

## 用于电磁超声测温的脉冲激励电源研制

郭亚飞, 王高, 魏艳龙, 梁海坚, 石佳, 周汉昌

(中北大学电子测试技术国防科技重点实验室, 太原 030051)

**摘要:** 针对电磁超声测温需求, 利用串联的功率 MOSFET 为开关器件, 设计一种同步驱动 MOSFET 的新型高速高压脉冲激励电源。该电源通过现场可编程门阵列 (FPGA) 产生脉冲触发信号, 经专用驱动电路驱动功率 MOSFET 实现幅值 0~1.5 kV、脉冲频率 10 Hz~1.5 kHz、脉冲宽度 3~30  $\mu$ s 及脉冲个数在 1~100 的内高压的精确控制。实验数据表明, 该电源系统设计合理, 上升时间达到纳秒级, 基本能满足电磁超声应用要求。

**关键词:** 脉冲电源; 同步驱动; MOSFET; 光纤隔离; FPGA

**中图分类号:** TM89 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)05-0099-05

## Development of Pulse Excitation Power for Electromagnetic Ultrasonic Thermometry

GUO Ya-fei, WANG Gao, WEI Yan-long, LIANG Hai-jian, SHI Jia, ZHOU Han-chang

(North University of China, National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Aiming at the requirements of electromagnetic ultrasonic temperature test, we designed a new type of high-speed high voltage pulse power by using the power MOSFET as switching device, which is based on the theory of synchronous driving MOSFET. The power system uses the FPGA for producing the pulse trigger signal and the dedicated driver module of power MOSFET for driving. It can achieve the precise control that the pulse voltage is of 0~1.5 kV, the pulse frequency of 10 Hz~1.5 kHz, the pulse width of 3~30  $\mu$ s and the pulses number of 1~100. Experimental data showed that the design of power system is reasonable with the time of rising edge reaching nano scale, which can meet the requirement of electromagnetic ultrasonic applications.

**Key words:** pulse power; synchronous drive; MOSFET; fiber isolation; FPGA

### 0 引言

在航空航天及国防建设中, 各类先进发动机、高速飞行器、高速侵彻弹药等武器装备的设计优化和火力性能评价, 急需超高温条件下温度等参数的测试技术<sup>[1]</sup>。电磁超声检测技术在航空航天、国防和工业生产中应用广泛, 该技术是一种无需耦合剂的检测方法, 它利用电磁感应涡流原理激发超声波, 需要高压窄脉冲施加在激励线圈上, 从而产生交变电磁场, 激励超声波<sup>[2]</sup>。作为电磁超声检测系统中的重要部分, 电磁超声脉冲电源决定了检测的性能。

作为多学科边缘交叉技术的应用, 激励电源主要涉及了自动控制、电磁技术和电力电子器件等多学科。国

外将开关器件用于制作脉冲电源的技术已经十分成熟<sup>[3]</sup>。1998年, 美国劳伦斯里弗莫尔实验室设计的 ARM-II 用于感应加速器, 每个调制器由 1300 多个场效应管组成, 28 层串联的 MOSFET, 其输出电压可达 15 kV, 电流 4.8~6 kA, 脉宽 200 ns 到 2  $\mu$ s 可调, 最高重复频率 2 MHz; 日本 KEK 的 12 GeV-PS 感应同步加速器, 其功率源由一个全 MOSFET 开关电路组成, 4 个桥臂中, 每个都是由 7 个 MOSFET 串联, 输出电压幅度是 2.5 kV, 电流 18 A, 上升时间和下降时间均为 30 ns<sup>[4]</sup>。根据电磁超声测温的需求, 本文设计了一种高速激励电源, 它采用功率 MOSFET 作为开关器件。高压脉冲波形在一定范围内可以实现随脉冲发生器的设置而改变, 符合电磁超声理论和实验研究的需求。

### 1 脉冲电源原理及实现方法

#### 1.1 脉冲电源原理

作为直流电源, 脉冲电源的工作原理是: 首先通过

收稿日期: 2015-10-10

修回日期: 2016-01-12

基金项目: 国家自然科学基金(11304289)

