

电磁超声相控阵激励源高频隔离驱动电路

王新华, 王奇之, 涂承媛, 陈迎春

(北京工业大学机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124)

摘 要: 为了进一步提高电磁超声相控阵激励源的工作效率, 基于半桥拓扑放大结构提出了一种电磁超声相控阵激励源高频隔离驱动电路的设计方法. 根据金属氧化物半导体场效应晶体管 (metal oxide semiconductor field effect transistor, MOSFET) 的简化模型, 分析了 MOSFET 在开通和关断过程中的开关损耗, 从而给出了高频隔离驱动电路所必须满足的条件. 通过采用光纤器件隔离脉冲信号和 DC-DC 隔离电源对参考电位进行转换, 有效解决了驱动电路的高频“浮栅”问题, 并利用 RC 微分电路和施密特反相器设计了驱动信号死区时间可调电路. 实验结果表明: 设计的驱动电路能够输出频率为 1.1 MHz、死区时间为 0.32 μ s、驱动电压为 18.8 V、占空比为 26% 的互补驱动信号, 并且在驱动 MOSFET 栅极的实际应用中, 有效降低了功率开关管的功率损耗.

关键词: 金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET); 光纤隔离; 死区时间; 延时; 浮栅

中图分类号: TM 133

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2017)06-0826-07

doi: 10.11936/bjtxb2016060031

High-frequency Isolation Drive Circuit of Exciting Source for Electromagnetic Ultrasonic Phased Array

WANG Xinhua, WANG Qizhi, TU Chengyuan, CHEN Yingchun

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to further improve the work efficiency of exciting source for electromagnetic ultrasonic phased array, a method of gate drive circuit design of high frequency isolation for exciting source of electromagnetic ultrasonic phased array was presented in this paper based on half bridge topology structure. Through analyzing the process of turn-on and turn-off loss of MOSFET based on the simplified model structure of MOSFET, satisfied conditions of drive circuit with high frequency isolation were put forward and the reference potential was converted by using fiber optic components isolated pulse signal and DC-DC power supply. The high frequency “floating gate” problem of drive circuit was solved effectively, and the dead-time adjustable circuit was designed by combining the RC differential circuit with Schmitt inverter. The experimental results show that the design of drive circuit can output drive signal in which the frequency is 1.1 MHz, the dead-time is 0.32 μ s, the voltage amplitude is 18.8 V, and the duty ratio is 26%. The drive circuit reduces power loss of power switch tube effectively in the practical application of driving MOSFET.

Key words: metal oxide semiconductor field effect transistor (MOSFET); fiber optics isolation; dead-time; delay; floating gate

收稿日期: 2016-06-12

基金项目: 北京市科学技术委员会首都科技条件平台资助项目 (Z141100003414001)

作者简介: 王新华 (1969—), 男, 教授, 主要从事油气管道检测与评价、流体传动与控制、机电伺服驱动技术方面的研究,
E-mail: wxhemma2005@163.com

随着埋地钢质管道内检测技术的不断成熟,对检测器的精度及效率也提出了一定的严苛要求,相较于传统的超声检测系统中单通道探头,多个电磁超声换能器 (electromagnetic acoustic transducer, EMAT) 进行超声检测这一新技术更具有良好的波束可达性,不仅能对不规则或复杂形状工件进行检测,而且能提高检测速度^[1-2]。多个 EMAT 阵元组成的检测器与其他内检测器相同,包括激励源、相控阵探头阵列、清管器、数据处理和储存模块 4 个部分。其中激励源的研制和相控阵探头阵列的优化设计是目前克服 EMAT 换能效率低的 2 种有效途径。然而,随着国内外对电磁超声工作机理研究的深入及各种电磁仿真软件的大量出现,探头阵列灵敏度的优化设计取得很大进步,但并不能在根本上解决问题。因此,只有通过合理设计配套的大功率多通高频激励源,才能从根本上提高探头阵列的激发效能,改善超声相控阵的在线检测效率。

