

# 基于 MOSFET 的电动汽车电源开关设计

尹百通, 龚元明

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

**摘要:** 针对传统继电器的机械磨损和电弧灼烧的现象, 为满足电动汽车动力电池的开关控制要求, 设计了一款基于 MOSFET 的大功率电源开关。该开关能够有效提高开关的通断速度和降低机械损坏。详细分析了电源开关工作原理, 其次阐述了电源开关结构设计和各模块的设计优势, 其中就如何选取合适的 MOSFET 驱动器进行重点阐述, 最后, 通过电流耐受能力试验, 验证电源开关可以在 375 A 大电流下正常工作。

**关键词:** 电源开关; 继电器; MOSFET 驱动器; MOSFET

中图分类号: TN386.1

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211547

中文引用格式: 尹百通, 龚元明. 基于 MOSFET 的电动汽车电源开关设计[J]. 电子技术应用, 2021, 47(12): 126-130.

英文引用格式: Yin Baitong, Gong Yuanming. Design of power switch of electric vehicle based on MOSFET[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(12): 126-130.

## Design of power switch of electric vehicle based on MOSFET

Yin Baitong, Gong Yuanming

(College of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** Aiming at the mechanical abrasion and arc burning of traditional relays, in order to meet the switch control requirements of the power battery of electric vehicles, a high-power power switch based on MOSFET was designed. The switch can effectively improve the on-off speed of the switch and reduce mechanical damage. This article analyzes the working principle of the power switch in detail, and then elaborates the structure design of the power switch and the design advantages of each module. It focuses on how to select a suitable MOSFET driver. Finally, through the current withstand capability test, it is verified that the power switch can operate normally at 375 A high current.

**Key words:** power switch; relay; MOSFET driver; MOSFET

## 0 引言

随着近年来电动汽车的兴起, 汽车电子化程度越来越高, 传统继电器上电磁干扰与电弧灼烧现象的弊端逐渐显现出来<sup>[1]</sup>, 而 MOSFET(场效应管)是多数载流子导电的电压控制器件, 具有输入阻抗高、开关速度快、高频性能好等优势<sup>[2]</sup>, 在各类电源开关尤其电动汽车上应用广泛<sup>[3]</sup>。本文详细介绍开关电源的工作原理和结构组成, 其中着重阐述了 MOSFET 驱动器与 MOSFET 的匹配设计以及驱动器的相关特性, 最后, 将电源开关放置在不同的电流下进行耐受能力测试。

## 1 电源开关总体设计与工作原理

电源开关总体可以分为五个模块: 电源稳压模块、温度采集模块、光耦隔离模块、MOSFET 驱动器模块及 MOSFET 工作模块。

相较于之前的开关电源电路<sup>[4]</sup>, 其突出优势为: (1)MOSFET 选用的是 ATOOL66608 型号, 具有通大电流、低阻值的显著特点; (2)增加了 TC4432 驱动器, 可以为

MOSFET 提供更高的驱动电流, 有效提高开关速度<sup>[5-6]</sup>; (3)通过光耦隔离的方式, 有效减少外界噪声和电磁信号的干扰。

电源开关结构图如图 1 所示。

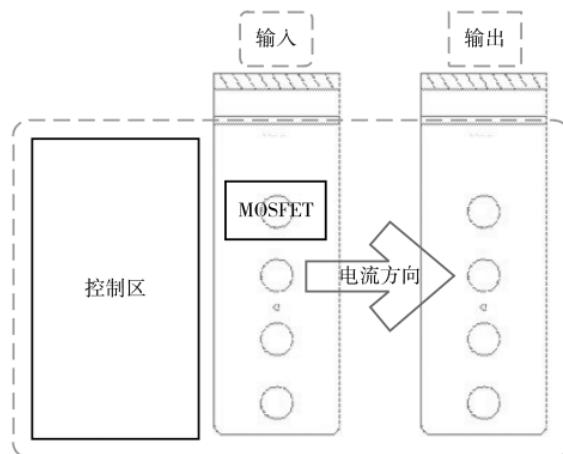


图 1 电源开关结构图

电源开关工作原理:(1)首先接入 12 V 电压,经电源稳压模块,将电压转换为 5 V。(2)5 V 电压经光耦隔离模块以及 DC/DC 芯片,将电压升高为 9 V 电压,为 MOSFET 驱动器供电。(3)控制信号通过光耦隔离模块将信号传送到 MOSFET 驱动器,从而控制 MOSFET 的快速通断<sup>[7]</sup>。

