

# MOSFET 隔离型高速驱动电路

纪圣儒,朱志明,周雪珍,王琳化

(清华大学 机械工程系,北京 100084)

**摘要:**结合以 MOSFET 为主要功率开关器件,应用于电弧超声焊接的高频脉冲激励系统的研发,在对 MOSFET 开通和关断过程进行分析的基础上,给出了 MOSFET 隔离型高速驱动电路所必需满足的条件。详细讨论了最大工作频率可达 100 kHz、实现电气隔离、具有较强驱动能力和抗干扰能力的 MOSFET 驱动电路的设计与实现过程,实验结果证明了所设计驱动电路的可行性。所讨论的 MOSFET 驱动电路对于 IGBT 等其他电压控制型功率开关器件驱动电路的设计也有一定的借鉴意义。

**关键词:** MOSFET 驱动;脉冲变压器;高速光耦

**中图分类号:** TP402

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-2303(2007)05-0006-05

## Electrical-isolated high-speed MOSFET driver circuit

Ji Sheng-ru, ZHU Zhi-ming, ZHOU Xue-zhen, WANG Lin-hua

(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Combining with the research and development of high frequency pulse stimulating system applied in arc excited ultrasonic welding, in which the MOSFET being used, the turn-on and turn-off processes of MOSFET are presented, and then its requirements of electrical-isolated high-speed driver circuit are introduced. After that, the design and implementation process of MOSFET driver circuit, which meets the requirements including operation frequency up to 100 kHz, electrical-isolated, strong driving capability and anti-disturbance capability, is discussed in detail. Experimental results show the feasibility of the driver circuit. The driver circuits introduced in this paper have also referential values for designing driver circuits of other voltage-controlled switches such as IGBT.

**Key words:** MOSFET driver circuit; pulse-transformer; high-speed optocoupler

## 0 前言

各种全控型功率电子器件如 GTO、MOSFET 和 IGBT 等的相继出现,极大地推动了电力电子技术的发展。电能变换装置的小型化对功率电子器件的开关工作频率提出了越来越高的要求,而 MOSFET 是一种单极型器件,没有少数载流子的存储效应,工作频率可达几百 kHz 至 MHz,在各种逆变电源装置中得到广泛应用。

本研究结合以 MOSFET 为主要功率开关器件、应用于电弧超声焊接的高频脉冲激励系统的研发,提出了一种工作频率可达 100 kHz 且具有较强负载驱动能力和抗干扰能力的 MOSFET 隔离型驱动电路。

## 1 MOSFET 的开关工作过程

应用于电弧超声焊接的高频脉冲激励系统的结构如图 1 所示,其输出脉冲电流峰值 10~50 A 范围、频率 20~100 kHz 范围连续可调。其中,DC/AC 变换采用全桥拓扑,通过改变其工作频率来实现对输出脉冲电流频率的调节。由于最高输出脉冲电流频率为 100 kHz,因此选用 MOSFET 作为主功率开关器件,并采用移相 PWM 控制方式实现零电压开关,以减小高频开关损耗。

MOSFET 属于电压控制型器件,其输入阻抗高,所需静态驱动功率很小。然而,由于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,特别是在高开关工作频率的应用中。图 2 所示为 MOSFET 在开通和关断过程中的漏源电压  $U_{DS}$ 、漏极电流  $I_D$ 、栅源电压  $U_{GS}$  和栅极充电电荷  $Q_g$  的变化曲线。以 MOSFET

收稿日期:2007-03-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50375080)

作者简介:纪圣儒(1982—),男,福建尤溪人,在读硕士,主要从事材料加工领域的功率电子设备研究工作。



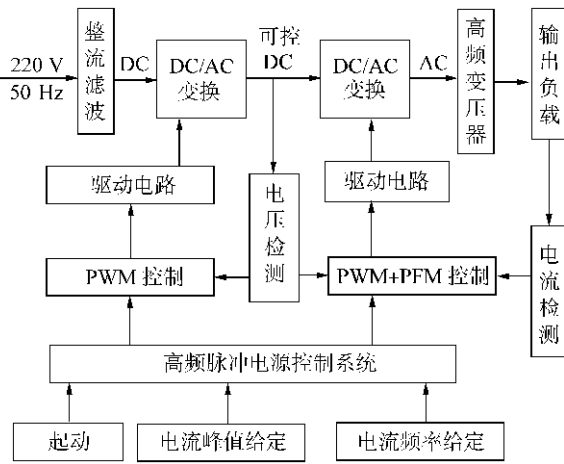


图 1 用于电弧超声焊接的高频脉冲激励系统

Fig.1 High-frequency pulse stimulating system applied in arc excited ultrasonic welding

