DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.7.8 **中图分类号**：TN32 **文献标志码**：A

基于集射电压频谱的 IGBT 老化状态解耦方法

李亚辉(中国电源学会学生会员)，杜明星(中国电源学会会员)
(天津市新能源电力变换传输与智能控制重点实验室(天津理工大学)，天津 300384)

摘要：IGBT 的健康监测对于电力系统的正常运行至关重要，当前针对 IGBT 器件老化的研究主要面向单一老化，多种老化叠加会导致部分监测方法适用性降低、误动作频繁，对于多老化状态判定和区分的研究还有很多不足。由于集射电压 U_{CE} 频谱中含有丰富的信息，不同老化会对其产生不同影响，因此提出一种基于 U_{CE} 频谱的键合线老化和栅极老化的判定和区分方法。首先，分析键合线和栅极老化对开关电压波形的影响。然后，对开关电压波形进行快速傅里叶变换 FFT(fast Fourier transform)并进行频谱分析，探究不同老化对频谱产生的影响，由此进行老化判定和区分。最后，搭建电路进行实验验证，并分析不同工况对该方法的影响。结果表明键合线老化和栅极老化均会使高频段幅值增大，所提方法可以有效区分不同老化形式。

关键词：IGBT；状态监测；频谱；键合线老化；栅极老化

Decoupling Method for IGBT Aging State Based on Collector-emitter Voltage Spectrum

LI Yahui, *Student Member*, *CPSS*, DU Mingxing, *Member*, *CPSS*
(Tianjin Key Laboratory of New Energy Power Conversion, Transmission and Intelligent Control, Tianjin 300384, China)

Abstract: The health monitoring of the IGBT is crucial for the normal operation of the system, and current research mainly focuses on single aging. The combination of multiple aging states can lead to low applicability and misoperation of some monitoring methods. There are still many shortcomings in the research on the determination and differentiation of multiple aging states. Due to the rich information contained in the U_{CE} spectrum, different aging will have different effects on it. Therefore, a method for determining and distinguishing bond wire aging and gate aging based on U_{CE} spectrum is proposed. Firstly, the impact of bonding wire and gate aging on the voltage switch waveform is analyzed. Then, fast Fourier transform (FFT) the switch voltage waveform and perform spectral analysis to explore the impact of different aging on the spectrum, and thus make aging judgments and distinctions. Finally, the circuit is constructed for experimental verification and the impact of different operating conditions on the method is analyzed. The experimental results show that both bond wire aging and gate aging can increase the amplitude of the high-frequency band, and the proposed method can effectively distinguish different aging forms.

Keywords: IGBT; condition monitoring; spectrum; bond wire aging; gate oxide layer aging

IGBT 作为功率变换器的关键元件，广泛应用于航海、航空、航天等领域。据统计，34%的功率变换器失效由 IGBT 引起，因此研究 IGBT 的失效原因及监测其健康状态对功率变换器的健康运行非常重要。文献[1]证明阈值电压、栅极平台电压和栅极平台时间可以监测栅极老化；文献[2]研究表明栅极老化和键合线老化均会导致导通电阻增大，对 MOSFET 模块导通电阻进行了分离，但此方法只适用于 MOSFET 模块，不适用于 IGBT 模块；文献[3]研究了栅极老化对 MOSFET 寄生电容的影响，用栅漏寄生电容 C_{GD}、栅源寄生电容 C_{GS} 监测老化，但需要在 $0<U_{GE}<3$ V、$U_{DS}=0$ V(U_{GE} 为栅射极电压、

收稿日期：2024-08-09；**修回日期**：2024-09-23，2024-10-11；
录用日期：2024-10-18；**网络首发日期**：2024-11-04

U_{DS}为漏源电压)的条件下测量，非器件正常工作条件；文献[4]提出了用阈前电压的充电时间监测栅极老化，老化会使到达固定栅极电压的充电时间增大；文献[5]利用漏源电压频谱的高频部分监测栅极老化，随着老化的加深，高频部分幅值增大，但未考虑键合线老化对其的影响；文献[6]利用 IGBT 米勒平台时栅电流的大小监测栅氧化层老化，栅氧化层老化引起栅电流减小，相比于栅极平台电压具有监测简单的优势；文献[7]研究了栅氧化层老化对关断延迟时间的影响，老化后关断延迟时间增大，由此监测栅极健康状态；文献[8]提出分离 *C-U* 曲线的不同部分以表征栅氧化层陷阱的退化位置、类型和能级；文献[9]基于栅极老化后输入电容变化提出一种基于栅极参考电压的 SiC MOSFET 栅极氧化物健康状态在线监测方法，并提出一种栅极参考电压在线提取电路；文献[10]利用 SiC MOSFET 开通过程中的栅极电流振荡监测栅氧化层老化，随着栅极老化加深，频域振荡峰值减小，但未考虑结温对所提方法的影响。

