

基于复杂可编程逻辑器件的超声电机小型电源

李华峰, 赵淳生

(南京航空航天大学, 江苏省 南京市 210016)

MICRO-DRIVER FOR ULTRASONIC MOTOR BASED ON CPLD

LI Hua-feng, ZHAO Chun-sheng

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: For the ultrasonic motor driver, the output voltage and energy efficiency is relative to the duty cycle of the driving pulse. The rationality of 40% duty cycle is proved in this paper firstly. Then a micro driver based on CPLD for ultrasonic motor is presented. The circuit is applied to a traveling-wave ultrasonic motor, of which stator's diameter is 45mm. Experimental results show that this scheme is valid and feasible. Compared with traditional driver using separate logical circuit, this micro-driver can be reduced by 66% in volume and 40% in element numbers, which fulfils the demand of practicability.

KEY WORDS: Electric machinery; Ultrasonic motor; Driver; CPLD

摘要: 首先分析了超声电机电源驱动信号的占空比与输出电压幅值和能量利用率之间的关系, 提出采用 40% 占空比驱动信号的合理性。随后介绍了采用 CPLD 为信号发生器的超声电机小型电源的设计方案, 并用它驱动自制的 $f45$ 的行波型超声电机, 验证了设计方案的合理性。与普通驱动器相比, 新驱动器体积减小了 66%, 元件数减少了 40%, 基本满足了实用性的要求。

关键词: 电机; 超声波电机; 驱动器; 复杂可编程逻辑器件

1 引言

超声波电机 (UltraSonic Motor, USM) 是使用功能材料构成的一种新型电机, 它利用压电陶瓷的逆压电效应和超声振动, 将弹性材料 (压电陶瓷, PZT) 的微观形变通过共振放大和摩擦耦合转换成转子或滑块的宏观运动^[1-4]。由于其独特的运行机理, USM 具有传统电磁式电机不具备的优点: 结构简单紧凑, 低速大转矩, 不需减速机构、形式灵

活多样等, 已在航空航天、机器人、工业自动化等领域得到了应用^[5-7]。有关专家预言超声电机将有可能部分取代微、小型的传统电磁电机, 而得到广泛地应用。

但是要驱动超声电机, 必须配备专用的驱动电源, 这为超声电机取代传统的电磁电机设置了障碍。如果驱动器的体积过大, 将更加阻碍超声电机的推广。为此, 在保证满足驱动器基本要求的前提下, 应尽可能地缩小驱动器的体积, 以便在更多领域充分发挥超声电机的独特优点^[8-9]。

目前使用的超声电机驱动电源框图如图 1 所示^[10-11], 其中的信号发生电路使用分立的逻辑器件构成, 存在着诸如体积大、效率低、难维护等缺点。本文采用 CPLD (复杂可编程逻辑器件) 为核心构成信号发生电路, 极大地缩小了驱动器体积, 初步解决了这一工程问题。

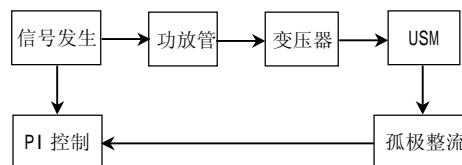


图 1 超声电机驱动电源框图

Fig. 1 The diagram of ultrasonic motor driver

2 系统设计

对于行波型超声电机驱动器而言, 信号发生电路的功能是产生 4 路互差 90° 的方波信号 $q_1 \sim q_4$ (图 2), 经过功放和变压器升压后变为高压方波信号, 再由滤波电感滤去谐波后形成超声电机需要的两路高频高压正弦驱动信号。

目前驱动器使用的方波信号的占空比主要有 25% 和 50% 两种。25% 占空比的逻辑电路设计简单,

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50235010)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China (50235010).

