

一种高压可变波形的压电驱动电路设计

孙浩,张卫平,邹阳,王晨阳,陈畅,吴彬彬

(微米/纳米加工技术重点实验室,薄膜与微细技术教育部重点实验室,上海市北斗导航与位置服务重点实验室,上海交通大学电子信息与电气工程学院微纳电子学系,上海 200240)

摘要:压电驱动方式因具有位移分辨率、机械耐久性、速度高、输出力大、功耗低和频带宽等优势,因而被广泛采用。文章总结并分析了压电驱动的驱动要求与驱动方式,将压电驱动电路划分为直流升压转换模块、直流电压校准模块、开关放大器驱动模块、交流电压校准模块及控制模块,提出了一种结构简单、输出稳定以及可小型化的双级压电驱动电路系统,完成了将5 V 低压直流电转换为280 V 的高压交流电的设计目标,可以自由地改变输出方波信号和正弦信号的幅值、频率和占空比,并对压电驱动电路的带载能力、输出功率和效率作了分析。

关键词:压电陶瓷;压电;驱动电路;高压交流电信号;可变波形;控制

中图分类号: TN384

文献标识码: A

DOI: 10.11977/j.issn.1004-2474.2018.04.014

The Design of a Piezoelectric Drive Circuit With High Voltage and Variable Waveforms

SUN Hao, ZHANG Weiping, ZOU Yang, WANG Chenyang, CHEN Chang, WU Binbin

(National Key Laboratory of Science and Technology on Micro/Nano Fabrication Laboratory, Laboratory for Thin Film and Micro Fabrication of the Ministry of Education, Shanghai Key Lab. of Beidou Navigation and Location-based Services, Dept. of Micro-Nano Electronics, School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The piezoelectric drive method is widely used since it has the outstanding advantages of high mechanical durability, speed and great output strength, low power consumption as well as wide bandwidth. The drive requirements and ways of the piezoelectric drive are analyzed in the paper. The piezoelectric drive circuit is divided into DC boost converter module, DC voltage calibration module, switch amplifier drive module, AC voltage calibration module and control module in this paper. A two-stage piezoelectric drive circuit system with simple structure, stable output and miniaturization is proposed. The design goal of converting the low voltage DC of 5 V into high voltage AC of 280 V has completed, and the amplitude, frequency and duty ratio of the square wave signal and sine wave signal can be changed freely. The load carrying capacity, output power and efficiency of the piezoelectric drive circuit are also analyzed in the paper.

Key words: piezoelectric ceramics; piezoelectricity; drive circuit; high voltage alternating current electric signal; variable waveform; control

0 引言

近些年,国内、外对于驱动方式多采用直流电机^[1]、压电^[2]、静电^[3]、电磁^[4]和非传导弹性驱动^[5]。其中,压电驱动方式由于具有速度高,输出力大及功耗低等突出优势而被广泛采用。

目前,压电驱动方式接入了大量应用场景,也要

求压电驱动电路朝着体积更小,功能更强大稳定,效率更高及节省能源的方向发展。压电驱动电路需要满足三大要求:

1) 驱动电路需将输入低压信号转换为输出高压信号,升压的比率约50~100。

2) 能够产生任意波形的时变信号,需要对未使

收稿日期:2017-10-17

基金项目:预研项目(LZY2016215,6141A02022607,17070107,1620010701);国家自然科学基金资助项目(61574093);航空基金资助项目(2013ZC57003);上海市平台基金资助项目(16DZ2290103)

作者简介:孙浩(1992-),男,新疆省奎屯人,硕士生,主要从事微仿生机器人驱动电路系统的研究。通信作者:张卫平(1971-),男,山东青岛人,教授,博士,主要从事机电系统和仿生机器人相关技术的研究,E-mail:zwp37@163.com,021-34208598。

