

基于二自由度PID的混合步进伺服控制策略研究与实现

唐朝¹, 刘健¹, 王阳¹, 胡佳²

(1. 武汉工程大学电气信息学院, 湖北 武汉 430073 2. 深圳万至达电动机制造有限公司, 广东 深圳 518106)

摘要: 步进电动机控制简单、成本低, 已广泛应用于各种工控领域, 但是由于其体积较大, 安装较为复杂, 控制准确度有限, 在伺服系统中应用具有一定的局限性。主要解决混合步进伺服一体机驱动器的控制准确度低、成本高和安装复杂等问题。在控制策略方面, 使用基于二自由度PID位置环、速度环和电流环的闭环控制策略与细分控制相结合的控制方法, 可以有效提高控制器的响应速度和抗干扰能力。在驱动器硬件方面, 使用STM32作为主控芯片, 结合A5950全桥驱动芯片和磁性编码器, 设计了低成本、高性能的驱动器硬件结构。在驱动器结构方面, 将控制系统与编码器、步进电动机本体改进于一体, 结构紧凑可以有效减少步进电动机的接线复杂度和安装尺寸, 用时搭建了48 W/24 V的完善的实验平台。实验结果表明, 二自由度PID控制策略下, 控制准确度较高, 能够有效地降低振动和噪声, 具有控制器体积小、结构紧凑、成本低和安装简单的特点, 有一定的应用参考价值。

关键词: 混合步进伺服; 二自由度PID; 细分控制; STM32; 低成本

The research and implementation of hybrid stepper servo motor based on two-degree-of-freedom PID

TANG Chao¹, LIU Jian¹, WANG Yang¹, HU Jia²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China;

2. Shenzhen Wanzhida Motor Manufacturing Co., Ltd., Shenzhen 518106, China)

Abstract: The stepper motor has simple control and low cost. it has been widely used in various industrial control fields. Due to its large size, complicated installation, the conventional stepper motor has limited control precision, the problems of low control precision, high cost and complicated installation of the hybrid stepping servo motor driver need to solve. The control strategy and hardware aspects of the drive are studied. A two-degree-of-freedom closed-loop control position loop, speed loop, current loop combined with subdivision control is used to improve the response speed and anti-interference ability of the controller, and reduce the low frequency vibration at the same time. In terms of driver hardware, STM32 is used as the main control chip, combined with A5950 full-bridge driver chip and magnetic encoder, low-cost, high-performance driver hardware structure is designed. A complete experimental platform of 48 W/24 V is built. Experiments show that the motor has no out-of-step, high control precision angle, good effect in vibration and noise. The volume is small, the cost is low, the installation is relatively simple and has certain application prospects.

Key words: hybrid stepping servo motor; two degrees of freedom; subdivision control; STM32; low cost

国家自然科学基金 (51207117)

0 引言

步进电动机成本较低，控制简单，广泛应用于医疗设备、雕刻机和绕线机等工控领域。由于其控制准确度有一定的局限性，所以在准确度要求较高的伺服系统中，步进电动机的应用较少，同时广泛应用于伺服系统的永磁同步电动机价格较为昂贵，在对成本要求较高的伺服系统中应用存在困难^[1-4]。因此，近年来，混合步进伺服一体机成为研究热点，将步进电动机与编码器、闭环驱动器结为一体，满足伺服系统对其准确度的性能要求，可以有效解决伺服系统控制准确度和成本高的问题^[5-8]。

混合步进伺服一体机的关键技术主要体现在其结构紧凑性和驱动器的控制性能两个方面，这两个方面也是本文研究的重点。在驱动器硬件方面，目前国内现有研究大多使用数字信号处理（Digital Signal Processing, DSP）控制芯片，其运算速度较高，并且功能丰富，安全稳定性较高，但是其成本也较高，且编程相对不够灵活^[9]。在控制策略方面，对于混合伺服步进电动机，现有研究一般采用比例积分导数（Proportion Integral Derivative, PID）闭环控制策略与细分控制、斩波恒流控制和电流矢量控制等控制策略相结合，其虽满足特定场合的控制要求，但是仍有一定的不足，如其抗干扰性能不够、响应速度较低，在准确度要求较高的领域无法使用^[10-15]。另外，步进伺服一体机的结构也是影响其应用领域的关键因素，现有研究一般采用独立插针底座的接口方式，接线较为复杂，且对安全稳定性有一定的影响。

针对上述问题，本文在驱动器硬件方面使用性价比较高的STM32控制器，A5950全桥驱动芯片在满足其控制性能的同时降低生产成本。在控制策略方面，本文研究了二自由度PID控制和细分控制相结合的闭环控制策略，对闭环控制器进行了优化处理；在结构方面，使用VGA接口代替传统的插针底座，在减小一体机体积、提高紧凑性的同时，提高系统运行