关于键合线老化的监测已有较多研究成果。文献[11]提出一种基于开通栅电压过冲的监测方法，随着键合线断裂数的增加，栅电压过冲幅值增大；文献[12]利用阈前电压监测多芯片模块的键合线老化，老化后的阈前电压增大，但只有某个芯片上的键合线全部断裂才能被监测到；文献[13]研究了键合线老化对差模电磁干扰的影响，随着老化的增加，差模干扰峰值增大；文献[14]提出一种基于开通栅电压的新型 IGBT 键合线老化监测方法，可有效避免温度和负载电流带来的影响；文献[15]利用辅助发射极电压提取的开通延迟时间来监测所有键合线脱落引起的芯片开路故障；文献[16]提出一种基于卷积神经网络的键合线老化监测方法，将栅极电压波形作为模型输入，但其解释性较差。

以往对栅极老化和键合线老化的研究大都分开进行，但在实际应用中，多种老化可能同时发生，甚至耦合。当前少有关于同时监测多种老化的研究，这将影响判断的准确性。文献[17]提出用米勒平台持续时间 t_{GP} 监测栅极老化和键合线老化，键合线老化导致 t_{GP} 减小，栅极老化导致 t_{GP} 增大，当只有一种老化时该方法是可行的，但如果二者同时发生则可能会抵消这种变化，影响监测结果。大量基于集射电压 U_{CE} 的电参数被用来作为栅极老化及键合线老化的监测量，可见栅极老化和键合线老化的信息同时存在于 U_{CE} 波形中，因此，本文提出一种利用 U_{CE} 频谱所蕴含的老化信息同时监测 IGBT 栅极和键合线的健康状态的方法。该方法基于 2 个参数转折频率中点 f_b 和滤波后时域信号的电压正峰值 U_B，经过理论分析和实验验证发现 f_b 仅受键合线老化影响，不受栅极老化影响，可以及时监测键合线老化，在与 U_B 组合时则可以很好地区分 2 种老化，且一定程度上判断老化的程度。与以往研究相比，本研究同时考虑了 2 种老化形式，且可以很好地进行多老化区分。

1　多老化状态耦合分析

1.1　键合线老化对 IGBT 开关过程的影响

键合线老化后，IGBT 的 U_{CE} 波形也会发生变化。图 1 为沟槽型 IGBT 的寄生电容分布，栅极−集电极电容 C_{GC} 是由栅氧化物电容 C_{oxd} 和耗尽层电容 C_{dep} 串联而成，可表示为

$$C_{GC}=\frac{C_{oxd}C_{dep}}{C_{oxd}+C_{dep}}=\frac{C_{ox}Aa_iC_{dep}}{C_{ox}Aa_i+C_{dep}} \tag{1}$$

$$C_{dep}=A\sqrt{\frac{qNb\varepsilon_{Si}}{2(U_{CE}-U_{TH})}} \tag{2}$$

式中：C_{ox} 为 IGBT 芯片内栅极单位面积的氧化物电容；A 为 IGBT 芯片焊盘对应的内胞总面积；a_i 为 IGBT 芯片内胞与整个焊盘面积的比例；Aa_i 为 1 个 IGBT 芯片焊盘的内胞面积；q 为电子电荷量；N 为 N 漂移区掺杂浓度；b 为沟槽侧壁耗尽层的有效宽度；ε_{Si} 为硅的介电常数；U_{TH} 为阈值电压。研究表明，铝的重构和键合线的脱落会导致栅极多晶硅和掺杂区域重叠表面的减小，进而使得 C_{oxd} 减小，由式(1)可得键合线断裂根数的增加会导致 C_{GC} 减小[17]。

