文章编号:1004-2474(2018)06-0843-04

一种用于超声电机驱动的半桥集成电路的设计

刘泽浪,罗 萍,黄 龙

(电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室,四川 成都 610054)

摘 要:在超声波电机应用系统中,超声波电机驱动电路的小型化越来越重要。该文基于0.35 μm的双极互补双扩散金属半导体(BCD)工艺设计了一款单片集成超声波电机驱动电路的芯片,本芯片包括一个非同步峰值电流模升压电路和2个半桥驱动电路。非同步峰值电流模升压电路给半桥驱动电路提供电源,具有自适应死区时间控制的2个半桥驱动电路,其输出的2个相位差90°的方波用于驱动超声波电机。

关键词:超声波电机;单片化;升压电路;半桥驱动;电流采样

中图分类号:TN384 **文献标识码**:A **DOI**:10.11977/j.issn.1004-2474.2018.06.009

Design of a Half-bridge Integrated-circuit Driver for Ultrasonic Motor

LIU Zelang, LUO Ping, HUANG Long

(State Key Lab. of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The miniaturization of the driving circuit of ultrasonic motor is becoming more and more important in the ultrasonic application system. Based on the 0.35 μm bipolar-complementary metal oxide semiconductor-double diffused metal oxide semiconductor(BCD) process, a monolithic integrated ultrasonic motor driving circuit chip is designed in this work. The chip consists of a non-synchronous peak current mode boost circuit and two half-bridge drivers. The peak current mode boost circuit provides power for the half-bridge driver. Two square waves with the phase difference of 90° which output from two half-bridge drivers with adaptive dead-time controller are used to drive the ultrasonic motor.

Key words: ultrasonic motor; monolithic; boost circuit; half-bridge drive; current sensing

0 引言

超声波电机(USM)作为一种新型电机,与传统的电磁电机不同,它不需要依靠电磁场传递能量,而是通过压电陶瓷的逆压电效应和超声振动,将电能转化为弹性材料超声频段内的微幅振动,而使定子的微幅振动转化为转子的宏观运动,进而输出力矩驱动负载[1-3]。与传统电磁电机相比,USM具有体积小,惯性小,响应快,无电磁干扰,低速转矩大,断电自锁及较好的环境适应性等优点,它不仅可用于高档相机镜头调焦,精密仪器定位,汽车方向盘操纵,生物医学工程,工业控制及可穿戴设备等民用领域,也可用于宇宙飞船、空间机器人、卫星探测系统、导弹及核弹头等航空、航天及军事领域[4-6]。

超声电机的数学模型[7-8]主要包括解析模型和等效电路模型等。USM等效电路模型表明,其可看作容性负载电路。但是,容性负载会造成无用功率的增加,降低整个电路的工作效率,此时需要呈感性的匹配电路,有利于提升效率,同时还可起到一部分的升压作用,匹配电路[9-10]一般采用LC谐振和LLCC谐振电路。

随着超声波电机技术的不断发展,超声波电机的体积已很小了,在此过程中,超声波电机的驱动电压也在逐渐减小。现行的超声电机驱动技术主要有直接数字式频率合成器(DDS)[11]技术和基于开关逆变器[12]的驱动方式。但DDS技术原理复杂,开发难度大,不易产品化;而后者多使用变压器逆变,造成驱动电路体积大,且会出现直流偏磁现象。对于超声电机系统,超声波电机及其控制电路与驱动电源电路不可分割,现行复杂结构含变压器的超声波电机驱动电路已成为制约整个超声波电机系统小型化、扁平化的一大瓶颈。

随着集成电路技术的不断发展,本文针对此问题提出了一种使用集成电路作为驱动电源和驱动电路的解决方案。

收稿日期:2018-01-08

基金项目:国家自然科学基金NSAF联合基金资助项目(U1630117)

作者简介:刘泽浪(1993-),男,安徽滁州人,硕士生,主要从事模拟集成电路和开关电源的研究。E-mail:zl_lau@foxmail.com。通信作者:罗萍,女,教授,博士生导师,主要从事智能功率集成电路与系统的研究。