多通道激励源是基于射频技术设计的一款开关逆变电源,它和线性电源的根本区别在于它的操作频率不是工频频段而是工作在几十 kHz 到几十 MHz。目前,国外已经研制出可用于激励 EMAT 的大功率高频激励电源,如美国 T&C 电源公司生产的 AG 1024 型高频电源,频率范围 0.2 ~ 1.0 MHz,最大输出功率 2 kW^[3];日本相继研制出了 3 ~ 200 kW、20 ~ 300 kHz 系列高频电源,并于 1999 年研制出 2 MHz、6 kW 的金属氧化物半导体场效应晶体管 (metal oxide semiconductor field effect transistor, MOSFET) 高频电源^[4]。然而这 2 种电源产品的技术资料处于保密状态。国内对电磁超声技术的研究起步相对较晚,2005 年王淑娟等^[5]研制出用于轨道踏面的电磁超声检测设备,激励源输出频率为 30 kHz ~ 1 MHz,输出电流约 10 A,由二级功率管组成的共射互补推挽驱动放大电路。2009 年军械工程学院的李志宇等^[6]提出了一种基于 RLC 振荡电路的连续脉冲电磁超声换能器激励装置设计方法,该装置电流峰值随电容的增大而增大,但信号频率反而降低。2012 年李鹏等^[7]研制出一种电磁超声检测用脉冲电源,选择集成电路芯片 IR2110 构建了 MOSFET 驱动电路,以自举电容作为悬浮电源并为高端驱动电路提供能量,该电源输出激励脉冲的电压峰值为 0 ~ 350 V、频率为 20 ~ 300 kHz、相邻脉冲时间间隔等连续可调,输出激励脉冲的电流峰值可达 50 A。

从上述国内外研究现状可知,国内的激励源研

制在频率范围和输出功率相对落后于国外,原因在于高频率与大功率本身就是一对矛盾体,而国内对此也尚无成熟的解决办法。随着功率放大电路的深入研究而变得日益成熟,但与其相匹配的高频驱动电路却是功率放大的重要前提。因此,设计一套能够长期稳定地工作在高频且功率损耗低的 MOSFET 驱动电路至关重要。为此,根据 MOSFET 管开关的开通与关断过程分析,给出了电磁超声相控阵激励源栅极高频驱动的设计要求,并通过隔离电源对参考电位进行转换,从而设计了以光纤为隔离器件的高频“浮栅”驱动电路,不仅提高了抗电磁干扰 (electromagnetic interference, EMI) 能力^[8]和驱动信号的完整度,而且能够对死区时间进行调节,同时也缩短了驱动信号延时时间,该驱动电路可以适应不同规格的 MOSFET,从而保证了电磁超声相控阵激励源工作效率。

1 MOSFET 开关损耗分析

1.1 MOSFET 开通和关断

MOSFET 是一种电压控制器件,其输入阻抗高,没有少数载流子的存储效应,工作频率可达几百 kHz 至几 MHz,在各种逆变开关电源装置中得到广泛应用。然而, MOSFET 的各极之间存在着寄生电容,在其开通和关断过程中,驱动电路必须能够对其寄生电容网络进行快速充放电。图 1 所示为 MOSFET 管的模型结构^[9]。