## 2 电源开关硬件设计

电源开关的主要模块由电源稳压模块、温度采集模块、光耦隔离模块、MOSFET 驱动器模块、MOSFET 工作模块这五部分组成。其中最重要的是 MOSFET 驱动器模块,它关系到 MOSFET 开关速率的快慢。

### 2.1 电源稳压模块

电源芯片选用的型号是 LM2596-5,它是一款开关稳压电源的芯片,该芯片具有出色的线路和负载调节能力,能够驱动 3 A 的负载。在  $V_{in}$  端通入 12 V 电压后,芯片  $V_{out}$  引脚输出的电压为 5 V,为内部其他元件供电。在电路设计时,在  $V_{in}$  端加入两个滤波电容,在输出端加一个肖特基二极管 1N5819,提供过压保护,RC 电路用于整流滤波。此电源电路输入电压范围广,输出电压稳定,具有低功耗模式和热关断限流保护,以至于不需要散热器<sup>[8]</sup>。电源稳压模块如图 2 所示。

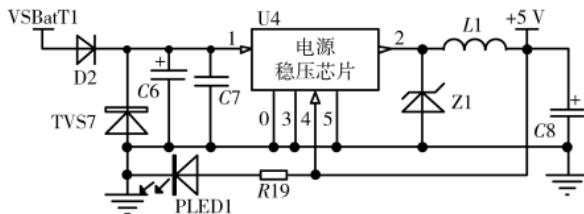


图 2 电源稳压模块

### 2.2 温度采集模块

此模块选用的是 LM50 芯片,具有良好的温度检测,工作原理是将采集到的温度转换成相应的电压数值输出<sup>[9]</sup>。为了能更加准确地测量 MOSFET 的实际温度,将温度传感器布置在靠近 MOSFET 并在同一平面上,要求具备良好的耐热性和稳定性。温度传感器原理参考图如图 3 所示。

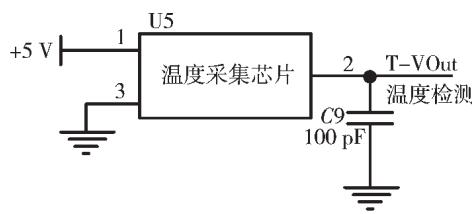


图 3 温度采集模块

### 2.3 光耦隔离模块

为了消除电容的耦合效应,输入开关信号必须经过光耦器件的隔离才可以作为 MOSFET 驱动器的控制输入信号,光耦器件可以提供较高的隔离电压和信号传输频带,具有不错的电气隔离效果。使用时,光耦器件两侧

需要两个不同的供电电压,尤其是输出端需要一个单独的供电电压来输出控制信号,此时需要电路中的 DC-DC 升压芯片来作为另一个供电电压。

采用光电隔离方法来作为驱动器的控制信号输入,如图 4 所示,光耦隔离电路由光耦隔离器件和 DC-DC 升压芯片组成。隔离电压不仅为光耦隔离芯片供电,而且也很好地为 MOSFET 驱动器供电<sup>[10]</sup>。当需要导通和断开 MOSFET 的操作时,拨动开关,电压驱动信号经光耦隔离芯片,将信号传到 MOSFET 驱动器,由 MOSFET 驱动器来控制 MOSFET 的导通与断开。

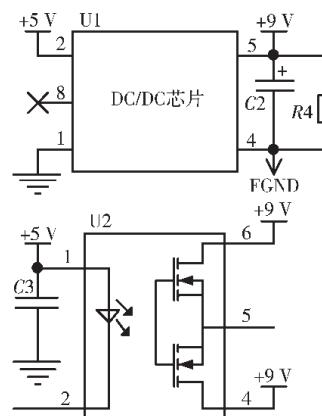


图 4 光耦隔离电路

### 2.4 MOSFET 驱动器

按照该场效应管的管芯尺寸与电压或电流,在对该驱动器与场效应管进行配对时将会面临较大困难。在设计环节,需要遴选合适的驱动器,此时需要对以下参量进行考虑:电流驱动能力、传输延时、静态电流等。对驱动器遴选也受到其功率耗用影响。随后对该场效应管的工作频率与栅极电荷有关联性的驱动器功耗进行分析,同时分析按照该元件的导通、截止时间,将驱动器与栅极电荷进行更好地匹配<sup>[11-13]</sup>。