的安全稳定性，最后在实验平台上进行了相应的验证。

1 两相混合步进电动机细分原理概述

两相混合步进电动机驱动主要包括单极性驱动和双极性驱动两种：单极性驱动适合驱动三相六线电动机；双极性驱动主要用来驱动两相四线电动机，即两相混合步进电动机适用于双极性驱动。

两相混合步进电动机（以四线为例）为50齿，其步距角为 1.8° ，而细分控制即是指对步距角再进行详细的分步控制。典型两相混合步进双极型驱动电路如图1所示。

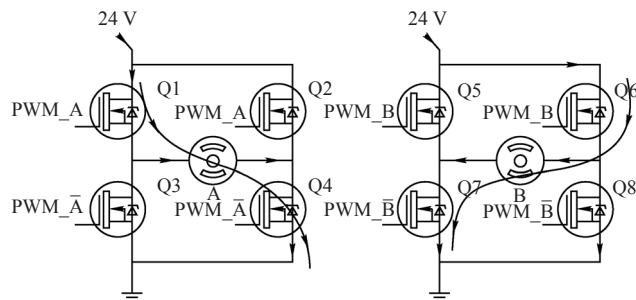


图1 典型两相混合步进双极型驱动电路

Fig. 1 Typical drive circuit

两相混合步进电动机的转矩 T 在一般情况下可以表示为

$$T = K_T (-I_a \sin \theta + I_b \cos \theta) \quad (1)$$

式中， K_T 为在理想状态下的比例常数； θ 为转子的电角度位置。

两相步进电动机的距角特性为正弦波，其两相绕组通入电流的表达式为

$$\begin{aligned} I_a &= I_m \cos \beta \\ I_b &= I_m \sin \beta \end{aligned} \quad (2)$$

式中， β 为电动机目标位置的电角度。

将式（2）代入式（1）可得

$$T = K_T I_m \sin(\beta - \theta) \quad (3)$$

由式（3）可知，两相混合步进电动机细分的时钟可以控制两相绕组的大小。对于步进电动机而言，其正常运行时，内部为旋转的圆形磁场，以此使步进电动机按照交流同步电动机的运行方式进行旋转，理想相电流均为正弦

波。对于细分控制来说,即以阶梯波来模拟正弦波,其转矩的大小由两相合成的磁场矢量决定。

如一般的8细分控制,则 β 的步长为 $\pi/16$ 。所以为了实现对两相混合式步进电动机的恒转矩细分控制,就需要在电动机的两相绕组中通以按正弦规律变化并互差 90° 相位的两相电流,阶梯越细小,越接近于正弦波,步距角也越小,细分效果越好,如图2所示。

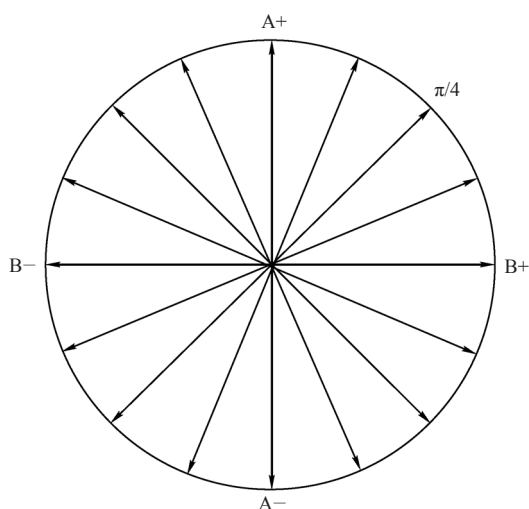


图2 两相混合步进电动机8细分磁场矢量变化

Fig. 2 8 Subdivided magnetic field vector diagram

混合步进电动机细分控制可以较好地抑制其低频振动现象,同时提高其控制准确度。

2 二自由度PID闭环控制策略研究

步进一体机的闭环控制分为位置环控制、速度环控制和电流环控制。传统控制策略一般选用PID控制器,虽然PID控制器有很多成熟应用,但是常规PID控制器只能设置一组控制参数,即一种一自由度控制器。若要获得较好的跟随特性,则干扰抑制能力通常较差,两者不能同时兼顾。

因此PID控制器的参数整定通常情况下采用折中处理。这种方法虽然能够满足一般控制系统的要求,但对于混合步进伺服一体机而言,跟随性能和控制准确度是控制器最关键因素,而采用折中处理的PID控制器并不能实现良好的控制性能。此外,反馈控制的控制信号

