文章编号:1001-5078(2017)10-1305-05

·电子电路·

基于 FPGA 的光弹调制器用高压驱动电路设计

罗欣玮^{1,2},王志斌²,李克武^{1,2},梁 赛^{1,2},张敏娟^{1,2}

(中北大学信息与通信工程学院,山西太原030051;中北大学山西省光电信息与仪器工程技术研究中心,山西太原030051)

摘 要:为满足光弹调制器对高电压、高稳定和精确易控制的驱动电压需求,设计了一种基于 FPGA 控制、全桥结构 LC 谐振升压的高压驱动电路。该电路与传统的光弹调制器驱动控制电 路相比,大幅降低了直流电源的电压输入要求,通过 DDS 调节方波频率来控制光弹调制器工 作频率,调节方波占空比来控制输出电压。该电路应用于光弹调制器实验,结果表明在光弹调 制器的谐振频率下,外部直流电压为5 V 时,方波占空比范围为0~50%,对应电压峰 - 峰值 可调节范围为0~840 V。电路具有稳定可靠、操控方便、带负载能力较强等优点,能够实现光 弹调制器驱动电压实时精确的控制。

关键词:光弹调制;高压驱动;LC 谐振;全桥结构

中图分类号:R730.58 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2017.10.022

Design of high voltage driving circuit based on FPGA for photoelastic modulator

LUO Xin-wei^{1,2}, WANG Zhi-bin², LI Ke-wu^{1,2}, LIANG Sai^{1,2}, ZHANG Min-juan^{1,2}

(1. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

 Engineering Technology Research Center of Shanxi Province for Opto-electric Information and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to meet the requirement of high voltage, high stability, accuracy and easy control driving voltage for photoelastic modulator, a high voltage driving circuit based on FPGA control and full bridge LC resonant boost is designed. Compared with the traditional photoelastic modulator driving control circuit, it reduces the DC power supply input voltage, controls the photoelastic modulator frequency through DDS square wave frequency, and adjusts square wave duty cycle to control the value of output voltage. The results of photoelastic modulator experiment show that the square wave duty cycle range of $0 \sim 50\%$ corresponding to peak voltage can be adjusted in the range of $0 \sim 840$ V at the resonant frequency of the photoelastic modulator when external DC voltage is 5 V. The circuit has the advantages of reliable, easy control, heavy load capacity, and it can realize the real-time and accurate control of the driving voltage of photoelastic modulator.

Key words: photoelastic modulator; high voltage driving; LC resonant; full bridge

基金项目:国际科技合作项目(No. 2013DFR10150);国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 61505180);山西省青年科 技研究基金项目(No. 2015021084)资助。

作者简介:罗欣玮(1987 -),男,硕士研究生,研究方向为光弹调制器驱动控制。E-mail:s1505017@ st. nuc. edu. cn 通讯作者:王志斌(1966 -),教授,研究方向为物流光学和光电技术。E-mail:wangzhibin@ nuc. edu. cn 收稿日期:2017-02-22;修订日期:2017-04-05

1 引 言

光弹调制技术是一种基于光弹效应的光学偏振 调制技术。光弹调制器谐振工作时,压电晶体对光 弹晶体加以周期性变化的机械应力,驱动并维持光 弹晶体振动,并产生周期性变化的双折射,实现对入 射光的相位进行调制^[1-2]。现阶段常用的光弹调制 器有长棒状一维和八角对称结构二维光弹调制器。 光弹调制器具有较宽的光谱窗口(从深紫外到太赫 兹波段)、工作频率(一般为40~80 kHz)高、调制纯 度和效率比较高、通光孔径和面积比较大等^[3]。鉴 于光弹调制器的这些优势,光弹调制器已被广泛应 用于 Stokes 矢量分析、线性双折射检测、椭偏参量测 量、Muller 矩阵分析、偏振成像和偏振光谱测量等 领域^[4-8]。

高压驱动器是使光弹调制器处于谐振状态的关键所在,高压驱动器的输出电压越高,光弹调制器产生的光程差越大。输出频率的精度越高,光弹调制器工作状态越稳定。传统的光弹调制高压驱动器,存在驱动能力不强,输出电压调节需要外部可调电源调节输入,电压频率调节需要外接信号发生器等不足^[9-10]。

针对光弹调制器的特点和现有高压驱动的不 足,本文设计了基于 FPGA 的全桥结构高压驱动电 路,可在固定的低输入直流电压下,具有可程控输出 的交流高电压,以及带负载能力强的特点。利用 DDS(直接数字频率合成器)技术,输出频率、占空 比、相位可调的方波给谐振电路,通过改变方波的占 空比来调节谐振电路输出交流高压大小,改变方波 频率调节谐振电路频率,使电路工作在光弹调制器 谐振频率下,输出高精度,高稳定性,可调节的高压 交流驱动信号。