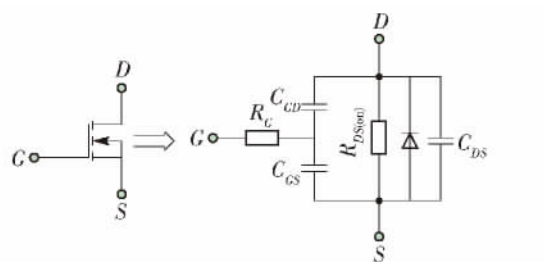


图 1 MOSFET 的模型结构

Fig. 1 Model structure of MOSFET

在 MOSFET 的简化模型中,漏极、源极、栅极之间存在 3 个寄生电容: C_{GD} 、 C_{GS} 、 C_{DS} 。三者间的关系为

$$C_{GD} = C_{rss} \quad (1)$$

$$C_{GS} = C_{iss} - C_{rss} \quad (2)$$

$$C_{DS} = C_{oss} - C_{rss} \quad (3)$$

式中: C_{iss} 为输入电容; C_{oss} 为输出电容; C_{rss} 为反向传输电容。

C_{GD} 、 C_{GS} 、 C_{DS} 之间的关系影响着 MOSFET 各极间的电荷量和开通关断过程。如图 2 所示, MOSFET

开通过程中 $t_1 \sim t_2$ 是其开通延时阶段, 栅源极间电容 C_{GS} 开始充电, 当上升到开启阈值电压 U_{TH} , 时间参数为 $(R_G + R_{DS(on)}) C_{iss}$, U_{DS} 保持外加直流电压 V_{DD} 不变, 漏极没有电流流过 ($I_D = 0$), 栅极电流 I_G 最高达到 I_{PK} ; $t_2 \sim t_3$ 阶段, U_{GS} 电压从 V_{TH} 按指数规律增到米勒平台电压 V_{PL} , I_D 开始缓慢增加, 到 t_3 时刻 I_D 上升到最大值, $U_{DS} = V_{DD}$ 保持不变, 电荷量为 Q_{GS} ; $t_3 \sim t_4$ 阶段, 漏极电流保持恒定的最大电流值 I_D , 漏源电压 U_{DS} 开始下降, 反向传输电容 (C_{rss}) C_{GD} 的米勒效应使得 U_{GS} 保持不变, MOSFET 管固有的转移特性使得栅极电压与漏极电流维持比例关系, 栅源极间的电容 C_{GS} 不再流过电流, 驱动电流全部流过米勒电容, 其电荷量为 Q_{GD} , 栅极电流 I_G 保持在平台电流 I_{PL} 值不变; $t_4 \sim t_5$ 阶段, 栅极处于过驱动状态, 但驱动部分仍然在消耗能量, 过了米勒平台后, MOSFET 已经完全导通, 栅极电压和漏极电流不再受转移特性的束缚, 继续增大, 直至驱动电压, 此时, 栅极电流 I_G 用于给 C_{GS} 、 C_{GD} 充电。

MOSFET 的关断过程为图 2 中的 $t_6 \sim t_{10}$, 正好与开通过程相反, 经过一段的关断延时和栅极即间电容 C_{GS} 开始放电后, 进入一段米勒平台, 栅源电压 U_{GS} 开始上升, MOSFET 管逐渐关断, 直至漏极电流 $I_D = 0$, 此时开关管彻底关断。

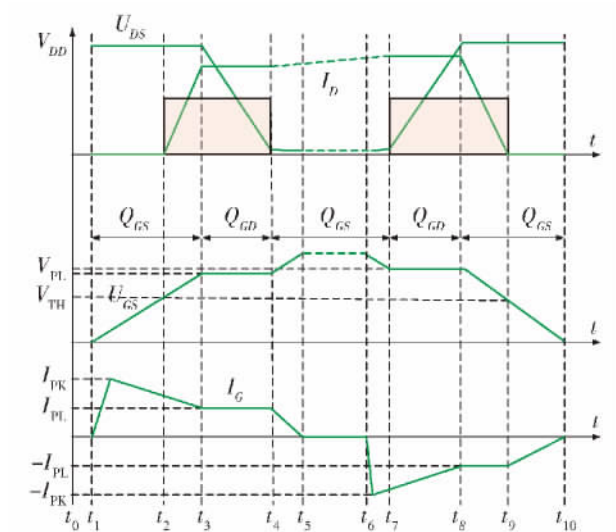


图 2 MOSFET 开通和关断过程

Fig. 2 Turn on and turn off sequence of MOSFET

1.2 开通和关断功率损耗

由图 2 可知, MOSFET 的功率损耗主要发生在 U_{DS} 和 I_D 交叉重叠区域. 3 个极间电容 (C_{GD} 、 C_{GS} 、 C_{DS}) 在每次开关转换中需要充电、放电以达到新的电压值与开关状态改变相对应, 所以交叠会持续一