作者简介: 郭亚飞(1990—), 男, 河南焦作人, 硕士生, 研究方向为超高温环境下瞬态温度参数测试。

储能元件,使得一次能源拥有相当的能量;其次,向中间存储器脉冲整形系统放电;然后能量通过存贮、压缩、变换等复杂过程之后,脉冲电源就形成了。

### 1.2 直流斩波

脉冲电源的实现方法可分为 3 种:1) 利用储能元件充电放电的形式获得;2) 通过逆变的方式从直流获得;3) 通过直流斩波方式获得。相比来说,方法 1) 是将开关信号直接作用在直流环节,控制回路放电,该方法没有单独的控制信号产生单元,结构较为简单,可以得到高压窄脉冲,但是其波形较难控制,各类参数较难调整;方法 2) 是将直流逆变成频率脉冲,但是这种方法具有比较复杂的结构,并且脉冲的占空比、频率、幅值不易调整;方法 3) 是把信号产生与直流环节分离,使得其具有控制方便、脉冲波形好、参数易调节等诸多优点<sup>[5]</sup>。

直流斩波法是利用电力电子器件的高速开关的特性,通过调整器件的开关频率,或者调整直流电断开与接通时间的比值,得到预期的输出参数。电力电子器件单个工作周期为  $T_s$ , 开时间为  $T_{ON}$ , 关时间为  $T_{OFF}$ , 即

$$T_s = T_{ON} + T_{OFF} \quad (1)$$

$T_{ON}$  与  $T_s$  的比值为占空比  $D$ , 即

$$D = T_{ON} / T_s \quad (2)$$

## 2 高压脉冲电源系统

### 2.1 高压脉冲电源结构

本文依据直流斩波法设计了脉冲激励电源,其原理如图 1 所示。

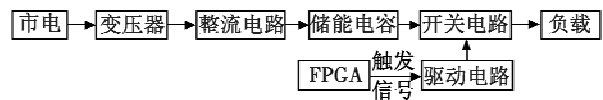


图 1 高压脉冲电源原理图

Fig. 1 Schematic diagram of high voltage pulse power

首先通过变压器把市电升压,然后通过整流电路将升压后的市电整流为高压直流电,该高压直流电再向储能元件充电。由 FPGA 构成的触发器发出触发信号,通过光纤传送到电力电子器件的驱动电路,控制开关电路的开通与关断,将高压直流电斩成高压脉冲输出给负载。

