

集成并联多芯片电流分布测量的 SiC 半桥功率模块

曲泽龙¹, 孙鹏^{1*}, 程旭², 陈勇², 蔡雨萌¹, 张浩然¹, 李学宝¹, 赵志斌¹

(1. 新能源电力系统全国重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206;

2. 广东电网有限责任公司珠海供电局, 广东省 珠海市 519000)

SiC Power Module With Integrated Parallel Multi-chip Current Distribution Measurement

QU Zelong¹, SUN Peng^{1*}, CHENG Xu², CHEN Yong², CAI Yumeng¹,

ZHANG Haoran¹, LI Xuebao¹, ZHAO Zhibin¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China; 2. Zhuhai Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd.,

Zhuhai 519000, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: In multi-chip parallel silicon carbide (SiC) half-bridge modules, chip current imbalance can easily lead to overcurrent failure of some chips. Monitoring the current of each chip inside the module is an effective way to achieve chip-level protection, fault diagnosis and active current sharing to improve the reliability of the module. Aiming at the problem of measuring the current distribution inside the module, a SiC half-bridge module with an integrated chip-level current measurement circuit board is developed. The integrated circuit board of the module provides low inductance power circuit (10.5 nH) and driver circuit (8.2 nH for the upper arm and 7.8 nH for the lower arm) connections while realizing full chip current measurement. The current measurement coil inside the board has a high-frequency bandwidth of 163 MHz, and the relative deviation of transient current measurement is less than 3%. A single measurement coil can simultaneously measure the SiC MOSFET switching current and diode freewheeling current. Using coils of half the quantity of chips, the current distribution of all chips can be measured. The accuracy and validity of the current distribution measurement of parallel chips under different static parameters and driving resistances are also verified by dynamic characteristic test experiments.

KEY WORDS: SiC half-bridge module; packaging; Rogowski coil; integration; parallel; chip current measurement

摘要: 多芯片并联的 SiC 半桥模块内, 芯片电流不均衡容易导致部分芯片过流失效。监测模块内部各芯片电流是实现芯片级保护、故障诊断和主动均流, 提高模块可靠性的有效途径。针对模块内部电流分布测量问题, 该文研制一种集成芯片级电流测量电路板的 SiC 半桥模块, 该模块集成的电路板在实现全芯片电流测量的同时, 提供低电感功率回路 (10.5 nH) 及驱动回路 (上桥 8.2 nH、下桥 7.8 nH) 连接。电路板内部的芯片电流测量线圈高频带宽达 163 MHz, 瞬态电流测量相对偏差小于 3%。单个测量线圈可同时测量 SiC 芯片开关电流和二极管续流电流, 使用芯片数量一半的线圈即可测量所有芯片的电流分布。通过动态特性测试实验, 验证并联芯片在不同静态参数和驱动电阻下电流分布测量的准确性和有效性。

径。针对模块内部电流分布测量问题, 该文研制一种集成芯片级电流测量电路板的 SiC 半桥模块, 该模块集成的电路板在实现全芯片电流测量的同时, 提供低电感功率回路 (10.5 nH) 及驱动回路 (上桥 8.2 nH、下桥 7.8 nH) 连接。电路板内部的芯片电流测量线圈高频带宽达 163 MHz, 瞬态电流测量相对偏差小于 3%。单个测量线圈可同时测量 SiC 芯片开关电流和二极管续流电流, 使用芯片数量一半的线圈即可测量所有芯片的电流分布。通过动态特性测试实验, 验证并联芯片在不同静态参数和驱动电阻下电流分布测量的准确性和有效性。

关键词: SiC 半桥模块; 封装; 罗氏线圈; 集成; 并联; 芯片电流测量

0 引言

第三代宽禁带半导体材料如 SiC、氮化镓(GaN)使得电力电子器件性能表现有了整体提升, 拥有十分广阔的发展前景^[1-4]。近几年的新能源汽车行业蓬勃发展、百舸争流, 提高了 SiC 器件的工业使用量 and 市场占比。

SiC 金属氧化物半导体场效应晶体管 (metal oxide semiconductor field effect transistor, SiC MOSFET) 单芯片的功率等级无法满足大功率的工程要求, 因此, 电流等级更大、杂散参数更低的多芯片并联的大功率模块成为主要的解决方案^[5-8]。然而, 相比于硅基芯片, SiC 芯片的转移曲线、阈值电压 u_{th} 、通态电阻 $R_{ds(on)}$ 等静态参数分散性更加明显^[9]。即使芯片被筛选过, 模块内部的芯片布局差异也会导致不同并联芯片的驱动及功率回路杂散参数的不一致, 进而对并联芯片间的电流分配产生

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目 (030400KC23090017)。

Science and Technology Project of China Southern Power Grid (030400KC23090017)。

影响,造成模块内部芯片不均流^[10-12]。部分芯片会因电流超额出现过热甚至失效,严重影响功率模块的可靠性。因此,如何实时在线掌握模块内部各个芯片的状态是极具价值的研究。

能够嵌入 SiC 模块内部的传感器必须满足要求: 1) 高测量带宽。Wolf speed 公司最新一代 SiC MOSFET 关断暂态的电流下降时间为 13 ns^[13], 根据 $BW=0.35/t$ 可计算开关瞬态等效频率, 为保证高测量可靠性, 取 3 倍裕度后, 可计算其高频带宽至少要满足 80.8 MHz^[14]; 2) 线性、非饱和。部分电流传感器为提高测量灵敏度加入磁芯, 但磁芯会导致传感器在大电流下出现磁路饱和, 无法满足线性的传递关系; 3) 高抗干扰能力。SiC 器件开关速度远远快于硅基器件, 高 di/dt 及 du/dt 给测量带来严重干扰^[15], 且模块内部的电磁干扰更加严重, 因此要求传感器必须具有强抗电磁干扰能力; 4) 灵活集成。模块内部结构紧凑, 电流传感器必须有灵活易集成的特点, 以方便和功率回路一体化设计; 5) 电气隔离。功率回路杂散参数的存在会导致器件开关暂态下的电压、电流过冲, 缩小器件的安全工作区。因此, 传感器要和功率回路要实现可靠的电气隔离, 不能引入高额的杂散参数^[16], 另外, 还需保证传感器与功率回路的可靠绝缘, 以保证功率模块的电压等级。

目前已经商用的电流测量方法的对比如表 1 所示, 可以看出, 商用的电流传感器在集成性、带宽、隔离、抗干扰能力上均无法达到 SiC 模块内部集成的要求。因此, 亟需提出新的模块内部传感器的设计和集成方式, 以满足 SiC 模块内芯片级的电流传感。

表 1 电流测量方法的性能比较
Table 1 Performance comparison of current measurement methods

参数	电流互感器	同轴分流器	霍尔传感器	磁阻传感器	柔性罗氏线圈
型号	Pearson 2877	SDN-414-05	TMCS1133	CT433	CWT UM
隔离	是	否	是	是	是
高频带宽/GHz	0.200	2.000	0.001	0.001	0.030
集成性	差	差	差	好	一般
饱和	是	否	否	是	否
抗干扰性	弱	弱	强	强	强

将罗氏线圈嵌入印制电路板(printed circuit board, PCB)中可以有效地改善柔性罗氏线圈的缺点, 减小体积的同时也提高带宽, 增强结构稳定性,