段时间. 总之, 电容值越大, 充电时间就越长, 交叠时间就会越长, 结果导致交叠损耗就越大。

开通过程中产生的开关损耗为

$$P_{\text{loss(on)}} = \frac{1}{2} f_s V_{DD} I_D (t_4 - t_2) \quad (4)$$

关断过程中产生的开关损耗为

$$P_{\text{loss(off)}} = \frac{1}{2} f_s V_{DD} I_D (t_9 - t_7) \quad (5)$$

从式 (4) (5) 可知, 开通和关断损耗决定因素是电流和电压各自完成转换所需的时间 ($t_4 - t_2$) 和 ($t_9 - t_7$), 转换的快慢是随着驱动电阻和极间寄生电容乘积大小而变化的. 当然, 在工艺方面, 通过改良 MOSFET 自身的寄生电容和饱和导通后的导通电阻 $R_{DS(on)}$ 降低开关功率损耗. 但是, MOSFET 在实际应用过程中, 只能通过对其外部驱动电路结构的精准有效设计, 才能弥补 MOSFET 自身工艺制造方面的缺陷, 降低开关管在高速工作状态的功率损耗, 有效地提高功率放大电路输出功率。

2 驱动电路搭建

2.1 驱动电路设计要求

驱动电路的优化设计可以有效地降低高速工作状态下 MOSFET 的开关损耗, 也是提高电磁超声相控阵激励源换能效率的关键前提, 从而给出了激励源栅极驱动电路必须考虑的 4 点要求:

1) 具有动态驱动能力, 提供足够大的瞬间驱动功率或者瞬间驱动电流, 使 MOSFET 迅速建立栅极电场并导通, 驱动电路应能提供陡峭的前后沿驱动脉冲。

2) 控制电路与功率放大电路之间需要进行电气隔离, 驱动电路与功率变换器的连线要尽量短, 以提高 MOSFET 管的关断速度。

3) 在半桥拓扑结构中, 同一桥臂的高压侧和低压侧 MOSFET 的栅极参考电位不同, 则需对高压侧 MOSFET 栅极驱动电源参考电位进行转换。

4) 为使得功率变换器的功率开关管工作在零电压开关 (zero voltage switch, ZVS) 模式, 驱动信号的死区时间必须可调且占空比小于 50%。

根据电磁超声相控阵激励源栅极驱动的设计要求, 搭建了图 3 所示的半桥拓扑结构驱动电路设计示意图. 其中, V_{dr1} 、 V_{dr2} 分别以 GND1 和 GND2 作为参考电位, 并为高低压侧 MOSFET 管的栅极驱动电路提供电源. 驱动的功率放大电路是由 M_1 、 M_2 组成的半桥式功率变换谐振电路, 通过 LC 谐振电路

选频,在所选频率的操作下使得EMAT阵元达到最佳的能量转换效率。

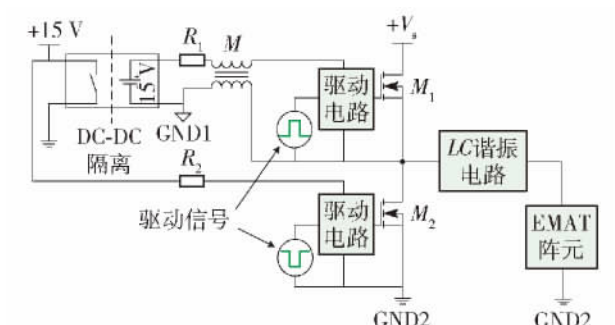


图3 半桥拓扑结构驱动电路设计示意图

Fig. 3 Schematic diagram of drive circuit design for a half bridge topology

2.2 MOSFET管“浮栅”驱动电路

由于高压侧功率管 M_1 栅极电位与低压侧功率管 M_2 栅极电位不是同一个参考点,导致功率管 M_1 栅极电位不断浮动(即“浮栅”)。因此,高压侧驱动电路电源参考电位必须与低压侧驱动电路电源参考电位进行隔离。如图4所示,选用15W的DC-DC模块HSD15D-12S15对电源参考电位进行隔离转换,模块输入端以GND2为参考电位,输出端以GND1为参考电位。转换电路具有输出电压精度高、过流、过压和短路保护。旁路电容 C_2 、 C_3 给输入输出电源提供滤波作用,共模扼流圈 M 是为了进一步提高抗EMI能力。

