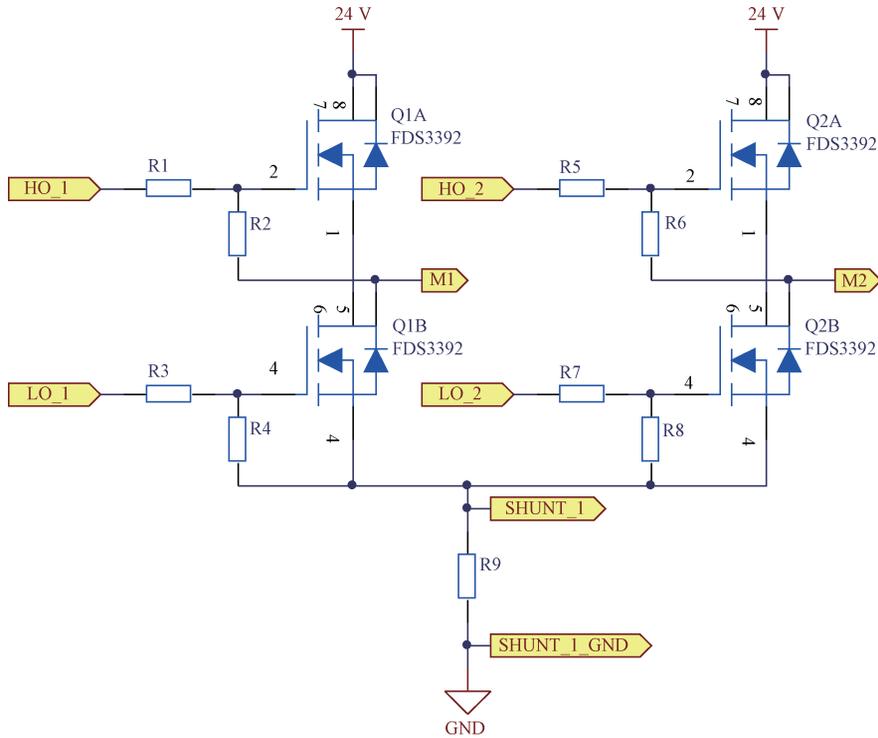


图5 功率驱动电路原理

阻的阻值不可以选择过大。而当采样电阻的阻值太小时，又会影响到电流反馈值的精度。所以采样电阻的阻值一点要合适，本设计中采样电阻选择功率为2 W的0.1 Ω电阻。

由于dsPIC33F单片机的ADC模块输入电压的范围

是0~3 V，所以采样点组采集到电压信号之后，要经过放大环节之后送给单片机进行处理。将电压信号放大之后，还需要对信号进行简单的滤波处理。信号放大电路原理如图6所示。

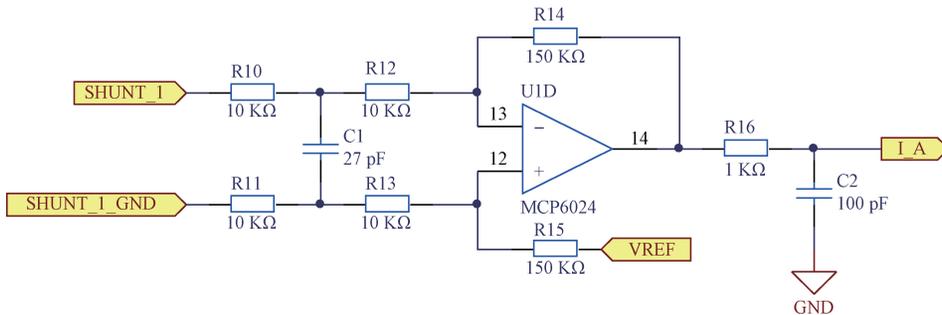


图6 放大电路原理

采样得到的电压信号在控制芯片经过换算得到当前步进电机两相电流值，dsPIC33F单片机与式(1)计算得到的电流期望值进行比较，通过PID算法调节PWM波形，使电流满足预期的期望值输出。

### 3.2 软件流程

本文设计的步进电机细分驱动系统的软件分为上位机界面和底层硬件控制程序两部分。其中，上位机软件界面如图7所示。

用户可以通过上位机软件选择与步进电机驱动器通信端口。同时用户可以设置步进电机运行的角速度和步进电机每一次的运动角度。

本文设计驱动器的主程序流程如图8所示。控制主程序循环执行，等待上位机通信中断信号。驱动器接收到UART中断信号，获取上位机设定的步进电机运行的速度位置信息，并开始执行速度、位置控制。