满足功率模块内部集成的条件。

常见的功率模块封装形式可分为压接型模块和焊接型模块。对于压接型 IGBT 内部芯片的电流, 可以用 PCB 罗氏线圈直接嵌套发射极碟簧的方式, 测量内部的芯片电流分布^[17-19]。而对于焊接型模块, 半导体公司推出了模块中驱动、监测、保护的智能功率模块(intelligent power module, IPM)。英飞凌^[20]、赛米控^[21]等公司在功率回路串入采样电阻测量模块内部电流, 由于测量方式和功率回路非隔离, 电阻的存在会增加整体损耗, 而且电阻阻值存在温度漂移, 高温状态无法精准测量模块内部电流分布, 因此, 不适用于大功率场景。有研究在 IGBT 模块的键合线外部嵌套 PCB 罗氏线圈^[22-23], 但 PCB 罗氏线圈在功率模块内部并不固定, 会因外力位移, 造成线圈偏心及倾斜, 导致测量重复性差, 且不固定的线圈严重影响了模块的正常工作。有学者采用硅钢片缠绕线匝的方式, 自制两级电流传感器, 并将其套在 SiC MOSFET 芯片周围, 通过皮尔森电流互感器输出电流测量信号, 实现芯片电流测量^[24]。但所研制的传感器具有磁芯, 在较大电流下存在饱和及测量非线性问题, 且绕制的一次侧没有设计电场屏蔽和返回绕线, 传感器抗电磁侵扰性弱, 且 45 MHz 的带宽较低, 在高频下无法满足高精度测量。因此, 需要提出合理的电流传感器的集成方式, 来实现功率模块芯片电流分布测量。

本文首先对 PCB 罗氏线圈及其外部信号处理电路所组成的 PCB 罗氏线圈电流测量系统的工作原理进行阐述; 然后, 提出了一种集成芯片级电流测量电路板的 SiC 半桥功率模块, 通过实验考核了模块内集成的多个电流传感器的高频带宽、增益一致性、测量准确性; 其次, 成功研制了所提出的集成芯片电流分布测量的 SiC 半桥功率模块, 并阐述了模块的封装流程; 最后, 通过动态特性测试实验, 来对所研制的 SiC 半桥功率模块的并联芯片电流分布测量能力进行验证。

1 PCB 罗氏线圈电流测量系统

1.1 电流测量原理

如图 1 所示, PCB 罗氏线圈电流测量系统主要由 PCB 罗氏线圈、传输线和外部积分器电路构成。流过一次导体的随时间变化的电流 $i(t)$ 所产生的时变磁场穿过 PCB 截面中的线匝, 在线圈两端感应出与电流变化率 $di(t)/dt$ 成正比的电压信号 u_d 。PCB

罗氏线圈的输出信号 u_d 经由传输线引出至外部积分电路进行信号积分，最终输出与一次侧电流成比例的电压信号 u_{out} ，即：

$$u_{out} = K \int \frac{di(t)}{dt} dt = Ki(t) \quad (1)$$

式中 K 为比例系数。

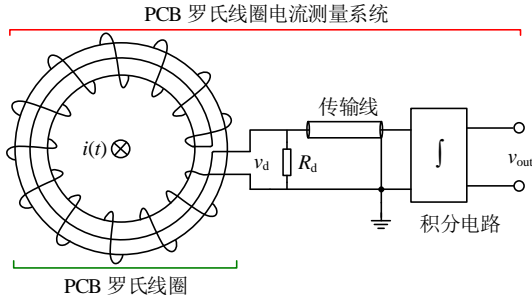


图 1 PCB 罗氏线圈电流测量系统的整体架构
Fig. 1 Structure of the current measurement system

在图 2 中，在 f_l 到 f_h 频率范围内，随频率单调递增的线为 PCB 罗氏线圈的幅频特性，即 G_{coil} 。单调递减的线为积分器的幅频特性 G_{int} 。平直线代表 PCB 罗氏线圈电流测量系统的幅频特性，即：

$$G_s = G_{coil} G_{int} \quad (2)$$

式中 G_0 为基准增益，在基准增益 ± 3 dB 范围内的频则为 PCB 罗氏线圈电流测量系统的带宽。

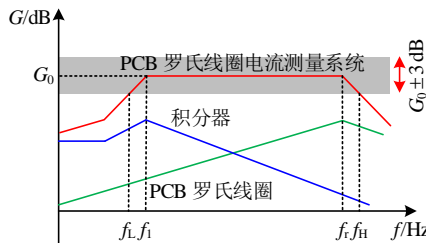


图 2 PCB 罗氏线圈电流测量系统幅频特性
Fig. 2 Amplitude-frequency characteristics of current measurement system

PCB 罗氏线圈电流测量系统的低频带宽 f_l 由积分器决定，高频带宽 f_h 由 PCB 罗氏线圈决定，线圈的谐振频率 f_r 越高，PCB 罗氏线圈电流测量系统的高频带宽越高。降低线圈的寄生参数是提升高频带宽的有效方法。

1.2 PCB 罗氏线圈等效电路模型及传递特性

PCB 罗氏线圈的集总参数等效电路如图 3 所示，由于线圈本身存在的杂散参数，线圈两端的感生的电压信号在高频时会产生畸变。根据等效电路，PCB 罗氏线圈的传递函数 G_{coil} 如式(3)所示，其输入为一次侧电流 I ，输出为 PCB 罗氏线圈的输

出信号 V_d 。

$$G_{coil} = \frac{sM}{s^2 L_s C_s + s(L_s / R_d + R_s C_s) + R_s / R_d + 1} \quad (3)$$

式中： R_d 为线圈外部并联的阻尼电阻； R_s 、 L_s 和 C_s 分别为线圈的杂散电阻、电感和电容。 L_s 和 C_s 的并联谐振频率决定传感器的高频带宽，谐振频率为

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}} \quad (4)$$

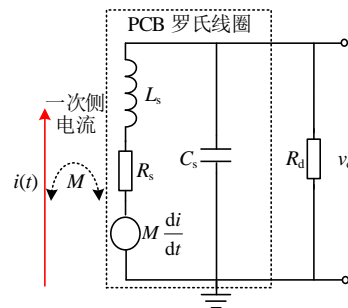


图 3 PCB 罗氏线圈等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of PCB Rogowski coil

1.3 积分器电路拓扑及传递特性

带宽范围内，线圈两端感应出的电压幅值与电流变化率 di/dt 为正比例关系，需要加入积分环节进行原电流信号的复原。如图 4(a)中， R_{PI} 、 C_{PI} 、 R_{AI} 和 C_{AI} 分别为无源积分和有源积分电路的积分电阻和积分电容。如图 4(b)所示，无源积分在高于 $1/(2\pi \cdot R_{PI} C_{PI})$ 的频段内具有积分特性。为拓展积分器带宽，需要与有源积分构成组合积分，使 $R_{PI} C_{PI} = R_{AI} C_{AI}$ 则便能够达到组合积分的效果。有源积分在直流附近的低频增益趋近于无穷大，这样会无限放大运算放大器的低频噪声和直流偏置，使得积分器无法正常工作。因此，有源积分电容 C_{AI} 两端必须并联 R_{F1} 、 R_{F2} 、 R_{F3} 、 C_F 所组成的 T 型滤波网络来降低积分器低频增益，以保证积分器正常工作^[25]。