### 2.2 主电路

脉冲激励电源主电路如图 2 所示。

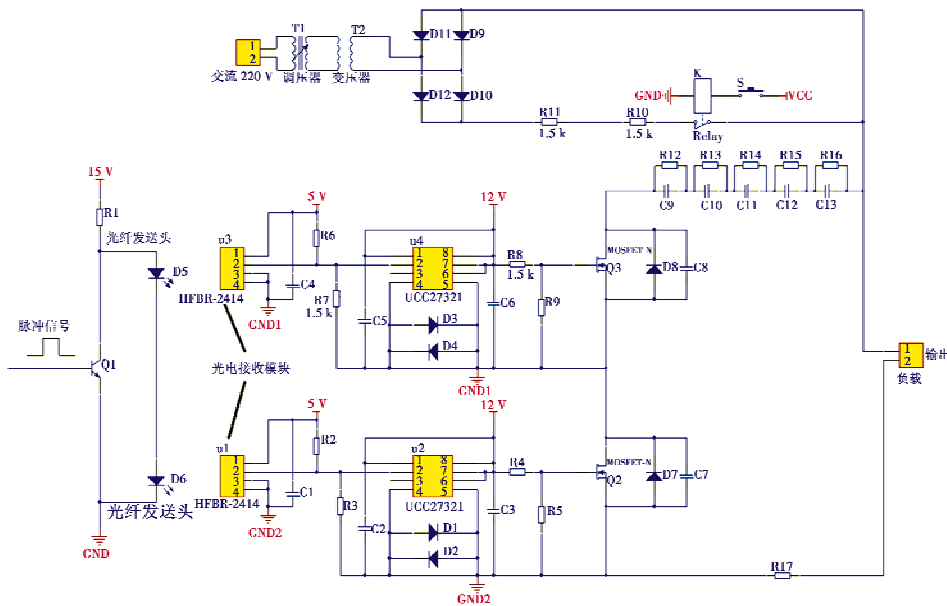


图 2 主电路图

Fig. 2 The main circuit diagram

市电通过调压器调压后再经变压器升压,通过整流桥后对电容器组进行充电。充电完成后,开关开启对负载放电。充电电容器组两端并联加入一个高压真空继电器 K1,待电源使用完毕后,可以将电容中残留的电量耗尽。将电阻与电容器组中的每个电容并联,可以使得电容在充电过程中电压均等。

### 2.3 开关器件选择

在该可控高速高压脉冲电源中,脉冲电源的输出

质量直接由开关器件的选择决定。其中常用的是绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 和 MOSFET,它们都属于电压驱动型器件,具有驱动功率小,安全工作区宽等优点<sup>[6-7]</sup>。而 MOSFET 的显著特点是其漏极电流由栅极电压控制,所以其驱动电路简单,驱动功率小;并且 MOSFET 的开关频率是目前频率最高的电力电子器件。为使可控高速高压脉冲电源的输出波形的上升、下降沿控制在 30 ns 左右,本文采用功率 MOSFET 作为

开关器件。

本文的调制开关是使用2个相同的功率 MOSFET 通过串联的方式构成。功率 MOSFET,漏源击穿电压 1000 V,稳态电流 18 A,脉冲电流 60 A,2 个功率 MOSFET 串联后击穿电压达到 2000 V,该电源放电时,电容的脉冲电压最大为 1800 V,所以该调制开关完全满足要求。开关器件在串联使用时,需要解决均压的问题。2 个功率 MOSFET 的等效输出一致性通过并联均压电容解决。

### 2.4 控制与驱动电路

#### 2.4.1 控制电路

由于脉冲发生回路与控制电路的工作电压相差比较大,前者的工作电压在 1.5 kV 左右,而后者仅工作于 10~20 V 的低压下。因此需要两者进行电气隔离,否则会造成触发装置的损坏,开关器件也将无法工作。光纤隔离技术因其光发射与接收器件的独立性从而具有更高的电压隔离能力和更远的传输距离,另外,考虑到本电源的应用背景,光纤隔离可以使控制更为方便。因此,本文采用光纤隔离技术作为脉冲发生回路和控制电路的高低电压隔离手段。

将光纤发送头两端分别接在三极管的发射极和集电极。当三极管基极输入高电平时,发射极和集电极导通,将光纤发送头短路,即没有光信号输出,当基极输入低电平时,三极管截止,光纤发送头导通,发出光信号<sup>[8-9]</sup>,三极管的控制信号由脉冲发生器给出。

系统中采用美国安捷伦公司的光纤发送头,其上升与下降时间分别为 1.30 ns 和 3.08 ns。并且发送头和三极管并联的形式与串联的形式相比,可以极大地消除发送信号的毛刺<sup>[10]</sup>。由于电路中存在分布电感,若发送头与三极管串联,在三极管开通时会产生震荡,使光纤发送头误导通,在关断时会在开关器件两端产生相对的高压。同样由于分布电感的存在,并联形式可以在三极管关断时加快光纤发送头的导通,而开通时由于光纤发送头被短路所以不会受到影响<sup>[11]</sup>。当光纤接收头接收到光信号时就为功率 MOSFET 驱动电路提供了控制输入信号。

#### 2.4.2 驱动电路

MOSFET 驱动电路采用 UCC27321 集成芯片。UCC27321 能输出 9 A 的峰值电流,并且能够快速驱动功率 MOSFET,当负载在 10 nF 时,UCC27321 输出脉冲的上升与下降时间仅为 20 ns。