系统在速度、位置控制环节进行PWM重构对步进电机相电流进行控制，PWM配置程序流程如图9所示。

PWM重构程序中包含定时器中断和PWM中断。定时器中断的作用是提供一个高精度的时间基准用来计算当前步进电机两相绕组所需要的相电流值。PWM中断的作用是进行电流采样，每一次PWM中断进行一次步进电机的相电流A/D采样，采样得到的电流值送给

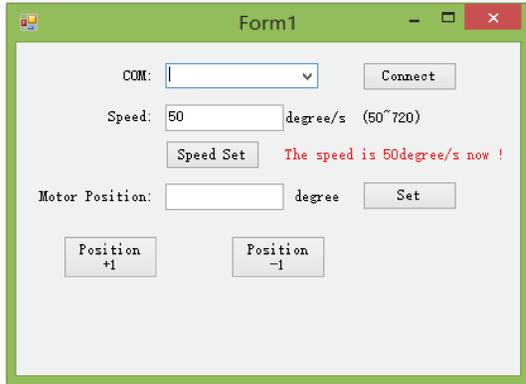


图7 上位机软件界面

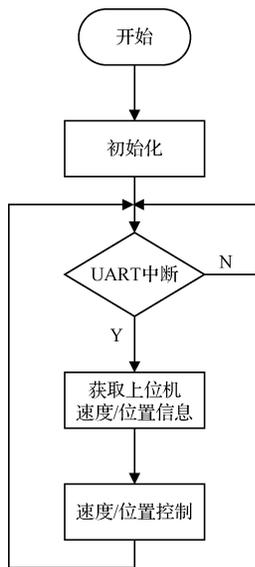


图8 主程序流程

dsPIC33F 单片机 PID 控制器。控制器将采样得到的电流值与计算得到的电流期望值进行比较,通过 PID 算法调节 PWM 波形,使电流满足预期的期望值输出。

#### 4 实验结果分析

##### 4.1 理论验证

为验证上述的分析与设计的合理性,使用本系统对 Leadshine 公司的 42HS03 两相式混合步进电机进行 8 细分控制,同时与整步控制进行对比。

首先,通过示波器测得的步进电机传统工作模式(无细分)A 相的正负脉冲序列如图 10 所示。

由图 10 可知,步进电机在整步工作模式下,A 相的电流波形与图 1 两相步进电机工作原理波形完全相符。放大观察每一个 PWM 脉冲,可以发现每一个 PWM 脉冲是由若干个幅值相等,脉宽也相等的 PWM 脉冲组成。

如图 11 所示为步进电机工作在 8 细分模式下的 A 相的正负脉冲序列。同样,电机 A 相的脉冲序列与图 1 两相步进电机工作原理波形也完全相符。而对每一个脉冲

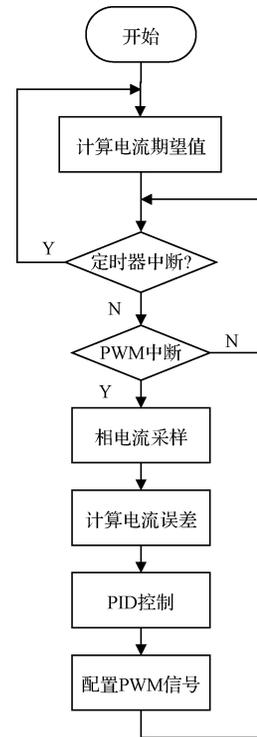


图9 PWM 配置程序流程



图10 步进电机整步工作 A 相的 PWM 脉冲序列

序列进行放大观察,可以发现步进电机工作在 8 细分工作模式下的每一个脉冲序列的组成与工作整步模式下每一个脉冲序列的组成是存在差别的。步进电机工作在 8 细分模式下,每一个脉冲序列是由若干个幅值相等,脉宽按照正弦规律变化的脉冲组成,如图 12 所示。