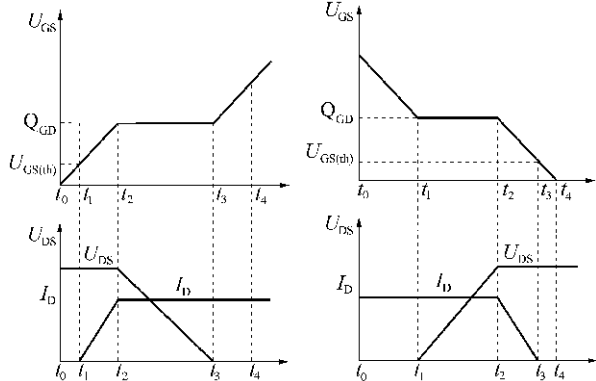


图 2 MOSFET 的开通和关断过程

Fig.2 Turn on and turn off processes of MOSFET

的开通过程为例,它可分为如下四个阶段<sup>[1]</sup>。

(1)开通延迟阶段( $t_0 \sim t_1$ )。  $U_{GS}$  从零上升到门限电压  $U_{th}$ , 而  $U_{DS}$  和  $I_D$  保持不变。

(2)逐渐开通阶段( $t_1 \sim t_2$ )。  $t_1$  时刻  $U_{GS}$  达到门限电压  $U_{th}$ ,  $I_D$  开始缓慢增加, 至  $t_2$  时刻,  $I_D$  达到最大值。在该阶段,  $U_{DS}$  保持不变。

(3)密勒平台产生阶段( $t_2 \sim t_3$ )。  $t_2$  时刻开始,  $U_{DS}$  开始下降, 反向传输电容的密勒效应使得  $U_{GS}$  出现了一个平台,  $t_3$  时刻,  $U_{DS}$  降至 MOSFET 导通压降。

(4)完全导通阶段( $t_3 \sim t_4$ )。  $U_{GS}$  继续上升至最终的驱动电压,  $U_{GS}$  的增大使得 MOSFET 导通电阻  $R_{DS(on)}$  减小, 但当  $U_{GS}$  超过 10 V 后, 对  $R_{DS(on)}$  的影响很小。

MOSFET 的关断过程与开通过程正好相反, 也可分为关断延迟( $t_0 \sim t_1$ )、密勒平台产生( $t_1 \sim t_2$ )、逐渐关断( $t_2 \sim t_3$ )和完全关断( $t_3 \sim t_4$ )四个阶段。

根据上述对 MOSFET 开通和关断过程的分析, 在用于电弧超声焊接的高频脉冲激励系统中, 功率

MOSFET 的驱动电路应满足如下要求:

(1)具有足够快的开关速度, 最大工作频率可达 100 kHz。为此, 驱动脉冲应具有足够陡的上升和下降速度, 即驱动脉冲本身延迟要小。开通时, 能够提供足够大的瞬时峰值电流, 使得开通延迟和密勒平台时间足够短; 关断时, 能为栅极电荷提供低阻放电回路, 从而提高 MOSFET 的关断速度<sup>[2]</sup>。

(2)由于栅极驱动电压是相对于 MOSFET 管的源极而言的, 而在桥式电路中, 同一桥臂的上管和下管的源极电位是不同的, 即不同 MOSFET 的驱动信号基准点是不同的。同时, 为了避免功率变换电路对控制电路产生干扰, 驱动电路必须实现功率变换电路与控制电路的电气隔离。