#### 2.4.1 MOSFET 驱动器的功耗

在对场效应管栅极进行充放电时,都要得到相同能量支持,不管充放电有着怎样的快慢过程,譬如栅极电压的增长与下降,为此,该驱动器电流驱动能力并不会对其栅极电容性负载所涉及的驱动器功耗产生不利影响。

该驱动器功耗主要构成包括:

(1) 该栅极电容充放电所形成的功耗:

$$P_C = C_G \times V_{DD} \times F \quad (1)$$

其中,  $C_G$  为 MOSFET 栅极电容;  $V_{DD}$  为 MOSFET 驱动器电源电压(V);  $F$  为开关频率。

(2) 该驱动器对静态电流进行吸收,由此形成的功耗为:

$$P_Q = (I_{QH} \times D + I_{QL} \times (1-D)) \times V_{DD} \quad (2)$$

其中,  $I_{QH}$ 、 $I_{QL}$  依次为驱动器输入为高、低电平,开关波形占空比则是  $D$ 。

(3) 该驱动器交越导通电流所形成的功耗：

$$P_S = CC \times F \times V_{DD} \quad (3)$$

其中,  $CC$  为交越常数( $A^*sec$ )。

为了获取式(1)的值,就需要对该场效应管的栅极电容进行查询,它又涉及两个电容,即栅极与栅漏电容,后者又可以称作米勒电容。通常,较容易犯错的就是将MOSFET输入电容(亦即是  $C_{ISS}$ )用作该场效应管的总栅极电容。对该栅极电容进行确认的方法就是总栅极电容,用  $Q_G$  表示。这类信息通常在场效应管的典型特性曲线之中。

表 1 展示的是 60 V、400 A、N 沟道 MOSFET 数据手册中的典型实例。数据表中的给定数值,与对应的测试条件(也就是漏极与栅极电压)具有相关性,这些测试条件将会对栅极电荷值带来明显影响。

表 1 数据手册中栅极电荷的表示

符号	参数	最小值	典型值	最大值	单位	测试条件
$Q_G$	总栅极电荷	--	205	300	nC	$V_{GS}=10$ V
$Q_{GS}$	栅源电荷	--	50	--		$V_{DS}=30$ V
$Q_{GD}$	栅漏电荷	--	50	--		$I_D=20$ A
$C_{ISS}$	输入电容	--	14 200	--	pF	$V_{GS}=0$ V
$C_{OSS}$	输出电容	--	4 300	--		$V_{DS}=30$ V
$C_{RSS}$	反向传递电容	--	155	--		$f=1$ MHz

图 5 展示了该场效应管在测试环境下栅极电荷所呈现出来的典型特征曲线,从而确保该功耗的栅极电荷值也能很好满足使用条件。

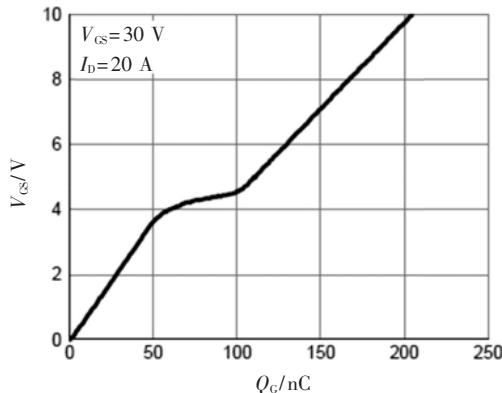


图 5 总栅极电荷-栅源电压(60 V, 400 A, N 沟道MOSFET)

对图 5 曲线进行分析,在  $V_{GS}=10$  V 成立下,该总栅极电荷即为 205 nC( $V_{DS}=30$  V)。利用  $Q=C \cdot V$  关系式,计算出栅极电容为 20.5 nF,这显著高于表 1 给出的 14.2 nF 的输入电容。这意味着,对此栅极电容进行计算时,能够利用总栅极电荷来对相应的电容进行推导。倘若是通过该栅极电荷最大值对最坏情形进行设计,此值就需要按照设计的栅源与漏源电压加以动态调整。

通过表 1 所提出的该场效应管信息作为案例,在  $V_{GS}$  达到 10 V,该开关频率也就是  $F$  为 0.25 MHz,而漏

源电压则是 30 V,该场效应管的栅极电容充放电就会形成该驱动器的功耗,具体如下:

$$P_C = C_G \times V^2 \times F \quad (4)$$

已知  $Q_G = C_G \times V_G$ , 公式可重写为:

$$P_C = Q_G \times V \times F = 205 \times 10^{-9} \times 10 \times 250 \times 10^3 = 512.5 \text{ mW}$$