此时,经过对图 12 的观察分析,其每一个脉冲的组成,与图 3 正弦波的等效 PWM 波完全相同,验证了上述理论分析的正确性与可实现性。

##### 4.2 对比分析

根据参考文献[3]、[6]、[7]得到的结论,两相混合式步进电机在细分控制下,将在电机定子侧生成带有均匀梯度的类正弦电流,如图 13 所示。

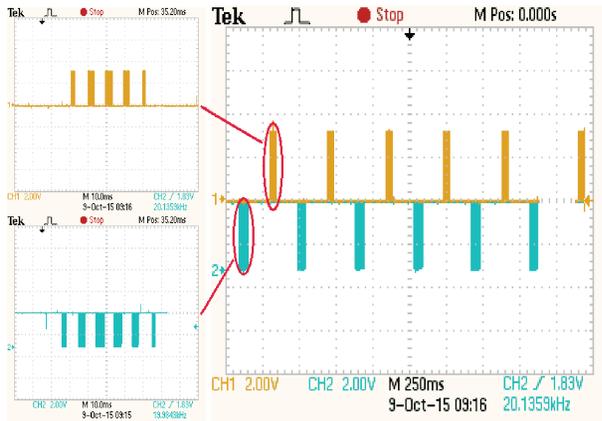


图 11 步进电机 8 细分工作 A 相的 PWM 脉冲序列

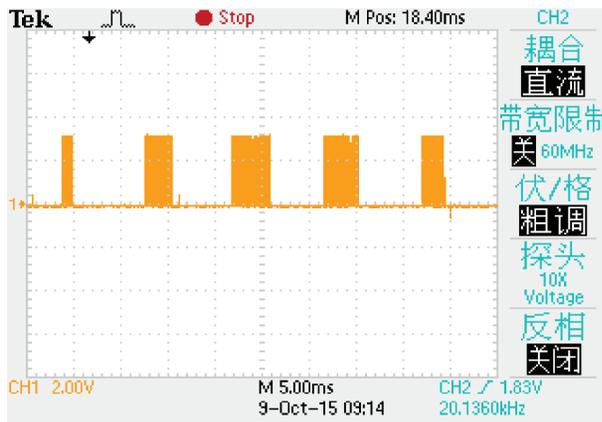


图 12 步进电机 8 细分工作 A+ 相 PWM 脉冲序列

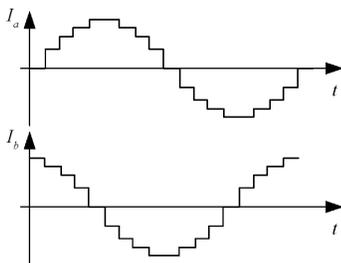


图 13 步进电机细分控制相电流理论波形

文献[11]采用混合模式 PWM 控制方法驱动两相步进电机,通过仿真分析,得到的二相电子绕组电流波形如图 14 所示。

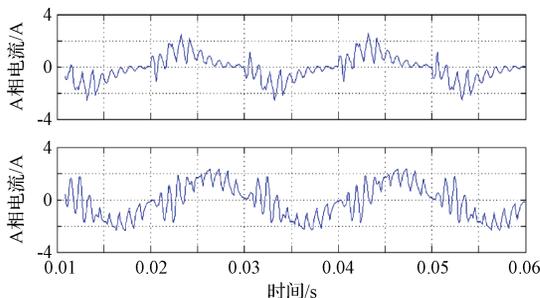


图 14 混合模式 PWM 驱动步进电机两相绕组电流波形

如图 13 所示,采用普通的正弦细分方式得到的电机绕组相电流,虽然趋势是正确的,但由于在一个细分计算周期内,电流值是固定的,最终得到的相电流波形不是一条平滑的曲线。根据图 14 所示可知,在电机电流控制过程中,如果采用开环控制不加入电流反馈,由于电磁效应的存在,得到的步进电机相电流将会存在波动现象,电流波形正弦度不够好。

本文设计的步进电机驱动系统在电流环不加入 PID 控制时,通过采样电阻测量得到电机绕组的相电流如图 15 所示。可以看出,本文设计的步进电机驱动系统得到的电机相电流正弦趋势明显,电流连续平滑。但是在电流环开环的情况下,相电流换向时,由于电磁效应的影响,电流波动很大。在系统中加入电流反馈,对电流环采用 PID 控制得到的电机绕组的相电流如图 16 所示。