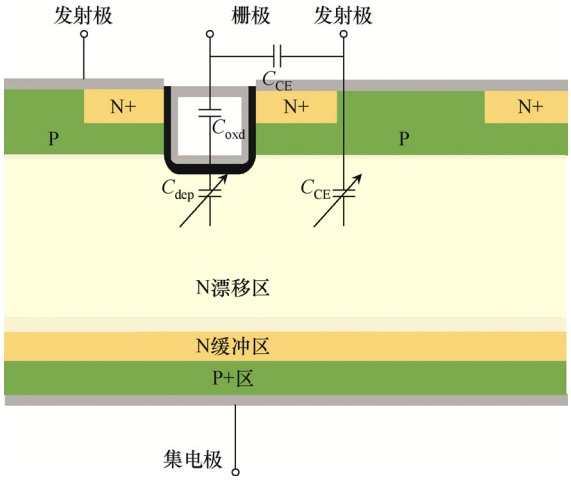


图 1 沟槽型 IGBT 芯片的电容分布

Fig. 1 The capacitance distribution of trench-type IGBT chips

IGBT 的开通过程如图 2 所示，开通过程中，U_{CE} 从母线电压 U_{DC} 降为导通压降。

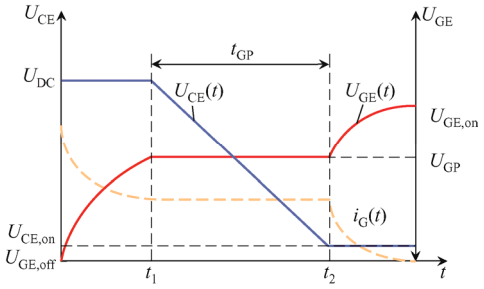


图 2 IGBT 模块的开通波形

Fig. 2 Turn-on waveform of the IGBT module

接通电源时，U_{GE} 通过栅极电阻 R_G 给栅极-发射极电容 C_{GE} 和 C_{GC} 充电。当 U_{GE} 达到米勒平台时，栅极电流只对 C_{GC} 充电，此阶段栅极电流表达式为

$$i_G(t)=\frac{U_{CC}-U_{GP}}{R_G}=-C_{GC,avg}\frac{\mathrm{d}u_{CE}}{\mathrm{d}t} \tag{3}$$

式中：U_{CC} 为从栅极驱动器到 IGBT 栅极发射极的施加电压；U_{GP} 为米勒平台电压；R_G 为栅极内外电阻之和；$C_{GC,avg}$ 为栅极-集电极电容的平均值；u_{CE} 为集电极发射极电压。假设 U_{CE} 在开关接通过程中从 U_{DC} 线性下降到 0 V，则 U_{CE} 的下降时间可表示为

$$t_f=R_GC_{GC,avg}\frac{U_{DC}}{U_{CC}-U_{GP}} \tag{4}$$

在关断过程中，U_{CE} 从导通压降增加到 U_{DC}。为了关闭 IGBT，为栅极提供 1 个零电平电压，使 C_{GE} 和 C_{GC} 放电。U_{CE} 的变化主要发生在米勒平台期，在此时间段，U_{GE} 近似恒定，驱动电流 i_G 给 C_{GC} 放电，U_{CE} 的上升时间可表示为

$$t_r=R_GC_{GC,avg}\frac{U_{DC}}{U_{GP}} \tag{5}$$

由式(4)和式(5)可知 C_{GC} 的变化会影响 t_r 和 t_f，随着键合线的老化，C_{GC} 减小，使 t_r 和 t_f 减小，U_{CE} 的变化如图 3 所示。

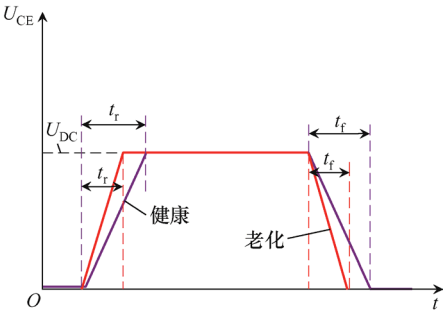


图 3 键合线老化前、后 U_{CE} 对比

Fig. 3 Comparison of U_{CE} before and after bonding wire aging

1.2 栅极老化对 IGBT 开关过程的影响

目前对栅极退化机理的研究表明，界面捕获电荷 Q_{it} 和氧化物捕获电荷 Q_{ot} 是在栅氧化物退化过程中产生的，这 2 种电荷是导致经时击穿的主要原因，也是目前研究的重点。式(4)和式(5)表明 t_r 和 t_f 除了受 C_{GC} 的影响外，还受 U_{GP} 的影响，随着栅极老化的加深，U_{GP} 也会发生变化，可表示为

$$U_{GP}=U_{TH}+\sqrt{\frac{I_LL_{CH}}{\mu C_{ox}Z}} \tag{6}$$

$$U_{TH}=U_{TH0}-\frac{Q_{ot}}{C_{ox}}+\frac{Q_{it}}{C_{ox}} \tag{7}$$

式中：U_{TH0} 为初始阈值电压；I_L 为负载电流；L_{CH} 为 MOS 沟道长度；μ 为载流子迁移率；Z 为 MOS 沟道有效宽度。如式(6)和式(7)所示，在老化早期，Q_{ot} 占主导地位，U_{GP} 减小，进而导致 t_r 增大和 t_f 减小。随着老化的加深，Q_{it} 开始占主导地位，U_{GP} 增大，进而导致 t_r 减小和 t_f 增大。栅极老化前期对 IGBT 芯片的健康运行影响较小，因此主要监测老化后期，即 U_{GP} 增大的时段，此时段 U_{CE} 的

