



DOI: 10.13382/j.jemi.B2003052

高压多芯片并联 IGBT 模块故障监测方法*

王晨苑 何怡刚 王传坤 李 猎 李济源

(武汉大学 电气与自动化学院 武汉 430072)

摘要:绝缘栅双极型晶体管(IGBT)作为电力电子装置的关键核心器件,其高可靠性是系统长久稳定运行的重要保障,对IGBT模块进行故障监测是提高系统可靠性的有效方式之一。提出一种新的健康敏感参数-栅极-发射极导通前电压 $V_{GE(pre-on)}$,用于监测高压多芯片并联IGBT模块中的IGBT芯片故障。首先,对现有故障监测方法进行比较,然后建立导通前电压可靠性模型,再通过监测导通瞬态期间的 $V_{GE(pre-on)}$ 来检测高压多芯片并联IGBT模块中的IGBT芯片故障。为验证该方法的可行性,对16芯片DIM800NSM33-F IGBT模块进行了仿真,结果显示,在不同外部条件下,每个并联IGBT芯片故障所产生的导通前电压 $V_{GE(pre-on)}$ 的平均偏移约为900 mV,且具有较高的灵敏度和抗干扰能力,可有效监测IGBT模块芯片故障。

关键词: 高压多芯片 IGBT 模块; 导通前电压 $V_{GE(pre-on)}$; IGBT 芯片故障; 故障监测

中图分类号: TN322.8; TM930

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.3030

Method for fault monitoring of high-voltage multi-chip parallel IGBT module

Wang Chenyuan He Yigang Wang Chuankun Li Lie Li Jiyan

(School of Electrical and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Insulated gate bipolar transistor (IGBT) is a key component of power electronic devices. Its high reliability is an important guarantee for long-term stable operation of the system. Fault monitoring of IGBT modules is one of the effective ways to improve system reliability. Presents a new health-sensitive parameter, gate-emitter pre-on voltage $V_{GE(pre-on)}$, for monitoring IGBT chip failures in high-voltage multi-chip parallel IGBT modules. First compare existing fault monitoring methods, then build a pre-threshold voltage reliability model, and then detect the IGBT chip failure in the multi-chip high-voltage IGBT module by monitoring $V_{GE(pre-on)}$ during the gate-emitter voltage turn-on transient. In order to verify the feasibility of this method, a 16-chip DIM800NSM33-F IGBT module was simulated. The results show that under different external conditions, the average deviation of the pre-on voltage $V_{GE(pre-on)}$ generated by each parallel IGBT chip failure is about 900 mV, and has high sensitivity and anti-interference ability, which can effectively monitor the IGBT module chip failure.

Keywords: high-voltage multichip insulated gate bipolar transistor (IGBT) module; pre-on voltage $V_{GE(pre-on)}$; IGBT chip failure; fault monitoring

0 引言

绝缘栅双极性晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)模块由多个IGBT芯片、二极管芯片、焊料层、键合线、陶瓷覆铜基板、散热底板及功率端子组成。

IGBT模块因具有高开关速度、低传导损耗和高通流能力等优点而被广泛应用于大功率变换器中。作为大功率变换器中的核心器件,IGBT模块的可靠性是电力电子应用中的重要问题。研究表明,电力电子装置中31%的故障归因于电力设备,而近60%的故障主要是由热引起的^[1],且结温每升高10℃,故障率就会翻倍。功率设备故障主

收稿日期: 2010-04-03 Received Date: 2010-04-03

* 基金项目: 国家自然科学基金(51977153, 51977161, 51577046)、国家自然科学基金重点项目(51637004)、国家重点研发计划“重大科学仪器设备开发”项目(2016YFF0102200)、装备预先研究重点项目(41402040301)资助



要是由热电击穿、局部热失控和热机械故障造成的^[2-3]。IGBT 器件中各层材料热膨胀系数不一致,结温波动导致各层膨胀程度不同,产生热应力,使得焊料层疲劳老化或键合线脱落,从而造成器件电、热参数等外特性变化,最终导致器件老化失效^[4-5]。通常,IGBT 故障监测主要涉及 3 个方面,结温 T_j ^[6-8]、焊料层疲劳^[9-11] 以及键合线脱落^[12-15]。IGBT 模块实时在线故障监测技术的发展意味着可以研发用于功率变换器上的测试电路来实现健康监控,从而避免因监测拆除功率变换器而导致现场服务中断。

焊料层失效和键合线脱落是 IGBT 模块主要老化失效机制^[16]。在多芯片 IGBT 模块中,在发生部分键合线脱落时仍可正常工作。但当同一芯片上所有键合线全部脱落时,IGBT 芯片将完全失效。多芯片并联 IGBT 模块由多个 IGBT 芯片并联组成^[17-18],在单个 IGBT 芯片初始故障时,仍可保持正常工作,但其模块的可靠性及健康状况取决于并联的每一个 IGBT 芯片。因此,通过监测 IGBT 芯片故障数量来评估多芯片 IGBT 模块的整体健康状况至关重要。

文献[12,17,19]提出采用负载电流下的通态压降 $V_{CE(ON)}$ ^a 实时监测 IGBT 键合线的脱落,但其抗扰性较弱;文献[15]通过拐点处通态压降 $V_{CE(ON)}$ ^b 监测键合线的老化脱落,且具有较强的抗结温干扰性。但通态压降 $V_{CE(ON)}$ 的测量需要考虑高压隔离,并且测量范围为断开阶段的上千伏到导通阶段的几伏,测量电路须考虑较大的 V_{CE} 电压摆幅,在实际应用中存在困难。文献[20]采用通态电阻 $R_{CE(ON)}$ 在线监测 IGBT 模块封装老化程度,但其抗结温干扰性较低,无法检测到第 1 条键合线的脱落;文献[21-23]利用峰值栅极电流 $I_{G(peak)}$ 监测并联 IGBT 键合线的脱落,其对结温的变化具有很强的抵抗力,但是检测峰值栅极电流值在实际应用中很难实现;文献[13]采用导通和关断过程中栅极-发射极电压变化 dV_{CE}/dt 检测键合线的脱落,无法检测到第 1 条键合线的脱落。

