

# 辉光放电质谱仪真空泵碳化硅逆变器设计

王占扩, 李想, 陈吉文

(北方工业大学 电气与控制工程学院, 北京 100144)

**摘要:**针对辉光放电质谱仪真空机械泵电机逆变器工作周期较长,可靠性和稳定性要求高的特点,设计一套三相全SiC MOSFET的逆变器。首先介绍控制电路和功率电路的设计思路,然后详细介绍驱动和保护电路工作原理,并对直通短路保护电路进行优化设计,使用复杂可编程逻辑控制器(complex programmable logic controller, CPLD)代替各种逻辑芯片,降低电路复杂度,最后经过实验验证,逆变器运行良好,可以在2.4 μs完成过流保护、在0.4 μs完成半桥直通短路保护,可靠性高,为SiC MOSFET逆变器设计应用提供一定的参考价值。

**关键词:**碳化硅MOSFET;逆变器;过流保护;直通短路保护

**中图分类号:**TP271; TM46 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-7241(2025)09-0100-05

## Silicon Carbide Inverter Design for Glow Discharge Mass Spectrometer

WANG Zhankuo, LI Xiang, CHEN Jiwen

(School of Electrical and Control Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

**Abstract:** The vacuum mechanical pump motor inverter of glow discharge mass spectrometer has a long working cycle and high requirements for reliability and stability. A three-phase full SiC MOSFET inverter is designed in this paper. Firstly, the design idea of control circuit and power circuit is introduced. Firstly, the design idea of control circuit and power circuit is introduced, then the working principle of drive and protection circuit is introduced in detail, and the straight-through short-circuit protection circuit is optimized. Complex programmable logic controller (CPLD) is used to replace all kinds of logic chips to reduce the complexity of the circuit. Finally, the experimental results show the inverter works well, and the over-current protection can be completed at 2.4 μs and the half-bridge straight-through short-circuit protection at 0.4 μs. The inverter has high reliability and can provide some reference value for the design and application of SiC MOSFET converter.

**Keywords:** silicon carbide MOSFET; inverter; over-current protection; shoot-through short circuit protection

## 0 引言

辉光放电质谱仪是一种可以检测金属和非金属材料各种元素及成分的重要仪器,在冶金、半导体工业、材料加工领域有着重要的应用<sup>[1]</sup>,也是国家“十四五”重大科研仪器攻关项目之一。在辉光放电质谱仪中,机械真空泵用于辉光放电离子源腔体真空抽取和维持。在工作初始阶段,以最大的抽气量运行,快速达到分子泵的启动条件,在检测过程中与分子泵持续维持工作环境的真空状态,工作周期长,对可靠性要求高。相对于定频控制,变频控制具有节能、环保和延长泵体使用寿命等优点。第三代宽禁带半导体功率器件SiC MOSFET相比于第二代Si功率器件可以承受更高的温度,在高功率密度和长时间运行电力电子装置中有很好的应用前景<sup>[2]</sup>。国内外对真空泵电机及驱动器进行了一些研究,文献[3-4]对真空泵驱动电机设计和逆变器控制进行了研究,并对控制器

电流输出谐波问题提出了建议。文献[5-6]对SiC MOSFET的特性及驱动保护进行了研究,文献[7]设计一台7.5 kW汽车用SiC MOSFET逆变器,驱动保护电路采用商业驱动芯片完成,有一定的参考意义。本文在以上文献基础上,结合课题需求,以节能、提高可靠性为目的,设计一套全SiC MOSFET的真空机械泵电机逆变器,具有独立的驱动保护电路。逆变器除了基本控制功能之外,还具有丰富的接口,可与离子源的分子泵、高压电源、真空柜、阀门等装置连接,可实现真空环境和离子源整机控制。