用的能量进行回收^[6]。

3) 电路结构简单, 体积和质量足够小, 能够被应用在更丰富的场景下, 如微型机器人与仿生机器人等。

虽然现在的研究已出现了一些能够输出高压的电路设计^[7], 但是这些电路大多数不能轻易的小型化, 输出功率与效率很低。

本文设计了一种可以输出时变信号(方波和正弦波)的压电驱动电路系统, 输出信号波形参数可任意调节, 大幅提高升压比及系统稳定性, 并简化了电路复杂性, 节省了能源。

1 压电驱动电路设计

1.1 驱动方式的选择与模块划分

双级电路设计是将电路分为一、二级电路。一级电路负责将输入的低压直流信号转换为高压直流信号, 二级电路负责将高压直流信号变为高压交流信号, 产生驱动信号。由于双级设计本身会产生一个稳定的高压直流电信号和交流电信号, 因此与同步驱动方法相匹配。

同步驱动^[8]属于双压电片驱动, 是将整个致动器施加一个恒定的高压直流偏置和一个连接到中心碳纤维层的交流电压源进行驱动, 如图 1 所示。压电层极化方向相同。同步驱动允许多个驱动器之间共享高压直流的偏置, 因此, 每 n 个双晶片需要 n 个交流信号源, 并只需要 1 个高压直流偏压, 因此增加了系统的可拓展性。

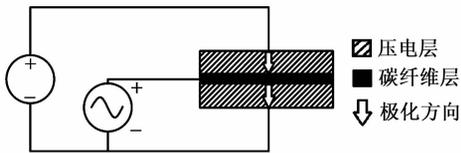


图 1 同步驱动方式

虽然双级电路设计相对于单级电路设计会增加电路的质量, 但是前级电路产生稳定的高压直流信号可以在多个压电致动器间共享, 有利于电路系统的拓展, 所以本文将采用双级电路设计方案。给定理想驱动电压 V_{def} , 采用双级电路设计方案对电路进行设计。压电驱动电路系统包括 5 大模块: 直流升压转换模块、直流电压校准模块、开关放大器驱动模块和交流电压校准模块以及控制模块, 如图 2 所示。

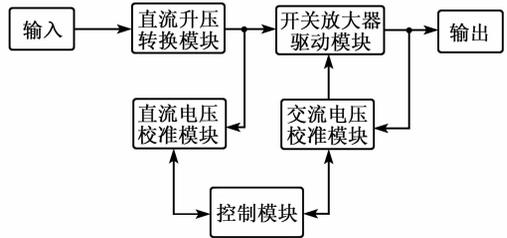


图 2 压电驱动电路模块组成

将电路系统分为一、二级电路。一级电路通过直流升压转换模块将输入端直流低压电信号升压, 然后不断对一级电路输出端的直流高压信号进行模数转换, 与 V_{def} 相比, 通过比例、积分、微分 (PID) 控制算法程序进行校准, 最终使一级电路输出端输出驱动电压幅值为 V_{def} 的稳定持续的直流高压电信号。二级电路将一级电路的 V_{def} 的直流高压电信号通过开关放大器驱动模块逆变为方波或正弦交流信号, 然后不断对二级电路输出端的交流高压电信号进行 ADC 采样及查表操作, 调整控制信号对开关放大器驱动模块进行控制, 直至二级电路输出端输出所需一定频率和占空比的幅值为 0 和 V_{def} 的方波或正弦信号, 如图 3 所示。

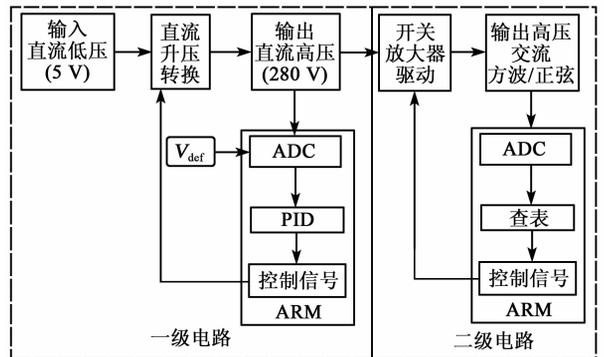


图 3 压电驱动电路流程图

1.2 一级电路设计^[9]