(3)为防止 MOSFET 误导通, 在 MOSFET 关断时, 应提供一定的负偏电压, 以提高其抗干扰能力。

(4)为保证 MOSFET 的可靠开通, 应使驱动电压高于 MOSFET 的开启电压, 通常取 10~15 V。

常见的 MOSFET 驱动电路可分为直接驱动型和隔离驱动型两种。直接驱动包括 TTL 驱动、CMOS 驱动和推挽输出驱动等<sup>[3]</sup>。其中, 推挽输出驱动(又称为图腾柱驱动)是直接驱动中最常用的一种驱动方式, 它采用一对 PNP 和 NPN 晶体管搭建而成, 可以实现开通时输出较大的驱动电流, 关断时为栅极电荷提供低阻的放电回路, 同时晶体管工作于射极跟随方式, 不会出现饱和, 很多隔离型驱动电路也借鉴了这种方式。隔离型驱动主要包括光耦隔离驱动和变压器隔离驱动两种形式。

## 2 脉冲变压器隔离驱动

脉冲变压器隔离是 MOSFET 和 IGBT 等全控型器件驱动电路常用的一种隔离形式, 由于它具有电路结构简单、不需要提供隔离电源、成本较低, 对脉冲信号无传输延迟等优点, 能够满足驱动电路电气隔离、快速性、较强驱动能力的要求, 因此研发过程中首先考虑采用这种隔离驱动方式, 包括正激变换和全桥变换两种电路拓扑形式。其中, 正激变换拓扑单独驱动每个开关管, 而全桥变换拓扑适用于桥式电路同一桥臂两个互补开关管的驱动。

图 3 所示为采用的两种正激变换脉冲变压器隔离驱动电路, 它们的不同之处仅在于脉冲变压器的复位方式, 分别为 RCD 复位和变压器第三绕组复位。

实验表明, 采用 RCD 复位方式的正激变换驱动



专题讨论——焊机中电子元器件的选择与应用

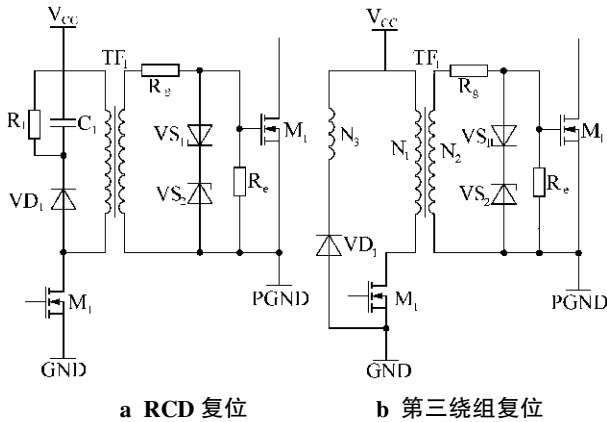


图 3 单端正激型变压器隔离驱动电路

Fig.3 Transformer-isolated single-ended forward topology driver circuits

电路(图 3a)在特定的工作频率下具有驱动能力较强,延迟小,能够满足快速性的要求,并且能够提供负的关断栅极电压,可有效防止开关管误导通的优点。同时,实验也发现该电路存在如下问题:只有在各元器件参数和工作条件相匹配、脉冲变压器磁心复位良好的情况下,驱动电路才能够稳定地输出上升沿和下降沿均较陡的驱动信号,而当移相 PWM 控制信号的频率变化时(此时脉冲占空比也产生了一定变化),由于脉冲变压器的复位情况发生了改变,从而影响了输出驱动信号的上升沿和下降沿,将无法很好地满足高速驱动的要求,甚至可能出现变压器磁心偏磁现象,使得驱动输出信号紊乱。因此,这种采用 RCD 复位的正激变换驱动电路不适用于控制信号频率和占空比变化较大的场合,但可用于采用移相 PWM 控制方式、工作频率恒定的全桥变换开关管的驱动。而采用第三绕组复位方式的驱动电路,由于变压器绕制工艺较复杂,成本较高,不适用于批量生产,因此不推荐采用。

为克服正激变换变压器隔离驱动电路所存在的问题,对图 4 所示全桥变压器隔离型驱动电路进行了实验研究。在图 4 中,每个桥臂分别采用一对 P 型和 N 型 MOSFET 搭建而成,两路互补的控制信号分别控制两个桥臂 MOSFET 的开关状态。当其中一路控制信号为高电平时,全桥电路的某一对角开关管导通,将某一极性脉冲方波电压施加在隔离变压器的一次侧,由于两个二次侧输出绕组的极性相反,因此得到两路极性相反的驱动信号;当两路控制信号均为低电平时(死区时间),两个 P 型管同时导通,隔离变压器一次侧被短路,两路输出驱动信号均为