本文提出了一种通过测量栅极-发射极导通前电压 $V_{GE(pre-on)}$ 来监测高压多芯片并联 IGBT 模块中 IGBT 芯片故障的新方法。从 IGBT 健康敏感参数-栅极-发射极导通前电压 $V_{GE(pre-on)}$ 出发,建立栅极-发射极导通前电压可靠性模型,提出通过监测栅极-发射极导通前电压 $V_{GE(pre-on)}$ 检测多芯片高压 IGBT 模块中 IGBT 芯片故障的方法。最后在 MATLAB/Simulink 中对 16 芯片 DIM800NSM33-F IGBT 模块仿真模拟,在 IGBT 触发后监测导通前电压 $V_{GE(pre-on)}$ 波形并选定四个固定延迟时间测量其值,最后研究外部条件对故障特征的影响。结果表明,每个 IGBT 芯片故障的灵敏度约为 900 mV,验证了本文所提方法的可行性和准确性。

1 现有故障监测方法比较

目前国内外已有许多学者致力于 IGBT 模块可靠性研究,其中大多数研究集中于 IGBT 健康敏感参数 (health-sensitive parameters, HSPs) 或温敏电参数 (thermosensitive electrical parameters, TSEPs) 的在线测量上,即通过测量 IGBT 模块集电极、栅极、发射极以及合适的开尔文端子,实现 IGBT 模块的在线故障监测。

表 1 为 5 个常用于监测键合线故障和芯片故障的 HSP,负载电流下的通态压降 $V_{CE(ON)}$ ^a、拐点处通态压降 $V_{CE(ON)}$ ^b、通态电阻 $R_{CE(ON)}$ 、峰值电流 $I_{G(peak)}$ 、栅极电压变化率 dV_{CE}/dt 。通态电阻 $R_{CE(ON)}$ 和栅极电压变化率 dV_{CE}/dt 具有较高的温度敏感度,抗结温干扰性较低,分别为 0.44% 和 0.17%,均无法检测到第 1 条键合线脱落。负载电流下的 $V_{CE(ON)}$ ^a 具有较弱的抗扰性,但在拐点处的通态压降 $V_{CE(ON)}$ ^b 具有较强抗结温干扰性。但通态压降 $V_{CE(ON)}$ 的测量需要考虑高压隔离,并且 $V_{CE(ON)}$ 的测量范围较大,测量电路难以实现。峰值电流 $I_{G(peak)}$ 对结温的变化具有很强的抵抗力,但在实际应用中很难实现。除此之外,栅极电流相对较小,并且在靠近 IGBT 模块的一侧进行测量,检测电路还需应对电磁干扰的挑战。

表 1 用于键合线故障和芯片故障监测 HSP

Table 1 HSP for bond wire and chip failure monitoring

HSP	相对灵敏度/%	结温 T_j 敏感度/%	抗结温干扰性	参考文献
$V_{CE(ON)}$ ^a	1	0.01	100(弱)	[12,17,19]
$V_{CE(ON)}$ ^b	14.6	0.01	1460(强)	[15]
$R_{CE(ON)}$	1.9	0.44	4(弱)	[20]
$I_{G(peak)}$	36	0.05	720(强)	[21-23]
dV_{CE}/dt	25	0.17	147(弱)	[13]

这些 HSPs 仅适用于有 1~2 个芯片的 IGBT 模块。当 IGBT 模块有多个并联 IGBT 芯片时,在线故障监测将变得更具挑战性,其主要挑战在于不均匀的功率半导体芯片与功率模块的异构结构相结合,使得故障时 HSP 物理特征的复杂性增加,导致芯片加速损坏,从而使 HSP 灵敏度降低或掩盖其故障特征。多芯片 IGBT 模块多应用于大电流工况,其并联 IGBT 芯片数量取决于芯片电流额定值和负载电流额定值。因此,本文将提出一种用于监测多芯片高压 IGBT 模块中 IGBT 芯片故障的方法。

2 栅极-发射极导通前电压可靠性模型

在实际 IGBT 结构中,栅极-发射极等效 RC 电路由外部栅极电阻 $R_{G(ext)}$ 、内部电阻 $R_{G(int)}$ 、栅极-发射极间电



容 C_{GE} 、栅极-集电极极间电容 C_{GC} 和栅极电压源 V_{GG} 构成,如图 1 所示。

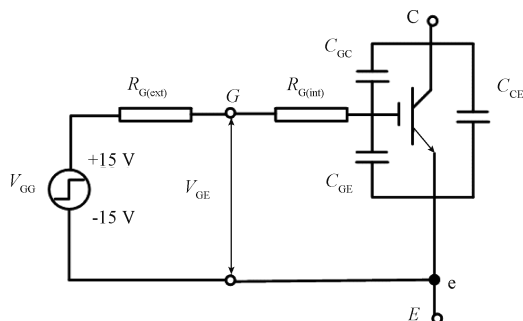


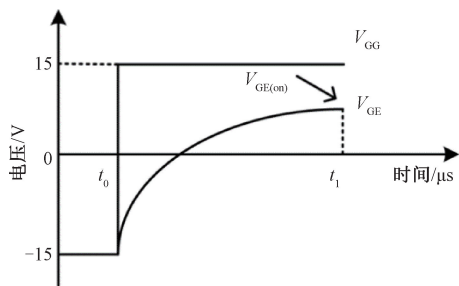
图 1 栅极-发射极等效电路

Fig. 1 Gate-emitter equivalent circuit

由栅极-发射极等效 RC 电路可知,栅极-发射极电压 V_{GE} 在到达导通电压 $V_{GE(on)}$ 前近似呈指数上升,如图 2 所示^[23]。当 IGBT 处于关断状态时,栅极电压源 $V_{GG(OFF)}$ 为 -15 V ,而在完全导通状态时,栅极电压 $V_{GG(ON)}$ 为 $+15\text{ V}$ 。在 IGBT 模块导通之前,IGBT 栅极电容充电 V_{GE} 从 t_0 开始呈指数在 t_1 处上升至阈值导通电压。 V_{GE} 上升过程可用式(1)表示。

$$V_{GE(\text{pre-on})}(t) = (V_{GG(ON)} - V_{GG(OFF)}) \left(1 - e^{-\frac{t}{R_G C_{ies}}}\right) + V_{GG(OFF)} \quad (1)$$

式中: t 为时间; R_G 为总栅极电阻, $R_G = R_{G(int)} + R_{G(ext)}$; C_{ies} 为栅极输入电容, $C_{ies} = C_{GE} + C_{GC}$ 。