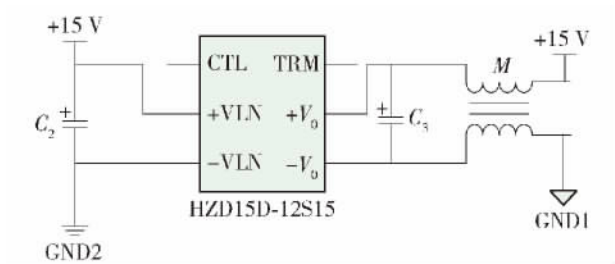


图4 高压侧 M_1 源极参考电位转换电路

Fig. 4 Reference potential conversion circuit of high side M_1 source

此外,MOSFET的工作频率及输入阻抗高,容易被干扰,故驱动电路应具有良好的电气隔离性能,以实现主电路与控制电路之间的隔离,使之具有较强的抗干扰能力,避免功率电路对控制信号的干扰^[9]。而隔离型驱动主要包括变压器隔离和光电隔离驱动,其中光电隔离包括光耦隔离和光纤隔离2种形式。

在表1中,针对3种隔离型器件属性的基本功

能做了相关比较^[10-11]。

表1 隔离型器件功能比较

Table 1 Function comparison of isolation device

驱动类别	频率范围	隔离电压/kV	dv/dt
变压器	< 10 MHz	< 2	有限
光耦	< 20 Mbit/s	< 5	< 10 V/ns
光纤	> 1 GHz	> 5	> 10 V/ns
驱动类别	调占空比	耦合电容	EMI
变压器	复杂	大	强
光耦	简单	小	弱
光纤	简单	忽略	忽略

变压器不仅制作工艺要求较高、体积大,而且对电路中元器件参数和工作条件的匹配要求苛刻,可能存在变压器磁心偏磁、隔离变压器漏感和寄生参数使得驱动信号产生振荡、抗干扰能力不足等缺点。

光耦器件直接用于模拟量时,要考虑它的非线性问题和响应速度问题,它会受到温度的影响改变传输信号的延时,从而造成脉冲宽度改变,并且光耦芯片的集成,使得信号输入输出靠得太近而导致防干扰布局受到限制。由于电磁超声相控阵激励源不仅工作频率和电压高,而且驱动相控阵探头阵列各阵元的是ns级延序列。因此,高低压侧功率管栅极驱动电路采用光纤作为放大电路与控制信号之间的隔离器件。如图5所示为MOSFET栅极高频隔离驱动电路。

驱动电路采用T-4527Z/R-2526Z作为控制信号的发射端/接收端,T-4527Z内部包含650nm波长的LED,光信号经过光纤传输至R-2526Z在其内部转换成电信号并前置放大,信号的传播速度高达125 Mbit/s。R-2526Z输出的信号经过由 R_3 、 R_4 和 C_1 组成的RC微分电路处理,其中 R_4 为电位器,可以调节死区时间范围。微分信号通过施密特反相器 $U1_C$ 矫正输出脉冲波形并与原输出信号在逻辑门 $U2$ 相积,从而输出调脉冲调制(pulse width modulation, PWM)信号。采用TC6320TG作为MOSFET栅极驱动芯片,其内部集成了N沟道和P沟道结合的图腾柱,可输出2A的驱动电流,具有导通电阻低、输入电容低和快关速度快等优点。