变化如图 4 所示。

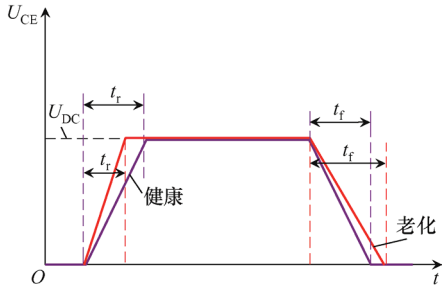


图 4　栅极老化前、后 U_{CE} 对比

Fig. 4 Comparison of U_{CE} before and after aging of gate oxide layer

1.3　U_{CE} 频谱分析

在研究老化对 U_{CE} 频谱的影响前，首先分析时域开关波形产生频谱的主要特征。将 IGBT 的开关电压波形近似为梯形波[18]，其波形如图 5 所示，经过快速傅里叶变换 FFT(fast Fourier transform)得到其频谱，如图 6 所示。文献[19]分析了梯形波 FFT 后各个频段的转折频率和包络线幅值，对于健康状态下的 IGBT 模块，其开通和关断时间基本相等，因此其频谱表现为二拐点三段线的特点。第一段包络线斜率为 0 dB/dec，第二段从转折频率 f_{a1} 开始，斜率为−20 dB/dec，第三段从转折频率 f_{a2} 开始，斜率为−40 dB/dec，其中

$$f_{a1}=\frac{1}{\pi DT} \tag{8}$$

$$f_{a2}=\frac{1}{\pi t_r}=\frac{1}{\pi t_f} \tag{9}$$

式中：D 为占空比；T 为开关周期。可以看出在不同的频段，频谱幅值以不同的斜率衰减，转折频率的变化将会影响高频部分的幅值，这可以作为老化监测的依据。

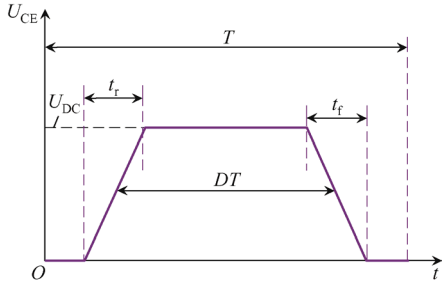


图 5　IGBT 的 U_{CE} 理想波形

Fig. 5 Ideal U_{CE} waveform of IGBT

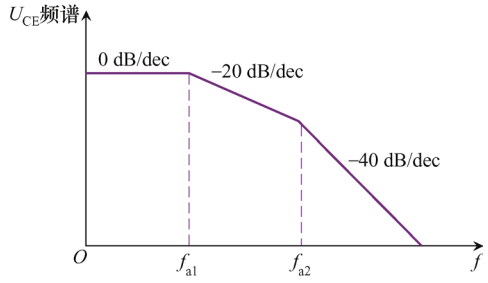


图 6　理想梯形波的频谱包络

Fig. 6 Spectrum envelope of ideal trapezoidal wave

1.4　不同类型老化后 U_{CE} 频谱的区别

对键合线老化后的 U_{CE} 进行 FFT 可得到其频谱包络线如图 7 所示，f_{a2} 增大至 f_{a3}，同时键合线老化后高频段的幅值会增大。文献[5]表明栅极老化也会影响 U_{CE} 频谱的高频段，这说明此方法只能监测老化，而不能区分老化。图 8 为栅极老化前、后 U_{CE} 频谱的对比图，老化后的 U_{CE} 频谱表现为三拐点四段线的特点。老化前 t_f 和 t_r 基本相等，老化后 t_f 增大、t_r 减小，在频谱中的变化则表现为出现了 1 个包络线斜率介于−20~−40 dB/dec 的频段，且随着老化程度的增加，t_f 和 t_r 的差距越来越大，该频段越明显。

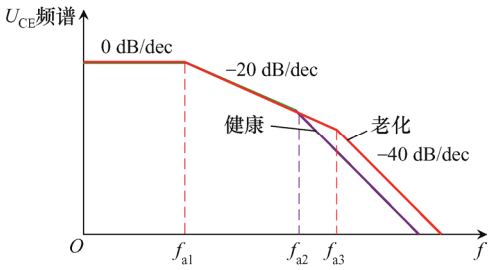


图 7　键合线老化前后 U_{CE} 频谱包络对比

Fig. 7 Comparison of U_{CE} spectral envelope before and after bonding wire aging

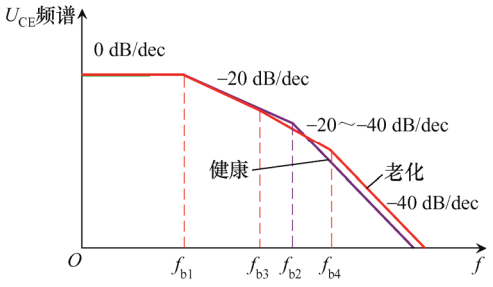


图 8　栅极老化前、后 U_{CE} 频谱包络对比

Fig. 8 Comparison of U_{CE} spectrum envelope before and after aging gate oxide layer