图 2 RC 电路在导通过程中 V_{GE} 的波形Fig. 2 V_{GE} waveform of RC circuit during turn-on

在多芯片 IGBT 电源模块中,每个并联的 IGBT 芯片都具有固有的栅极输入电容和内部栅极电阻,如图 3 所示。假设 IGBT 模块有 n 个 IGBT 芯片并联,则 IGBT 模块的总内部栅极电阻为 $R_{G(int),total}$ ($R_{G(int),total} = R_{G(int)}/n$),栅极输入电容为 $C_{ies,total}$ ($C_{ies,total} = (C_{GE} + C_{GC}) * n$),其中 $R_{G(int),total}$ 和 $C_{ies,total}$ 为 n 个并联芯片的集总电阻和总电容。

以 DIM800NSM33-F IGBT 模块为例,该模块为 16 单元 IGBT 模块,每个芯片具有 8 条发射极键合线,共有 128 条发射极键合线,查阅数据手册得栅极-发射极电路

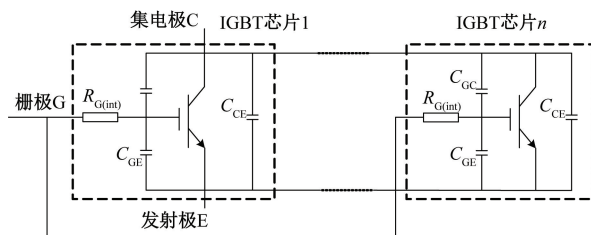


图 3 多芯片 IGBT 中芯片电容和内阻的表示

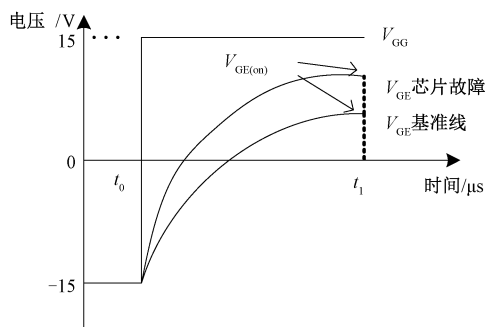
Fig. 3 Chip capacitance and internal resistance in multi-chip IGBT module

参数如表 2 所示。DIM800NSM33-F IGBT 模块的总栅极输入电容 $C_{ies,total}$ 为 144 nF ,总内部栅极电阻 $R_{G(int),total}$ 为 $135\text{ }\mu\Omega$ 。当某单元 IGBT 芯片的键合线全部脱落时,并联的有效 IGBT 芯片数量将会减少,从而导致 $C_{ies,total}$ 减小, $R_{G(int),total}$ 增大。多芯片 IGBT 模块内的这种局部开路故障不一定会导致 IGBT 模块彻底故障,但会导致 $C_{ies,total}$ 和 $R_{G(int),total}$ 发生改变,导致其栅极动态性能发生变化。如图 4 所示,当 IGBT 芯片故障后, V_{GE} 轨迹将发生变化,并且式(1)中定义的 $V_{GE(\text{pre-on})}$ 的曲线将发生偏移。但该方法无法检测到单键合线脱落,这是因为在芯片完全故障之前发生的单条键合线故障不会使 $R_{G(int),total}$ 和 $C_{ies,total}$ 发生变化,芯片仍通过剩余的键合线连接并可以正常工作。如果连接到某芯片的所有发射极键合线都断落,那么通过 $V_{GE(\text{pre-on})}$ 的变化可以检测到彻底的芯片故障。

表 2 栅极-发射极电路参数

Table 2 Gate-emitter circuit parameters

栅极电压源 V_{GG}	栅极内部电阻 $R_{G(int)}$	栅极-发射极极间电容 C_{GE}	栅极-集电极极间电容 C_{GC}	栅极输入电容 C_{ies}
$\pm 15\text{ V}$	$2.16\text{ m}\Omega$	8.8625 nF	0.1375 nF	9 nF

图 4 IGBT 芯片故障时 V_{GE} 的变化Fig. 4 Changes in V_{GE} with IGBT chip failure

定义栅极-发射极电压 V_{GE} 在米勒平台电压 $V_{GE(pl)}$ 和导通电压 $V_{GE(on)}$ 过渡阶段为导通前电压 $V_{GE(\text{pre-on})}$ 。导通



前电压 $V_{GE(\text{pre-on})}$ 是在 IGBT 集电极电流 I_C 导通之前进行测量的,因此不会受阈值点之后负载电流变化或器件导通过程中噪声的影响。此外, $V_{GE(\text{pre-on})}$ 的测量是在栅极侧而不是在高压集电极侧,因此不需要考虑高压隔离和高压绝缘等问题,可以使用简单低成本的轻量级电压传感器,将其嵌入任何栅极驱动器中。由图 4 可知,随着芯片故障, V_{GE} 始终从固定电压 -15 V 在 t_0 时刻开始增大, V_{GE} 的轨迹也将发生变化。若在到达 $V_{GE(\text{on})}$ 之前的固定延迟时间点进行测量,电压则会随芯片数的变化而变化,因此,栅极-发射极导通前电压 $V_{GE(\text{pre-on})}$ 可用作 IGBT 芯片故障的 HSP。这种检测方法允许使用计数器在达到 $V_{GE(\text{on})}$ 之前确定测量点。该计数器由 PWM 信号触发,以同步 $V_{GE(\text{pre-on})}$ 的测量。

尽管 IGBT 功率模块在最初的芯片故障后仍可继续运行,但当更多的芯片陆续出现故障时,将达到警告状态,可以将其确定为严重故障。这意味着除了损失一定数量的芯片外,IGBT 模块即将发生故障。IGBT 模块可接受的芯片损失数量取决于工作环境和工作要求。通常,将 10% 的芯片损失视为可接受的。因此,对于 DIM800NSM33-F IGBT 模块,可将检测到 16 个芯片中的 2 个芯片故障设置为安全裕度,仿真模拟是针对最初两个芯片故障的情况。

3 仿真模型与结果分析

基于栅极-发射极导通前电压 $V_{GE(\text{pre-on})}$ 的高压多芯片并联 IGBT 模块中 IGBT 芯片故障监测原理如图 5 所示。直流母线电源电压为 $1\ 800\text{ V}$,感性负载为 $400\ \mu\text{H}$ 。初始状态下,被测 16 芯片 IGBT 模块是由栅极驱动器以 $-15\sim+15\text{ V}$ 的电压脉冲驱动。理想脉冲电压电源和 IGBT 栅极端子之间为 $3.9\ \Omega$ 的开通栅极电阻 $R_{G(\text{ext}),\text{on}}$ 和 $6.2\ \Omega$ 的关断栅极电阻 $R_{G(\text{ext}),\text{off}}$ 。