1 驱动拓扑

本文基于 0.35 μm 的双极互补双扩散金属半导体(BCD)工艺,设计了一款单片集成超声波电机驱动电路的芯片。本芯片包括一个非同步峰值电流模升压电路和 2 个半桥逆变电路。此单片化超声电机驱动芯片可减小超声电机驱动系统。本驱动电路的拓扑结构如图 1 所示。其中输入电压 $V_{IN}=12$ V,输出电压 $V_{OUT}=40$ V。

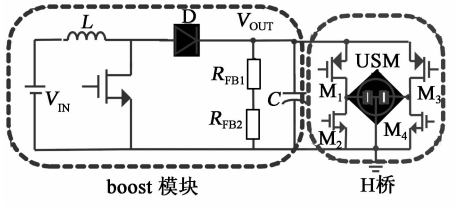


图 1 本驱动电路的拓扑结构

图 2 为芯片的结构框图。图中上半部分为升压(boost)模块。其中基准(BGR)子模块产生 1.21 V 的带隙基准电压,供给低压差线性稳压器(LDO)子模块使用;LDO 产生 5 V 电压,给芯片内部其他模块供电;振荡器(OSC)子模块确定升压模块的工作频率,通过改变给电容充放电的电流来改变振荡器输出方波的频率;功率管(MP)置于芯片内部;欠压锁定(UVLO)子模块在输入电压过低时,输出使能信号,关断芯片内部所有模块,等到输入电压大于一定值时,再开启所有模块;过温保护(OTP)子模块在芯片温度大于一定值时,输出使能信号,关断芯片内部模块。

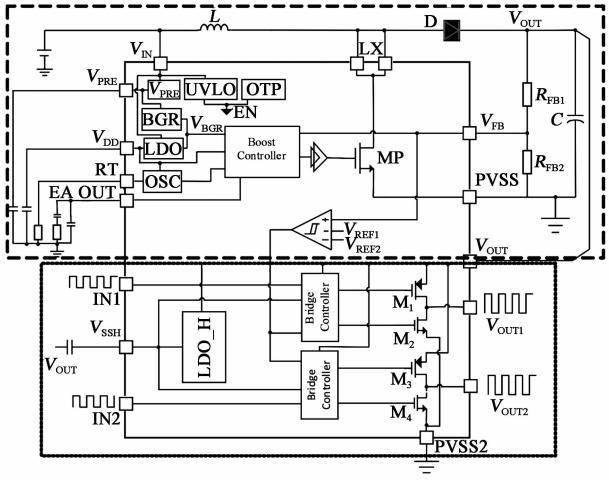


图 2 本芯片的整体结构框图

图 2 中下半部分为半桥子模块,其中迟滞比较器用来判断升压模块的输出电压是否建立好,建立好后输出信号使半桥子模块工作,用来防止半桥电路误输出。其中 IN1 和 IN2 是 2 个相位相差 90° 的数字信号的输入端,LDO_H 子模块产生一个比 boost 模块的输出电压 40 V 低 5 V 的 35 V 电压,用作功率管 M_1 和 M_3 的电源轨;半桥驱动控制器(Bridge Controller)子模块包括死区时间控制、电平位移电路等。

2 关键子电路的结构与原理

2.1 升压变换器模块

图 3 为升压(boost)模块的主要环路拓扑。本芯片采用脉冲宽度调制(PWM)型峰值电流模控制模式,其中电感 L 和二极管 D 都放在片外,电流采样(Current Sensing)子模块采样功率管 MP 的电流,斜坡补偿(Slope Compensation)子模块产生斜坡补偿电流,在驱动功率管 MP 的驱动信号大于 50% 占空比的情况下,避免发生次谐波振荡现象;软启动模块(Soft Start)使输出电压 V_{OUT} 跟随软启动电路的输出上升,保证电路不出现大的峰值电流,从而起到保护电路的作用;当软启动电路的输出电压达到 BGR 所产生的基准电压时,误差放大器 EA 选择基准电压作为输入电压,脱离软启动状态;R_i 为采样电阻,误差放大器 EA 的输出端外挂的 3 个无缘器件用于环路补偿,确保环路的稳定性。逻辑控制(Logic Controller)子模块包括逻辑部分、最大及最小导通时间等。boost 电路输出电压与基准输出电压的关系为