栅极老化前各转折频率为

$$f_{b1} = f_{a1} \tag{10}$$

$$f_{b2} = f_{a2} \tag{11}$$

栅极老化后转折频率为

$$f_{b3} = \frac{1}{\pi t_f} = \frac{U_{CC} - U_{GP}}{\pi R_G C_{GC,avg} U_{DC}} \tag{12}$$

$$f_{b4} = \frac{1}{\pi t_r} = \frac{U_{GP}}{\pi R_G C_{GC,avg} U_{DC}} \tag{13}$$

f_{b3} 和 f_{b4} 的转折频率中点为

$$f_b = \frac{f_{b3} + f_{b4}}{2} = \frac{U_{CC}}{2\pi R_G C_{GC,avg} U_{DC}} \tag{14}$$

由式(14)可以看出 f_b 只受 C_{GC} 的影响，即只受键合线老化影响，不受 U_{GP} 影响，即不受栅极老化影响，因此 f_b 的变化可进行键合线和栅极老化的区分监测。

2 IGBT 的老化监测方法

2.1 老化监测策略

在键合线老化的过程中，C_{GC} 发生变化导致开关瞬态发生变化；在栅极老化过程中，U_{GP} 的变化导致开关瞬态变化。由第 1 节的分析可知，时域开通和关断时间的微小变化可能导致频域的明显变化，2 种老化后 U_{CE} 的高频段会发生明显变化，这个变化可以作为监测的重点，并提取变化明显的频段信息。本文通过 2 种老化后 U_{CE} 频谱的变化监测老化，并依据频谱变化区分 2 种老化。设计一个巴特沃斯带通滤波器(Butterworth filter)筛选高频部分，然后计算滤波后时域信号的电压正峰值作为老化监测量，定义为 U_B，其表达式为

$$U_B = \max\{\mathrm{FT}^{-1}[U_S(f) \cdot H(f)]\} \tag{15}$$

式中：$\mathrm{FT}^{-1}(\cdot)$ 为傅里叶反变换；$U_S(f)$ 为 U_{CE} 的频谱；$H(f)$ 为带通滤波器的传递函数。

巴特沃斯带通滤波器是一种可以实现平滑频率响应的滤波器，常用于信号处理和控制系统中。该滤波器在通带内具有近似于平坦的幅频响应，且滤波器的阶数越高，其幅频响应越平坦。其设计步骤包括设置参数、计算归一化频率、计算滤波器系数、绘制结果。本实验首先设计滤波器的低截止频率为 30 MHz，高截止频率为 40 MHz，采样率为 5 GHz，阶数为 4 阶；然后将实际的截止频率转换为归一化频率，使用 MATLAB 的 butter 函数计算巴特沃斯带通滤波器的系数，这些系数定义了滤波器的传递函数；最后使用 filtfilt 函数将设计好的滤波器应用于信号上，由 max 函数获得 U_B。

同时本文研究一种针对不同母线电压的归一化方法，可以有效减小 U_{DC} 不同导致的对监测结果的影响。对于第三频段，文献[19]给出了其包络线幅值表达式为

$$U_S(f) = \frac{U_{DC} f_s}{\pi^2 f^2}\left(\frac{1}{t_r} + \frac{1}{t_f}\right) \tag{16}$$

式中，f_s 为系统采样频率。可以看出第三频段的包络线幅值与 U_{DC} 成正比。根据傅里叶变换的线性性质，设基准母线电压为 U_{DC0}，对于一个健康的 IGBT 模块，式(15)可以写为

$$U_{B0} = \max\left\{\mathrm{FT}^{-1}\left[U_S(f) \cdot H(f)\right]\right\} \tag{17}$$

式中，U_{B0} 为健康状态下的 U_B。

若 IGBT 模块仍健康，当母线电压变化为 U_{DC1} 时，其健康基准值可以表示为

$$U_{B1} = \frac{U_{DC1}}{U_{DC0}} \max\{\mathrm{FT}^{-1}[U_S(f) \cdot H(f)]\} = \frac{U_{DC1}}{U_{DC0}} U_{B0} \tag{18}$$

即得到健康基准值的 U_{DC} 和实际 U_{DC} 就可调整基准值，极大减小了母线电压变化对监测精度的影响，实现了归一化。

2.2 老化解耦方法

2.1 节主要研究了监测老化的策略，但该策略只能判断 IGBT 模块发生了老化，不能确定是何种老化，本节主要研究如何对键合线老化和栅极老化进行区分。式(14)定义了 f_b，可以看出 f_b 仅受键合线老化影响，不受栅极老化影响。由式(9)可知，对于一个健康的 IGBT 模块，可以认为其 f_b=f_{a2}，键合线老化会使其转折频率 f_{a2} 右移至 f_{a3}，即 f_b 右移，如图 7 所示。对于只有栅极老化的模块，由式(14)