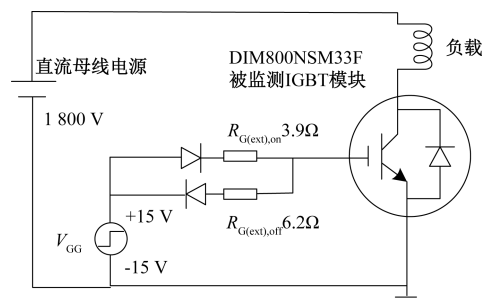


图 5 IGBT 芯片故障监测原理

Fig. 5 Schematic for IGBT chip fault monitoring

基于 IGBT 芯片故障监测原理图,在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真电路图,并定义连接到一个 IGBT 芯

片的 8 条发射极键合线的脱落而导致芯片彻底故障为“1 个 IGBT 芯片故障”状态;连接到两个芯片的 16 条发射极键合线的脱落会导致两个 IGBT 芯片彻底故障为“2 个 IGBT 芯片故障”状态;而在芯片故障之前的初始状态为“健康”状态。在仿真电路中,当 IGBT 芯片完全故障时,将此芯片视为开路,通过改变并联 IGBT 芯片个数模拟 IGBT 芯片故障状态。“健康”状态下该 IGBT 模块由 16 个芯片并联组成,“1 个 IGBT 芯片故障”状态下该 IGBT 模块由 15 个 IGBT 并联组成,“2 个 IGBT 芯片故障”状态下该 IGBT 模块由 14 个 IGBT 并联组成。

在上述条件下对 IGBT 模块进行芯片故障仿真,不同健康状态下的栅极-发射极导通前电压 $V_{GE(\text{pre-on})}$ 的波形如图 6 所示。IGBT 触发瞬间记作 $t_0 = 0\ \mu\text{s}$,在 IGBT 模块触发后使用固定延迟时间 $t_1 = 14\ \mu\text{s}$ 、 $t_2 = 16\ \mu\text{s}$ 、 $t_3 = 18\ \mu\text{s}$ 、 $t_4 = 20\ \mu\text{s}$ 测量导通前电压 $V_{GE(\text{pre-on})}$,并以 IGBT 模块健康状态下的 $V_{GE(\text{pre-on})}$ 为基准值计算芯片故障时 $V_{GE(\text{pre-on})}$ 的波动,结果如表 3 所示。结果表明,导通前电压 $V_{GE(\text{pre-on})}$ 随着芯片故障个数增加而升高,平均波动约为 900 mV ,该差值足以识别 IGBT 芯片故障数目,并且具有较高的灵敏度。禁带宽度的大小为产生本征激发所需要的最小能量,由于硅半导体禁带宽度具有负的温度系数,即随温度增加而减小,在器件最高工作温度下,高温时载流子浓度的上升使得形成沟道的电压降低。栅极门槛电压 $V_{GE(\text{th})}$ 温度系数约为 $-8\text{ mV}/^\circ\text{C}$, $V_{GE(\text{miller})}$ 的温度系数约为 $-3\text{ mV}/^\circ\text{C}$, $V_{GE(\text{pre-on})}$ 的温度敏感系数约为 $-2.2\text{ mV}/^\circ\text{C}$ ^[15],在设备正常工作时, $V_{GE(\text{pre-on})}$ 的温度影响波动约为几十毫伏,远小于芯片故障时导通前电压 $V_{GE(\text{pre-on})}$ 平均波动 900 mV ,因此该方法无需考虑温度对 IGBT 开关状态的影响。仿真结果表明,对于高压多芯片并联 IGBT 模块可以通过在固定延迟时间测量导通前电压 $V_{GE(\text{pre-on})}$,对比于健康状态导通前电压 $V_{GE(\text{pre-on})}$ 基准值的波动大小判断 IGBT 模块中芯片故障数目,进而对其进行故障监测和健康评估,该监测方法抗干扰能力强,灵敏度高。

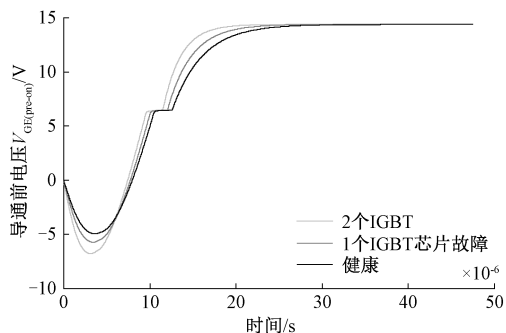


图 6 不同健康状态下的导通前电压 $V_{GE(\text{pre-on})}$ 波形

Fig. 6 $V_{GE(\text{pre-on})}$ waveform diagram of pre-on voltage under different health states

表 3 不同健康状态下的导通前电压 $V_{GE(pre-on)}$ Table 3 Pre-on voltage $V_{GE(pre-on)}$ in different health states

IGBT 芯片故障数目	0	1	2
$t_1 = 14 \mu s, V_{GE(pre-on)}/V$	9.076 3	10.449 2	11.991 3
$t_2 = 16 \mu s, V_{GE(pre-on)}/V$	11.388 9	12.469 4	13.480 9
$t_3 = 18 \mu s, V_{GE(pre-on)}/V$	12.697 9	13.457 7	14.050 4
$t_4 = 20 \mu s, V_{GE(pre-on)}/V$	13.438 7	13.940 9	14.267 7
$\bar{V}_{GE(pre-on)}/V$	11.650 5	12.579 3	13.447 6
$\Delta V_{GE(pre-on)}/V$	0	0.928 9	1.797 1

为了验证导通前电压 $V_{GE(pre-on)}$ 的抗干扰能力,下面对外部栅极电阻 $R_{G(ext)}$ 和栅极驱动器电源电压 V_{GG} 因温度或老化等原因发生微小变化情况下的不同故障状态进行仿真。

3.1 外部栅极电阻 $R_{G(ext)}$ 的影响

外部栅极电阻 $R_{G(ext)}$ 位于 IGBT 模块的外部电路上,影响导通前电压 $V_{GE(pre-on)}$ 电压波形,且属于温度敏感参数,电阻温度系数为 $100 \times 10^{-6}/^{\circ}C$,温度每升高 $100^{\circ}C$, $R_{G(ext)}$ 增大 0.0375Ω 。考虑温度和老化对 $R_{G(ext)}$ 的影响,研究 $R_{G(ext)} = 3.96 \Omega$ 和 $R_{G(ext)} = 4.00 \Omega$ 情况下 IGBT 芯片不同故障数目下的导通前电压 $V_{GE(pre-on)}$ 波形,如图 7 和 8 所示。采用固定延迟时间 $t_1 = 14 \mu s, t_2 = 16 \mu s, t_3 = 18 \mu s, t_4 = 20 \mu s$ 测量导通前电压 $V_{GE(pre-on)}$,结果如表 4 和 5 所示。可以看出,由温度或老化等造成的外部栅极电阻 $R_{G(ext)}$ 的微小波动与初始状态下的导通前电压 $V_{GE(pre-on)}$ 变化轨迹几乎重合,而不同健康状态下的电压水平差值依然明显。