总是滞后于干扰信号,如果干扰不断施加,则不可避免地存在稳态位置跟踪误差,从而影响了系统最终的控制性能。所以在混合步进伺服一体机中,为了实现较好的跟随性能,同时增强系统的抗干扰性,不可避免地要使用二自由度控制方法。

混合步进伺服一体机的顶层控制策略与伺服电动机类似,即由位置环、速度环和电流环构成,在本文中,位置环采用P控制器,速度环和电流环均采用二自由度控制器。顶层控制策略结构如图3所示。

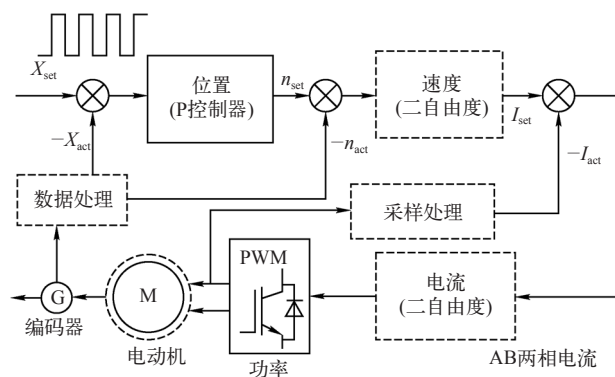


图3 顶层控制策略结构图

Fig.3 Diagram of top-level control strategy

图3中, X_{set} 为目标位置信号,由上位机控制器脉冲个数给定; $-X_{act}$ 为实际位置信号,由编码器反馈信息决定; n_{set} 为目标速度信号,由上位机及控制器脉冲频率给定; n_{act} 为实际速度信号,由编码器反馈信息给定; I_{set} 为目标电流信号,由理论计算给定; I_{act} 为实际电流信号,由电流采样处理之后给定。

需要说明的是,位置环之所以采用P控制器,主要原因在于速度环控制精确,响应速度快,同时P控制器简单高效。位置环的输出即是速度的设定值 n_{set} ,由于速度环对于其设定值总是可以作出快速的响应,以克服误差。对于位置速度环来说,任意偏差都可克服,从而实现了位置的控制。而I控制器的作用是消除静态误差,由于速度环的作用,位置环并不存在静态误差。

综上所述,采用二自由度PID的闭环控制,

可以提高对电动机的控制高效性以及稳定性，同时保证了控制器结构的便捷性，易于实现。

3 混合步进电动机一体机控制器实现

3.1 混合步进电动机一体机控制器硬件实现

混合步进电动机一体机控制器的控制准确度是决定其应用领域范围的关键因素，而控制准确度主要由控制策略和控制器硬件决定，同时需要考虑的还有控制器的成本问题。

本文设计了一种低成本、高效能的基于MCU+A4950的混合步进伺服一体机硬件系统。其中MCU选用意法半导体公司的STM32F103RCT6控制器，有丰富的外设资源，同时成本较低。A4950为Allegro公司的全桥集成驱动电路，内部包含MOS驱动器、MOS管和简单的逻辑电路，其控制方法简单且安全稳定性较高，同时成本较低，控制器的结构如图4所示。

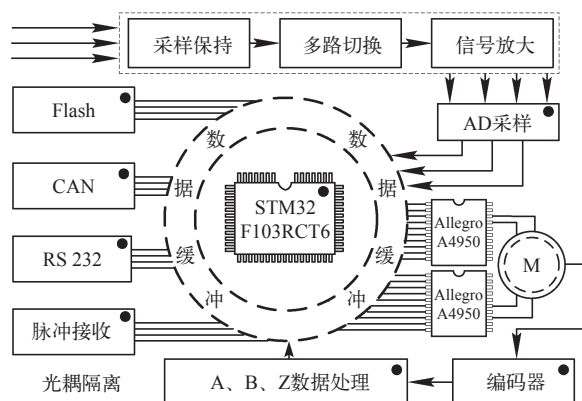


图4 一体机驱动器硬件结构

Fig. 4 Diagram of driver hardware

3.2 混合步进电动机一体机控制器软件实现

混合步进一体机控制的软件实现流程主要包括主程序和中断程序两部分。主程序主要完成初始化、通信等程序。中断程序为核心部分，就整理流程简单来说，就是通过接收上位控制器的脉冲命令来获得位置信号和速度信号，然后转换至位置环输入和速度环输入，同时通过读取编码器信号获取实时位置和实时速度，进行二自由度运算之后，进而控制电流相