一级电路示意图如图 4 所示。当场效应管 Q 导通时, 回路 $V_{in}-L_1-Q$ 导通, 能量积聚在自耦变压器初级绕组的电感 L_1 ; 当 Q 关断时, 回路 $V_{in}-L_1-L_2-D$ 负载(电容 C_1 、电阻 R_1 和 R_2) 导通, 存储在自耦变压器中的能量通过电感 L_1 及 L_2 被输出释放。

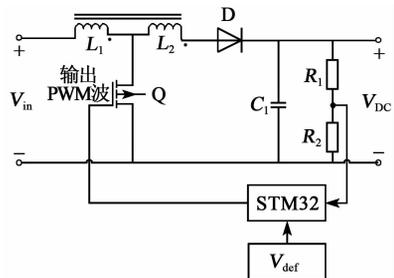


图 4 一级电路示意图

非连续模式指一个开关周期结束,变压器电感电流降为0后,再开始下一个开关周期的模式。这种工作模式具有低功耗,高升压比和高效的特点,并简化了控制回路的设计。在非连续模式中,电压升压比为

$$\frac{V_{DC}}{V_{in}} = \frac{V_{in} t_{on}^2}{2TI_{out}L_1} \quad (1)$$

式中: V_{in} 和 V_{DC} 分别为一级电路的输入电压和输出电压; T 为开关周期; I_{out} 为负载电流; t_{on} 为开关导通时间; L_1 为自耦变压器初级绕组的电感值。

一级电路的负反馈功能是通过脉冲宽度调制实现的。ARM电路系统将实时采集到的 R_1 和 R_2 中的阻值较小的 R_2 所分担的电压与 V_{def} 进行比较,通过PID控制算法程序调整内部时钟所产生的脉冲宽度调制(PWM)波形的占空比,并将调整后的PWM波输入Q的栅极,从而对图4中Q的通断时间进行实时调整,使 L_1 及 L_2 的充放电时间变化,产生直流高压电信号。

1.3 二级电路设计^[10]

二级电路示意图如图5所示。输入高侧场效应管 Q_H 和低侧场效应管 Q_L 的控制信号互为反相。如果控制 Q_H 和 Q_L 通断的栅极信号为PWM波,则输出端 V_{AC} 输出的波形为方波;如果控制 Q_H 和 Q_L 通断的栅极信号为正弦脉宽调制(SPWM)波,则输出端输出的波形为正弦波。电感 L 在电路中扮演着能量回收的角色(一方面将能量进行传递,另一方面将负载中未使用的能量传输至直流侧)。二极管 D_H 和 D_L 是负载向直流侧反馈能量的通道,同时起着使负载电流连续的作用,因此是反馈、续流二极管。当 Q_H 导通时,电感电流开始上升,当电流达到最高数值 I_{max} 时, Q_H 关断;当 Q_H 关断时, L 中的惯性电流通过 D_L 继续对容性负载 C_3 充电,由 Q_H 导致的 V_{AC} 的增加量用 ΔV_{ACH} 表示,即

$$\Delta V_{ACH} = \sqrt{V_{AC}^2 + \frac{LI_{max}^2}{C}} - V_{AC} \quad (2)$$

相反,当 Q_L 导通时,从节点 V_{AC} 移除电荷,当电流达到 $-I_{max}$ 时,关断 Q_L ;当 Q_L 关断时, L 中的惯性电流通过 D_H 对负载 C_2 充电,由 Q_L 导致的 V_{AC} 的增加量用 ΔV_{ACL} 表示,即

$$\Delta V_{ACL} = \sqrt{V_{AC}^2 - \frac{LI_{max}^2}{C}} - V_{AC} \quad (3)$$

式中: ΔV_{ACH} 是 Q_H 在一个开关周期内 ΔV_{AC} 的变化值; ΔV_{ACL} 是 Q_L 在一个开关周期内 V_{AC} 的变化值; I_{max}