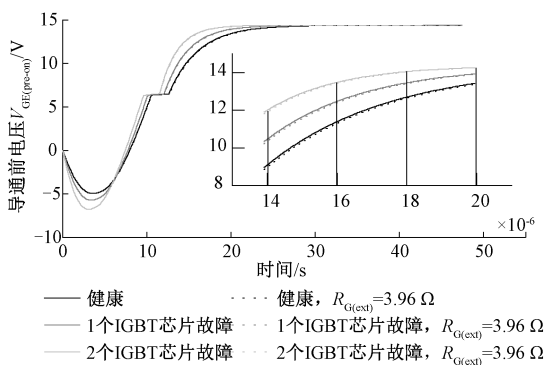
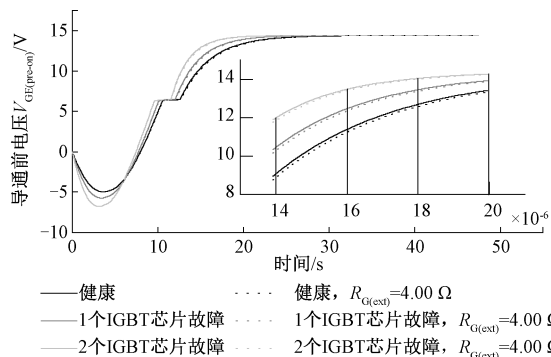
图 7 $R_{G(ext)} = 3.96 \Omega$ 时不同健康状态下的导通前电压 $V_{GE(pre-on)}$ 波形Fig. 7 Waveform graph of pre-on voltage $V_{GE(pre-on)}$ under different health states when $R_{G(ext)} = 3.96 \Omega$

图 9(a)~(d) 所示分别为固定延迟时间 $t_1 = 14 \mu s, t_2 = 16 \mu s, t_3 = 18 \mu s, t_4 = 20 \mu s$ 下 $R_{G(ext)}$ 分别为 $3.90, 3.96$ 和 4.00Ω 时不同健康状态下的导通前电压 $V_{GE(pre-on)}$ 的测量值,可知外部栅极电阻 $R_{G(ext)}$ 的微小变化对 IGBT 芯片故障特性几乎没有影响,最大误差仅为 2.69% 。综上,

图 8 $R_{G(ext)} = 4.00 \Omega$ 时不同健康状态下的 $V_{GE(pre-on)}$ 波形Fig. 8 Waveform graph of $V_{GE(pre-on)}$ under different health states when $R_{G(ext)} = 4.00 \Omega$ 表 4 $R_{G(ext)} = 3.96 \Omega$ 时不同健康状态下的 $V_{GE(pre-on)}$ Table 4 $V_{GE(pre-on)}$ under different health states when $R_{G(ext)} = 3.96 \Omega$

IGBT 芯片故障数目	0	1	2
$t_1 = 14 \mu s, V_{GE(pre-on)}/V$	8.963 8	10.347 9	11.912 5
$t_2 = 16 \mu s, V_{GE(pre-on)}/V$	11.301 7	12.401 4	13.439 8
$t_3 = 18 \mu s, V_{GE(pre-on)}/V$	12.635 5	13.415 8	14.030 8
$t_4 = 20 \mu s, V_{GE(pre-on)}/V$	13.395 1	13.915 3	14.258 1
$\bar{V}_{GE(pre-on)}/V$	11.574 0	12.520 1	13.410 3
$\Delta V_{GE(pre-on)}/V$	0	0.946 1	1.836 3

表 5 $R_{G(ext)} = 4.00 \Omega$ 时不同健康状态下 $V_{GE(pre-on)}$ Table 5 $V_{GE(pre-on)}$ under different health states when $R_{G(ext)} = 4.00 \Omega$

IGBT 芯片故障数目	0	1	2
$t_1 = 14 \mu s, V_{GE(pre-on)}/V$	8.888 5	10.279 7	11.858 6
$t_2 = 16 \mu s, V_{GE(pre-on)}/V$	11.242 3	12.354 4	13.410 3
$t_3 = 18 \mu s, V_{GE(pre-on)}/V$	12.592 1	13.385 7	14.015 8
$t_4 = 20 \mu s, V_{GE(pre-on)}/V$	13.364 7	13.897 0	14.250 9
$\bar{V}_{GE(pre-on)}/V$	11.521 9	12.479 2	13.383 9
$\Delta V_{GE(pre-on)}/V$	0	0.957 3	1.862 0

基于导通前电压 $V_{GE(pre-on)}$ 的高压多芯片 IGBT 模块的 IGBT 芯片故障监测可以忽略由温度变化或老化等引起的外部栅极电阻 $R_{G(ext)}$ 的微小变化对导通前电压 $V_{GE(pre-on)}$ 的影响,仅需在外部栅极电阻 $R_{G(ext)}$ 发生物理变化时重新校验导通前电压 $V_{GE(pre-on)}$ 。

3.2 栅极驱动器电源电压 V_{GG} 的影响

由式(1)可知,栅极驱动器电源电压 V_{GG} 影响导通前电压 $V_{GE(pre-on)}$ 的变化趋势,且 $V_{GG(ON)}$ 和 $V_{GG(OFF)}$ 的影响效果相同。假设 $V_{GG(ON)}$ 固定为 $+15 V$,仅研究 $V_{GG(OFF)}$ 波动对导通前电压 $V_{GE(pre-on)}$ 波形的影响。考虑栅极驱动器对结温的敏感性,当栅极驱动电源电压波动为 1.3% 和 3.3% 时不同健康状态下的导通前电压 $V_{GE(pre-on)}$ 的波形分别如图 10、11 所示。并使用固定延迟时间 $t_1 = 14 \mu s$ 、