零电平。实验发现,这种驱动电路具有如下优点:(1)两路驱动脉冲采用同一个隔离变压器,能够避免所驱动的两个 MOSFET 出现同时导通的情况;(2)由于两路互补控制信号的占空比基本相同,以及隔直电容的设置,能够使隔离变压器工作在良好的磁通对称状态,避免出现偏磁现象,在控制信号频率变化的情况下,该电路均能够稳定地输出驱动信号。但该电路存在如下问题:在互补控制信号均为低电平(死区时段)时,两路输出驱动信号均为零,不能提供负的关断偏压,在主功率变换电路电流变化率较大时,该时段的驱动信号将出现一定振荡,开关管易出现误导通,抗干扰能力不足。

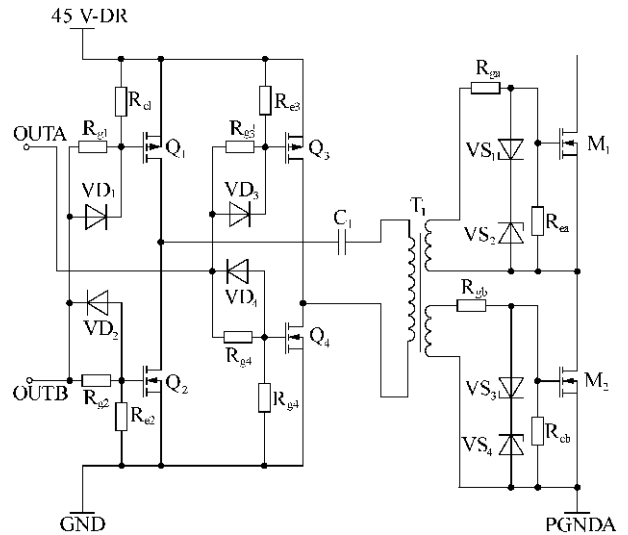


图 4 全桥型变压器隔离驱动电路

Fig.4 Transformer-isolated full-bridge topology driver circuit

总之,用于隔离驱动的脉冲变压器不仅制作工艺要求较高,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。

### 3 光耦隔离驱动

光耦隔离型驱动是解决变压器隔离型驱动所存在问题的一种有效方法。随着全控型功率电子器件的广泛应用,各种集成驱动芯片也相继出现,如 M57962L 和 EXB841 等,它们均采用内部集成光耦来实现隔离,具有较强的驱动能力并设有过流等保护功能。然而,这类驱动芯片的工作频率有限,一般不超过 30~40 kHz,不适用于工作频率更高的场合。为此,专门针对 MOSFET 驱动的高速集成驱动芯片也相继产生,如 IXYS 公司推出的 IXDD404 序列芯

专题讨论——焊机中电子元器件的选择与应用

片,IR 公司推出 IR2110 序列芯片等。这些集成驱动芯片工作频率较高(最高可达几百 kHz)并具有一定的驱动能力,但这些集成驱动芯片本身并无信号隔离功能,需要设置额外的隔离电路。

IR2110 是 IR 公司推出的一款双通道、栅极驱动、高速高压的集成驱动芯片,它兼容 TTL 和 CMOS 逻辑信号输入,在芯片中采用了高度集成的电平转换技术,仅需一路供电电源,高压端的浮地电源采用自举电容实现,高压端的工作电压可达 500 V,工作频率可达 500 kHz,特别适合于同时驱动桥式电路同一桥臂的上下两个 MOSFET 管。鉴于该集成驱动芯片没有实现电气隔离的功能,因此需要考虑采用外部电路来实现,采用光耦隔离是一种常用的方法。6N137 是一款隔离电压高达 2 500 V,负载为 350 Ω 时的导通延迟仅为 45 ns 的高速光耦,作为 100 kHz 左右工作频率驱动电路的隔离芯片是合适的。