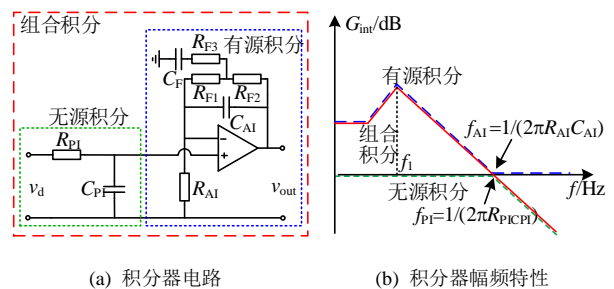


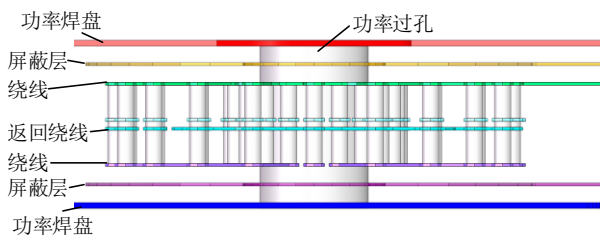
图 4 积分器电路拓扑及幅频特性

Fig. 4 Topology and amplitude-frequency characteristics of integrator

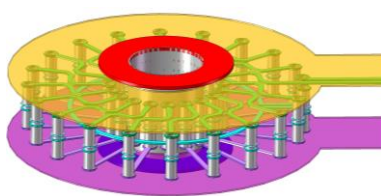
因此,整体 PCB 罗氏线圈电流测量系统的低频带宽由积分器确定。需合理地选择 R_{F1} 、 R_{F2} 、 R_{F3} 和 C_F , 在保证积分器正常工作的情况下,延拓积分器的低频带宽 f_L 。本文所提 PCB 罗氏线圈电流测量系统的低频带宽 f_L 为 103 Hz。

1.4 模块内部集成的 PCB 罗氏线圈结构

传统的 PCB 罗氏线圈通常设计在 4 层或 6 层板中,中间开孔,以便一次侧导体穿过。然而,这种结构难以集成到功率模块中,而且无法保证一次侧导体与线圈的相对位置固定。一次侧电流的偏心和倾斜均会带来测量误差。并联的多个 PCB 罗氏线圈与其一次侧导体之间存在互感系数不一致问题。因此,本文提出如图 5 所示的功率回路、测量线圈为一体的 PCB 结构,最大限度的减小不同的一次侧导体与 PCB 罗氏线圈间互感系数的差距。这种结构既能实现芯片电流测量,又能实现一次侧导体在功率模块中的低杂散电感连接。



(a) PCB 罗氏线圈叠层图



(b) PCB 罗氏线圈结构图

图 5 可模块内部集成的 PCB 罗氏线圈结构

Fig. 5 Module-integrable PCB Rogowski coil structure

PCB 设计为 8 层,上下外层和功率过孔负责通流,接入功率模块的功率回路中。大电流条件下的载流能力可以通过增加第 1 层和第 8 层的铜层厚度以及填充功率过孔来保证。PCB 罗氏线圈嵌入在 PCB 的 2—7 层中。功率过孔为嵌套在其周围的 PCB 罗氏线圈提供了固定的一次侧电流路径,克服由于一次侧偏心和倾斜带来的测量误差,极大增加了测量准确度。PCB 罗氏线圈由电场屏蔽层、绕线和返回绕线组成。电场屏蔽层位于线圈的最外侧,通过接地以隔离 SiC 器件开关过程中产生的高 du/dt 干扰。线圈的灵敏度与其线匝面积和匝数有关。线圈

绕线均匀分布在功率过孔周围,以达到高共模噪声抵抗能力和均匀的感应电压。另外,线圈整体可视为一圈环路,磁场垂直穿过线圈时会产生严重的干扰信号。因此,需要返回绕线逆向绕一圈来抵消垂直穿过线圈的磁场所产生的干扰。

SiC 器件的高速开关特性要求 PCB 罗氏线圈满足高测量带宽,因此,在设计时要对带宽的影响因素进行充分考虑。首先根据空间范围确定线圈内外半径和匝数以完成线圈走线,然后还应考虑 PCB 板整体的层压设计,以控制 PCB 板厚和内部的层间距。屏蔽层与线圈之间的杂散电容 C_{sc} 是 PCB 罗氏线圈杂散电容 C_s 的主要贡献项,可表示为

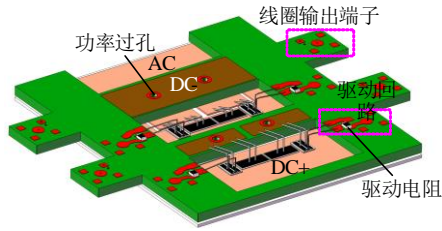
$$C_{sc} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r W l}{h} \quad (5)$$

式中: h 为 PCB 罗氏线圈绕线与屏蔽层之间的距离; W 为线宽; l 为绕线总长度; ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_r 为 PCB 板的相对介电常数。过小的层间距 h 会导致 PCB 罗氏线圈具有高额的杂散电容,极大地降低高频带宽。因此,提高需要合理控制层间距,以减小 PCB 罗氏线圈的杂散电容,提高 PCB 罗氏线圈的高频带宽。通过有限元仿真,计算 PCB 罗氏线圈的杂散电感 L_s 为 113.1 nH,杂散电容 C_s 为 7.8 pF,通过式(4)可计算谐振频率为 169.4 MHz,谐振频率远高于 SiC MOSFET 的开关电流的振荡频率。

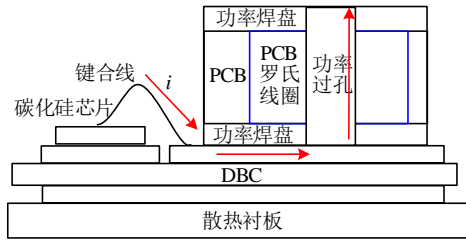
2 芯片级电流测量电路板

2.1 PCB 结构

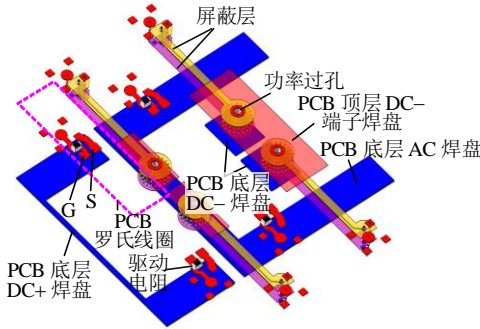
如图 6 所示,芯片级电流测量电路板可分为功率回路部分、电流测量部分和栅极部分。功率回路部分由功率过孔、PCB 底层 DC+ 焊盘、PCB 顶层 AC 键合焊盘、PCB 底层 AC 焊盘、PCB 顶层 DC- 端子焊盘构成。底层焊盘与直接覆铜(direct bond copper, DBC)陶瓷基板表面焊接,PCB 和 DBC 陶瓷基板共同构成功率回路。对于电流测量部分,PCB 罗氏线圈嵌套在 4 个功率过孔周围,测量流经 4 个功率过孔的电流。测量信号经由 PCB 板上的射频端子引出后,经由传输线连接至外部积分器。对于栅极驱动部分,每颗 SiC MOSFET 均设置了独立的驱动回路,栅极和开尔文源极键合至 PCB 顶层焊盘,驱动信号经由 4 个射频端子独立输入。根据 4 个 PCB 罗氏线圈测量到的模块内部芯片的电流分布结果,可闭环独立控制每颗 SiC MOSFET 的驱动信号来达到均流、均热的目的。