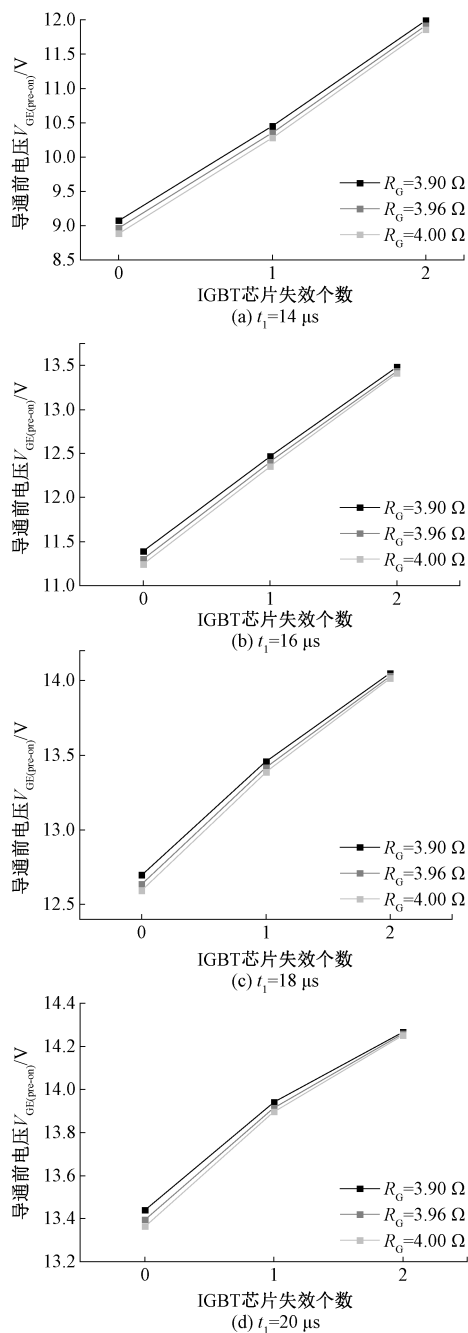
图 9 $R_{G(\text{ext})}$ 对不同健康状态下 $V_{GE(\text{pre-on})}$ 的影响

Fig. 9 Effect of $R_{G(\text{ext})}$ on $V_{GE(\text{pre-on})}$ under different health conditions

$t_2 = 16 \mu\text{s}$ 、 $t_3 = 18 \mu\text{s}$ 、 $t_4 = 20 \mu\text{s}$ 测量导通前电压 $V_{GE(\text{pre-on})}$ ，结果如表 6 和 7 所示。可以看出，由温度或老化等造成的栅极驱动器电源电压 V_{GG} 的微小波动与初始状态下的导通前电压 $V_{GE(\text{pre-on})}$ 变化轨迹几乎重合，而不同健康状态下的导通前电压 $V_{GE(\text{pre-on})}$ 波动依然明显，栅极驱动器电源电压 V_{GG} 的微小波动相比于 IGBT 芯片故障时的波动可忽略不计，因此，该监测方法可不考虑栅极驱动器电源电压 V_{CC} 微小变化的影响。

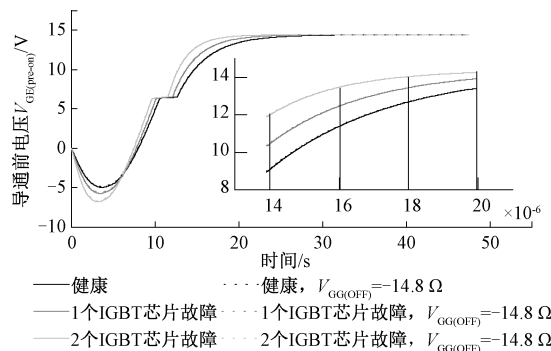


图 10 $V_{GG(\text{OFF})} = -14.8 \text{ V}$ 时不同健康状态下 $V_{GE(\text{pre-on})}$ 波形
 Fig. 10 $V_{GE(\text{pre-on})}$ waveforms under different health conditions when $V_{GG(\text{OFF})} = -14.8 \text{ V}$

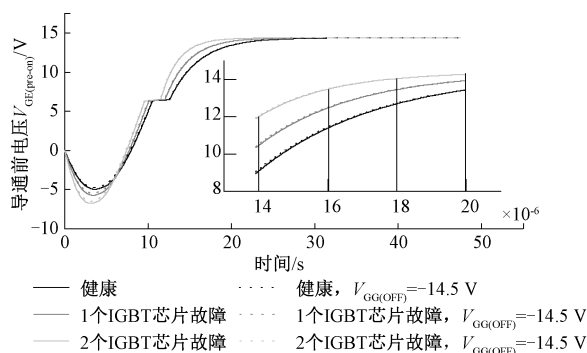


图 11 $V_{GG(\text{OFF})} = -14.5 \text{ V}$ 时不同健康状态下 $V_{GE(\text{pre-on})}$ 波形
 Fig. 11 $V_{GE(\text{pre-on})}$ waveform diagram of $V_{GG(\text{OFF})} = -14.5 \text{ V}$ before turn-on voltage in different health states

表 6 $V_{GG(\text{OFF})} = -14.8 \text{ V}$ 时不同健康状态下 $V_{GE(\text{pre-on})}$
 Table 6 $V_{GE(\text{pre-on})}$ under different health conditions when $V_{GG(\text{OFF})} = -14.8 \text{ V}$

IGBT 芯片故障数目	0	1	2
$t_1 = 14 \mu\text{s}, V_{GE(\text{pre-on})}/\text{V}$	9.116 7	10.481 7	12.013 9
$t_2 = 16 \mu\text{s}, V_{GE(\text{pre-on})}/\text{V}$	11.413 0	12.487 0	13.491 6
$t_3 = 18 \mu\text{s}, V_{GE(\text{pre-on})}/\text{V}$	12.712 6	13.467 5	14.055 5
$t_4 = 20 \mu\text{s}, V_{GE(\text{pre-on})}/\text{V}$	13.449 0	13.947 5	14.270 9
$\bar{V}_{GE(\text{pre-on})}/\text{V}$	11.672 8	12.595 9	13.458 0
$\Delta V_{GE(\text{pre-on})}/\text{V}$	0	0.923 1	1.785 2

表 7 $V_{GG(\text{OFF})} = -14.5 \text{ V}$ 时不同健康状态下的 $V_{GE(\text{pre-on})}$
 Table 7 $V_{GE(\text{pre-on})}$ under different health conditions when $V_{GG(\text{OFF})} = -14.5 \text{ V}$