2 光弹调制原理

高压驱动电路产生的交流高电压驱动压电石英 晶体谐振,周期性的振动带动粘合在压电石英晶体 上的光弹晶体振动产生周期性的形变,因此晶体的 相互垂直的两个方向折射率也会产生周期性的变 化。当光通过光弹晶体后就会产生光弹效应。

光通过光弹晶体的互相垂直的两个偏振分量的 光程差为^[11]:

$$\delta_{(t)} = \delta_0 \sin \omega t \tag{1}$$

式中, δ_0 为光程差的幅值,其中 $\delta_0 = (2\pi d/\lambda)kV_m$, d为光弹晶体的厚度, λ 为光的波长, V_m 为压电石英 晶体上的电压峰 – 峰值,k是关于压电石英的机电 系数、光弹晶体的应力光学常数和两者之间耦合的 效率相关系数。



图 1 光弹调制器的工作原理图 Fig. 1 Schematic diagram of photoelastic modulation experiment

对于一个研制好的光弹调制器,参数 *d*,λ 和 *k* 是确定的,此时相位差只和驱动电路提供的电压 峰 - 峰值 *V_m* 有关。因此,要获得较大相位差,必须增 大高压驱动电路产生的电压值。

3 高压驱动电路组成及原理

高压驱动电路主要由三部分构成,分别为 DDS 方波生成电路、全桥逆变电路和谐振电路,其 原理如图 2 所示。压电石英的两侧都镀有一层金 膜,在膜层上焊接导线引出后连接到高压驱动输 出端,由于压电石英具有逆压电的特性,因此高压 驱动的输出交流高压越高,压电晶体的形变也会 越大。压电石英晶体与光弹晶体用胶粘在一起, 所以给光弹晶体的应力也就越大,从而使其产生 机械形变增大^[12]。通过对高压驱动输出交流高压 大小的控制,就可以调节光弹调制器产生的光程 差的大小,满足光弹调制器的调制需求。





3.1 DDS 方波生成电路

DDS 方波生成电路的作用是通过 DDS 产生频 率、相位、占空比可调节的方波信号,为全桥逆变电 路中的全桥控制器 UBA2037 提供时钟信号。DDS 方波的生成通过 FPGA 来完成,FPGA 选用 ALTERA 公司的 Cyclone III EP3C16Q240C8N。

DDS 输出方波频率的公式为:

$$f_o = \frac{Mf_s}{2^n} \tag{2}$$

式中, f_a 为 DDS 输出方波的频率; M 为频率控制字; f_s 为系统时钟频率; n 为频率控制字的位宽。

由公式(2)可知,为了使 DDS 的输出方波具有 高精度、高稳定度,频率控制字采用 32 位的位宽, FPGA 时钟频率采用 50 MHz,通过 FPGA 内部的锁 相环再将 50 MHz 的系统时钟倍频到 200 MHz^[13]。 如图2 所示频率控制字在 200 MHz 时钟的控制下进 行累加,累加后的结果存储在相位寄存器内,相位累 加器的值和相位控制字相加得到相位地址,相位地 址和占空比控制字做比较,相位地址大于占空比控 制字输出高电平,反之则输出低电平,从而得到所需 的方波。所以通过改变频率控制字、相位控制字、占 空比控制字,就可以改变输出方波的频率、相位、占 空比。

3.2 全桥逆变电路

全桥逆变电路作用是把电源提供的直流电压转 变成正负交替的方波电压,来驱动谐振电路工作。 如图 3 所示,全桥控制器芯片 UBA2037 把 DDS 产 生的方波信号转变成四路方波信号,用来驱动四个 N 沟道金属氧化物场效应管两两依次导通,从而把 5 V 的直流输入电压变成 + 5 V 和 - 5 V 交替的交 流方波电压^[14]。