#### 2.4.2 峰值电流驱动的需求

对场效应管驱动器进行分析,需要对其内外要素进行综合考虑,分析它们对该驱动器所带来的功耗。为此,需要对其功耗进行科学计算,然后再选择合适的封装模式,并对结温进行计算<sup>[14-15]</sup>。

该场效应管需要和其驱动器进行匹配,此时需要结合其导通与截止速度来进行科学设计。而这种速度与栅极电容充放电速度关系紧密。场效应管的栅极电容、导通、截止时间等,和相应驱动器的驱动电流存在密切关系,具体如下:

$$T_d = \frac{[V_d \times C]}{I} \quad (5)$$

其中:  $T_d$  为导通/截止时间,  $V_d$  为栅极电压,  $C$  为栅极电容,  $I$  为峰值驱动电流。

已知栅极电荷的关系为:

$$Q = C \times V \quad (6)$$

公式可以转化为:

$$T_d = \frac{Q}{I} \quad (7)$$

其中:  $Q$  为总栅极电荷。

以下就是借助于设计参数,对该驱动器的峰值电流进行运算。

MOSFET 栅极电荷( $Q$ )=50 nC

MOSFET 栅极电压( $V_d$ )=10 V

导通/截止时间( $T_d$ )=40 ns

代入前面的公式中:

$$T_d = \frac{Q}{I}$$

$$I = \frac{Q}{T_d} = 50 \text{ nC} / 40 \text{ ns} = 1.25 \text{ A}$$

通过该公式,可以算出峰值驱动电流为 1.25 A。其中栅极驱动电压大小为 10 V,在对驱动器进行遴选之际,该参数需要得到充分的考虑,为此,该峰值输出电流即为 1.5 A 的驱动器。

#### 2.4.3 MOSFET 驱动器的选择

MOSFET 驱动器最终选择的型号为 TC4432,它是 30 V CMOS 驱动器,其功耗只有 470 mW,适用于高端驱动器应用。它具有如下的优点:

- (1)高容性负载驱动能力;
- (2)高峰值输出电流:1.5 A;
- (3)输入电压范围广:4.5 V 至 30 V;
- (4)延迟时间短:小于 78 ns;
- (5)输出阻抗低:7 Ω;

(6) 静电释放保护: 4 kV。

MOSFET 驱动器的控制输入支持 TTL/CMOS 兼容输入, 驱动输出有独立的拉电流和灌电流输出引脚, 可以提供 3 A 峰值电流到容性负载和吸收来自容性负载的 1.5 A 峰值电流。

## 2.5 MOSFET 工作模块

由于此电源开关需要通过较大的电流, 电路设计采用 MOSFET 并联来实现电路的分流, 减小单个 MOSFET 的电流压力<sup>[16]</sup>, 因此选用 N 沟道增强型 MOS 管(AOTL66608), 其漏源电压为 60 V、额定电流可达 400 A、导通电阻低至 0.85 mΩ。驱动器及场效应管模块实现机制图如图 6 所示。

## 3 试验设计与分析

### 3.1 试验说明

试验目的为测试 MOSFET 电源开关的电流耐受能力。将电源开关串联在电池包与充放电机电流回路负极主线上, 闭合电源开关后, 对电池包进行充放电, 让电流持续恒流通过电源开关以测试其电流耐受能力, 每次测试过程中电源开关始终保持闭合状态。

如图 7 所示, 经过验证, 电源开关温度最高点为内部温度采集芯片温度, 对此处进行温度采集可以反映整个继电器的最高温度( $T_3$ )。在整个测试过程中需记录下电流和温度等信息以衡量电源开关的过电流能力。