$$V_{OUT}=\frac{R_{FB1}+R_{FB2}}{R_{FB2}}\cdot V_{BGR} \tag{1}$$

式中:V_{OUT} 为 boost 电路的输出电压;R_{FB1} 和 R_{FB2} 为分压电阻;V_{BGR} 为基准模块的输出电压。

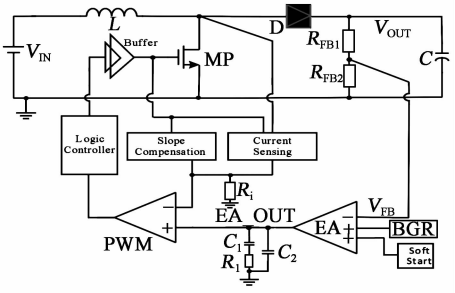


图 3 升压变换器环路拓扑

电流采样电路采用 SENSEFET 采样技术:通过设置与功率管宽长比成比例的镜像管,并运放保证使得两者的三端电位相同,则流过镜像管的电流应为功率管电流(即电感电流),且此比例与宽长比相同,其原理图如图 4 所示。图中,M_s 是高压保护管,防止在功率管关闭期间,LX 点的高压损坏采样结构;INV、M_1 及 M_2 用来稳定采样结构在功率管关断期间的工作点;延时部分通过延时来保护采样结构的工作点免受在功率管开启瞬间 LX 未下降到

低电压的较高电压的影响,而在功率管关闭瞬间不起作用;运放 EA 是用于箝位,使得镜像管(Mirror MOS)的漏极电压等于 LX 点的电压,确保镜像管与功率管的三端电压相等,提高采样精度。采样电流与电感电流的比例关系为

$$\frac{I_{\text{sense}}}{I_{\text{L}}}=\frac{(W/L)_{\text{Mirror MOS}}}{(W/L)_{\text{Power MOS}}} \tag{2}$$

式中:I_{SENSE}为采样电流;I_{L} 为电感电流;$(W/L)_{\text{Mirror MOS}}$和$(W/L)_{\text{Power MOS}}$分别为采样管和功率管的宽长比。

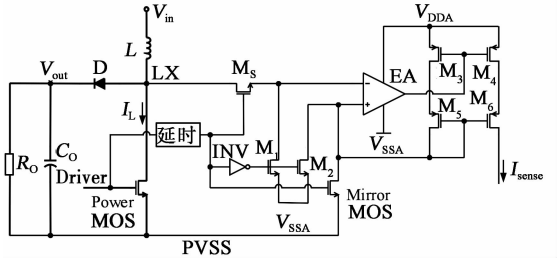


图 4　电流采样电路结构示意图

图 5 为 boost 电路的仿真输出波形。由图可知,在电路启动阶段,boost 输出电压随软启动电压的上升而上升,当软启动电压大于基准电压时,启动阶段结束,启动时间为 900 μs,boost 输出电压恒定。图 5(b)为 L =4.7 μH、电容 C =10 μF 时,电感电流和输出电压在负载变化时的波形。由图可看出,负载电流从 240 mA 突变到 1 A 时,输出电压的恢复时间为 15 μs,下冲电压为 192 mV,由此可看出,负载电流从 1 A 突变到 240 mA 时,输出电压的恢复时间为 17 μs,下冲电压为 187 mV。

