

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.12.017

一种用于S型压电直线电机的新型驱动电源

梁 宇,王 寅,黄卫清,李海林

(南京航空航天大学 机械结构力学与控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要: 为满足S型压电直线电机多通道相位可控的驱动要求,设计并制作了一种新型驱动电源。基于直接数字式频率合成器技术和可编程片上系统,设计了S型压电直线电机所需的三路相位差 120° 的正弦信号发生装置。采用CD4051和LM358作为主要器件,设计了用于阶跃式电压调节的PGA电路。设计了线性功率放大电路,解决了叠层压电陶瓷快速放电问题。实验结果表明,所设计的驱动电源能可靠地用于该S型压电直线电机,电机运行良好,驱动信号稳定。

关键词: 压电直线电机; 驱动电源; 可编程片上系统; 直接数字式频率合成器; 可编程增益放大器

中图分类号: TH39; TM35 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2013)12-1520-04

Driving power for S-type linear piezoelectric motor

LIANG Yu, WANG Yin, HUANG Wei-qing, LI Hai-lin

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To meet the requirement of phase controlled for S-type linear piezoelectric motor, a new type of driving power was designed. for The design of a signal generator based on direct digital synthesizer(DDS) and programmable system on chip(PSOC3), providing 3-phase sin wave voltage signal with 120° phase difference was proposed. The CD4051 and LM358 was used as the main component to design the PGA circuit. A linear power amplifier circuit was designed, and the problem of quick-discharge for the piezoelectric stack was solved. The experimental results demonstrate that the driving power is reliable for the s-type linear piezoelectric motor with long-time stability.

Key words: piezoelectric linear motor; driving power; programmable system on chip(PSOC); direct digital synthesizer(DDS); programmable gain amplifier(PGA)

0 引 言

新型功能材料技术的发展催生了压电电机技术并推动了该技术的迅速发展。由于压电直线电机具有体积小、控制精度高无电磁干扰、相应速度快等优点,在精密仪器和设备驱动控制方面有着广阔的应用前景^[1]。

非共振型压电电机使用叠层压电陶瓷为激振元件,叠层压电陶瓷在直流电压下产生变形用以驱动电机工作。叠层压电陶瓷相对于传统的压电陶瓷有更大的电容,一般在几百纳法以上,这导致在驱动过程中对电源的带负载能力要求较高。在叠层压电陶瓷的驱动信号生成技术中,通常采用“先产生方波,再对

输出的方波信号进行滤波”的方法,这种方式对滤波器提出了较高的要求,需配备较大的电感,实用性较差^[2-4]。而采用DDS集成化芯片设计的分立式电路系统具有电路复杂、成本高、稳定性差的缺点,且对于信号的调制通常较复杂。

本研究针对自行研制的S型压电直线电机,提出基于可编程片上系统(PSOC3)的驱动电源,在进行电路仿真后搭建实际电路板并进行相关实验,以求取得较好的驱动效果。

1 驱动要求

本研究所研制的一款基于尺蠖式的S型压电直线

收稿日期: 2013-08-12

作者简介: 梁宇(1990-),男,安徽蚌埠人,主要从事压电直线电机驱动技术方面的研究. E-mail:403364948@qq.com

电机。尺蠖式压电电机的工作过程与自然界中尺蠖类动物的运动极其相似。S型压电直线电机如图1所示。

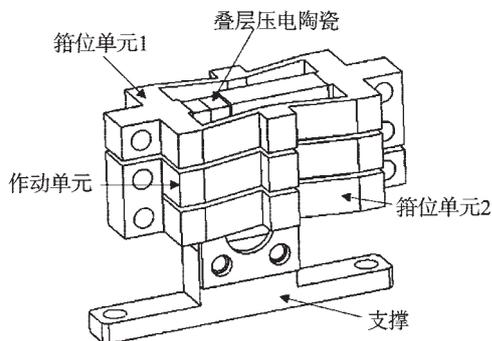


图1 S型压电直线电机

位于S形上、下端的两个位移转换机构中各有一组叠层压电陶瓷,而位于中间的位移转换机构含有两组叠层压电陶瓷,并且在这两组的中间还装有支撑,该支撑通过支撑件固定在基座上。与定子3对驱动足同时接触的两个接触面一边固定,另一边可以沿接触面法向平移,这时通过一个柔性铰链构成的平行结构实现导向,定子和动子之间的预压力可以通过调节弹簧实现。笔者给任一箱位单元施加直流电压信号,使之保持与动子接触,这时再调节作动单元中叠层压电陶瓷上的激励信号,便可利用叠层压电陶瓷的静变形实现精确定位。

根据叠层压电陶瓷的特性及电机的运行机理,对驱动电源提出了以下要求:

- (1) 为实现S型压电直线电机的尺蠖式运行方式,需要3路相位差 120° 的正弦信号,且相位差稳定;
- (2) 为避免叠层压电陶瓷退极化的发生,驱动信号的幅值不得溢出 $0\sim 150\text{ V}$;
- (3) 驱动信号电压在 $60\text{ V}\sim 120\text{ V}$ 区间内可阶跃式调制;
- (4) 驱动信号频率在 $0\sim 1\text{ kHz}$ 范围内可实现高精度调制;
- (5) 由于叠层压电陶瓷端电压不能跃变,驱动电源要有提供快速放电功能的放电回路。

2 驱动电源设计

2.1 驱动电源总体结构设计

S型压电直线电机驱动电源的总体设计框图如图2所示。它由信号调制、PGA电路、线性功率放大3部分组成,其中,信号调制模块采用Cypress公司的片上嵌入式控制器PSOC3作为主控芯片,实现原始信号生成及PGA电路控制信号生成的功能;PGA电路用于叠层压电陶瓷驱动信号峰值的阶跃性调制;线性功率放

大部分用于对PSOC3生成的原始信号进行功率放大,提高电路的整体带负载能力。

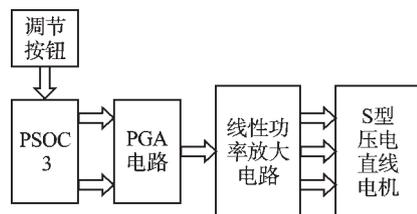


图2 驱动电源总体设计框图

2.2 原始信号生成部分设计

S型压电直线电机要求驱动信号为3路相位差为 120° 的正向偏置正弦信号。为了实现驱动信号正向偏置的要求,传统的方法是采用双相信号加直流偏置电压的方案,这种方法的缺点是容易出现小范围的反相电压^[5],而这种情况对叠层压电陶瓷的寿命是极其不利的。本研究采用基于DDS和PSOC3的原始信号生成方案,既解决了信号相位控制难、电压偏置难以准确调制以及分立式DDS电路稳定性差的问题,还实现了高集成化、低功耗^[6]。

在PSOC3中模拟DDS方案的原理,如图3所示。

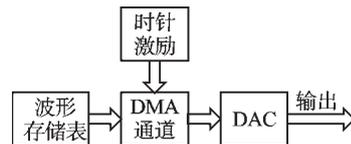


图3 PSOC3内部模拟DDS流程图

波形存储表中记录着带偏置的正弦信号经过采样离散化处理后的数字量,本研究通过配置PSOC3中的DMA组件,将上述数字量直接传输到DAC组件中,经过DAC组件的数模转换过程,在PSOC3的模拟端口即能输出预置的正弦波信号。这其中两个重要的组件分别是DMA组件和DAC组件。DMA(direct memory access)即直接内存存取,是一种在嵌入式系统中广泛使用的技术,其赋予了嵌入式系统中非CPU组件间的数据传输功能。该设计中采用DMA组件提高了数据的传输速度,同时降低了CPU的占用率。DAC组件是集成于PSOC3系统中的一种电压输出型的8位数模转换组件,能够在芯片内部完成数模转换的过程。通过采用这种集成化的组件不仅能够极大地减小硬件电路的规模,还避免了因芯片间信号传输导致的稳定性下降问题。

相位差调制过程是在波形存储表的数据存储时实现的。一方面调整各通道间已有的正弦波数字量的初始相位;另一方面通过对3个DMA通道配置同一时钟激励信号保障各通道同时传输数据,共同完成对输出信号间相位的调制。

频率的调节过程是在DMA通道的时钟激励组件Clock组件中完成的,本研究在系统中配置了两个中断组件分队对应于频率的增大和减小,在相应的中断服务程序中通过调用PSOC3固有的API函数“Timer_WritePeriod()”;实现对Clock组件中Period参数的调节。在调整频率时,以增加Period为例,记调节后的Period为 $Period_2$,调节前的Period为 $Period_1$,则有:

$$Period_2 = Period_1 + 1 \quad (1)$$

本研究中Timer组件使用的时钟源Clock组件的时钟频率是20 MHz,故输出波形频率 f 和Period的关系式为:

$$f(\text{kHz}) = \frac{20\,000\text{ k}}{\text{Period}} \quad (2)$$

在增加Period时:

$$\Delta f(\text{kHz}) = \frac{20\,000\text{ k}}{\text{Period}_2} - \frac{20\,000\text{ k}}{\text{Period}_1} = \frac{20\,000\text{ k} (\text{Period}_1 - \text{Period}_2)}{\text{Period}_1 \times \text{Period}_2} = \frac{-20\,000\text{ k}}{\text{Period}_1 \times (\text{Period}_1 + 1)} \quad (3)$$