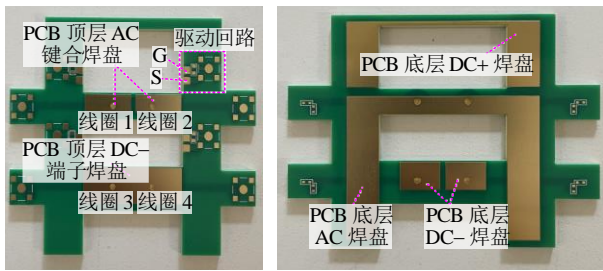
(a) 模块内 PCB 连接关系示意图



(b) 下桥芯片电流测量方式



(b) PCB 内部铜层示意图



(c) PCB 正面实物图

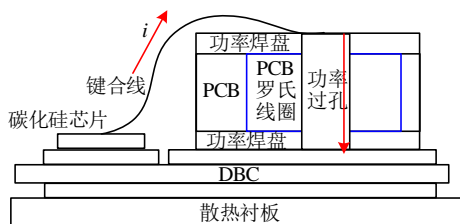
(d) PCB 反面实物图

图 6 芯片级电流测量电路板结构

Fig. 6 Structure of chip-level current measurement board

2.2 芯片电流测量过程

本文所提 PCB 结构能够满足不同电流方向的流通需求。如图 7(a)所示，上桥芯片当需要向 AC 端通流时，上桥 SiC 芯片可以键合至 PCB 顶层 AC 键合焊盘，电流从 SiC 芯片经由键合线、功率过孔达到 DBC 铜皮。而当下桥芯片需要向 DC- 端子通流时，如图 7(b)所示，SiC 芯片则可以键合至 DBC 铜皮表面，再由 PCB 的功率过孔向上引出至 PCB 顶层 DC- 端子焊盘。因此，功率过孔周围的 PCB 罗氏线圈可以测量到芯片电流。多层 PCB 可以让模块的功率回路设计更加灵活。



(a) 上桥芯片电流测量方式

图 7 功率模块内部 PCB 罗氏线圈嵌入方式

Fig. 7 Embedding method of PCB Rogowski coils inside the power module

半桥模块内部芯片电流测量的过程如图 8 所示。上桥 SiC MOSFET 导通时，PCB 罗氏线圈测量芯片源极回路的电流；在关断时，下桥 PCB 罗氏线圈测量流经下桥 SiC MOSFET 体二极管和其并联肖特基二极管的续流电流。因此，PCB 罗氏线圈不仅可以测量 SiC MOSFET 芯片导通时的电流分布情况，还能够在续流时测量同时流经 SiC MOSFET 体二极管和并联肖特基二极管的电流。

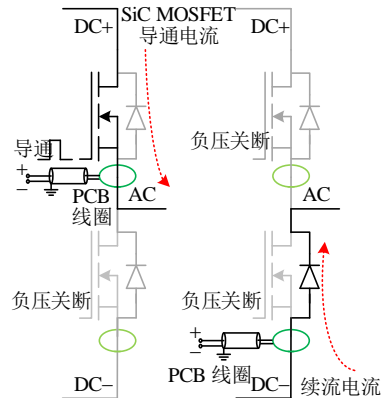


图 8 芯片电流测量过程示意图

Fig. 8 Chip current measurement process

综上所述，对于内部有并联二极管的功率模块，无需为二极管单独设置 PCB 罗氏线圈进行电流测量。PCB 罗氏线圈可以同时测量 SiC MOSFET 和二极管的电流分布。在半桥模块工作过程中，PCB 罗氏线圈电流测量系统能够精准感知流经芯片的电流分布，实现芯片级状态监测。

2.3 PCB 罗氏线圈电流测量系统性能

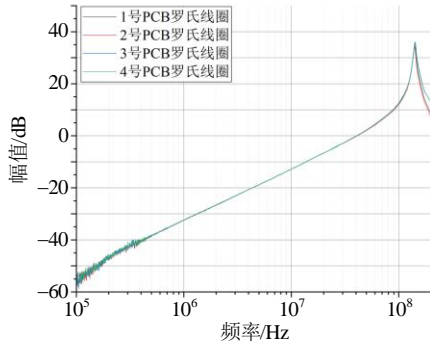
2.3.1 PCB 罗氏线圈参数及系统整体高频带宽

使用阻抗分析仪和矢量网络分析仪测量 PCB 罗氏线圈的寄生参数及互感 M ，结果如表 2 所示。线圈互感为 3.7 nH，寄生电感为 114.0 nH，寄生电容为 9.7 pF。线圈在 151.3 MHz 附近发生并联谐振。由于 PCB 的工艺偏差和实验测量误差，测量到的谐振频率与仿真存在 10.7% 的偏差。图 9(a)为在没有

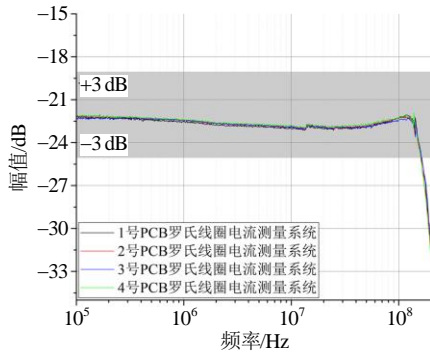
表2 PCB罗氏线圈的各项参数

Table 2 Parameters of PCB Rogowski coil

线圈参数	测量结果	线圈参数	测量结果
寄生电阻 R_s/Ω	0.9	互感 M/nH	3.7
寄生电感 L_s/nH	114.0	谐振频率 f_r/MHz	151.3
寄生电容 C_s/pF	9.7	—	—



(a) 无积分器的PCB罗氏线圈传递特性曲线



(b) 连接积分器后PCB罗氏线圈电流测量系统的传递特性曲线

图9 PCB罗氏线圈和PCB罗氏线圈电流测量系统的传递特性曲线

Fig. 9 Transmission characteristic curves of PCB Rogowski coils and current measurement systems

并联阻尼电阻 R_d 和外接积分器的情况下,集成在模块中的4个PCB罗氏线圈的传递特性曲线,通过对比传递特性曲线可以看出,PCB中的4个PCB罗氏线圈谐振频率一致,线圈在小于谐振频率的频段内表现出微分特性。图9(b)则展示了连接积分器后所组成的4个PCB罗氏线圈电流测量系统的传递特性曲线。PCB罗氏线圈电流测量系统在带宽范围内具有均匀的增益,且4个PCB罗氏线圈电流测量系统的增益和带宽均高度一致。选取100 kHz下的增益为基准增益,在此基准上加、减3 dB便可以确定带宽。4个PCB罗氏线圈电流测量系统的平均-3 dB高频带宽为163 MHz,远高于所述的80.8 MHz的测量SiC MOSFET开关电流瞬态的高频带宽需求。因此,通过实验证明了PCB罗氏线圈电流测量系统具有高度的测量一致性和出色的高频