位和电流大小，输出至A4950驱动芯片，从而实现了闭环控制。中断程序的整体流程如图5所示，其速度环和电流环为二自由度闭环控制算法，位置环为P控制。

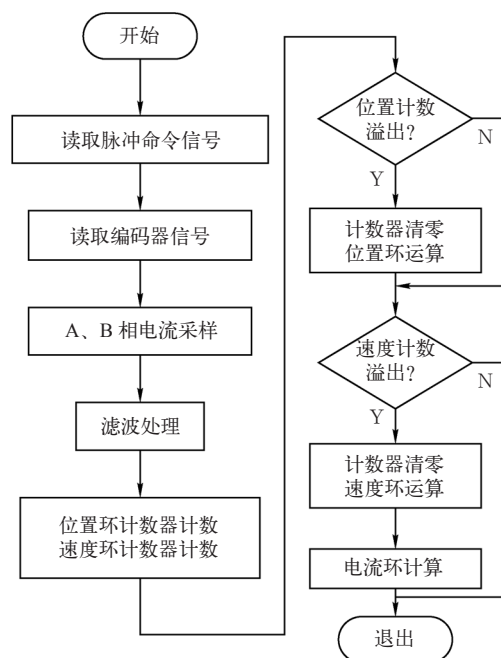


图5 一体机驱动器中断程序

Fig. 5 Driver interrupt program

4 混合步进伺服一体机实验验证

4.1 混合步进电动机一体机控制器紧凑型实现

本文设计了紧凑型混合步进一体机结构，其接线简单，尺寸相对较小，安装较为方便，具有一定的创新性。

4.2 混合步进电动机一体机控制器动模实验

本文进行了相关动模实验并验证本文所研究的混合步进伺服一体机各项技术的可行性和可靠性，实验平台及样机相关核心器件如下表所示。

实验平台如图6所示，实验过程中，混合步进伺服一体机在典型工况运行，样机可以高效稳定地进行工作，下面以部分实验波形为例说明。图7为电动机在40细分的情况下的实验波形，图8为电动机在200细分情况下的实验波形。

表 实验平台及样机相关器件

Tab. Experimental platform and prototype device table

器件	型号	数量	厂家
MCU	STM32F103RCT6	1	ST
H桥及驱动	A4950	2	Allegro
步进电动机	42	1	万至达
示波器	TPS2024B	1	泰克
信号发生器	DG1022	2	RIGOL
直流电源	3605	1	IVYTECH
拉力器		1	—