具体过程为当全桥控制芯片 UBA2037 的外部 时钟引脚接收到 DDS 输入的方波信号为低电平时, UBA2037 的引脚 GHL 和 GLR 输出高电平,同时引 脚 GHR 和 GLL 输出低电平,从而使高左开关管 HL 和低右开关管 LR 处于导通状态,高右开关管 HR 和 低左开关管 LL 处于截止状态,充电回路导通,电流 依次从电源、HL 开关管、谐振电路、LR 开关管流过 为谐振电路充电。当 UBA2037 的外部时钟引脚接 收到 DDS 输入的方波信号为高电平时,UBA2037 的 引脚 GHL 和 GLR 输出低电平,同时引脚 GHR 和 GLL输出高电平,从而使高左开关管 HL 和低右开 关管 LR 处于截止状态,高右开关管 HR 和低左开关 管 LL 处于导通状态,放点回路导通,电流依次从电 源、HR 开关管、谐振电路、LL 开关管流过为谐振电 路放电。所以在 DDS 方波信号的控制下在产生 +5 V和-5 V 交替的交流方波电压,为谐振电路充 放电。由于谐振电路输出电压和其充电和放电时间 有关,充电和放电时间由输入方波占空比来控制,因 此通过对 DDS 输出方波的占空比调节就可以改变 谐振电路的充放电时间,进而达到精确控制高压驱 动的输出电压值。



3.3 谐振电路

在高压驱动电路中谐振电路为核心组成部分,完成波形转换和电压放大两个功能,输入占空比可调节的方波信号后可直接输出大小可控的交流高电压,省去了传统的高压驱动电路中独立的波形转换电路和功放电路,提高电路效率和可靠性。在本电路中电感 L 和光弹调制器的工作频率 是确定的,通过调节银云母电容的容值 C 使谐振电路的容抗和感抗相等,此时电路工作在谐振状态^[15],即:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \tag{3}$$

电路工作在谐振状态下的频率、Q 值和输出电 压根据下式得出:

$$\begin{cases} f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \\ Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{1}{\omega RC} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \\ U_0 = QU_i \end{cases}$$
(4)

式中,f为谐振频率; ω 为电路谐振角频率;Q为品质因数;L为电感;C为电容;R为电阻; U_a 为输出电压;

激光与红外

 U_i 为输入电压。

谐振电路工作原理为:压电石英晶体和电容并 联后串联电感器,组成 LC 串联谐振电路。由全桥 逆变电路输出的可调节占空比的 +5 V 和 -5 V 交 替的交流方波电压驱动谐振电路,省去了额外的波 形转换电路,通过改变方波占空比,控制谐振电路电 容和电感器的充放电时间来改变谐振电路的输出高 压值。因为电路工作在谐振状态,只需要提供很小 的能量就可以维持稳定的工作性能,降低了对电源 功率的要求^[16]。谐振电路如图 4 所示。



为了进一步提高高压驱动电路的效率减少损耗,电感器和电容器的选择至关重要,通过大量的实验测试,电感器选择定制的金属屏蔽封装的5 mH 电感,用来提高 Q 值、降低干扰,电容器选择高频性好、温度稳定性好、损耗极小的耐高压银云母电容。

4 实验结果及数据分析

为了验证本文设计电路方案的可行性,并测试 了高压驱动电路在固定的低输入直流电压下,输出 交流电压大小和 DDS 输出方波占空比之间的关系。 按原理图 1 搭建了一整套用于实验测试的系统,光 弹调制器自身的谐振频率为 50.3 kHz,高压驱动电 源输入的直流电压为 5 V,DDS 电路输出方波占空 比调节范围为 0 ~ 50%。具体测试方法为:调节方 波占空比从 0 开始到 50% 结束,步进为 5%,记录方 波在不同占空比下,高压驱动输出电压的峰 – 峰值。 以占空比为 25% 时的实验结果为例,如图 5 所示。



图 5 方波占空比为 25% 时的输出电压和经光弹调制后的信号 Fig. 5 The output voltage of the square wave duty cycle 25% and the signal modulated by photoelastic modulator

图 5 中显示的波形是在方波占空比调节到 25%时在示波器上截取的,其中通道 1 为衰减 10 倍 后的高压驱动输出电压、通道 2 为 DDS 输出的 25% 占空比的方波、通道 3 为经过光弹调制器调制后得 到的信号。

图 6 为方波占空比在 0~50% 步进 5% 时,测得 的高压驱动输出的交流电压峰 - 峰值,曲线为根据 测得的结果拟合得出的。从中可看出,方波占空比 在 10% ~35%之间电压变化基本线性,占空比变化 0.1% 对应电压约为 2.4 V。占空比在 0~10% 和 35% ~50% 之间和电压关系为非线性。方波在占空 比 50% 时电压峰 - 峰值达到最大值 840 V。



5 结 论

实验结果表明本文设计的光弹调制器用高压谐 振电路可以在 5 V 低输入直流电压下,通过 FPGA 改变 DDS 输出方波频率、占空比精确控制输出电压 频率和输出高压交流电峰峰值大小(0~840 V),并 且升压过程平稳可靠,带负载能力强,脱离了传统高 压驱动需要外接信号源、可调节输出电压电源和独 立的波形转换电路,电路结构简单稳定。从而使光 弹调制器产生的光程差大小可控制,满足光弹调制 的高精度,高稳定和易控制的需要。