是 L 的峰值电流; C 为压电致动器的电容值。

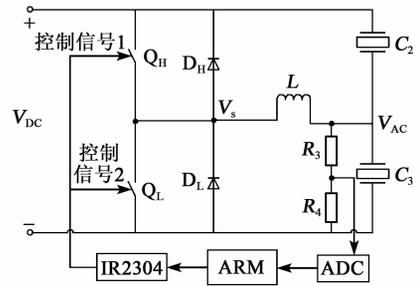


图5 二级电路示意图

通过适当的时间发出充电和放电脉冲序列,能够在 V_{AC} 处产生任意波形。由于在每个开关周期只有少量能量被传递,从而减轻了对最小电感大小的限制。

二级电路的负反馈功能是通过查表程序实现的。ARM控制模块将实时采集到的电阻 R_3 和 R_4 中阻值较小的 R_3 所分担的电压通过ADC转化成数字信号,然后输入控制模块中的ARM处理器,通过查表(表格内部存储了 Q_H 和 Q_L 的导通时间)程序,使用ARM控制内部时钟输出两路控制信号,通过IR2304驱动芯片,对图5中 Q_H 和 Q_L 通断时间分别进行调整,从而对交流高压电信号进行校准,最后将校准后的交流高压电信号经开关放大器驱动模块输出。

在ARM程序中加入 $5\mu s$ 的死区时间,防止 Q_H 和 Q_L 同时导通,导致电源瞬间短路从而损坏 Q_H 和 Q_L ,提高电路安全性。同时,为驱动 Q_H 和 Q_L ,采用IR2304芯片对控制信号1和2进行处理后输入 Q_H 和 Q_L ,使 Q_H 和 Q_L 能够正常开启和关断。

交流电压校准模块输出控制信号(PWM或SPWM波)的所有参数(频率、幅值以及占空比等)均可通过修改ARM程序进行自定义,所产生的控制信号前半周期和后半周期频率可以不同,从而产生所需劈裂信号,使压电陶瓷上、下振动频率不同,从而控制机器人,如微型机器人的扑翼拍打速度。

根据参数可以计算的导通时间:

$$t_{H-on} = \frac{LI_{max}}{V_{DC} - V_{AC}} \quad (4)$$

$$t_{L-on} = \frac{LI_{max}}{V_{AC}} \quad (5)$$

式中 I_{max} 为 V_{AC} 的函数。

与其他升压拓扑结构相比,此电路设计具有低功耗、高安全性、高电压及高灵活性的特点,并且很适用于小型化,拓扑结构的效率和制造性都很高。

2 压电驱动电路实验研究

2.1 压电驱动电路仿真

根据电路示意图,采用 Multisim14.0 软件分别对一、二级电路进行仿真,如图 6 所示。ARM 输出的控制信号使输出方波的脉冲源代替,采用高耐压低开启电压的 ZVN4424G 作为场效应管。