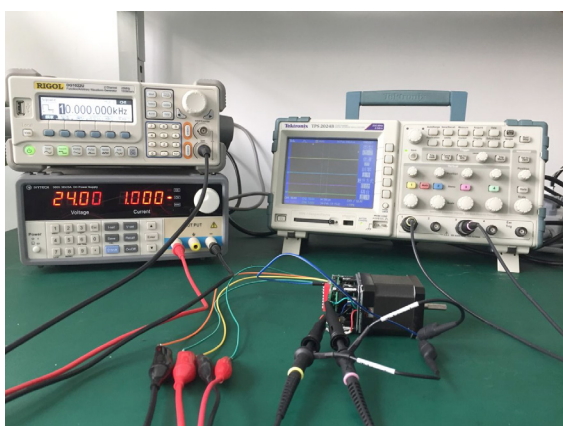


图6 混合步进伺服一体机实验室动模实验平台

Fig.6 Dynamic model experiment platform

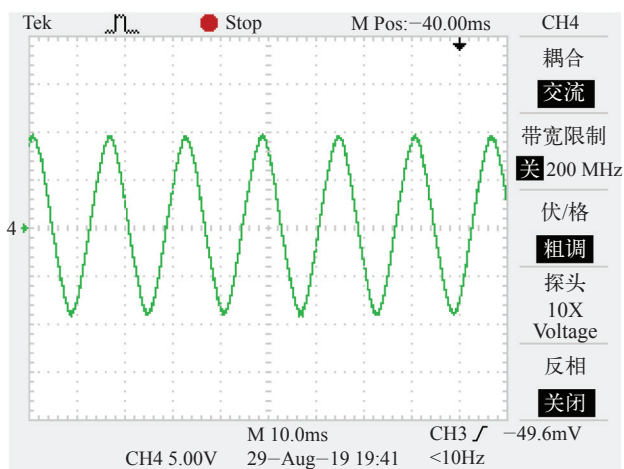


图7 混合步进伺服一体机40细分实验波形

Fig. 7 40 subdivision experimental waveform

实验结果表明,混合步进伺服一体机运行稳定,响应频率达200 kHz,最高稳定转速可达1 500 r/min,满足各种工况要求,验证了二自

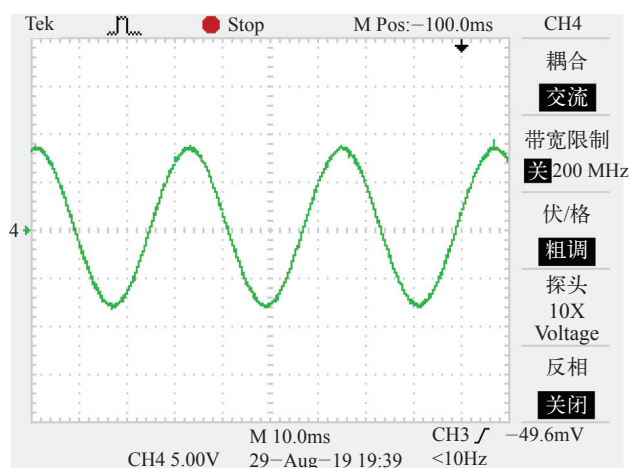


图8 混合步进伺服一体机200细分实验波形

Fig. 8 200 subdivision experimental waveform

由度PID控制策略核心算法的可行性和稳定性。

5 结束语

混合步进伺服一体机是智能制造领域的关键执行部件,其应用领域广泛,相关核心技术的研究具有一定的应用前景。本文就其控制准确度、成本和紧凑型进行研究,设计并实现了相关核心技术,研究特点如下:本文设计了一种基于STM32+A4950的混合步进一体机硬件控制系统,实现了控制系统低成本、高性能的目标。同时,在结构方面设计了一种紧凑型混合步进一体机的整体结构,减少了其尺寸,便于安装,提高了实用性。在控制策略方面研究并应用了二自由度PID闭环控制策略,同时分别对其位置环、速度环和电流环进行了相对应的处理,具有一定的创新性。最后,本文搭建了完善的实验室动模实验平台,做了大量的实验,验证了上述系统及控制策略的可行性。

参考文献

- [1] 王邦继,刘庆想,周磊,等.步进电机控制系统建模及加减速曲线优化[J].电机与控制学报,2018,22(1):37-42.
- [2] 马秀娟,张值豪,王学义,等.基于FPGA的步进电机控流细分驱动系统[J].控制工程,2017,24(1):16-21.

- [3] YANG S M, LIN K W. Automatic control loop tuning for permanent-magnet AC servo motor drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(3): 1499-1506.
- [4] AL-MAYYAH A, ALI R S, THEJEL R H. Designing driving and control circuits of four-phase variable reluctance stepper motor using fuzzy logic control[J]. Electrical Engineering, 2017(2): 1-15.
- [5] 孔汉, 刘景林. 永磁伺服电机转子偏心对电机性能的影响研究[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(1): 52-59.
- [6] 张元飞, 樊绍巍, 刘宏, 等. 步进电机期望控制脉冲的无抖动输出方法[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(2): 17-23.
- [7] 鲁炳林, 徐衍亮, 辛峰. 定子永磁和转子永磁混合式步进电机性能比较研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(21): 6255-6265.
- [8] 周永明, 许进亮, 李向阳, 等. 基于DSP的两相步进电机细分驱动器设计[J]. 电力电子技术, 2017(4): 87-89.
- [9] SRIVASTAVA S, PANDIT V S. A PI/PID controller for time delay systems with desired closed loop time response and guaranteed gain and phase margins[J]. Journal of Process Control, 2016, 37: 70-77.
- [10] RUBAAI A, CASTRO-SITIRICHE J, OFOLI A R. Design and implementation of parallel fuzzy PID controller for high-performance brushless motor drives: an integrated environment for rapid control prototyping[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(4): 1090-1098.
- [11] WANG Z F, WANG Y D, RONG Y N. Design of closed-loop control system for a bidirectional full bridge DC/DC converter[J]. Applied Energy, 2017, 194: 617-625.
- [12] ZANG C Q, GAO M Y, LIU Y F, et al. Study of subdivision stepping motor driver based on the controllable dead-time compensation[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 556-562(1): 1294-1297.
- [13] SEOL W K, CHUNG S K. Current vector control of wireless power transfer system with 2D transmitting coils[J]. Electronics Letters, 2017, 54(2): 91-93.
- [14] CHEKARI T, MANSOURI R, BETTAYEB M. IMC-PID fractional order Filter multi-loop controller design for multivariable systems based on two degrees of freedom control scheme[J]. International Journal of Control Automation & Systems, 2018, 16(2): 687-701.

作者简介



唐 朝

唐朝 (1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为各类电机的高性能驱动控制。

(收稿日期: 2019-01-18) **EA**