## 1 逆变器整体结构

真空泵逆变器整体结构如图1所描述,主要包括控制单元、功率单元两部分。其中控制单元负责驱动器的整体控制和通讯功能,由PWM输出电路、通信电路、数字接口电路、模拟信号处理电路等组成。功率单元负责交流-直流-交流变化功能,包括整流电路、逆变电路、驱动保护电路、电流、电压采样电路,其中驱动保护电路采用自主设计的门极电压检测直通短路保护电路和功率器件导通

\*基金项目:国家重点研发计划(2022YFF0705102)

收稿日期:2024-05-14

降压检测保护电路,以提高功率单元的可靠性。电源单元负责驱动器负责为控制单元和功率单元的电路提供运行所需要的各种电源,下面将分别介绍两个电路的设计。

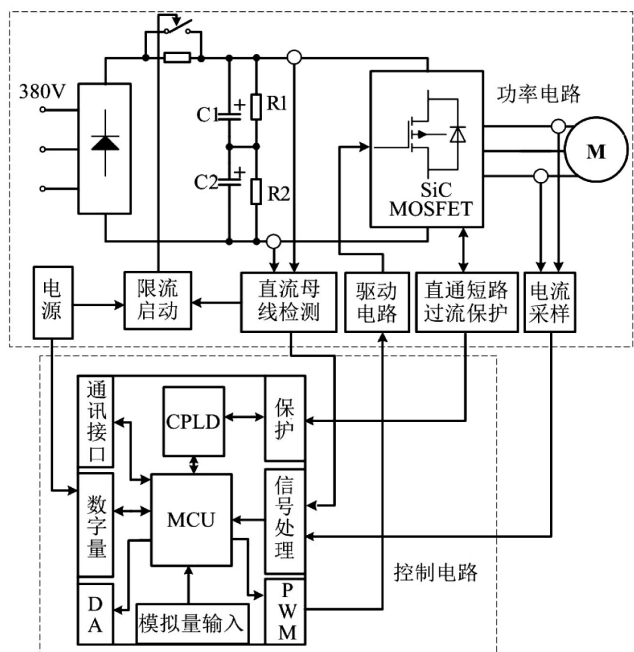


图1 逆变器整体框图

### 1.1 控制电路设计

控制电路以双核微控制器 TMS320F28377D 和 CPLD 为控制核心, TMS320F28377 具有较强的运算能力, 合理优化 CPU 任务分配, 可以最大效能利用控制器, 因此在设计中使用 CPU1 控制真空泵电机逆变器, CPU2 控制通信、数字接口、辉离子源腔体真空度的采集、高精度高压恒流辉光电源启停、载气质量流量计和各种阀门控制等, CPLD 用于对功率电路的故障信号进行综合, 完成半桥直通短路和过流保护。在控制单元中除了 PWM 输出、电流、电压信号处理电路之外, 增加了检测仪器通用的 CAN 通讯模块、数字量输入输出模块和模拟量输入输出模块。模拟量输入输出用于控制检测载气质量流量计的控制, 采集真空规数据输出, 计算腔体真空度; 数字量输入输出用于控制各种阀门通断与检测阀门状态, CAN 总线模块负责与激发电源和上位机通讯, 将离子源的真空状态、阀门状态信息发送给上位机, 用于检测设备的整体控制和状态显示。CAN 总线电路和数字量输入输出均采用高速光耦隔离, 提高抗干扰能力。

### 1.2 功率电路设计

功率电路包括整流、直流母线滤波、逆变、电压电流信号采样电路组成。功率电路设计依据传统的设计流程, 首先根据真空泵电机参数选择整流和逆变电路功率器件, 计算直流母线滤波电容, 参考逆变电路功率器件的特性设计逆变驱动电路, 包括驱动电源和驱动芯片的选