以电机的初始工作频率100 Hz为例,根据上式可求出该点调节的分辨率约为2 Hz,而当初始工作频率为200 Hz时,其调节分辨率则为0.5 Hz。可见在低频下,频率的调制分辨率是很高的,这完全满足电机的驱动要求。

2.3 PGA电路的设计

由于叠层压电陶瓷对于驱动电压十分敏感,成近似线性的关系,为了实现对叠层压电陶瓷的精密控制,需要能够控制驱动信号的电压幅值。PGA电路即可编程增益放大器用于对PSOC3输出的原始信号的初级放大。该电源整体放大倍率 G_w 受PGA环节的放大倍率 G_p 和线性功率放大环节的放大倍率 G_l 相关,并存在以下关系:

$$G_w = G_p \times G_l \quad (4)$$

因此,通过对PGA环节的的放大倍率 G_p 进行调制即可控制整个电路的增益。该PGA电路如图4所示。

该电路的基本原理是:通过调制一个基本的同相运算放大电路的实际反馈电阻达到调节放大倍率的目的,主要器件为可编程程控开关CD4051和LM358运算放大器。CD4051是一种常用的程控模拟开关,具有低导通阻抗和低截止电流的优点。其共有16个端口,1个公共输入/输出端口COM,7个选择输入/输出端口,1个使能端口1NH,电源端口 V_{dd} ,模拟信号地 V_{ss} ,数字信号地 V_{ss} ,3个控制端口。本研究通过控制控制端口A,B,C选择实际接入电路的反馈电阻,改变整个电路的放大倍数。

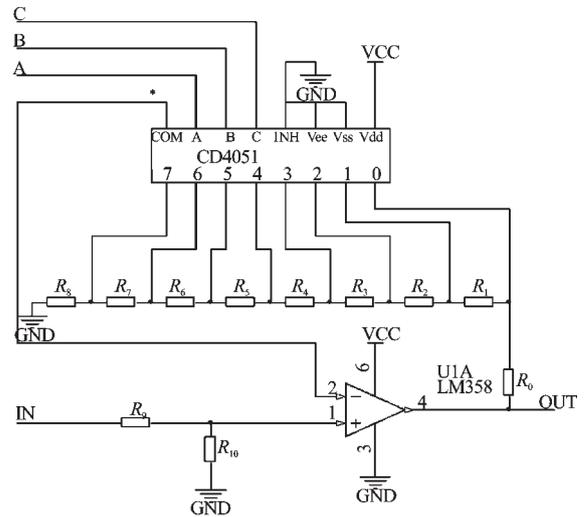


图4 PGA电路

2.4 带放电回路的线性功率放大电路

线性功率放大级电路是决定着驱动电源性能的一个关键环节^[7-9]。本研究中的线性功率放大环节采用由N沟道MOSFET构成的准推挽式线性功率放大电路,该电路如图5所示。

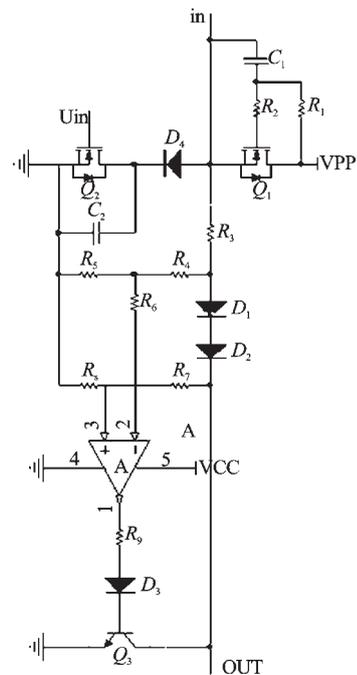


图5 线性功率放大电路

图5中, Q_2 成漏极放大电路,为减小静态电流,提高放大器上拉带负载能力和压摆率,本研究在 Q_1 的源级接源级输出电路 Q_2 、 D_1 ,可通过 R_1 调节静态工作电流的大小,一般为14 mA,尽量减小静态损耗,降低功耗。当输入电压上升时, Q_2 漏极电流减小,并小于 Q_1 、 Q_2 的静态电流,其剩余电流对 Q_1 的栅极电容充电,使 Q_1 栅极电压上升;当输入电压下降时,同时通过 D_4 传到输出,使输出电压跟随 Q_2 漏极电压下降。