本文开关器件由 2 个功率 MOSFET 串联构成,当开关器件串联时,2 个器件的控制信号必须独立给出,为实现波形要求,2 个器件的控制信号还必须具有良好的同步性。光纤发送电路由 2 个光纤发送头串联一起,电流通过使其发光,极大地提高了其同步性。

同时,由于采用了安捷伦公司的光纤发送头,两光纤发送头一致性较好且不同步时间小于 1 ns。

同步驱动电路如图 3 所示。2 个功率 MOSFET 不共地,驱动芯片供电直流电源为悬浮地。

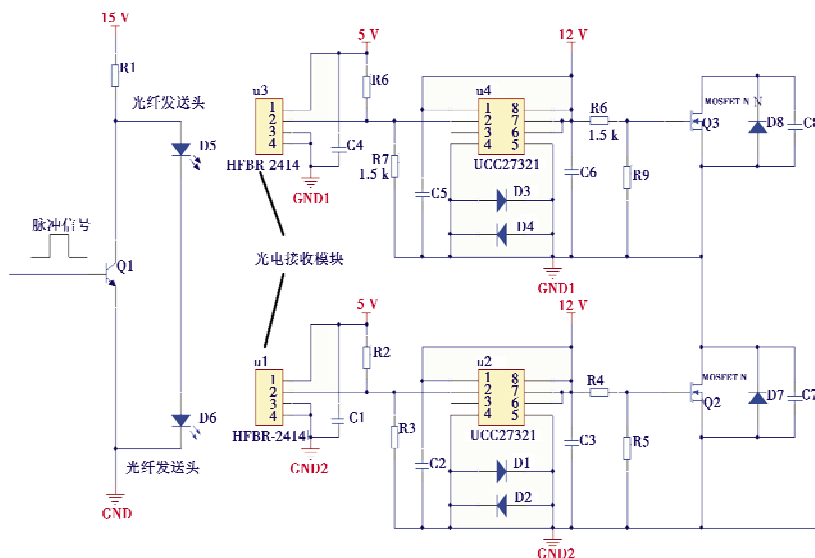


图3 同步驱动电路图

Fig. 3 Schematic diagram of synchronous driving circuit

### 2.5 脉冲发生器

单个脉冲周期分为两部分,高电平持续时间与低电平持续时间。通过采用 2 个计数器来控制占空比的方式改变周期<sup>[12]</sup>,计数器采用可并行加载初始值的 N

位减法计数器。当设定的高电平时间给第 1 个计数器赋值后程序开始,当计数器到零时自动停止并启动第 2 个计数器。第 2 个计数器当中赋值为低电平时间,当第 2 个计数器到零时,自动停止。此时,完成了一个

完整的脉冲控制信号,即完成了一个完整的脉冲。其流程如图4所示。

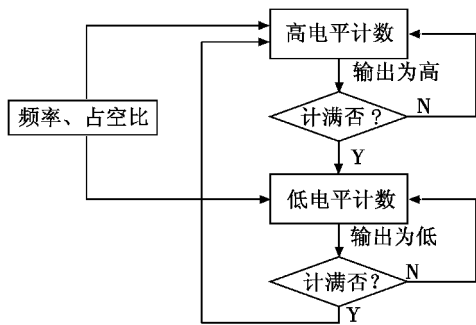


图4 程序流程图

Fig.4 Flow chart of the program

在确定了脉冲的频率宽度和每次作用的个数后,通过 FPGA 上的按键实现所需要的触发信号,此触发信号经光纤传输到功率 MOSFET 专用驱动模块的输入并输出控制功率 MOSFET。