择, 结合驱动电源电压和功率器件资料计算驱动电阻, 验证驱动电源是否满足额定功率输出要求, 最后可以根据应用情况选择设计短路和过流保护电路, 并验证设计有效性。本文使用飞越 VSV-65D 真空泵, 三相交流异步电动机功率 1.5 kW, 选取的功率器件为 Wolfspeed 公司的 1 200 V/ 36 A 碳化硅 MOSFET C2M080120D, 参数满足要求, 下面将详细介绍驱动和保护电路的设计。

#### (1) 驱动电路原理

驱动电路用于 SiC MOSFET 的通断控制, 既要可靠性, 又要兼顾快速性。驱动电路的功能框图如图 2 所描述。整个驱动电路包括了驱动电源、数字隔离、过流保护、功率器件开通消隐、门极电压检测和综合等电路, 均采用元器件搭建, 可以更深入研究驱动及保护原理, 并实时调整保护参数, 达到最优效果。

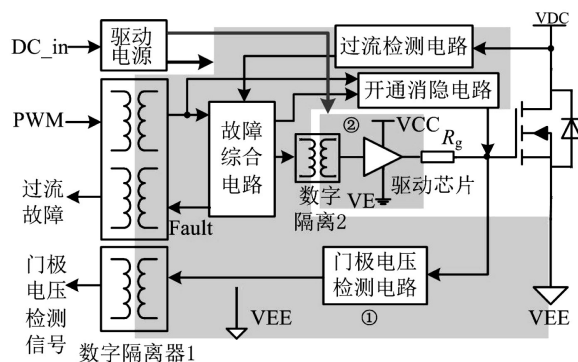


图2 驱动电路整体框图

当电路工作时, PWM 驱动信号首先经过数字隔离器 1 进入驱动电路, 经过故障综合电路后进入数字隔离 2, 最后进入驱动芯片产生门极驱动信号。过流检测电路用于监测 SiC MOSFET 是否发生过流故障, 消隐电路用于在 SiC MOSFET 未导通或者未充分导通之前防止过流检测电路误动作, 门极电压检测电路用于检测 SiC MOSFET 的门极电压, 判断是否导通, 用于半桥直通短路故障判断。故障综合电路用于综合过流故障, 当过流故障时, 将关闭驱动输出。

#### (2) 驱动电路地平面设计

驱动电源采用 SiC MOSFET 专用驱动电源芯片 QA-01C, 供电电源结构如图 3 所描述, 其中 VCC 与 VE 之间为 21 V, VCC 与 VEE 之间为 18 V, VE 与 VEE 之间为 -3 V, 21 V 为驱动芯片供电, 18 V 经过降压后为过流保护、门极电压检测和故障综合电路供电, SiC MOSFET 的源极与 VEE 连接, 驱动芯片的关断电平相对于 VEE 为 -3 V, 加速关断, 并防止驱动电路受到干扰造成功率器件误导通。电路 1 部分的地平面与 SiC MOSFET 的漏极连接, 电路 2 部分的地平面与关断负电压 VE 连接, 电路 1 和电路 2 的地平面存在负关断电压 -3 V 的电压差, 当故障综合电路

输出电平为0V时,相对于电路2为3V,已经临近驱动芯片的高电平输入下限,极易引发驱动芯片输出电平误跳变,进而导致SiC MOSFET误导通。为了解决这一问题,在驱动芯片前端增加了高速数字隔离2,如图4所示,这样就可以解决以上电平不统一问题,提高电路可靠性。

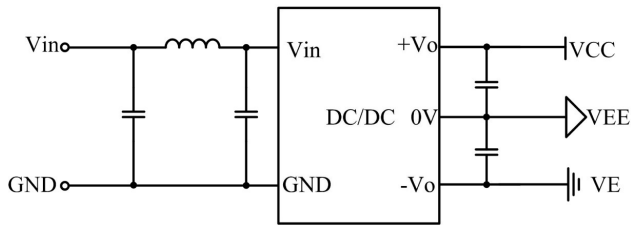


图3 驱动电源结构图

(3) 驱动功率计算

功率器件的开通和关断是驱动脉冲经驱动电阻和门极内阻对门极电容的充放电过程,电阻的大小对功SiC MOSFET的开关时间、损耗、EMI、dv/dt、di/dt、短路特性有较大的影响,根据文献[8]和SiC MOSFET的数据手册,驱动电阻取值为10Ω,代入式(1)计算最大驱动电流为:

$$I_{GM} = \frac{V_{GS(on)} - V_{GS(off)}}{R_G} \quad (1)$$

式中,  $R_G$  是门极电阻,为门极内阻与驱动电阻之和。

根据最大驱动电流,计算出电流为1.43A,驱动功率可以根据式(2)计算得到。

$$P_{DRV} = Q_{GATE} \cdot f_{IN} \cdot \Delta V_{GATE} \quad (2)$$

式中,  $Q_{GATE}$  是门极充电电荷,可以根据功率器件手册提供的曲线获得。  $\Delta V_{GATE}$  是驱动电压的模值,  $\Delta V_{GATE} = V_{GS(on)} - V_{GS(off)}$ ,  $f_{IN}$  是开关频率。根据功率器件手册参数,  $Q_{GATE}$  在设定的驱动电压下的参考值是62nF,开关频率20kHz综合电路中其他元件的功率消耗,可以估算出整个驱动电路的功耗计算驱动功率为25.5mW,驱动电源QA-01C和驱动芯片IXDN609SI可满足设计要求。

(4) 导通电压检测过流保护设计

功率器件的常用方法在文献[5]中有较为详细的论述,其中基于导通电压检测法应用最为广泛。原理是检测工作中的功率器件的导通压降,判断是否发生过流。过流保护电路如图4所描述。图4中,当驱动芯片输出高电平后,钳位MOSFET  $M_2$  关闭,SiC MOSFET开始导通,电流源  $I_b$  电压VCC高于SiC MOSFET的导通压降,电流源的电流如图4中  $i_1$  所示,经过电阻经  $R_{desat}$  和二极管  $D_{desat}$  流入SiC MOSFET,与此同时,功率电流  $i_2$  也流入SiC MOSFET,此时比较器反相端电压  $V_{desat}$  为SiC MOSFET导通压降、 $D_{desat}$  导通压降和  $R_{desat}$  电压之和,当电压超过同相端的阈值电压,  $A_c$  输出跳变为低电平,发生过流故障信号,经过故障综合电路,关断SiC MOSFET。

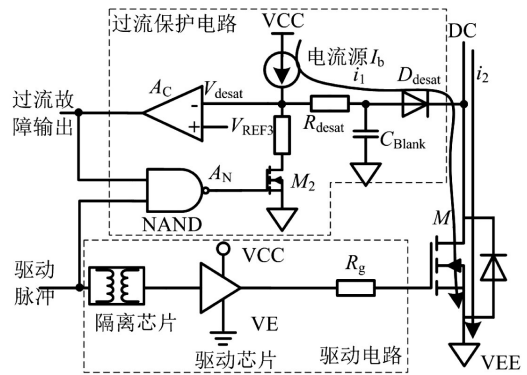


图4 过流保护原理图

(5) 半桥直通短路保护电路设计

半桥直通短路保护是一种专门应对桥式变流器中半桥功率器件同时导通短路故障的保护方法<sup>[5]</sup>,通过采集功率器件门极电压信号,使用高速比较器与SiC MOSFET的门极阈值电压比较,根据比较器输出结果判断功率器件是否导通,如果半桥两只功率器件同时导通,视为发生直通短路故障,可有效应对控制错误和串扰造成的直通短路故障。文献[5]使用逻辑门电路和锁存器在驱动电路侧搭建保护电路,电路复杂,且无法根据调整保护逻辑,导致保护灵活性不足,本课题对该保护方法进行了优化设计,直接将门极电压检测信号通过数字隔离器传输到驱动电路外侧,使用大规模可编程逻辑门阵列进行统一处理,具有集成度高,修改方便灵活,电路体积小优点。具体原理如图5所描述。