IGBT 芯片故障数目	0	1	2
$t_1 = 14 \mu\text{s}, V_{GE(\text{pre-on})}/\text{V}$	9.176 7	10.530 2	12.047 3
$t_2 = 16 \mu\text{s}, V_{GE(\text{pre-on})}/\text{V}$	11.447 3	12.511 0	13.504 7
$t_3 = 18 \mu\text{s}, V_{GE(\text{pre-on})}/\text{V}$	12.732 6	13.479 8	14.061 1
$t_4 = 20 \mu\text{s}, V_{GE(\text{pre-on})}/\text{V}$	13.458 9	13.952 3	14.272 1
$\bar{V}_{GE(\text{pre-on})}/\text{V}$	11.703 9	12.618 3	13.471 3
$\Delta V_{GE(\text{pre-on})}/\text{V}$	0	0.914 4	1.767 4

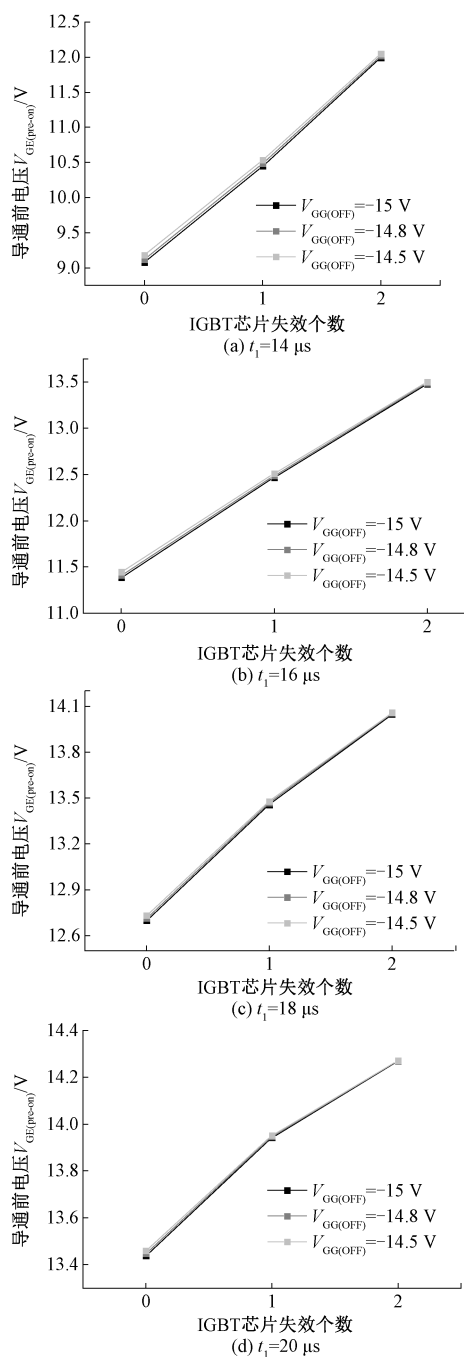
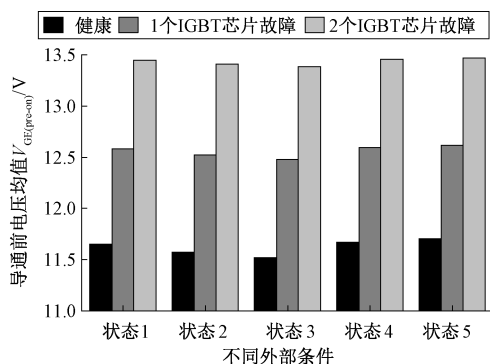
图 12 $V_{GG(OFF)}$ 对不同健康状态下 $V_{GE(pre-on)}$ 影响Fig. 12 Influence of $V_{GG(OFF)}$ on $V_{GE(pre-on)}$ in different health states

图 12(a)~(d) 所示分别为固定延迟时间 $t_1 = 14 \mu s$ 、 $t_2 = 16 \mu s$ 、 $t_3 = 18 \mu s$ 、 $t_4 = 20 \mu s$ 下, 栅极驱动器电源电压 $V_{GG(OFF)}$ 分别为 -15、-14.8 和 -14.5 V 时不同健康状态下的导通前电压 $V_{GE(pre-on)}$ 的测量值, 可以看出温度或老化等造成的栅极驱动器电源电压 V_{GG} 的微小变化对于 IGBT 芯片故障特征几乎没有影响, 最大误差仅为

1.11%, 不影响该参数用于多芯片并联 IGBT 模块芯片故障的监测。综上, 基于导通前电压 $V_{GE(pre-on)}$ 的高压多芯片 IGBT 模块的 IGBT 芯片故障监测, 可忽略温度或老化等引起的栅极驱动器电源电压 V_{GG} 的微小变化对导通前电压 $V_{GE(pre-on)}$ 的影响, 仅需在栅极驱动器电源电压 V_{GG} 发生物理变化时重新校验导通前电压 $V_{GE(pre-on)}$ 。

不同外部条件下 IGBT 模块不同故障状态的导通前电压均值 $\bar{V}_{GE(pre-on)}$ 如图 13 所示, 其中状态 1 为 $R_{G(ext)} = 3.90 \Omega$, $V_{GG(OFF)} = -15 V$, 状态 2 为 $R_{G(ext)} = 3.96 \Omega$, $V_{GG(OFF)} = -15 V$, 状态 3 为 $R_{G(ext)} = 4.00 \Omega$, $V_{GG(OFF)} = -15 V$, 状态 4 为 $R_{G(ext)} = 3.90 \Omega$, $V_{GG(OFF)} = -14.8 V$, 状态 5 为 $R_{G(ext)} = 3.90 \Omega$, $V_{GG(OFF)} = -14.5 V$ 。可以看出, 在不同外部条件下, 多芯片并联 IGBT 模块故障特征基本一致, 每个 IGBT 芯片故障时, 导通前电压均值 $\bar{V}_{GE(pre-on)}$ 波动均在 900 mV 左右, 最大误差不超过 6.29%。因此, 导通前电压 $V_{GE(pre-on)}$ 故障特征明显, 且具有良好的抗干扰能力, 只需要在部栅极电阻 $R_{G(ext)}$ 和栅极驱动器电源电压 V_{GG} 发生较大变化时重新校正基准值。本文仿真结果与 Richard Mandeya 实验结果基本一致^[21], 且本文采用 4 个固定延迟时间测量导通前电压 $V_{GE(pre-on)}$, 误差更小, 准确度更高。

图 13 栅极-发射极导通前电压均值 $\bar{V}_{GE(pre-on)}$ Fig. 13 Gate-emitter voltage average $\bar{V}_{GE(pre-on)}$