表现,满足模块内并联芯片电流分布的测量需求。

2.3.2 电流测量准确性

将功率模块的芯片级电流测量电路板接入并联分立器件动态特性测试平台进行电流测量,以检验线圈并联电流测量的准确性及抗临近电流干扰的能力,如图10所示。

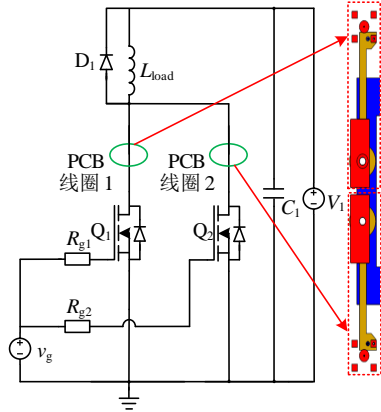


图10 分立器件动态测试平台等效电路

Fig. 10 The equivalent circuit of DPT platform for discrete device

图10中: C_1 为母线电容器; D_1 为用于续流的SiC二极管; L_{load} 为负载电感器, Q_1 和 Q_2 为并联的2个TO-247封装的分立SiC MOSFET器件; R_{g1} 和 R_{g2} 为驱动电阻; u_g 和 u_1 为电压源。

如图11所示,芯片级电流测量电路板的通流部分被串接到并联分立器件双脉冲(double-pulse test, DPT)测试平台上,同时,分别测量流过两个器件的电流。测量结果与最大量程为30 A、高频带宽为120 MHz的商用钳式电流探头进行比较。电流测量结果如图12所示,器件开通时电流的振荡频率为22.5 MHz,关断为40 MHz。与商用钳式探头测量结果对比,两PCB罗氏线圈电流测量系统测量到的稳态最大电流的相对测量偏差分别为2.0%和

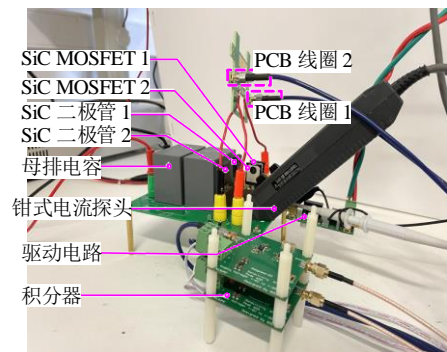


图11 分立器件动态测试实验平台

Fig. 11 Experimental platform of DPT platform for discrete device

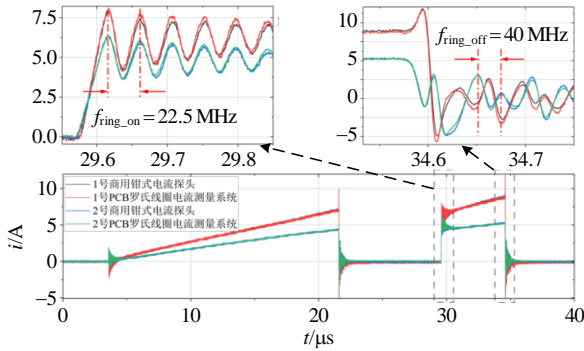


图 12 并联分立器件电流测量结果对比

Fig. 12 Comparison of current measurement results for parallel discrete devices

2.7%；开通时最大电流振荡峰值的相对测量偏差为 2.9% 和 0.3%。无论是稳态电流和暂态振荡电流，PCB 罗氏线圈电流测量系统均能够实现精准测量。因此，PCB 罗氏线圈电流测量系统能够实现并联器件电流测量的功能，且具有高测量准确性。

2.3.3 临近电流干扰

SiC MOSFET 2 保持关断，只对 SiC MOSFET 1 进行动态测试，考察 PCB 罗氏线圈对邻近电流的抗干扰能力。实验结果如图 13 所示，在邻近器件开通时，最大电流过冲达到 18.72 A，而 PCB 罗氏线圈电流测量系统 2 仅感生出幅值为 0.21 A 的误差电流。实验表明，PCB 罗氏线圈具有强抗临近电流干扰能力。

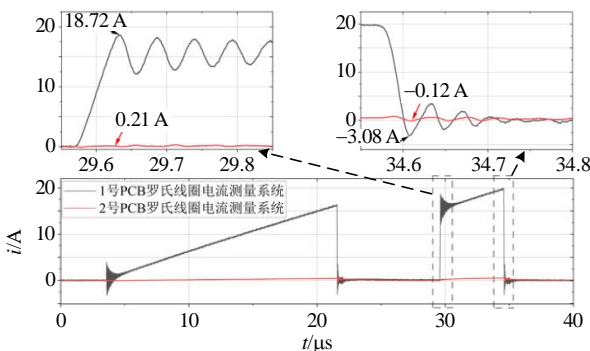


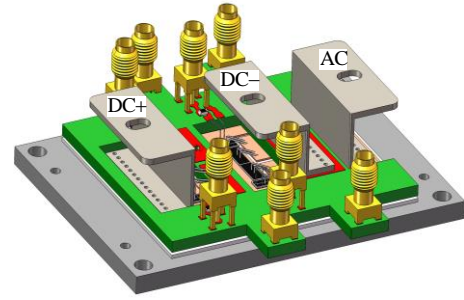
图 13 PCB 罗氏线圈抗干扰能力实验结果

Fig. 13 Experimental results of anti-interference capability of PCB Rogowski coil

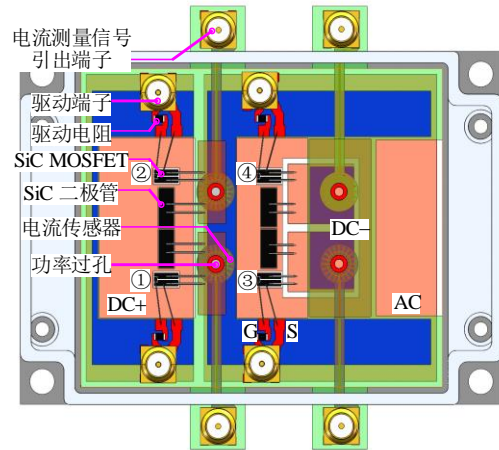
3 SiC 半桥功率模块

3.1 功率模块结构

结合所提 PCB 罗氏线圈的嵌入方法，设计一款图 14 所示的集成多芯片并联电流分布测量的 1.2 kV/120 A 的 SiC MOSFET 半桥功率模块。上桥和下桥分别采用 2 颗 1.2 kV/60 A 的 SiC MOSFET



(a) 模块整体结构



(b) 模块内部结构

图 14 功率模块结构图

Fig. 14 Overall structure of power module

芯片、2 颗 SiC 肖特基二极管芯片并联。每颗 SiC MOSFET 均采用独立驱动的方式。上桥 SiC MOSFET 芯片源极及其并联的 SiC 二极管阳极键合至 PCB 顶层 AC 键合焊盘，经由 PCB 上桥的功率过孔连接至 DBC 铜皮的 AC 端；下桥 SiC MOSFET 芯片源极及其并联的 SiC 二极管阳极则键合到 DBC 铜皮上，经由 PCB 下桥的功率过孔连接至 PCB 顶层的 DC- 功率端子。DC+ 功率端子和 AC 功率端子均焊接在 DBC 铜皮上，而 DC- 功率端子焊接在 PCB 顶层焊盘上。每颗 SiC MOSFET 的栅极及开尔文源极均键合至 PCB 上层焊盘上，分别由驱动端子独立引出，此设计可以明显降低驱动回路的杂散电感。电流测量信号线则延伸出模块外壳，由射频端子引出。每个 PCB 罗氏线圈的两条信号线尽量靠近，以减少磁通面积，降低磁场干扰。