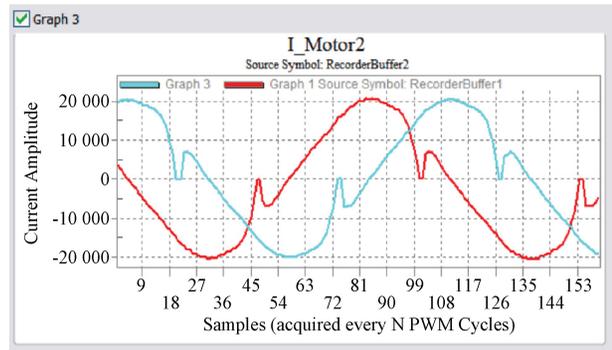


图 15 无 PID 控制电机相电流波形

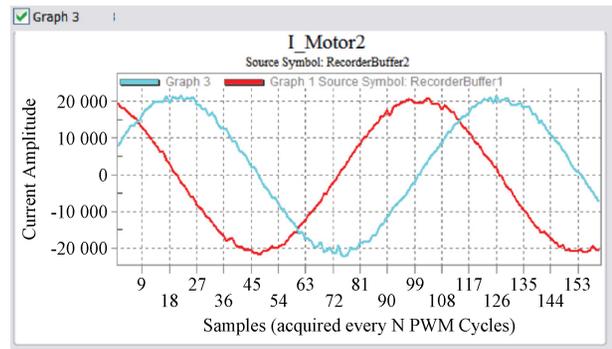


图 16 电流 PID 控制电机相电流波形

由图 16 可知,本文设计的步进电机驱动系统得到的电机相电流趋势正确,电流连续平滑。电流环加入 PID 控制之后,步进电机相电流波动极小,同时电机运行平稳。

## 5 结论

本文分析了利用正弦脉宽调制的方法对步进电机进行细分驱动的原理,并设计了基于 dsPIC33F 单片机的高可靠两相式混合步进电机细分驱动系统。利用 dsPIC33F 自带了 PWM 模块,通过软件查表的方法实现了正弦脉宽调制法对步进电机进行 8 细分驱动。同时系统包括基于

C#开发的上位机控制软件,用户可以通过上位机软件对步进电机运行速度和位置进行设置。最后,利用本文设计的步进电机细分驱动系统对42HS03两相式混合步进电机进行细分控制,得到的驱动波形与理论分析波形完全相符。同时,通过采样点组观察步进电机两相电流,步进电机两相相电流正弦趋势明显、波形平滑、系统运行流畅、电机工作平稳。

## 参 考 文 献

- [1] 胡维庆,颜建军. 步进电机驱动控制系统设计[J]. 现代制造, 2015(18):139-140.
- [2] 王辉堂,颜自勇,陈文芄. 基于带PWM模块单片机的步进电机细分驱动技术[J]. 国外电子测量技术, 2007, 26(3):9-11.
- [3] 俞林. 步进电机多级细分驱动方法研究[J]. 仪表技术, 2015(9):29-30.
- [4] 彭礴,张明敏,林飞龙,等. 基于AT89S52高精度步进电机伺服控制系统设计[J]. 电子测量技术, 2011, 34(3):49-53.
- [5] 王志超,林岩,李大庆. 两相混合式步进电机细分驱

动[J]. 信息与电子工程, 2008(6):457-460.

- [6] 章烈剽. 基于单片机的高精度步进电机控制研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2007.
- [7] 林鑫. 三相混合式步进电机细分控制策略优化[D]. 杭州:浙江工业大学, 2012.
- [8] 王晨光,孙运强,许鸿鹰. 步进电机的单片机控制设计分析[J]. 国外电子测量技术, 2008, 27(9):39-41.
- [9] 马文斌,杨延竹,洪运. 步进电机控制系统的设计及应用[J]. 电子技术应用, 2015, 41(11):24-26.
- [10] 李东君. 步进电动机加减速控制的查表算法研究[J]. 微特电机, 2015, 43(11):77-79.
- [11] 郑雪钦,郭东辉. 基于混合模式PWM二相步进电机驱动控制的研究[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(2):456-461.

## 作 者 简 介

**刘玉章**,1988年出生,工程硕士,研究实习员,主要研究方向为电机控制、伺服系统控制等。

E-mail:liuyuzhang1988@126.com

(上接第80页)

- [10] 胡云峰,陈虹,刘明星,等. 基于FPGA/SOPC的预测控制器设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(6):1241-1248.
- [11] 庄晓燕,赵贻玖. 谱稀疏信号随机等效采样重构方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(10):1507-1512.
- [12] 宋晓琳,张三林,张伟伟. 应用匹配滤波器的车道线恒虚警率识别方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(3):328-336.
- [13] 倪健华,谈恩民,姚普粮. 基于ATT7022E与STM32多功能电力监测仪设计[J]. 国外电子测量技术,

2015, 34(5):48-51.

## 作 者 简 介

**苟辉**,1992年出生,硕士研究生。主要研究方向为光学工程。

E-mail:1136011934@qq.com

**董威**,1958年出生,教授。主要研究方向为测控技术与仪器。

**何雯**,1992年出生,硕士研究生。主要研究方向为精密仪器及机械。