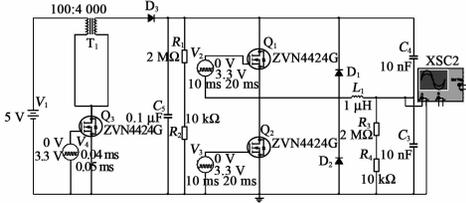


图 6 压电驱动电路仿真

在一级电路仿真中,一级电路需要输入 5 V 直流电压,在变压器匝数比达到 1 : 40 时,输出交流电压方波的峰值才能达到 280 V。

通过仿真,压电驱动电路输出信号波形接近于方波信号,频率为 50 Hz,占空比为 50%,最大幅值为 280 V,最小幅值为 0,如图 7 所示。

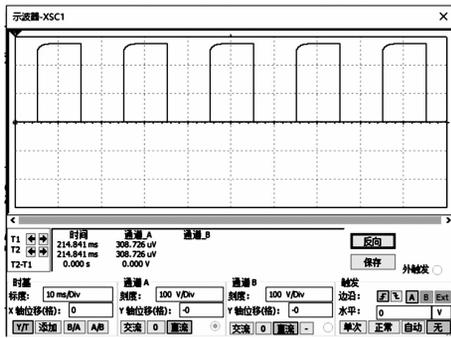


图 7 仿真输出信号

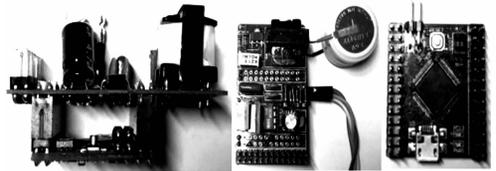
2.2 压电驱动电路实验

压电驱动电路系统供电电源采用三节 LIR2477 纽扣锂电池的串联组合,每节电池额定电压 3.6 V,可充电重复使用。电源通过分压电路,提供 3 个直流电压输出,分别为单片机最小系统板供电 3.3 V,电路输入信号 5 V 和半桥驱动芯片 IR2304 供电 10 V。

定制的变压器选用 EE19 骨架,高频磁芯作为线轴,匝数比定为 1 : 35,由 0.05 mm 的漆包铜线进行绕线。场效应管 Q 采用低阈值电压、高额定电压的 ZVN4424G。QH 和 QL 采用高额定电压的 IRF830 作为 MOS 开关管,通过 IR2304 芯片进行

驱动。

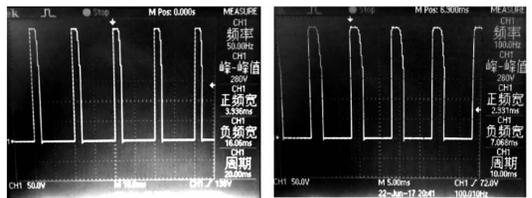
绘制上层电路板和 ARM 控制模块并打样,如图 8(a)所示。ARM 控制板与上层电路形成三维结构,上层电路(见图 8(b))为一、二级电路,下层电路为 ARM 控制模块如图 8(c)所示,这种三维结构阻隔了上层高频电路对下层电路 ARM 控制模块的影响,节省空间,提高系统的稳定性。



(a) 三维电路(上层+下层) (b) 上层电路 (c) ARM 控制模块

图 8 压电驱动电路系统板

电路输出信号的幅值、频率和占空比等参数可以在 ARM 控制模块的程序中根据需要自行修改。如将最大幅值调至 280 V,最小幅值为 0,占空比为 20%,频率为 50 Hz。一级电路输出 280 V 的高压直流电信号,二级电路在此基础上输出方波信号如图 9(a)所示。幅值参数不变,占空比为 30%,频率为 100 Hz,一级电路仍然输出 280 V 的高压直流电信号,二级电路在此基础上输出方波信号如图 9(b)所示。将最大幅值调至 200 V,最小幅值为 0,占空比为 50%,频率为 50 Hz,一级电路输出 200 V 的高压直流电信号,二级电路在此基础上输出正弦信号,如图 10 所示。



(a) 最大幅值为 280 V, 占空比为 20%, 频率为 50 Hz 的方波信号 (b) 最大幅值为 280 V, 占空比为 30%, 频率为 100 Hz 的方波信号

图 9 输出方波信号

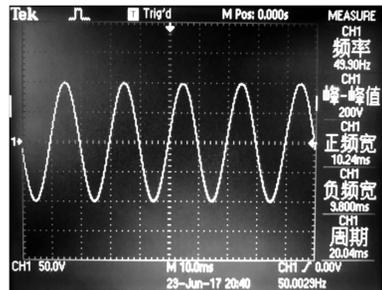


图 10 输出正弦波信号

由于压电陶瓷致动器属于容性负载,因此对压

电驱动电路系统进行电容负载实验测试。将输出交流信号幅值 V_{def} 的最大值设为 280 V(微扑翼飞行器的最优压电驱动信号最大值)、最小值为 0、频率为 50 Hz、占空比为 50% 的方波信号,调整 ARM 程序参数,负载一系列不同电容值的高压陶瓷电容进行实验。实测数值为实际测量的输出驱动信号幅值的最大值,误差率为 V_{max} 与 V_{def} 之间差值的绝对值与 V_{def} 的比。图 11 为不同电容负载下的输出信号最大幅值。由图可看出,负载情况下,当允许输出驱动信号误差小于 5% 时,负载最大电容值约为 20 nF。