此外，通过有限元仿真，模块 DC+ 功率端子到 DC- 功率端子之间的杂散电感为 10.5 nH。在板厚 2 mm 的情况下，提取单个功率过孔的引入给模块功率回路带来的杂散电感不超过 0.5 nH。考虑多芯片并联，所有功率过孔引入的总杂散电感将会更小。因此，功率过孔的存在不仅能够实现功率回路

低感连接,还是负责芯片电流测量的 PCB 罗氏线圈稳定的一次侧导体,提高电流测量的准确度。另外,栅极回路具有低的杂散电感,提取上、下桥并联芯片驱动回路的杂散电感分别为 8.2 和 7.8 nH,有效降低模块开关损耗和芯片的栅氧应力。

3.2 模块封装流程

功率模块的封装流程如图 15 所示。首先,使用探针测试芯片的漏电特性和静态参数并进行筛选。芯片的静态参数通过曲线追踪仪连接高压探针台,在芯片手册中的测试条件下,测量阈值电压和导通电阻。然后,用丝网印刷机均匀涂抹焊料,将芯片、DBC 基板和散热底板用石墨夹具固定后进行真空焊接。焊料采用 SAC305,是一种含有 96.5% 锡,3% 银和 0.5% 铜的无铅合金。DBC 表面铜厚为 300 μm,板厚 0.635 mm,表面镀镍钯金处理。散热底板材质则为铜,表面镀镍处理。选择 0.3 mm 粗的铝线分别进行驱动回路和功率回路的引线键合。键合完成后,采用预成型焊片焊接功率端子,采用焊料焊接驱动电阻和射频端子。焊接完成后,使用高温密封胶进行外壳粘接,以保证气密性,以方便后续的硅凝胶灌注。在灌注硅凝胶前,首先,将配制好的硅凝胶进行一次真空脱气,然后倒入模块中;再重复进行几次真空脱气处理,避免存在小气泡,以确保硅凝胶填充至模块内部所有空隙,保证绝缘性能;然后,对硅凝胶进行加热使其凝固;最后,安装好模块的上外壳和功率端子的螺母,弯折端子,完成模块封装。

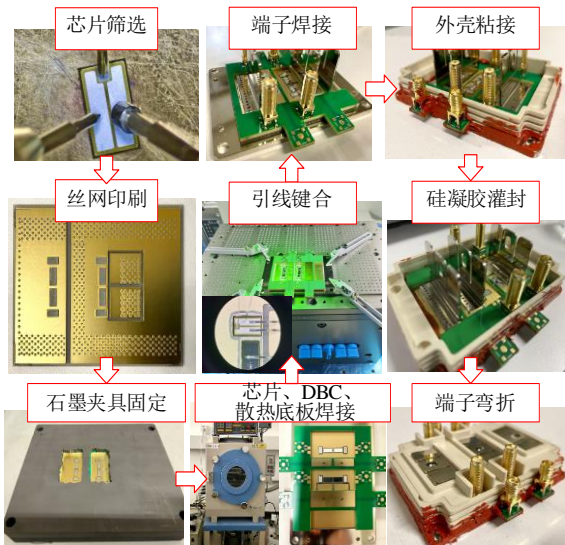


图 15 功率模块封装流程图

Fig. 15 The flow of power module packaging

4 模块内芯片电流分布测量实验

4.1 实验平台

针对所设计的 SiC 半桥功率模块,设计图 16 中的 SiC 半桥模块动态特性测试平台,并使用 2 个测量带宽为 DC 至 120 MHz,最大量程为 30 A 的商用钳式电流探头测量脉冲总电流。对于功率模块的驱动部分,使用商用驱动板通过转接板连接至功率模块的 4 个驱动端子来控制上下桥芯片开通和关断。半桥模块内部的 PCB 罗氏线圈通过同轴线与外部积分器连接,然后通过示波器采样积分器的输出信号。

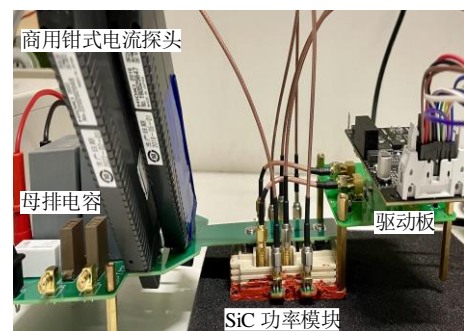


图 16 SiC 半桥模块动态特性实验平台

Fig. 16 Experimental platform for dynamic characterization of SiC half-bridge power module

4.2 芯片参数差异下的电流分布

在封装前, SiC MOSFET 芯片均进行了筛选,为了进一步证明 PCB 罗氏线圈电流测量系统对模块内多芯片电流分布的测量准确性,上桥 1 号 SiC MOSFET 芯片的阈值电压 U_{th} 和导通电阻 $R_{ds(on)}$ 均大于与其并联的 2 号 SiC MOSFET。两芯片阈值电压分别为 3.76 和 3.36 V,导通电阻分别为 59.2 和 53.5 mΩ。

模块内部芯片电流分布情况如图 17 所示,可

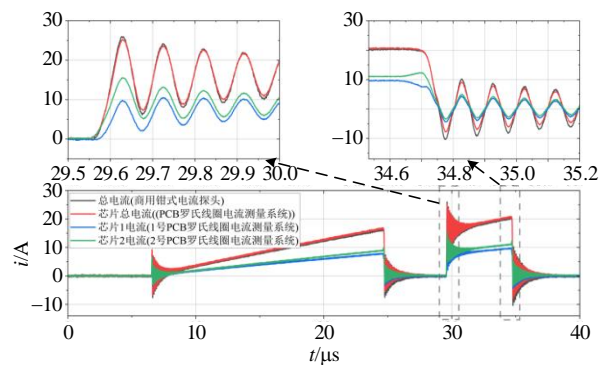


图 17 芯片参数差异下的功率模块内电流分布波形

Fig. 17 Waveforms of current distribution within a power module under different chip parameter

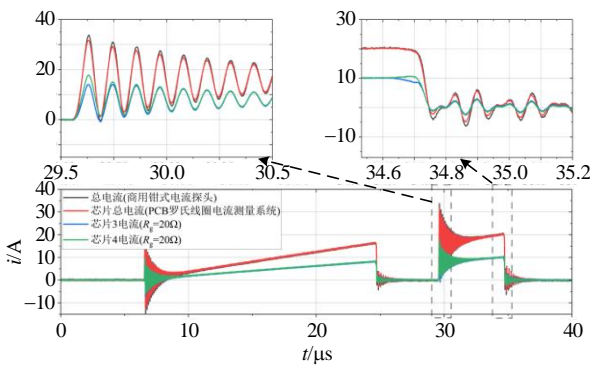
以明显看出，芯片 1 电流由于阈值电压的差异，芯片 1 慢于芯片 2 开通，早于芯片 2 关断；由于导通电阻的差异，稳态时流过芯片 1 的电流小于流过芯片 2 的电流，电流分布符合芯片筛选结果。另外，流过并联两芯片的电流和与商用钳式电流探头的测量结果进行对比，电流波形基本一致。稳态最大电流相对测量偏差分别为 1.7%；开通时最大电流振荡峰值相对测量偏差为 2.9%。