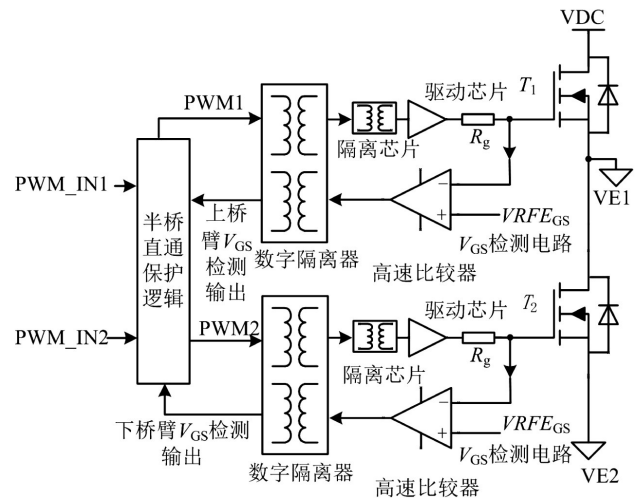


图5 直通保护电路原理图

直通短路保护电路包括门极电压  $V_{GS}$  检测、检测结果传输和故障综合处理三部分,使用高速比较器检测  $V_{GS}$  电压,当门极电压超过阈值电压后,比较器输出由高变低,结果经数字隔离器送入直通短路保护逻辑,逻辑电路处理之后输出故障综合结果,故障综合电路如图6所描述,整个电路包括直通短路保护,驱动故障综合和驱动自锁三部分。

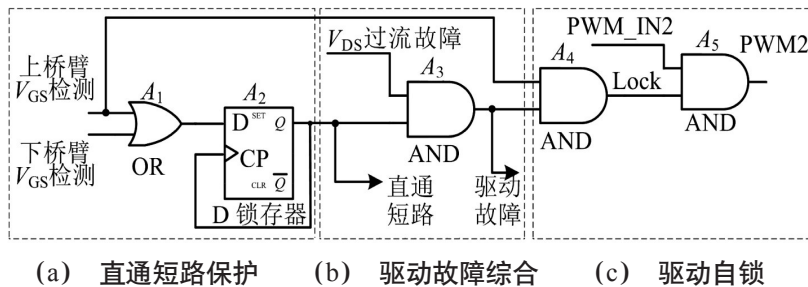


图6 直通短路保护综合逻辑原理图

在图中或门  $A_1$  和锁存器  $A_2$  构成直通保护逻辑: 半桥两个功率器件  $T_1$  和  $T_2$  的门极检测信号在  $A_1$  进行或逻辑运算, 只有两个功率器件全部处于开通状态时,  $A_1$  输出由高跳变为低电平, 直通故障信号有效。直通故障信号使用 D 锁存器锁存: 将锁存器 Q 端与 CP 端连接, 当直通故障发生时, 锁存器输入端跳变为低电平, Q 端输出和 CP 也变为低电平, 故障信号锁存在输出端。图中与门  $A_3$  将功率器件过流故障与直通短路故障进行逻辑运算构成驱动故障综合电路, 当发生任意一故障时, 输出由高电平跳变为低电平, 生成驱动故障信号。与门  $A_4$  和  $A_5$  构成驱动自锁电路: 驱动故障、互补桥臂门极电压检测信号和本桥臂功率器件的门极驱动信号 PWM\_IN 作为自锁电路的输入, 当有驱动故障或者互补开通之后, 与门  $A_4$  输出低电平,  $A_5$  输出为低电平, 从而将原始的驱动信号 PWM\_IN 锁定为低电平, 保证功率器件强制关闭, 驱动自锁电路可以在驱动故障产生关闭功率器件, 驱动电路在正常运行过程中可以避免产生直通短路。文献[5]使用各种逻辑芯片在驱动电路侧实现直通短路保护功能, 电路复杂, 灵活性不足, 本课题使用 CPLD 实现逻辑电路, 提高灵活性, 降低驱动保护电路的复杂度。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 实验测试条件