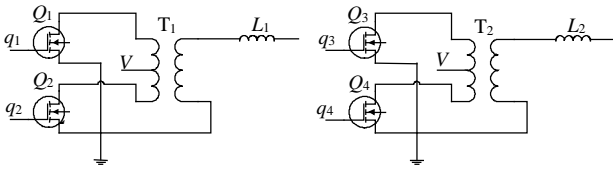


图2 超声电机电源功放电路

Fig. 2 Power amplifier of the ultrasonic motor driver

在驱动功放管时不存在直通的问题，但输出信号中基波成分少，效率不高。相比之下，50%占空比的信号中基波成分高，但存在功放管直通的隐患。为避免直通现象的发生，就需要用微分/积分和整形电路构成死区电路，使其占空比小于50%，但这无疑增加了驱动器的体积。由于微分/积分电路的时间常数是固定的，死区时间也随之固定下来，使得不同频率下信号的占空比也不一样。而由下面的分析可知，驱动信号的能量利用率在某一固定的占空比下才能达到最优。因而这种方案也是有缺陷的。

设经变压器升压后的信号波形如图3所示，其表达式为(其幅值已归一化处理)

$$f(x) = \begin{cases} -1 & -\pi \leq x < a - \pi \\ 0 & a - \pi \leq x < 0 \\ 1 & 0 \leq x < a \\ 0 & a \leq x \leq \pi \end{cases} \quad (1)$$

根据傅立叶分解，可将式(1)表示为

$$f(x) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos kx + b_k \sin kx) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \sin(kx + b) \quad (2)$$

式中的系数为

$$\begin{cases} a_0 = 0 \\ a_k = [\sin ka - \sin k(a - \pi)] / k\pi \\ b_k = [1 + \cos k(a - \pi) - \cos k\pi - \cos ka] / k\pi \\ c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \\ b = \arctg \frac{a_k}{b_k} \end{cases} \quad (3)$$

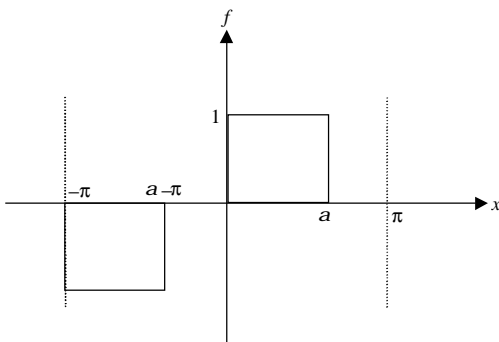


图3 变压器输出信号波形

Fig. 3 The signal waveform of the transformer

信号的占空比 $D = a / 2\pi$ 。图4为按照式(3)计算出的各次谐波幅值 C_k 随占空比 D 的变化趋势。由图可见，随着占空比 D 的增加，基波幅值 C_1 近似线性增加，其他次谐波幅值呈周期性变化。虽然基波幅值高一些更易驱动超声电机，似乎占空比选为50%最合适，但驱动电源除了对输出的基波幅值有要求外，也应考虑能量利用效率。

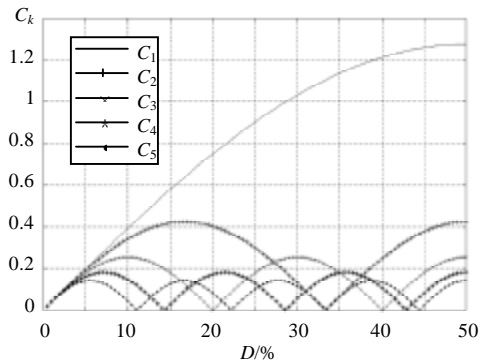


图4 谐波幅值与占空比的关系

Fig. 4 Relationship between duty cycle and harmonic amplitudes

由于变压器输出的方波信号需要外接电感进行滤波后才能形成超声电机需要的正弦信号，因而除基波外的谐波成分都被滤掉了，这必然造成一定的能量损失。定义一个周期内基波信号的能量 W_1 为^[12]

$$W_1 = \int_{-\pi}^{\pi} f_1^2(x) dx = (a_1^2 + b_1^2) \pi$$

而方波信号的能量为 $W = 2a$ 。

因而变压器的方波信号变为超声电机需要的基波信号时的能量利用率 R 可定义为 $R = W_1 / W$ 。

图5为能量利用率与占空比之间的关系。由图可见， R 与 D 并不是单调关系，而是在 $D = 37\%$ 左右达到峰值。因而，为简单起见，将占空比选为40%为好。此时，信号发生电路需要20分频才能输出4