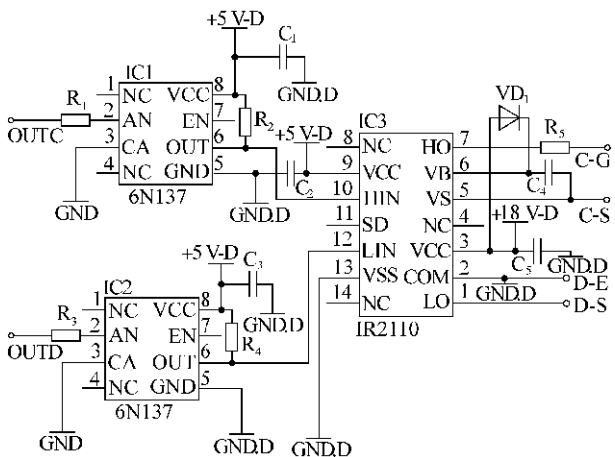


图 5 光耦隔离、集成驱动芯片驱动电路

Fig.5 Optocoupler-isolated IC driver circuit

采用 6N137 隔离、IR2110 集成驱动芯片的驱动电路如图 5 所示。实验发现,6N137 能够很好地实现高频控制信号的隔离,在全桥变换电路直流侧电压较低的情况下,该驱动电路能够输出满足要求的驱动信号。但是,随着全桥变换电路直流侧电压和工作频率的增加,出现了 IR2110 驱动芯片发热严重甚至烧毁的现象。分析发现,这是由于驱动芯片驱动功率不足造成的,对于大功率的应用需要外加增大输出驱动能力的电路,如每路输出加一级推挽输出对芯片输出的驱动信号进一步放大,显然这将增加电路的复杂度。此外,IR2110 本身不能提供关断负压,外接一套负压产生电路将会限制驱动电路的工作

频率,增加电路的复杂度并降低可靠性。

#### 4 带负偏压的光耦隔离高速驱动

最终采用的高速光耦隔离、由分立元件构成的带负偏压的 MOSFET 高速驱动电路如图 6 所示。它通过高速光耦 6N137 来实现控制信号与功率变换电路的电气隔离,同时满足驱动电路高速性的要求;利用推挽输出方式来增强输出脉冲电流的能力,同时为开关管栅极电荷提供低阻放电回路,使开关管具有较快的开关速度;并且,为了增强抗干扰能力,设置了关断负压电路,利用稳压管得到一个稳定的偏置电压(+4.7 V),作为被驱动开关管的源极基准电平,当 P 型管(M1)导通时,被驱动开关管栅源电压为+10 V,当 N 型管(M2)导通时,被驱动开关管栅源电压为-4.7 V。

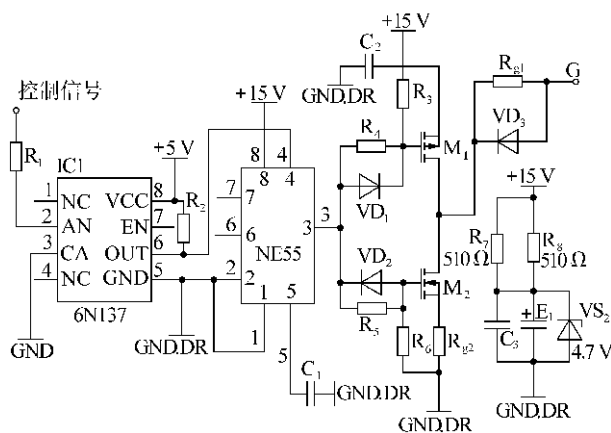


图 6 光耦隔离、推挽输出型驱动电路

Fig.6 Optocoupler-isolated push-pull topology driver circuit

由于高速光耦 6N137 的输出电流能力有限,因此采用了工作于跟随方式的 NE555 芯片,对光耦输出的信号进一步放大,NE555 具有 200 mA 的输出/输入电流能力,足以控制推挽输出电路的一对 P 型和 N 型 MOSFET 管进行高速开关切换。此外,为了避免推挽电路出现上下直通问题,在桥臂中串联了一个小电阻  $R_{e2}$ ,同时将一个快恢复二极管与栅极输出电阻  $R_{e1}$  反并联,使得  $R_{e1}$  和  $R_{e2}$  分别成为被驱动 MOSFET 栅极电荷充电和放电回路电阻。并且,通过在推挽输出电路 MOSFET 的栅极电阻两端并联快恢复二极管,使其关断速度快于开通速度,从一定程度减小了桥臂直通的概率。

图 6 所示驱动电路在控制信号频率为 100 kHz,未带载和带载两种情况下的被驱动功率 MOSFET 栅源电压实测波形分别如图 7 所示。

专题讨论——焊机中电子元器件的选择与应用