可知 f_b 是不变的，并且其包络线斜率介于−20~−40 dB/dec 的频段范围越来越大。只有栅极老化时，U_B 增大，f_b 不变；只有键合线老化时，U_B 增大，f_b 增大；栅极和键合线均老化时，U_B 增大，f_b 增大。要区分只有键合线老化还是键合线和栅极均老化，可根据 f_b 判断键合线老化的程度，然后根据键合线老化程度得到只有键合线老化时 U_B 的值 $U_{B,cal}$。若 $U_{B,cal}$ 等于所监测 U_B，则说明只有键合线发生老化；若 $U_{B,cal}$ 小于所监测 U_B，则键合线和栅极均老化。综上，由 f_b 和 U_B 的变化可以进行键合线老化与栅极老化的区分，设计实验原理如图 9 所示，将所测 U_{CE} 利用 FFT 获得 U_{CE} 的频谱图，利用巴特沃斯带通滤波器获得 U_B，由示波器测得 t_r 和 t_f，根据式(12)~式(14)计算得到 f_b。

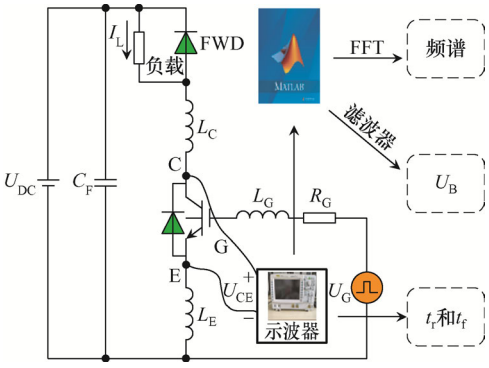


图 9　实验原理图

Fig. 9 Experimental schematic diagram

3　实验验证及结果分析

3.1　实验平台

为验证理论分析的正确性，搭建如图 10 所示的实验平台。被测模块为 MG100HF12TFC1，包括 2 个 IGBT。多范围直流电源提供 30 V 的母线电压，可编程直流电源为驱动板提供 15 V 的电压。由电压探头捕获 U_{CE} 波形，导入计算机，经过处理得到其电压频谱，由频谱筛选所需频段范围，设置滤波器参数得到 U_B。本文主要研究 2 种老化，为了缩短实验时间，采用剪断键合线的方法模拟键合线老化[20]。对于实际老化，本文参考文献[17]的研究做了器件加速老化试验，证明在功率循环上百万次后键合线发生老化，导通电阻增大，寄生电容降低，从而导致 t_{GP} 减小，表明本文通过剪断键合线的方式模拟键合线老化是可行的。栅极老化则采用 HT-HEF 应力实验，原理如图 11 所示，栅极电压设为 30 V，温度设为 100 ℃，集电极和发射极短路，设置应力时间为 1 h，每老化 1 h 将 IGBT 接入实验电路进行测量。

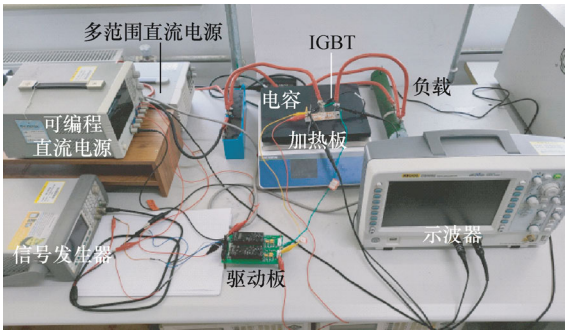


图 10　实验平台实物图

Fig. 10 Physical photograph of experimental platform

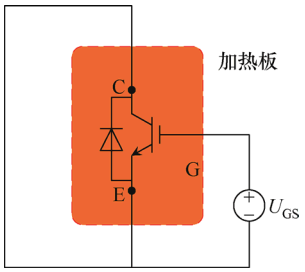


图 11　HT-HEF 应力实验

Fig. 11 HT-HEF stress experiment

3.2　实验结果

当 U_{DC}=30 V、开关频率为 40 kHz、占空比设定为 50%时，IGBT 模块键合线在不同老化程度下，所测 U_{CE} 的开通和关断波形分别如图 12 和图 13 所示，其中 n 为键合线断裂数。由图可以看出，随着键合线的老化，U_{CE} 的开通和关断时间均减小，且开通时间减小更为明显。将 n=6 与健康状态下的 U_{CE} 波形进行 FFT 得到其频谱，其高频段对比如图 14 所示。可以看到 n 的增加会导致高频段频谱的幅值增大，验证了本文第 2 节的理论分析。键合线老化后其幅值会变大，部分频点会受干扰影响导致幅值变大较明显，且电磁干扰幅值明显的频点相对固定，因此选择幅值变化明显的频段作为监测键合线老化的依据，本文

选择 30~40 MHz 的频段得到 U_B，在这个频段老化后幅值变化较明显，只有个别频点老化前的幅值超过老化后，但总体并不会影响 U_B 的变化趋势以及老化的监测。