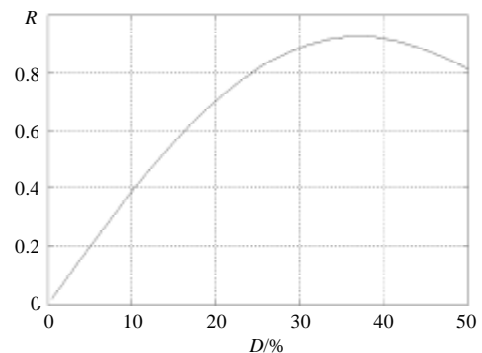


图5 能量利用率与占空比的关系

Fig. 5 Relationship between duty cycle and energy efficiency

路占空比为 40%、互差 90° 的方波，用分立的逻辑器件是很难满足这个要求的，而使用 CPLD 则很容易达到这个目标。

CPLD 具有容量大、设计简单、维护性好等优点，MAX+PLUSII 是 ALTERA 公司推出的功能强大的设计及仿真软件，可使用图形和语言方法设计逻辑电路并进行仿真^[13-14]。图 6 是用 MAX+PLUSII

软件对信号发生电路进行模拟时的波形图。其中 b_{clk} 为输入的频率可调的时钟信号， b_{cw} 和 b_{ccw} 为正、反转及停止的控制信号， $q_0 \sim q_3$ 为用于驱动功放管的 4 路占空比为 40% 的方波信号。仿真时 q_1 有宽度为 5ns 的毛刺，但因为这个毛刺会被芯片的引脚电容滤掉，故不会对功放管的开关过程造成影响。

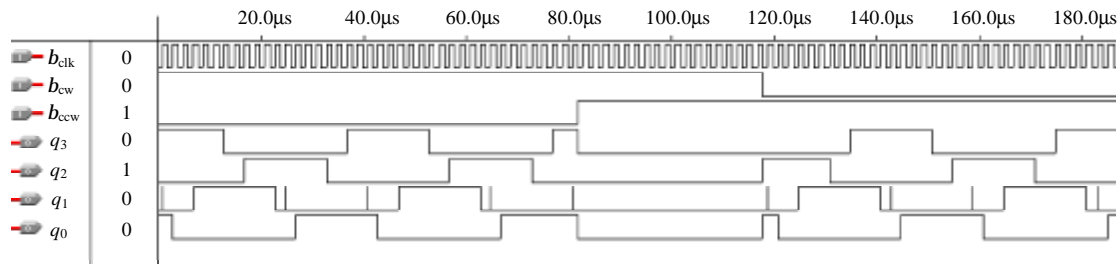


图 6 CPLD 的仿真波形
Fig. 6 Simulation waveforms of CPLD

3 实验结果

驱动系统由压控振荡器、CPLD 构成的分频分相电路、功放以及频率跟踪部分组成，驱动器外观见图 7。本文用此驱动器驱动自制的 f45 超声电机。驱动频率 45.75kHz，输入电压 12V，输入电流 0.4A，输出电压 218V_{vpp}，电机转速 125r/min。MOSFET 的栅极波形以及最终的输出电压波形见图 8 和图 9。由图可见，栅极信号无毛刺，且占空比为 40%，验证了设计方案的可行性。

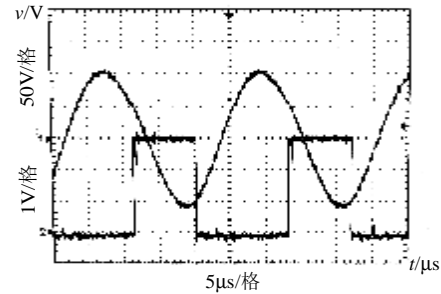


图 8 驱动信号波形图
Fig. 8 The waveform of the driving signals



图 7 超声电机小型电源外观图
Fig. 7 Photo of the ultrasonic motor micro driver

本驱动器与具有同样功能的普通驱动器的比较见下表：

	尺寸/mm ²	元件数
旧方案	105·75	91
新方案	71×38	51

由表可见，基于 CPLD 的驱动器的元件数减少了 40%，体积减小了 66%，已接近实用上可以接受的程度了。

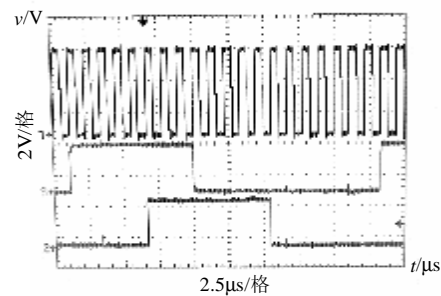


图 9 分频分相波形图
Fig. 9 The waveform of split frequency and phase

4 结论

本文提出的基于 CPLD 的超声电机小型电源，具有结构简单、能量利用率高、易维护等优点。与传统的驱动器相比，元件数和体积得到了极大的缩小，基本满足了实用性的要求。