为了验证设计的正确性, 对逆变器的输出和驱动保

护电路分别进行了验证, 实验条件如表 1 所示。

表 1 实验条件

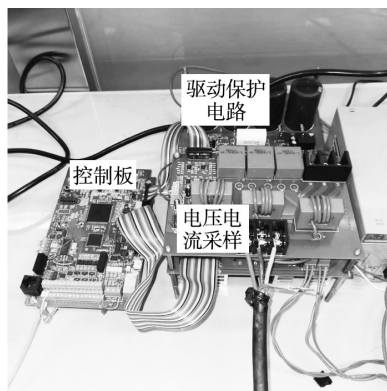
名称	参数设置
输入电压(AC)	380 V
电机功率	1.5 kW
逆变器工作开关频率	20 kHz
短路试验直流母线电压(DC)	500 V
SiC MOSFET	36 A / 1 200 V
门极驱动电压	+18 V / -3 V
$V_{GS}$ 检测阈值	4 V
$V_{DS}$ 检测阈值	7 V
直通和过流保护测试脉冲宽度	5 $\mu$ s

### 2.2 逆变器运行测试

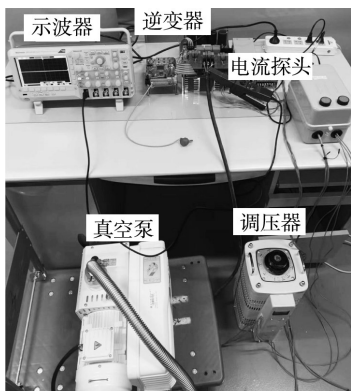
实验平台如图 7 所示, 其中图 7(a) 为控制电路和主电路, 图 7(b) 为实验平台整体。在实验时, 逆变器输入电压设定为 380 V, 真空泵与真空腔体通过波纹管连接, 并保证气路密封, 逆变器以 50 Hz 额定频率运行, 当腔体气压达到 200 帕并稳定后, 将逆变器工作频率调整为 30 Hz, 腔体气压可维持不变, 电流波形和 SiC MOSFET 门极驱动波形如图 7(c) 所示。

### 2.3 保护电路测试

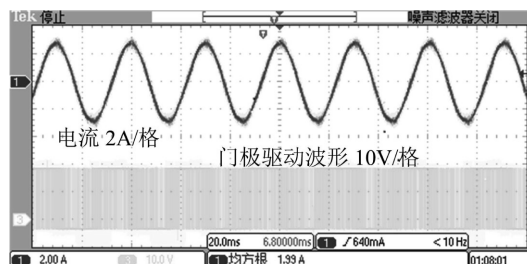
在直流母线电压 500 V 情况下, 对直通保护和过流保护进行了测试。通过同时对半桥两个 SiC MOSFET 发送