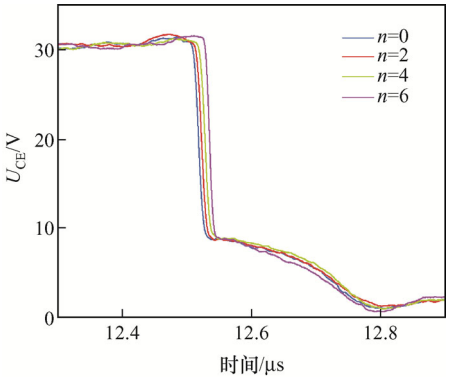


图 12 键合线老化 U_{CE} 开通瞬态波形

Fig. 12 Transient waveform of U_{CE} turn-on after bond wire aging

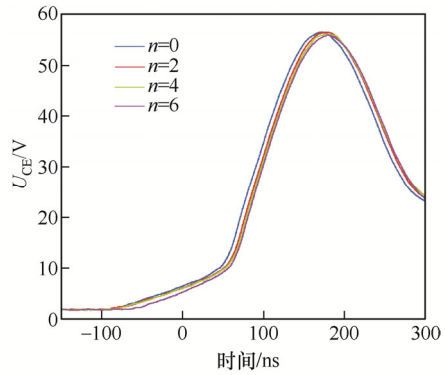


图 13 键合线老化 U_{CE} 关断瞬态波形

Fig. 13 Transient waveform of U_{CE} turn-off after bond wire aging

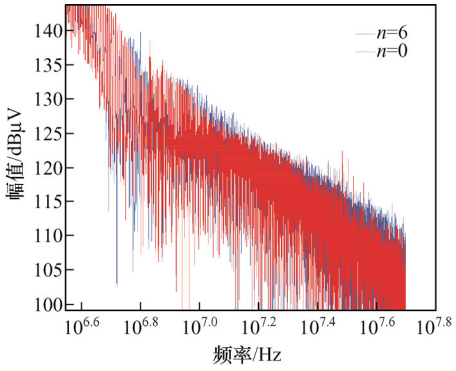


图 14 n=6 和健康模块的 U_{CE} 频谱对比

Fig. 14 Comparison of U_{CE} spectrum between the n=6 and healthy module

根据所得频谱选出变化明显的频段为 30~40 MHz 频段，利用巴特沃斯带通滤波器求出滤波后信号的最大值 U_B。用老化后 U_B 的变化量与 U_{B0} 的比值判断键合线的老化程度，表示为

$$\phi=\frac{U_B-U_{B0}}{U_{B0}}\times 100\% \tag{19}$$

图 15 为 n 值不同时 U_B 的变化情况，可以看出在键合线老化早期，即 $n\leqslant 4$ 时，n 每增加 2，U_B 增大约 30 mV，变化约 3%，可以监测老化。在老化后期，n=6 时，U_B 的变化更为明显，相比健康状态，增大了约 340 mV，变化了约 34%。综上可知，当 n>4 时，U_B 增大明显，此时认为模块不宜再使用，建议更换。

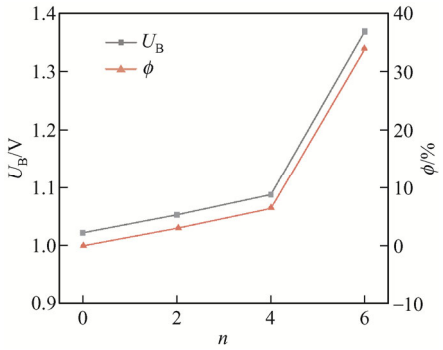


图 15 n 对 U_B 的影响

Fig. 15 The impact of n on U_B

当 U_{DC}=30 V、开关频率为 40 kHz、占空比设定为 50%时，IGBT 芯片栅极在不同老化程度下所测 U_{CE} 的开通和关断波形分别如图 16 和图 17 所示。老化 1 h 后 U_{CE} 的 t_r 增大、t_f 减小，这是因为老化早期 Q_{ot} 占主导。随着老化加深，Q_{it} 开始占主导地位，进而导致 t_r 减小和 t_f 增大，并且 t_f 比 t_r 的变化更明显。为了研究栅极老化后 U_{CE} 的频谱，将栅极老化 4 h 与健康状态下的 U_{CE} 波形进行 FFT，其高频段对比如图 18 所示，高频段频谱幅值增大，与理论分析一致。选择 30~40 MHz 频段，求出 U_B，利用式(19)来判断栅极的老化程度。图 19 为栅极老化不同时长后 U_B 的变化，可以看出栅极老化 1 h 时 U_B 下降了约 0.1%，这可能是由于监测时 Q_{it} 已经开始增大，抵消了早期老化 Q_{ot} 的影响。