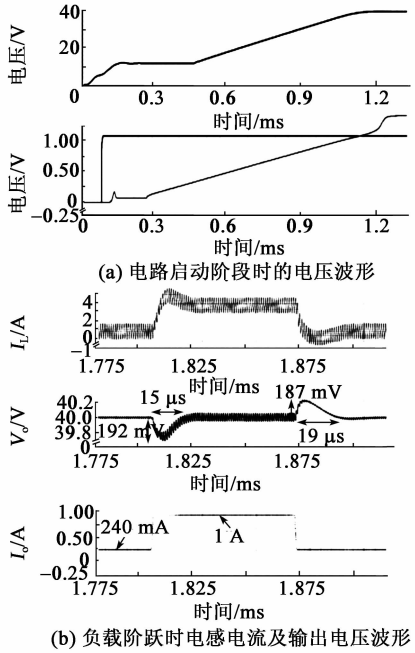


图 5　boost 电路的仿真输出波形

2.2　半桥驱动模块

图 6 为半桥模块细节电路图。MPH 和 MNL 为半桥的 2 个功率管。由于功率管器件一般具有很大的结电容,会在其导通、关断时出现一段延迟,可能导致上、下两个功能同时导通,使芯片产生瞬间极大电流,烧毁芯片。为保证芯片的可靠性,需在驱动逻辑中加入死区时间,本设计采用固定死区时间和自适应死区时间相结合的控制技术。由于上管 MP 的导通和关断电压分别为 40 V 和 35 V,使用 LDO_H 产生 35 V 的电源轨。因为电路中具有很多不同的电源轨,所以,设计中需加入电平位移电路,通过电平抬升(LEVEL_UP)模块完成 0～5 V 电源轨向 35～40 V 电源轨的转化,通过电平降低(LEVEL DOWN)模块完成 35～40 V 电源轨向 0～5 V 电源轨的转化。

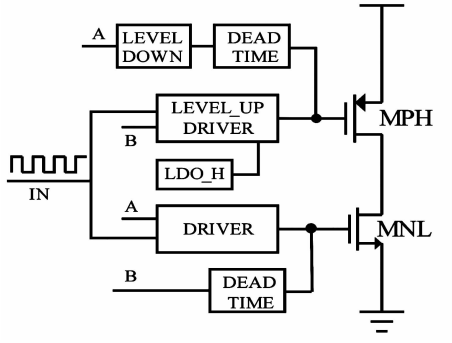


图 6　半桥电路内部完整结构

图 7 为半桥的仿真结果。图 7(a)中,半桥驱动上、下管导通的死区时间约为 47 ns,防止了上、下功率管出现穿通现象。图 7(b)给出了 2 个相位差 90°、频率 61 kHz 的波形。

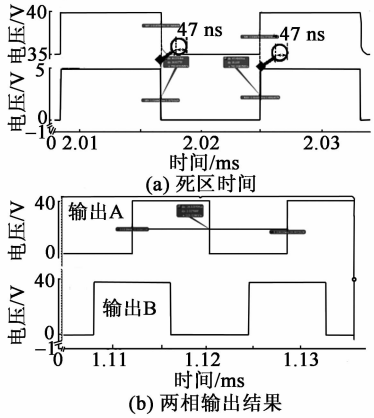


图 7　半桥的输出结果

3　流片及测试

3.1　整仿及流片

图 8 为本文提出的超声电机驱动芯片版图布

局，ESD 和 PAD 的芯片面积为 1 427 μm×1 873 μm。因为基准电压是整个芯片的基础，所以，把基准放在左下角处，使功率管 MP 对其影响最小。

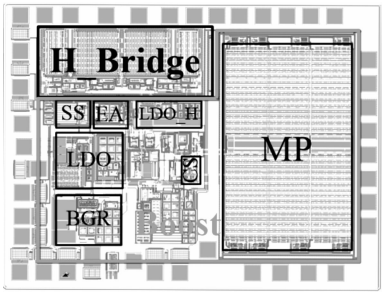


图 8 本芯片版图布局

图 9 为整个芯片的整体仿真结果。由图可看出，boost 升压模块的输出电压约为 40 V，纹波 2.2 mV，半桥输出是频率 61.5 kHz、相位差 90°，且可用于驱动超声波电机的方波信号。