3 实验结果分析

信号从光纤接收端输出,经过RC微分电路处理后,由示波器显示其输出波形。从图6中可以看

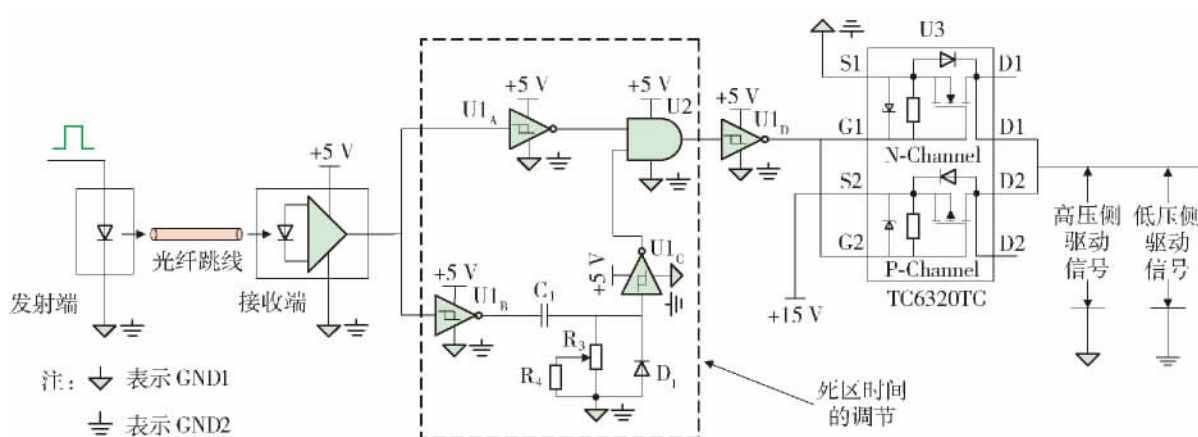


图5 MOSFET 栅极高频隔离驱动电路

Fig. 5 Gate drive circuit with high frequency isolation of MOSFET

出,其输出频率约为 2.03 MHz,则可调节的死区时间范围为 $0.5 \mu\text{s}$ 。图 7 所示波形为 RC 微分波形通过 $U1_c$ 施密特反相器矫正后的死区调节载波信号。

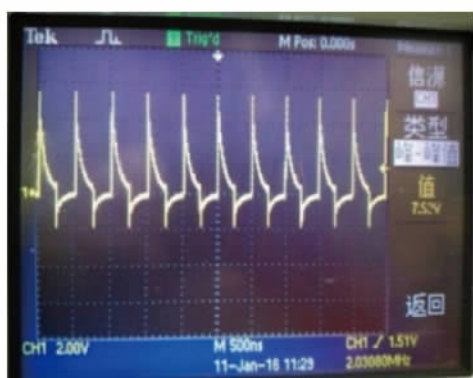


图6 RC 微分电路输出波形

Fig. 6 Output waveform of RC differential circuit

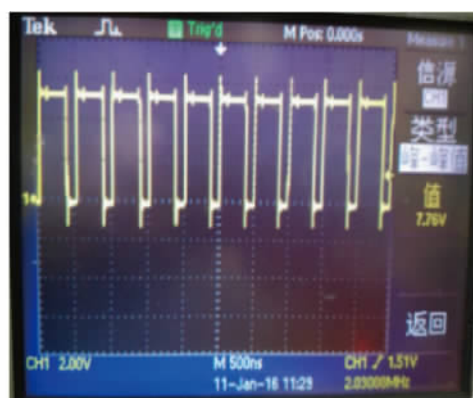


图7 死区调节载波波形

Fig. 7 Carrier wave to adjust dead-time

死区调节载波信号和接收端原始信号在逻辑门 $U2$ 相积后,经过驱动芯片 TC6320TG 处理,从而输出如图 8 所示的带死区且互补驱动信号。

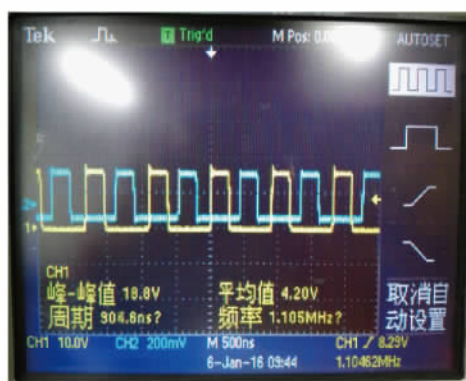


图8 带死区的互补驱动信号

Fig. 8 Complementary drive signal with dead-time

由图 8、9 可以看出,这对互补信号的频率为 1.1 MHz,死区时间为 $0.32 \mu\text{s}$,驱动电压为 18.8 V,信号的占空比为 26% (小于 50%),符合 MOSFET 栅极驱动信号要求,从而保证 2 个 MOSFET 不能同时导通而导致短路。