4.3 驱动电阻差异下的电流分布

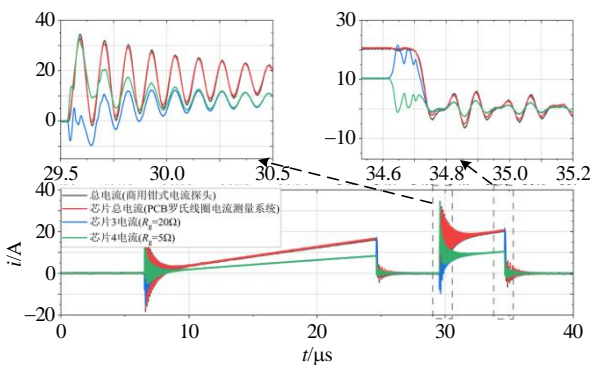
并联的 3 号 SiC MOSFET 芯片和 4 号 SiC MOSFET 芯片的阈值电压分别为 3.73 和 3.45 V，导通电阻分别为 49.4 和 49.7 mΩ。如图 18(a)所示，在驱动电阻阻值一致时，两芯片的开关暂态电流按阈值电压分布，稳态电流趋于一致，电流分布符合芯片筛选结果。暂态电流不平衡系数可表示为

$$\Delta I_{\text{dyn}} = \frac{2 |I_{\text{peak1}} - I_{\text{peak2}}|}{I_{\text{peak1}} + I_{\text{peak2}}} \quad (6)$$

式中 I_{peak1} 、 I_{peak2} 分别为流过两芯片暂态电流峰值。计算得到的开通暂态电流不平衡系数为 0.23。



(a) 两芯片驱动电阻一致时模块内电流分布



(b) 两芯片驱动电阻不一致时模块内电流分布

图 18 改变驱动电阻阻值前后功率模块内电流分布波形
Fig. 18 Waveforms of current distribution in the power module before and after changing the driving resistance

改变 4 号芯片驱动电阻为 5 Ω 后，电流分布如

图 18(b)所示，驱动电阻小的 4 号 SiC MOSFET 芯片开通早于 3 号，开通时的第 1 个振荡周期，4 号 SiC MOSFET 芯片承担几乎所有的电流；关断时，4 号 SiC MOSFET 芯片早于 3 号关断，关断瞬间电流转移至 3 号芯片。开通暂态电流不平衡系数由 0.23 上升至 2.19。通过改变驱动电阻，进一步证明 PCB 罗氏线圈电流测量系统具有可靠的电流测量能力。

4.4 续流电流分布

感性负载下，半桥功率模块需要二极管进行续流。通过感知续流电流的分布情况，可以掌握模块内部换流时的电流变化过程。在实验中，开关上桥的 SiC MOSFET 芯片，下桥的 SiC MOSFET 的体二极管及其并联二极管续流，图 19 为 PCB 罗氏线圈电流测量系统的输出波形，在上桥的 SiC MOSFET 关断后，下桥开始续流，验证了在不为二极管单独增加 PCB 罗氏线圈的情况下，所提 PCB 罗氏线圈的嵌入方式也可以测量到续流时的电流分布。

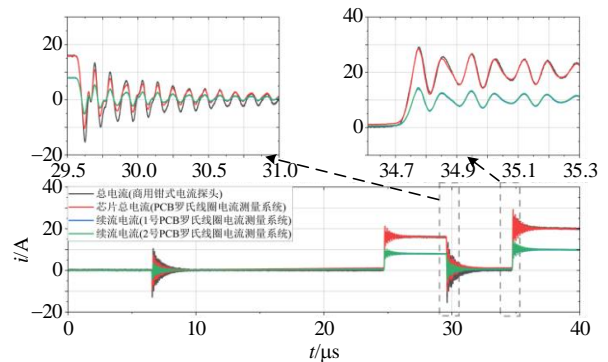


图 19 功率模块内续流电流分布波形

Fig. 19 Waveforms of freewheeling current distribution

4.5 模块内部测量干扰

图 20 为开关模块的下桥芯片，各 PCB 罗氏线圈电流测量系统的输出波形。3 号和 4 号 PCB 罗氏

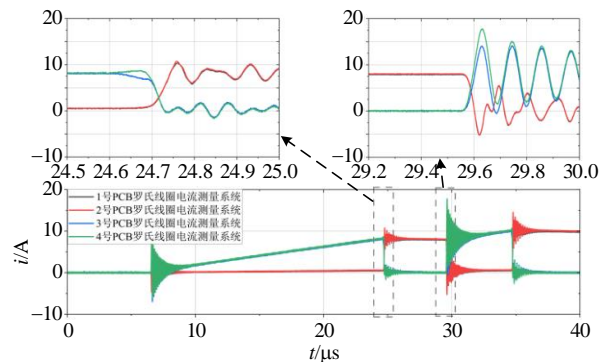


图 20 功率模块内 PCB 罗氏线圈电流测量系统输出

Fig. 20 Output signals from PCB Rogowski coil current measurement systems in power module

线圈电流测量系统分别测量流过下桥 3 号和 4 号 SiC MOSFET 的电流。1 号和 2 号 PCB 罗氏线圈电流测量系统测量上桥芯片的续流电流分布。表 3 为 24.6 和 29.5 μs 时刻, 4 个传感器所测量到的电流幅值。24.6 μs 时刻, 3 号和 4 号 SiC MOSFET 流过电流, 1 号和 2 号 PCB 罗氏线圈电流测量系统分别感应出 0.47 和 0.59 A 的干扰电流; 29.5 μs 时刻, 3 号和 4 号分别感应出 0.11 和 0.09 A 的干扰电流。可以看出 PCB 罗氏线圈在模块内复杂电磁环境下, 具有强抗干扰能力。

表 3 模块内部的测量干扰

时刻/ μs	PCB 罗氏线圈电流测量系统测量信号/A			
	1 号	2 号	3 号	4 号
24.6	0.47	0.59	8.10	8.16
29.5	7.89	8.01	0.11	0.09

5 结论

本文研制一种 SiC 半桥功率模块, 模块内集成了可实现并联多芯片电流分布测量的 PCB 罗氏线圈电流测量系统。并对传感器性能和模块电流测量过程进行详细分析, 得出结论如下:

1) 本文提出一种集成 PCB 罗氏线圈的 SiC 半桥功率模块, 实现半桥模块内部串并联芯片电流测量。集成于所提功率模块内部的芯片级电流测量电路板不仅能够测量 SiC MOSFET 芯片的开关电流分布情况, 还可以在不为二极管芯片增加额外 PCB 罗氏线圈的情况下, 测量续流时的电流分布。因此, 只需要一半芯片数量的 PCB 罗氏线圈, 即可测量模块内部流过所有芯片的电流分布。

2) PCB 罗氏线圈电流测量系统测量线性、无磁路饱和、设计灵活且具有高达 163 MHz 的高频带宽, 与商用钳式电流传感器对比, 测量偏差不高于 2.9%。得益于集成方式提供相同的一次侧电流路径, 模块内集成的 4 个 PCB 罗氏线圈传递特性高度一致, 极大降低模块内部因传感器差异而引入的测量误差。

3) 单个 PCB 罗氏线圈的功率过孔能够实现功率回路不超过 0.5 nH 的低电感电气连接, 模块功率回路杂散电感为 10.5 nH。另外, 栅极回路也具有低杂散电感, 提取上、下桥并联芯片驱动回路的杂散电感分别为 8.2 和 7.8 nH。