参考文献:

- [1] Zhang R, Li K, Chen Y, et al. Ultra-high-speed spectropolarimeter based on photoelastic modulator [J]. Applied optics, 2016, 55(30):8426-8432.
- [2] Ke-wu L, Zhi-bin W, Li-ming W, et al. 45° double-drive photoelastic modulation [J]. Journal Of The Optical Society Of America A, 2016, 33(10), 2041 – 2046.
- [3] Zhang R, Wen T, Li K, et al. A high retardation-amplitude photoelastic modulator study for an ultra-high speed infrared spectroscopy remote sensing measurement system[J].

Measurement Science and Technology, 2016, 27 (10):107002.

- [4] Han C Y, Chao Y F. Photoelastic modulated imaging ellipsometry by stroboscopic illumination technique[J]. Review of scientific instruments, 2006, 77(2):023107.
- [5] Satozono H. Elimination of artifacts derived from the residual birefringence of a phase modulator for circular dichroism by retardation domain analysis[J]. Optics letters, 2015,40(7):1161-1164.
- [6] Law W C, Markowicz P, Yong K T, et al. Wide dynamic range phase-sensitive surface plasmon resonance biosensor based on measuring the modulation harmonics [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2007, 23(5);627-632.
- [7] Liu Y, Jones G A, Peng Y, et al. Generalized theory and application of Stokes parameter measurements made with a single photoelastic modulator[J]. Journal of applied physics, 2006, 100(6):063537.
- [8] Alali S, Gribble A, Vitkin I A. Rapid wide-field Mueller matrix polarimetry imaging based on four photoelastic modulators with no moving parts[J]. Optics letters, 2016, 41(5):1038-1041.
- [9] WEI Haichao, ZHANG Jilong, WANG Zhibin, et al. Power supply technology and its application [J]. Power Supply Technologies and Applications, 2012, 38(6):68-71. (in Chinese)
 魏海潮,张记龙,王志斌,等. 光弹调制压电晶体驱动

控制器的设计[J]. 电源技术与应用, 2012, 38(6): 68-71.

[10] WANG Guoliang, LI Xiao, WANG Zhibin, et al. Design of high voltage resonant circuit based on the photoelastic modulator[J]. Laser & Infrared, 2014,44(6):668-671. (in Chinese)

王国梁,李晓,王志斌,等.光弹调制高压谐振电路设

计[J]. 激光与红外,2014,44(6):668-671.

- [11] ZHOU Jun, SU Guiying, LI Guohua. A new method for calibration of photoelastic modulator [J]. Acta Photonica Sinica,2001,30(1):81-85. (in Chinese)
 周军,苏桂英,李国华. 光弹调制器定标新方法[J]. 光子学报,2001,30(1):81-85.
- [12] Li K W, Wang L M, Zhang R, et al. Modulation axis performs circular motion in a 45° dual-drive symmetric photoelastic modulator [J]. Review of Scientific Instruments, 2016,87(12):123103.
- [13] YU Ling, Li Wei, Yang Xuefeng, et al. Driving power design for piezoelectric ceramic actuator based on FPGA and DDS[J]. Power Supply Technology And Its Application, 2010,36(12):65-68. (in Chinese)
 余凌,李威,杨雪锋,等. 基于 FPGA 和 DDS 的压电陶 瓷驱动器驱动电源设计[J]. 电子技术应用,2010,36 (12):65-68.
- [14] LIU Xuanchao, LIU Xiaolong. Application of the UBA2032T full-bridge driver chip in PWM[J]. Electronic Sci. & Tech., 2010,23(2):42-45. (in Chinese) 刘选朝,刘小龙. UBA2032T 全桥驱动芯片在 PWM 中 的应用[J]. 电子科技,2010,23(2):42-45.
- [15] CHEN Youhua, ZHANG Jilong, WANG Yanchao, et al. Single crystal photo-elastic modulator based on lithium niobate piezoeletric and photo-elastic effect[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11):192 - 197. (in Chinese) 陈友华,张记龙, 王艳超,等. 基于铌酸锂压电弹光双 效应的单晶体弹光调制器[J]. 光学学报, 2012, 32 (11):192 - 197.
- [16] WEI Haichao, ZHANG Jilong, CHEN Youhua, et al. Research on impedance matching features of piezoelectric crystal for photoelastic modulated interfermeter[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2013, (2):185-188.