参考文献

[1] Ueha.S, Tomikawa.Y, Kurosawam *et al.* Ultrasonic motors: theory and applications[M]. Oxford, 1993.
[2] 夏长亮, 郑尧, 史婷娜. 行波接触型超声波电机定子振动有限元

- 分析[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 25-32.
- Xia Changliang, Zheng Yao, Shi Tingna. FEM analysis on stator vibration of traveling-wave type contact ultrasonic motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(2): 25-32.
- [3] 刘俊标, 黄卫清, 赵淳生. 圆柱-球体三自由度超声电机运动机理研究[J]. 机械科学与技术, 2002, 21(4): 609-611.
- Liu Junbiao, Huang Weiqing, Zhao Chunsheng. Study on the motion mechanism of a cylinder-sphere ultrasonic motor with three-degree of freedom[J]. Mechanical Science and Technology, 2002, 21(4): 609-611.
- [4] 李华峰, 辜承林. 大转矩行波型超声波电机的研制[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 67-70.
- Li Huaifeng, Gu Chenglin. Research on large torque travelling wave ultrasonic motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8): 67-70.
- [5] 赵淳生. 面向 21 世纪的超声电机技术[J]. 中国工程科学, 2002, 4(2): 86-91.
- Zhao Chunsheng. Ultrasonic motor techniques for 21st century [J]. Engineering Science, 2002, 4(2): 86-91.
- [6] 魏守水, 冯传胜, 黄青华, 等. 超声马达振子等效模型的仿真与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 125-129.
- Wei Shoushui, Feng Chuansheng, Huang Qinghua *et al.* Simulation and experimental research of equivalent model for ultrasonic motor vibrator[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 125-129.
- [7] 刘锦波, 陈永校. 超声波电机定转子接触的摩擦传动模型及其试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(4): 59-63.
- Liu Jinbo, Chen Yongxiao. Investigation on control model of ultrasonic motor and its experiments[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(4): 59-63.
- [8] Dongzhe Bai, Takaaki Ishii, Kentaro Nakamura. An ultrasonic motor driven by the phase-velocity difference between two traveling waves[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2004, 51(6): 680-685.
- [9] Kim. Hyeoung.Woo, Dong. Shuxiang, Laoratanakul. Pitak. Novel method for driving the ultrasonic motor[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. 2002(10): 1356-1362.
- [10] 李华峰, 辜承林. 超声波电机的频率自动跟踪[J]. 压电与声光, 2003, 25(1): 36-38.
- Li Huaifeng, Gu Chenglin. Frequency tracking of ultrasonic motor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics. 2003, 25(1): 36-38.
- [11] 夏长亮, 郑尧, 史婷娜. 行波型超声波电机 PWM 驱动控制系统研究[J]. 电力电子技术, 2001, 35(3): 14-16.
- Xia Changliang, Zheng Yao, Shi Tingna. Study on PWM driving-controlling system of traveling wave type ultrasonic motor[J]. Power Electronics, 2001, 35(3): 14-16.
- [12] 辜承林, 陈乔夫, 熊永前. 电机学[M]. 华中科技大学出版社, 2001.2.
- [13] 宋万杰, 罗丰, 吴顺君. CPLD 技术及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.9.
- [14] 廖裕评, 陆瑞强. CPLD 数字电路设计[M]. 清华大学出版社, 2001, 10.

收稿日期: 2005-02-23。

作者简介:

李华峰(1974-), 男, 工学博士, 从事超声波电机及其驱动控制系统的研究;

赵淳生(1938-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 从事压电超声马达、机械设备故障诊断、模态实验和分析等研究。