### 3 实验

#### 3.1 串联驱动实验

保障功率 MOSFET 串联能够工作的关键是功率 MOSFET 具有良好的驱动同步性。图5所示为实际测量的2个MOSFET的驱动波形。

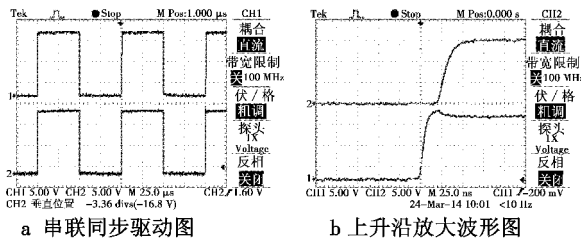


图5 2个MOSFET的驱动波形图

Fig.5 Two MOSFETs' driving waveform

从波形中可以看到驱动同步性比较一致,波形放大后,其不同步性相差小于25 ns,至于不同步时间小于多少,开关器件才能串联工作,取决于驱动下2个开关器件上的动态均压情况,如果没有因为驱动的不同步而引起在开通或关断瞬间的过电压情况出现,则可认为同步性良好,可以串联工作。

#### 3.2 脉冲电源实验

用脉冲激励电源激励超声波,对负载为23 μH和135 μH的电感线圈分别试验。图6a为负载23 μH电感线圈脉冲波形,脉宽为3 μs,电压幅值为900 V。图6b为负载135 μH电感线圈脉冲波形,脉宽为30 μs,电压幅值为1.34 kV,基本满足电磁超声激发要求,可以进行超声实验。但是电源输出存在一定震荡,下一步改进电源性能,减小震荡。

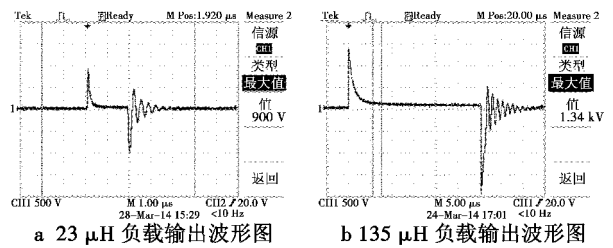


图6 线圈负载波形图

Fig.6 Waveform of output with coil load

### 4 结论

综上所述,采用光纤发送接收头配合功率 MOSFET 串联这种技术路线,有效地解决了功率 MOSFET 驱动的不同步性问题,利用 FPGA 制作的脉冲控制器可准确控制脉冲电源的脉宽、频率及脉冲个数,在一定范围内可以实现高压脉冲波形随脉冲发生器的控制,能够满足电磁超声理论和实验研究的要求,同时大大降低实验成本,且结构简单。

#### 参考文献

- [1] 李杨,李志敏,熊兵,等. 航空发动机涡轮叶片温度测量技术现状与发展[C]//中国科学技术协会:航空发动机设计、制造与应用技术研讨会,2013:1-5. (LI Y, LI Z M, XIONG B, et al. Present situation and development of temperature measurement technology of aero-engine turbine blade [C]//China Association for Science and Technology, Aircraft Engine Design, Manufacturing and Application Technology Conference, 2013:1-5.)
- [2] 陈鹏,韩德来,蔡强富,等. 电磁超声检测技术的研究进展[J]. 国外电子测量技术,2012,31(11):18-25. (CHEN P, HAN D L, CAI Q F, et al. Research progress in electromagnetic acoustic testing [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2012, 31(11):18-25.)
- [3] 高然. 输出串联型高压脉冲电源的研制[D]. 成都:西南交通大学,2013. (GAO R. Development on module-casacaded high-voltage pulse generator [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.)
- [4] TORIKAI K, ARAKIDA Y, NAKAMURA E, et al. Induction system for a proton bunch acceleration in synchrotron [C]//Proceedings of Particle Accelerator Conference, Knoxville, Tennessee, 2005:1398-1400.
- [5] 高艳丽,孙阳,刘迪. 基于 DSP 的直流斩波电源的设计[J]. 自动化与仪器仪表,2012(4):78-80. (GAO Y L, SUN Y, LIU D. A design of a based on DSP for core step-