4 结论

本文提出了一种新的用于高压多芯片并联 IGBT 模块中 IGBT 芯片故障监测方法。IGBT 模块触发导通后, 在低压栅极侧采用固定延迟时间测量栅极-发射极导通前电压 $V_{GE(pre-on)}$, 仿真结果表明该方法能有效监测 IGBT 芯片故障, 单个 IGBT 芯片故障的平均灵敏度为 900 mV。栅极-发射极导通前电压 $V_{GE(pre-on)}$ 具有良好的抗干扰性, 可忽略外部栅极电阻 $R_{G(ext)}$ 和栅极驱动器电源电压 V_{GG} 在使用过程中受温度或老化等因素影响的微小波动。该方法能够简单有效的判断多芯片并联 IGBT 模块中的 IGBT 芯片故障数目, 对于 IGBT 模块故障监测具有重要意义。



参考文献

- [1] WANG H, DAO Z, BLAABJERG F. A reliability-oriented design method for power electronic converters [C]. Proceedings of the Applied Power Electronics Conference and Exposition, IEEE, 2013: 2921-2928.
- [2] SCHULZE H J, NIEDERNOSTHEIDE F J, PFIRSCH F, et al. Limiting factors of the safe operating area for power devices [J]. IEEE Transactions on Electronics Devices, 2013, 60(2): 551-562.
- [3] SMET V, FOREST F, HUSELSTEIN J, et al. Ageing and failure modes of IGBT modules in high-temperature power cycling [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(10): 4931-4941.
- [4] 何怡刚,李凯伟,朋张胜,等. 基于改进最小二乘支持向量机的 IGBT 模块键合线状态评估方法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(9): 170-176.
- HE Y G, LI K W, PENG ZH SH, et al. Research on IGBT module bonding wire state evaluation method based on improved least squares support vector machine [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(9): 170-176.
- [5] 李新昌,徐大伟,朱弘月,等. 基于 IGBT 栅极米勒平台的新型电流过载检测技术 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(9): 156-162.
- LI X CH, XU D W, ZHU H Y, et al. Novel current overload detection technology based on IGBT gate miller platform [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(9): 156-162.
- [6] GHIMIRE P, VEGAA D E, BECZKOWSKI S, et al. Improving power converter reliability: Online monitoring of high-power IGBT modules [J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2014, 8(3): 40-50.
- [7] SUN P J, GONG C, DU X, et al. Condition monitoring IGBT module bond wires fatigue using short-circuit current identification [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 32(5): 3777-3786.
- [8] ELEFFENDIM A, JOHNSONCM. Application of Kalman filter to estimate junction temperature in IGBT power modules [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2): 1576-1587.
- [9] EVANSP L, CASTELLAZZIA, JOHNSONC M. Design tools for rapid multidomain virtual prototyping of power electronic systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(3): 2443-2455.
- [10] XIANG D W, RANL, YANG S Y, et al. Monitoringsolder fatigue in a power module using case-above-ambient temperature rise [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2012, 47(6): 2578-2591.
- [11] BROWND W, ABBASM, GINART A, et al. Turn-off time as an early indicator of insulated gate bipolar transistor latch-up [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(2): 479-489.
- [12] SMET V, FOREST F, HUSELSTEIN J J, et al. Evaluation of vce monitoring as a real-time method to estimate aging of bond wire-IGBT modules stressed by power cycling [J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2013, 60(7): 2760-2770.
- [13] WEI K X, DU M X, XIE L L, et al. Study of bonding wire failure effects on external measurable signals of IGBT module [J]. IEEE Transactions on Device Materials Reliability, 2014, 14(1): 83-89.
- [14] AVENAS Y, DUPONTL, BAKERN, et al. Condition monitoring: A decade of proposed techniques [J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2015, 9(4): 22-36.
- [15] SINGH A, ANURAG A, ANAND S. Evaluation of vce at inflection point for monitoring bond wire degradation in discrete packaged IGBTs [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(4): 2481-2484.
- [16] 柏同杨,汪飞,吴春华,等. 基于滑模观测器的 MMC IGBT 开路故障诊断 [J]. 电子测量技术, 2017, 40(11): 44-47.
- BAI T Y, WANG F, WU CH H, et al. Open-circuit fault diagnosis of MMC IGBT based on sliding mode observer [J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(11): 44-47
- [17] JI B, PICKERT V, CAO W, et al. In situ diagnostics and prognostics of wire bonding faults in IGBT modules for electric vehicle drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(12): 5568-5577.
- [18] ZHOU S, ZHOU L, SUN P. Monitoring potential defects in an IGBT module based on dynamic changes of the gate current [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(3): 1479-1487.
- [19] HYUNSEOK O, BONGTAE H, PATRICK M C, et al. Physics-of-failure, condition monitoring, and prognostics of insulated gate bipolar transistor modules: A review [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2413-2426.
- [20] ELEFFENDIM A, JOHNSONC M. In-service diagnostics for wire-bond lift-off and solder fatigue of power semiconductor packages [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(9): 7187-7198.
- [21] BAKER N, DUPONT L, MUNK-NIELSEN S, et al. IR camera validation of IGBT junction temperature measurement via peak gate current [J]. IEEE Transactions



on Power Electronics, 2017,32(4): 3099-3111.

- [22] BAKER N, MUNK-NIELSEN S, IANNUZZO F, et al. IGBT junction temperature measurement via peak gate current [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3784-3793.
- [23] MANDEYA R, CHEN C, PICKERT V, et al. Prethreshold voltage as a low-component count temperature sensitive electrical parameter without self-heating [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(4): 2787-2791.

作者简介



王晨苑, 2018 年于武汉大学获得学士学位, 现为武汉大学硕士研究生, 主要研究方向为大功率 IGBT 模块可靠性。

E-mail: 2014302540237@whu.edu.cn

Wang Chenyuan received her B. Sc. degree from Wuhan University in 2018. Now

she is a M. Sc. Candidate at Wuhan University. Her main research interests include the reliability assessment, condition monitoring and fault diagnosis of high power modules.



何怡刚 (通信作者), 1996 年于西安交通大学获得博士学位, 现为武汉大学教授, 主要研究方向为智能电网自动监测与健康管管理、电力电子技术及应用、极大规模集成电路设计测试与诊断、自动识别技术等。

E-mail: 18655136887@163.com

He Yigang (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 1996. Now he is a professor at Wuhan University. His main research interests include smart grid automatic monitoring and health management, power electronics technology and applications, VLSI design testing and diagnosis, automatic identification technology, etc.