同时,叠层压电陶瓷呈现出更大的电容特性,在频率较高电压下降速度较快时, Q_2 放电能力不足容易导致输出波形出现失真,所以在线性功率放大级输出端还应有供叠层压电陶瓷快速放电的放电回路,与叠层压电陶瓷电源端相连。从图5中还可以看出,线性功率放大级输出电压经分压电路进入比较器输入端,分压电路应满足 $R_4/R_5 = R_7/R_8$ 。当输出电压增加(相当于给容性负载充电)时,比较器的两输入端有 $V_- > V_+$,比较器输出为负,三极管 Q_3 截止,放电回路不起作用,对整个电路没有任何影响;当电源电路输出电压下降(相当于给容性负载放电)时,比较器两端有 $V_+ > V_-$,则输出为正,使 Q_3 导通,叠层压电陶瓷通过 Q_3 快速放电。

3 实验

本研究根据上述设计搭建了实际电路,并进行了相关实验。利用Cypress的CY8CKIT-001开发实验板作为驱动控制器,制作了硬件电路实物,实物图如图6所示。

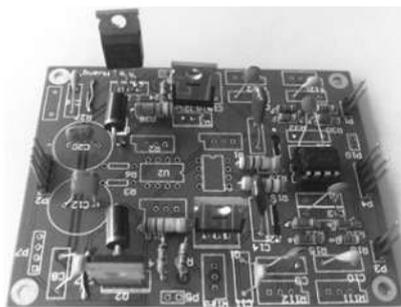


图6 功率放大电路实物图

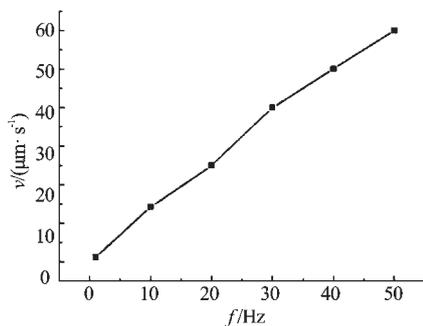
本研究在驱动信号电压峰值1 000 V,并且带有+50 V直流偏置的条件下,在频率范围从0~600 Hz范围内进行了实验研究,并利用激光干涉仪进行数据采集。

电机的运行效果如图7所示。

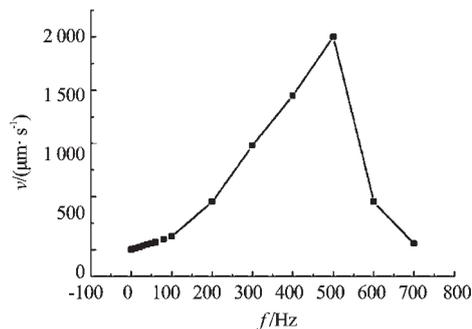
从实验结果可以知道,电机的驱动是在3路信号激励下有效地实现了对导轨的驱动。

4 结束语

本研究设计并制作了一种基于直接数字式频率合成器(DDS)技术和可编程片上系统(PSOC3)的电机驱动器。该驱动器能够产生带直流偏的3路两两相位差为 120° 的正弦波功率信号。通过对硬件电路的制备和实验,验证了该驱动器可以满足基于尺蠖原理的



(a) 0~50 Hz速度-频率特性曲线



(b) 0~700 Hz速度-频率特性曲线

图7 s型压电直线电机速度-频率特性曲线

S型压电直线电机的驱动要求,实现直线电机的平稳运行。

参考文献(References):

- [1] 赵淳生. 超声电机技术与应用[M]. 北京:科学出版社, 2007.
- [2] 王宏,钟朝位,张树人. 压电陶瓷驱动器线性动态驱动电源的研制[J]. 压电与声光, 2004, 26(31): 189-191.
- [3] WALLENHAUER C, KAPPEL A, GOTTLIEB B, et al. Efficient class-B analog amplifier for a piezoelectric actuator drive[J]. *Mechatronics*, 2009(19): 56-64.
- [4] 刘岩,邹文栋. 一种高速压电陶瓷驱动器驱动电源设计[J]. 压电与声光, 2008, 30(1): 48-52.
- [5] 孟益民. 压电直线电机及其驱动控制的研究[D]. 南京:南京航空航天大学航空宇航学院, 2009.
- [6] 赵明富,包明. 存储器函数变换技术及应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2004.
- [7] GRAY P R, PAUL J H, STEPHEN H L. 模拟集成电路的分析与设计[M]. 4版. 张晓林,译. 北京:高等教育出版社, 2003.
- [8] ALLEN P E. CMOS模拟集成电路设计[M]. 2版. 冯军,译. 北京:电子工业出版社, 2005.
- [9] 潘松. 新型压电叠堆驱动电机及微小型超声电机的驱动研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2011.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

梁宇,王寅,黄卫清,等. 一种用于S型压电直线电机的新型驱动电源[J]. 机电工程, 2013, 30(12): 1520-1523.

LIANG Yu, WANG Yin, HUANG Wei-qing, et al. Driving power for S-type linear piezoelectric motor[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2013, 30(12): 1520-1523.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>