4) 在功率模块的动态特性实验中, 通过芯片

预筛选和改变驱动电阻 2 种方式控制模块内部芯片的电流分布。芯片电流分布符合芯片预筛选结果。驱动电阻阻值由一致变为不一致后, 并联两芯片的开通暂态电流不平衡系数由 0.23 上升至 2.19, 验证 PCB 罗氏线圈电流测量系统的芯片电流测量能力。

参考文献

- [1] 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): 1741-1752. SHENG Kuang, REN Na, XU Hongyi. A recent review on silicon carbide power devices technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1741-1752(in Chinese).
- [2] 张擎昊, 郑大勇, 张品佳. SiC MOSFET 结温监测与控制技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(3): 1034-1051. ZHANG Qinghao, ZHENG Dayong, ZHANG Pinjia. A review of junction temperature monitoring and control methods for SiC MOSFETs[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(3): 1034-1051(in Chinese).
- [3] DO T V, LI Ke, TROVÃO J P, et al. Reviewing of using wide-bandgap power semiconductor devices in electric vehicle systems: from component to system[C]//2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Gijon, Spain: IEEE, 2020: 1-6.
- [4] 谭亚雄, 刘元, 张梦洋, 等. 一种 SiC MOSFET 双阈值检测短路保护电路设计与研究[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(21): 8544-8554. TAN Yaxiong, LIU Yuan, ZHANG Mengyang, et al. Research on a dual-threshold detection short-circuit protection circuit for SiC MOSFET[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(21): 8544-8554(in Chinese).
- [5] ZHAO Bin, SUN Peng, YU Qiuping, et al. Layout-dominated dynamic imbalanced current analysis and its suppression strategy of parallel SiC MOSFETs[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2021, 21(3): 394-404.
- [6] HOU Fengze, WANG Wenbo, CAO Liqiang, et al. Review of packaging schemes for power module[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(1): 223-238.
- [7] 王来利, 赵成, 张彤宇, 等. 碳化硅功率模块封装技术综述[J]. 电工技术学报, 2023, 38(18): 4947-4962. WANG Laili, ZHAO Cheng, ZHANG Tongyu, et al. Review of packaging technology for silicon carbide power modules[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(18): 4947-4962(in Chinese).
- [8] HUI Xiaoshuang, NING Puqi, FAN Tao, et al. A novel multiple DBC-staked units package to parallel more chips for SiC power module[J]. CES Transactions on Electrical

- Machines and Systems, 2024, 8(1): 72-79.
- [9] 柯俊吉, 赵志斌, 孙鹏, 等. 器件参数对 SiC MOSFET 并联均流影响的统计分析[J]. 半导体技术, 2018, 43(3): 181-187.
KE Junji, ZHAO Zhibin, SUN Peng, et al. Influence of devices parameters on the current sharing of paralleled SiC MOSFETs using statistics analysis[J]. Semiconductor Technology, 2018, 43(3): 181-187(in Chinese).
- [10] ZHAO Cheng, WANG Laili, ZHANG Fan. Effect of asymmetric layout and unequal junction temperature on current sharing of paralleled SiC MOSFETs with kelvin-source connection[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(7): 7392-7404.
- [11] 孙鹏, 赵志斌, 蔡雨萌, 等. 基于开关能量均衡的并联碳化硅 MOSFET 芯片筛选[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5613-5623.
SUN Peng, ZHAO Zhibin, CAI Yumeng, et al. Chip screening for parallel silicon carbide MOSFET based on switching energy balancing[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5613-5623(in Chinese).
- [12] 赵斌, 柯俊吉, 孙鹏, 等. 公共支路阻抗耦合对碳化硅 MOSFET 器件并联电流分配的影响及优化[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(7): 2638-2649.
ZHAO Bin, KE Junji, SUN Peng, et al. Influence and optimization of common branch impedance coupling on current sharing of paralleled SiC MOSFETs[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2638-2649(in Chinese).
- [13] Wolfspeed . E3M0016120K datasheet[EB/OL] . (2023-01-01)[2024-05-23]. https://assets.wolfspeed.com/uploads/2023/02/Wolfspeed_E3M0016120K_data_sheet.pdf.
- [14] 谢宗奎, 柯俊吉, 赵志斌, 等. 碳化硅 MOSFET 换流回路杂散电感提取方法的优化[J]. 电工技术学报, 2018, 33(21): 4919-4927.
XIE Zongkui, KE Junji, ZHAO Zhibin, et al. Optimized extraction method of stray inductance in commutation path for silicon carbide MOSFET[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(21): 4919-4927(in Chinese).
- [15] SHI Yafei, HAN Weijian, LI Xuebao, et al. A noncontact method for simultaneous measurement of di/dt and dv/dt [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(5): 5370-5374.
- [16] XIN Zhen, LI He, LIU Qing, et al. A review of megahertz current sensors for megahertz power converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(6): 6720-6738.
- [17] GERBER D, GUILLOD T, BIELA J. IGBT gate-drive with PCB Rogowski coil for improved short circuit detection and current turn-off capability[C]//2011 IEEE Pulsed Power Conference. Chicago, IL, USA: IEEE, 2011: 1359-1364.
- [18] JIAO Chaoqun, ZHANG Zuoming, ZHAO Zhibin, et al. Integrated Rogowski coil sensor for press-pack insulated gate bipolar transistor chips[J]. Sensors, 2020, 20(15): 4080.
- [19] FU Shi, LI Xuebao, LIN Zhongkang, et al. Current measurement method of multiple chips using rectangular PCB Rogowski coils integrated in press pack IGBT device[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(1): 96-100.
- [20] Infineon. Control integrated power system (CIPOS™) [EB/OL] . (2017-09-06)[2024-07-02] . https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IFCM20T65GD-DS-v02_02-EN.pdf?fileId=5546d46254bdc4f50154dd2acdfe2c7d.
- [21] Semikron . SKiiP 603 GD123-3DUL V3[EB/OL] . (2021-10-01)[2024-05-23] . <https://assets.danfoss.com/documents/latest/515041/AI498334575758en-000102.pdf>.
- [22] HASEGAWA K, TAKAHARA S, TABATA S, et al. A new output current measurement method with tiny PCB sensors capable of being embedded in an IGBT module[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3): 1707-1712.
- [23] HASEGAWA K, SHO S, TSUKUDA M, et al. Output-current measurement of a PWM inverter with a tiny PCB Rogowski sensor integrated into an IGBT module[C]//2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Baltimore, MD, USA: IEEE, 2019: 5707-5711.
- [24] MEINERT J, BECZKOWSKI S, KUBULUS P P, et al. Embedded current sensor for SiC die current measurement[C]//PCIM Europe 2023 ; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Nuremberg, Germany: IEEE, 2023: 1-8.
- [25] RAY W F, DAVIS R M. Wide bandwidth Rogowski current transducers: Part I: the Rogowski coil[J]. EPE Journal, 1993, 3(1): 51-59.



曲泽龙

收稿日期: 2024-07-01。

作者简介:

曲泽龙(2000), 男, 硕士研究生, 主要从事宽禁带电力电子器件状态监测、封装方面的研究工作, quzelong@ncepu.edu.cn;

*通信作者: 孙鹏(1994), 男, 博士, 讲师, 主要从事高压大功率电力电子器件封装、测试与可靠性相关研究工作, sunpeng@ncepu.edu.cn;。

(编辑 刘雪莹)