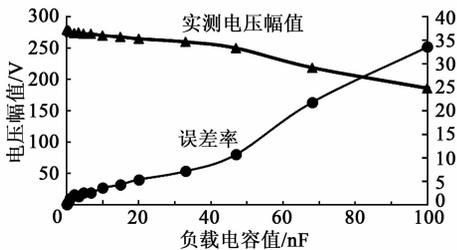


图 11 不同电容负载下的输出信号最大幅值

保持输入电压 5 V,电路分别负载 10 pF~20 nF 内的 18 个电容,通过程序调节频率和占空比,使保持输出交流电压信号最大幅值保持在 280 V 基本不变,测量输出功率与效率的曲线如图 12 所示。最优输出功率为 0.15~0.25 W,最高效率可达到 83%。

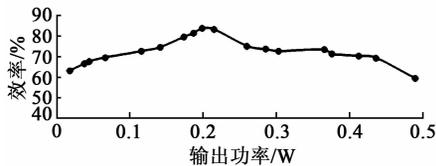


图 12 输出功率与效率曲线图

实验表明,压电驱动电路的一级电路可以输出任意幅值的高压直流信号,二级电路在此基础上输出高压交流信号,可以灵活地调节高压交流信号类型(方波或正弦波)、幅值、频率及占空比等参数,具有一定的带载能力。

3 结束语

本文提供了一种结构简单、输出稳定及可小型化的双级压电驱动电路系统。对电路的驱动要求与驱动方式进行了分析与讨论,在此基础上提出了电路系统的组成模块并将电路分为一、二两级进行设

计。提出了三维电路结构,节省了空间,加入了 PID 控制、死区控制以及查表反馈,大幅度提高了系统的安全性和稳定性。本文提供的压电驱动电路系统升压比最高可达到 70,并有产生高压交流信号(方波和正弦波时变输出信号)以及从负载回收能量的能力,具有应用在更丰富的场景下的潜力,如微型机器人和仿生机器人等。

参考文献:

- [1] HINES L, CAMPOLO D, SITTI M. Lifftoff of a motor-driven, flapping-wing microaerial vehicle capable of resonance[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2014, 30(1):220-232.
- [2] 陈文元,张卫平.微型扑翼式仿生飞行器[M].上海:上海交通大学出版社,2011:71-72.
- [3] HOLLAR S, FLYNN A, PISTER K S J. Solar powered 10 mg silicon robot [C]// Kyoto, Japan IEEE the Sixteenth International Conference on Micro-Electro-Mechanical Systems, 2003, 60:706-711.
- [4] ZOU Y, ZHANG W, ZHANG Z. Lifftoff of an electromagnetically driven insect-inspired flapping-wing robot [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 32(5): 1285-1289.
- [5] KOMBLUH R D. Electroelastomers: Applications of dielectric elastomer transducers for actuation, generation, and smart structures[J]. Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies, 2002, 254:254-270.
- [6] CAMPOLO D, SITTI M, FEARING R S. Efficient charge recovery method for driving piezoelectric actuators with quasi-square waves [J]. IEEE, 2003, 50(3): 237-244.
- [7] STELTZ E, SEEMAN M, AVADHANULA S. Power electronics design choice for piezoelectric microrobots [J]. IEEE, 2007, 6:1322-1328.
- [8] WOOD R J, STELTZ E, FEARING R S. Optimal energy density piezoelectric bending actuators[J]. Sensors & Actuators a Physical, 2005, 119(2):476-488.
- [9] 王兆安,刘进军.电力电子技术[M].北京:机械工业出版社,2009:123-126.
- [10] PRESSMAN I A, BILLINGS K, MOREY T. Switching power supply design[M]. 王志强,肖文勋,虞龙,译.北京:电子工业出版社,2013:63-68.