- down DC chopper power supply [J]. Automation & Instrumentation, 2012(4):78-80.)
- [6] 余琳. 用于高压脉冲电场杀菌的 IGBT 串联型高压脉冲发生器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012. (YU L. High-voltage pulse generator based on series-connected IGBT for Pulsed Electric Fields (PEF) sterilization[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.)
- [7] 郭翔, 江磊, 范青. 基于 MOS 管串联开关的高压脉冲电源设计[J]. 电源学报, 2013(1):121-124. (GUO X, JIANG L, FAN Q. Design of high voltage pulse power supply based on MOSFET series switch[J]. Journal of Power Supply, 2013(1):121-124.)
- [8] SHMILOVITA D, SINGER S. Pulsed power generation by means of transmission lines [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(1):221-230.
- [9] 丁道宏. 电力电子技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 1992. (DING D H. Power electronic technology[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1992.)
- [10] LEVI E, ZABAR Z, BIRENBAUM L. Basic performance of flux compression/expansion electromechanical converters [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1992, 20(3):554-561.
- [11] WAVE K D. Inductive energy technology for pulsed intense X-ray sources [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1997, 25(2):160-168.
- [12] 张孝飞, 赵孔新, 张赛男. 基于 FPGA 的脉冲发生器波形模块设计[J]. 长春工业大学学报: 自然科学版, 2011, 32(3):258-262. (ZHANG X F, ZHAO K X, ZHANG S N. Design of waveform module in a pulse generator based on FPGA[J]. Journal of Changchun University of Technology: Natural Science Edition, 2011, 32(3):258-262.)
- 
- (上接第 93 页)
- 全国力学史与方法论学术研讨会论文集, 兰州, 2007: 129-141. (LIU Y Z. Mathematic expression for the gesture and position of rigid bodies[C]//Conference Proceedings of the 3rd National Symposium on the History and Methodology of Mechanics, Lanzhou, 2007:129-141.)
- [6] 段锐, 张海, 陈祝明, 等. 垂直入射区雷达地面散射系数测量与特性研究[J]. 电子科技大学学报, 2012, 41(3):373-377. (DUAN R, ZHANG H, CHEN Z M, et al. Radar terrain scattering tetum measurement and characteristics research in vertical incidence region[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2012, 41(3):373-377.)
- [7] 孙亚洲, 王国华, 朱晓菲. 基于天底点的散射回波信号处理算法[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(9):198-201, 220. (SUN Y Z, WANG G H, ZHU X F. A scatter echo processing algorithm based on nadir point [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(9):198-201, 220.)
- [8] EDISON A R, MOORE R K, WARNER B D. Radar terrain return measured at near-vertical incidence[J]. IRE Transactions on Antennas and Propagation, 1960, 8(3):246-254.
- [9] 刘建新, 彭霞, 向敬成. 基于大地回波仿真的回波模拟器设计实现[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(2):212-216. (LIU J X, PENG X, XIANG J C. Design and implementation of ground echo simulator for radar altimeter [J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(2):212-216.)
- [10] 刘浩森, 卞树檀, 朱守保. 高度表宽多普勒频宽回波研究[J]. 电子科技, 2012, 25(2):41-47. (LIU H M, BIAN S T, ZHU S B. Study of altimeter wide Doppler frequency band echo[J]. Electronic Sci. & Tech, 2012, 25(2):41-47.)
- [11] 荣欣. 核武器(4) [Z]. 2011-05-05 [2015-04-14]. [http://www.ccad.gov.cn/view/zhishibolan/wuqizhuangbei/hshwq/20110505/324\\_4.html](http://www.ccad.gov.cn/view/zhishibolan/wuqizhuangbei/hshwq/20110505/324_4.html). (RONG X. Nuclear weapons(4) [Z]. 2011-05-05 [2015-04-14]. [http://www.ccad.gov.cn/view/zhishibolan/wuqizhuangbei/hshwq/20110505/324\\_4.html](http://www.ccad.gov.cn/view/zhishibolan/wuqizhuangbei/hshwq/20110505/324_4.html).)
- [12] 蔡武, 潘明海. 基于散射中心模型的典型目标宽带雷达回波仿真[J]. 航空兵器, 2015(2):34-37. (CAI W, PAN M H. Wide-band radar echo simulation for typical target based on scattering center model [J]. Aero Weaponry, 2015(2):34-37.)

欢迎关注新浪微博 @电光与控制