### 3.2 持续过电流测试(室温)

采用恒流充放交替(比如 250 A 10 s 充电, 再 250 A 10 s 放电, 如此循环, 理论上跟恒流一样)来对电源开关进行持续过电流测试。

#### (1) 250 A 恒流试验

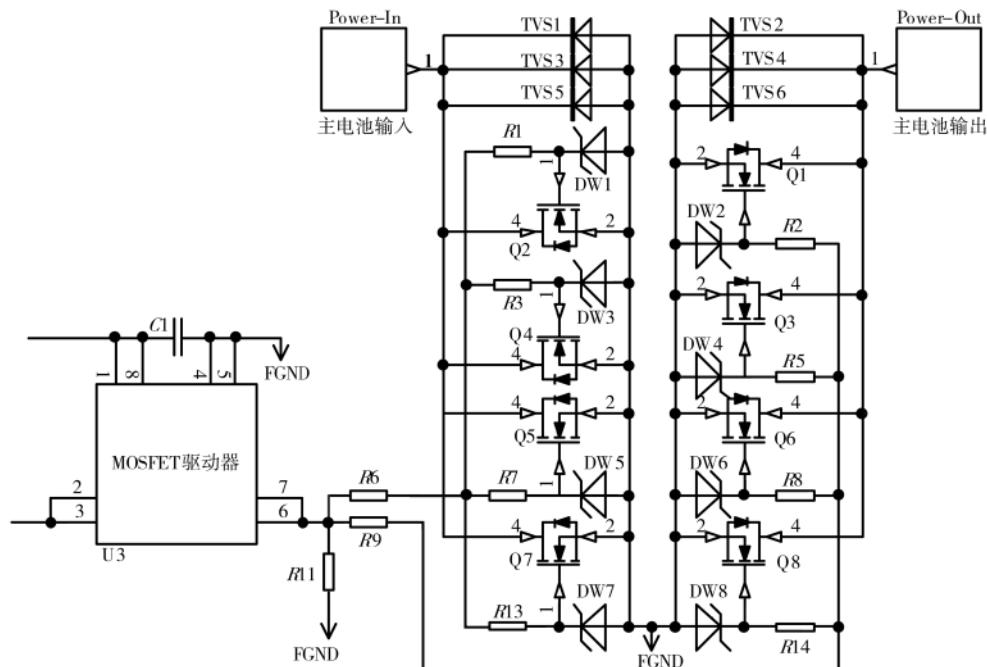


图 6 驱动器及 MOSFET 模块

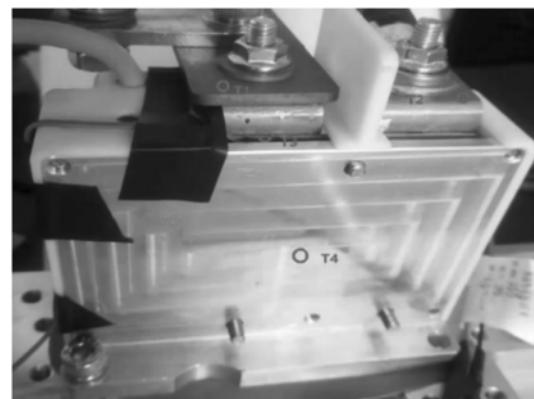


图 7 电源开关温度监控点示意图

250 A 恒流测试流程图如图 8 所示, 试验记录的温度值如表 2 所示。温度变化曲线如图 9 所示。

$T_3$  为电源开关内部温度(也是电源开关最高温度点),

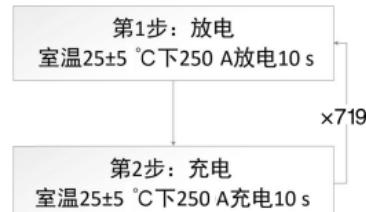


图 8 250 A 恒流测试流程图

表 2 250 A 恒流试验记录值

恒流 电流/A	持续 时间/min	试验开始				试验结束			
		$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$
250	28.6	/	/	12.9 °C	/	/	/	49.4 °C	/

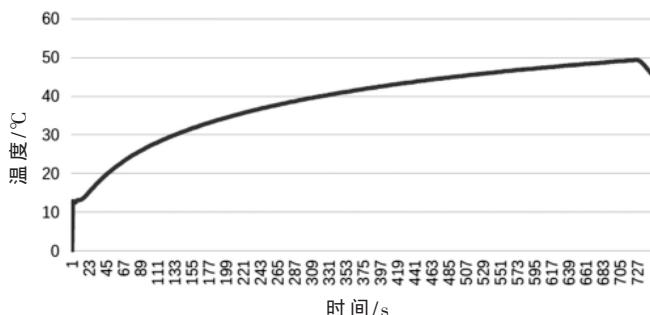


图 9 温度-时间曲线(250 A 恒流)

从试验开始到结束温度始终低于它的最高承受上限温度 80 °C, 外加的 NTC 灵敏度和布置位置影响, 曲线中的值始终比温度传感器值略低, 越到末端温差越大。250 A 恒流最终截止时温度差异为 3 °C。