(a) 驱动器硬件电路实物



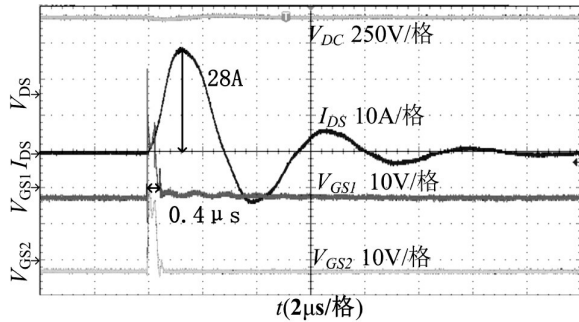
(b) 实验装置实物



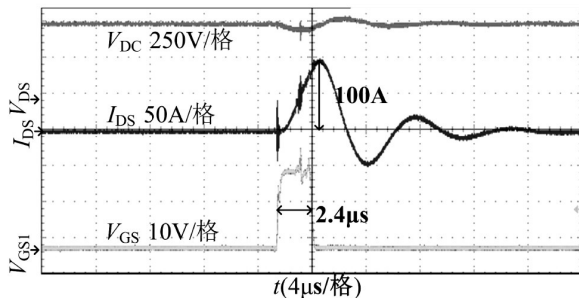
(c) 逆变器输出 30 Hz 电流及驱动波形

图 7 实验平台和实验波形

5  $\mu\text{s}$  的驱动脉冲,产生直通短路故障,保护波形如图 8(a) 所示,可以看出,电路在故障发生后 0.4  $\mu\text{s}$  关闭功率器件,短路电流约为 28 A。在逆变器中旁路半桥中的上桥臂 SiC MOSFET,对下桥臂 SiC MOSFET 施加 5  $\mu\text{s}$  的驱动脉冲,制造过流故障,保护波形如图 8(b) 所示,电路在过流故障后 2.4  $\mu\text{s}$  关闭功率器件,过流电流为 100 A。



(a) 直流母线 500 V 直通短路过流保护波形图



(b) 直流母线 500 V 导通电压检测过流保护波形

图 8 过流保护与直通短路保护波形图

## 2.4 实验结果分析

实验结果如表 2 所示,从逆变器输出实验波形可以看出,在输出 30 Hz 时,逆变器输出电流约 2 A,正弦度较好,驱动波形正常。直通短路保护和过流保护在 500 V 直流母线电压下均可以有效工作,直通短路保护的电流值明显要低于导通电压检测的过流保护,两种保护电路组合使用,可以提高逆变器的可靠性。

表 2 实验结果

名称	参数
输出频率/电流	30 Hz/ 2 A
500 V 直流母线过流保护时间/电流	2.4 $\mu\text{s}$ / 100 A
500 V 直流母线直通短路保护时间/电流	0.4 $\mu\text{s}$ / 28 A

## 3 结束语

本文对全 SiC MOSFET 真空泵逆变器进行了研究,设计了控制电路和驱动保护电路,并通过实验检验了电路的有效性,从实验结果可以看出,过流保护和直通电路保护均可有效地保护功率免受过流和短路造成损害,逆

变器可以可靠运行,为 SiC MOSFET 在变流器应用设计提供一定的借鉴作用。

## 参考文献:

- [1] 刘红,刘鹏宇,刘英,等. 辉光放电质谱法测定高纯铜中痕量硫[J]. 冶金分析, 2021, 41(8): 15-21.
- [2] 杨国武,侯艳霞,孙晓飞,等. 非标方法长期稳定性评价及在辉光放电质谱分析纯镍中痕量元素的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(3): 867-876.
- [3] 盛况,任娜,徐弘毅. 碳化硅功率器件技术综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1741-1753.
- [4] 安跃军,初佰慧,安辉,等. 真空干泵用屏蔽电机无速度传感器残压差重投控制策略[J/OL]. 电机与控制学报: 2023-09-19: 1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1408.TM.20230524.0925.008.html>.
- [5] 王占扩,童朝南,黄伟超. SiC MOSFET 短路特性及过流保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5751-5760.
- [6] 邵伟华,冉立,曾正,等. SiC MOSFET 短路特性评估及其温度依赖性模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2121-2131.
- [7] 苏杭,姜燕,刘平,等. 7.5 kW 电动汽车碳化硅逆变器设计[J]. 电源学报, 2019, 17(3): 126-132.
- [8] 咸粤飞,崔晓光,胡冰,等. SiC MOSFET 驱动与保护电路设计[J]. 半导体技术, 2022, 47(8): 660-664.

作者简介:王占扩(1982—),男,实验师,研究方向:电力电子技术,分析仪器电源设计。