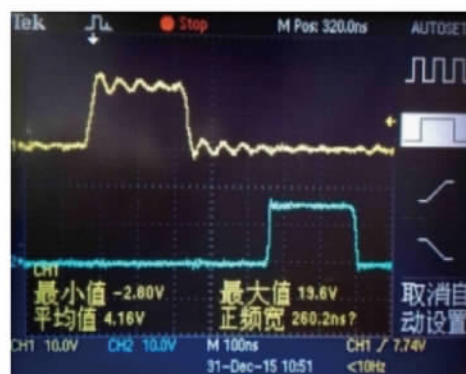


图9 驱动信号正宽频时间波形

Fig. 9 Positive broadband time waveform of drive signal

为了保证功率管能够快速导通和关断,需要测

量驱动信号的上升时间和下降时间。如图 10、11 所示,驱动信号上升时间为 7.45 ns、信号下降时间为 12.5 ns,明显低于死区的设定时间,从而有效地避免导通和关断时的交叉损耗。

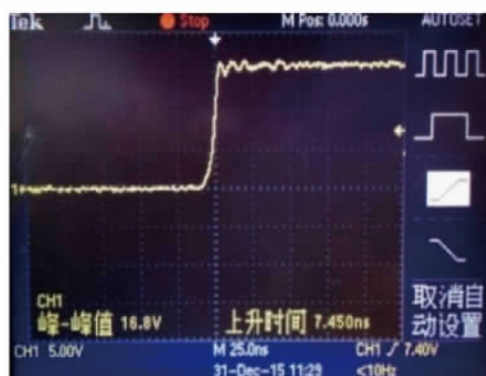


图 10 驱动信号上升时间波形

Fig. 10 Rise time waveform of drive signal

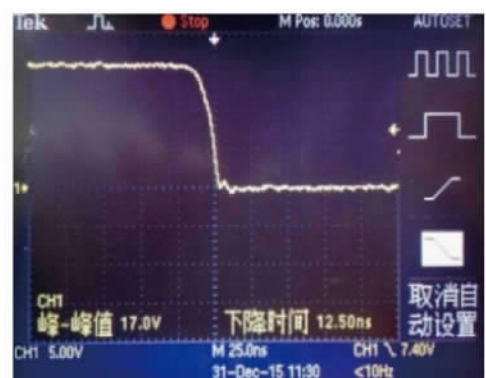


图 11 驱动信号下降时间波形

Fig. 11 Fall time waveform of drive signal

驱动电路在驱动功率放大电路的实践过程中,用热像仪拍摄了高低压侧 MOSFET 工作前后的温度对比照,如图 12 所示。在图 12(a)中所显示温度为 MOSFET 未工作时的温度(即室内温度) 66.7 (约 19.28℃);图 12(b)中显示温度为 MOSFET 在高频高压工作一段时间后的温度 71.3 (约 21.83℃)。说明 MOSFET 管工作一段时间后温度变化小,驱动电路的设计有效降低了功率管的自身功率损耗。

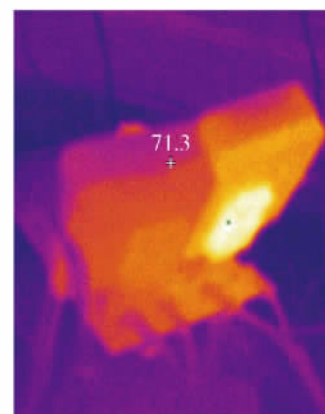
4 结论

1) 驱动电路能够对驱动信号的死区时间或者占空比进行调节,从而使得当控制信号占空比大于或等于 50% 时,能够及时通过驱动电路将驱动信号占空比调整至 50% 以下。