#### (2) 375 A 恒流试验

375 A 恒流试验记录的温度值如表 3 所示。温度变化曲线如图 10 所示。

表 3 375 A 恒流测试记录值

恒流 电流/A	持续 时间/min	试验开始				试验结束			
		$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$
375	10.2	/	/	9.1 °C	/	/	/	66.5 °C	/

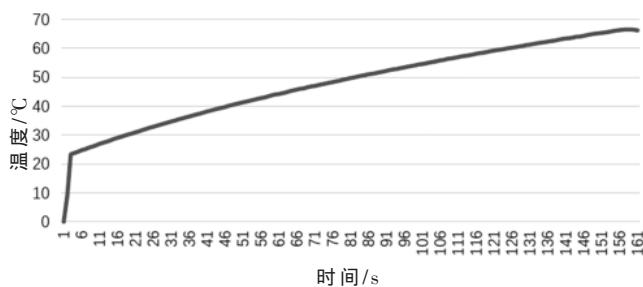


图 10 温度-时间曲线(375 A 恒流)

$T_3$  为电源开关内部温度(也是电源开关最高温度点), 从试验开始到结束温度始终低于它的最高承受上限温度 80 °C。外加的 NTC 灵敏度和布置位置影响, 曲线中的值始终比温度传感器值略低, 越到末端温差越大。375 A 恒流最终截止时温度差异为 14 °C。

通过上述试验, 结果验证该电源开关可以在 375 A 大电流下稳定工作。

#### 4 结论

本文针对继电器的电磁干扰和电弧灼烧现象, 设计了一款基于 MOSFET 的电源开关。对电源开关的工作原理和结构设计进行介绍, 并详细阐述了 MOSFET 驱动器

选型设计及驱动器的工作特性, 最后通过恒流试验测试, 实验结果验证电源开关的耐受能力符合要求。

#### 参考文献

- [1] 蔡永健, 黄爱国. 电磁继电器触点接触电阻分析[J]. 机电元件, 2011, 31(3): 60–62.
- [2] 于敏. 浅谈场效应管开关特性[J]. 中国新技术新产品, 2015(2): 32.
- [3] BARNEY B. 负载开关技术在现代电源管理中发挥重要作用[J]. 电子产品世界, 2019, 26(6): 28–30.
- [4] 赵宪宁, 张国海. 基于 MOSFET 的负载开关设计与实现[J]. 无线电工程, 2015, 45(6): 96–98.
- [5] 刘长柱, 王林军. MOSFET 开关过程的研究及米勒平台振荡的抑制[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(9): 69–74.
- [6] 徐顺尤. 功率 MOSFET 的特性分析及应用[J]. 通信技术, 1986(3): 33–49.
- [7] 范莹莹, 姜岩峰. 基于 MOS 管的新型转换开关在集成电路测试中的应用[J]. 电子测试, 2012(4): 66–71.
- [8] 陈诚, 赵永瑞, 任纪伟. 一种实用动力电池用大功率电子开关设计[J]. 微型机与应用, 2013, 32(19): 35–36, 40.
- [9] 杨宇澄, 叶海波, 金乃庆, 等. 一种 3.4 W 开关电源方案设计与分析[J]. 电器, 2013(S1): 533–537.
- [10] 徐瑞. 高效率 AC/DC 开关电源设计[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [11] 王毅. 功率 MOSFET 的失效分析及其驱动设计[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [12] 李小娜, 李艳娜. SiC MOSFET 驱动电路的设计[J]. 电子技术与软件工程, 2019(8): 83.
- [13] 刘晓琳. 高可靠性 SiC MOSFET 驱动电路的设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [14] 鲁莉容, 李晓帆, 蒋平. 功率 MOSFET 高速驱动电路的研究[J]. 电力电子技术, 2001(6): 45–47.
- [15] 田颖, 陈培红, 聂圣芳, 等. 功率 MOSFET 驱动保护电路设计与应用[J]. 电力电子技术, 2005(1): 73–74, 80.
- [16] 郭毅军, 苏小维, 李章勇, 等. MOSFET 的驱动保护电路的设计与应用[J]. 电子设计工程, 2012, 20(3): 169–171, 174.

(收稿日期: 2021-03-23)

#### 作者简介:

尹百通(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 汽车电子控制技术以及功率 MOSFET 的研究与分析。

龚元明(1964-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 汽车电子与控制、总线与仪表、物联网和工业自动化。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所