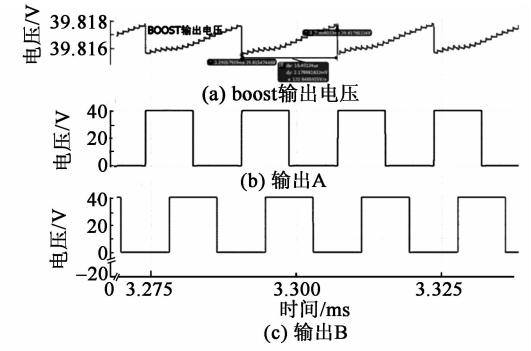


图 9 整仿结果

3.2 测试结果

图 10 为流片测试的 PCB 的版图，A 处为本文设计的芯片。图 11 为本芯片的测试结果。由图 11(a)可知，boost 电路软启动时间为 1 ms，输出电压可稳定在约 40 V。图 11(b)是 2 个半桥输出相位差 90°、频率 90 kHz 的方波信号。在实测时，当输出方波频率小于 3 MHz 时，此电路都能正常工作。图 11(c)给出了使用 LLCC 谐振网络匹配超声电机后，电机上两相的电压波形为类正弦波、没有高次谐波，可以很好地驱动和保护超声电机。

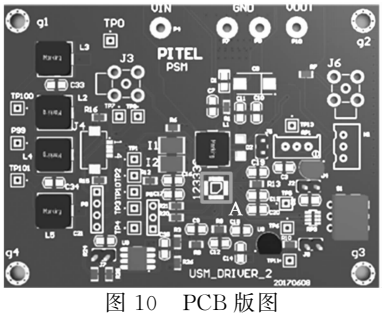
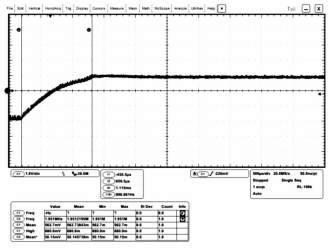
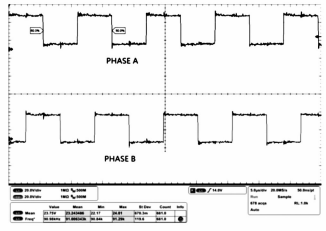


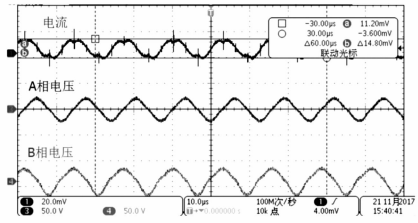
图 10 PCB 版图



(a) boost输出实测波形



(b) 半桥输出实测波形



(c) 超声电机上两相电压波形

图 11 本芯片的测试结果

4 结束语

本文设计了一款用于超声波电机驱动的集成电路芯片，使得整个超声电机的应用系统更小。基于 BCD 工艺，升压转换器给半桥提供电源，2 个半桥产生相位差为 90°的方波信号驱动专用微型电机。在此芯片的基础上，只需 12 个无源器件就可完成12～40 V 以及输出相差为 90°的 2 个方波信号，减小了 PCB 的面积，从而减小了超声电机的驱动系统。

参考文献：

[1] 赵淳生. 超声电机技术与应用[M]. 北京：科学出版社，2007：1-19.

[2] 郭吉丰，魏燕定，刘晓，等. 纵扭复合型超声波电机的力传递模型[J]. 中国电机工程学报，2003，23(3)：80-85. GUO Jifeng, WEI Yanding, LIU Xiao, et al. Force transfering model of hybrid transducer type ultrasonic motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 80-85.

[3] 陈超，赵淳生. 旋转型行波超声电机中三维接触机理的研究[J]. 中国电机工程学报，2006，26(21)：149- 155. CHEN Chao, ZHAO Chunsheng. Study on the three dimensional contact mechanism of traveling wave type rotary ultrasonic motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 149-155.

（下转第 850 页）