2) 采用光纤进行信号隔离以及 DC-DC 隔离电



(a) 工作前温度



(b) 工作后温度

图 12 MOSFET 工作前后温度

Fig. 12 Before and after work temperature of MOSFET

源进行参考电位的转换,有效地解决了驱动电路在高速运作时高压侧 MOSFET 的“浮栅”问题,降低了驱动信号的失真度和上升下降延时,保证了驱动信号的完整输出,并且通过了实验的有力验证。

3) 从红外摄像仪温度显示可知,工作频率为 1.1 MHz 的高频工作下,驱动信号能够长期稳定有效地驱动功率 MOSFET,降低了功率管的开关损耗,从而实现了电磁超声相控阵激励源高频隔离驱动电路设计要求。

参考文献:

- [1] 靳世久,杨晓霞,陈世利,等. 超声相控阵检测技术的发展及应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(9): 925-934.
JIN S J, YANG X X, CHEN S L, et al. Development and application of ultrasonic phased array inspection technology [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(9): 925-934. (in Chinese)
- [2] YAMADA H, YANO Y, UDAGAWA T. Development of the phased array system for angle beam testing[J]. Nippon

- Steel Technical Report ,2004(98) : 28-32.
- [3] T&C Power Conversion. AG 1024 LF Amplifier & Generator [EB/OL]. [2016-05-13]. http://media.wix.com/ugd/0e7f35_5aada9c2703f43a1b9a469488960fe95.pdf.
- [4] FUJITA H , AKAGI H , SHIVOHARA S. A 2-MHz , 6-kVA voltage-source inverter using low-profile MOSFET modules for low-temperature plasma generators [J]. IEEE Transactions on Power Electronics , 1999 , 14(6) : 1014-1020.
- [5] 王淑娟 , 赵再新 , 翟国富. 基于电磁超声的火车车轮裂纹检测系统 [J]. 仪表技术与传感器 , 2005(11) : 27-29.
- WANG S J , ZHAO Z X , ZHAI G F. Detection system about train-wheels cracks based on electronic ultrasonic technology [J]. Instrument Technique and Sensor , 2005 (11) : 27-29. (in Chinese)
- [6] 李志宇 , 陈鹏 , 王帅. 基于 RLC 振荡电路的电磁超声换能器激励研究 [J]. 四川兵工学报 , 2009 , 30(4) : 83-85.
- LI Z Y , CHEN P , WANG S. Exciting source research of electromagnetic ultrasonic transducer based on RLC oscillating circuit [J]. Journal of Sichuan Ordnance , 2009 , 30(4) : 83-85. (in Chinese)
- [7] 李鹏 , 黄松岭 , 王坤 , 等. 一种电磁超声检测用脉冲激励电源的研制 [J]. 电测与仪表 , 2012 , 554(49) : 76-83.
- LI P , HUANG S L , WANG K , et al. Development of a pulse exciting source for electromagnetic ultrasonic detection [J]. Electrical Measurement & Instrumentation , 2012 , 554(49) : 76-83. (in Chinese)
- [8] IRWIN L N. High-performance lossless RF fiber optic link [C] // IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Dana Point , California: IEEE , 2000: 375-378.
- [9] 彭咏龙 , 李荣荣 , 李亚斌. 大功率 SiC MOSFET 驱动电路设计 [J]. 电测与仪表 , 2015 , 52(11) : 74-78.
- PENG Y L , LI R R , LI Y B. Design of high power SiC MOSFET driver circuit [J]. Electrical Measurement & Instrumentation , 2015 , 52(11) : 74-78. (in Chinese)
- [10] 严寒松 , 周伟松 , 王培清 , 等. 高频感应加热电源功率器件 MOSFET 驱动电路 [J]. 电力电子技术 , 2007 , 41(4) : 91-99.
- YAN H S , ZHOU W S , WANG P Q , et al. Design of power MOSFET driver circuit for high frequency induction heating [J]. Supply Power Electronics , 2007 , 41(4) : 91-99. (in Chinese)
- [11] JEMISON L W D , WEY T A , PAOLELLA A. A new optoelectronic oscillator topology based on a class E analog fiber optic link [C] // 2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Anaheim , California: IEEE , 2010: 736-739.

(责任编辑 吕小红)