随着老化加深，U_B 持续增大，老化 4 h 时的 U_B 相比健康状态增大了约 37%，变化明显，完全可以监测老化。

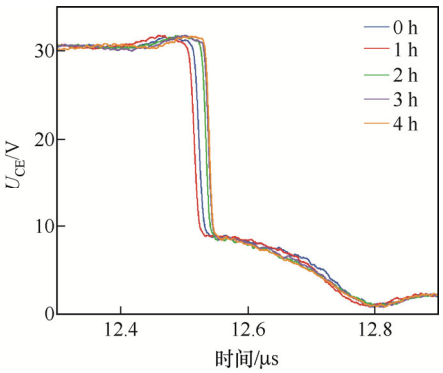


图 16　栅极老化 U_{CE} 开通瞬态波形

Fig. 16 Transient waveform of U_{CE} turn-on after aging of gate oxide layer

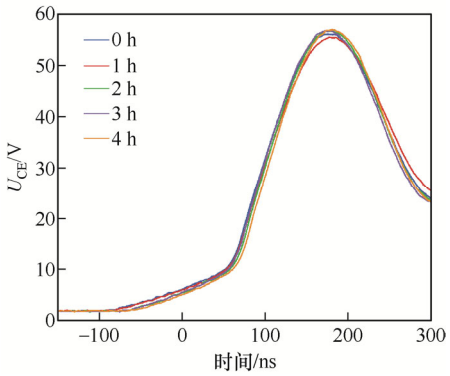


图 17　栅极老化 U_{CE} 关断瞬态波形

Fig. 17 Transient waveform of U_{CE} turn-off after aging of gate oxide layer

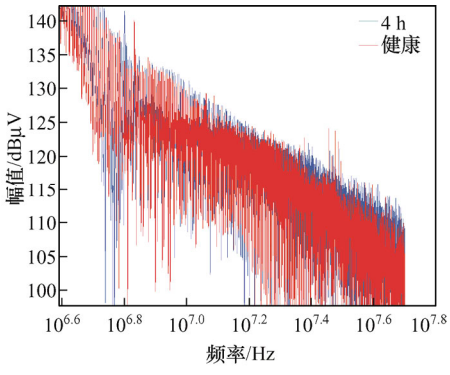


图 18　栅极老化 4 h 和健康模块 U_{CE} 频谱对比

Fig. 18 Comparison of U_{CE} spectrum between the gate oxide aged module for 4 h and healthy module

键合线老化和栅极老化均会使 U_B 增大，为了区分这 2 种老化，需要测得 t_r 和 t_f 计算 f_b。在变流器实际应用过程中，要充分掌握各功率器件的开关周期和状态，开通和关断时间的测量时刻选取很关键，需要在变流器设计之初充分考虑性价比，合理选取测量时刻。本文采用示波器测得，其最高采样率可达 5 GSa/s，可以测 ns 级的 t_f 和 t_r。根据式(12)~式(14)分别求出健康、n=6、栅极老化 3 h、n=6 且栅极老化 3 h 的模块的 f_b，结果见表 1。可以看出栅极老化对 f_b 的影响很小，这是因为栅极老化对 f_{b3} 和 f_{b4} 的影响相反，二者求和将会抵消。键合线老化会使 f_b 明显增大，这是因为键合线老化使 f_{b3} 和 f_{b4} 都增大，二者求和也会增大。

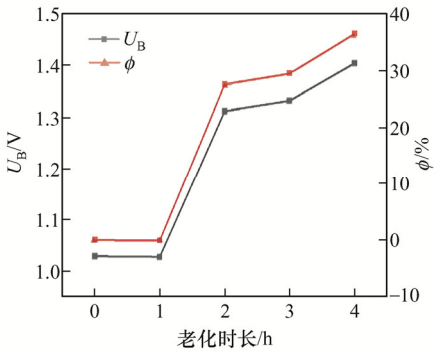


图 19　栅极老化对 U_B 的影响

Fig. 19 The effect of aging of gate oxide layer on U_B

综上得出以下结论：①健康状态，U_B 基本恒定；②只有栅极老化，U_B 增大，f_b 不变；③只有键合线老化，U_B 增大，f_b 增大；④栅极和键合线均老化，U_B 增大，f_b 增大，且 f_{b3} 与 f_{b4} 的差增大。当监测出了 U_B 和 f_b 增大时，可根据 f_b 判断出键合线老化的程度，然后根据键合线老化程度由图 15 判断只有键合线老化时 U_B 的值 $U_{B,cal}$。如果 $U_{B,cal}$ 等于所监测 U_B，则说明只有键合线发生老化；若 $U_{B,cal}$ 小于所监测 U_B，则键合线和栅极均老化。此方法会受到误差影响，为防止误判，设计 1 个裕度，即当 $U_B-U_{B,cal}>0.05U_{B0}$ 时，认为键合线与栅极均老化。虽然这会对栅极老化早期的判断造成影响，但栅极早期老化并不影响系统的健康运行，所以监测老化后期即可。实际应用时健康状态监测流程如图 20 所示。

表 1 各种老化状态下 f_b 的变化

Tab. 1 The changes of f_b under various aging states

模块类型	f_{b3}/MHz	f_{b4}/MHz	f_b/MHz
健康模块	1.178	1.770	1.474
栅极老化 3 h	1.126	1.848	1.487
n=6	1.255	1.967	1.611
n=6 且栅极老化 3 h	1.174	2.033	1.604

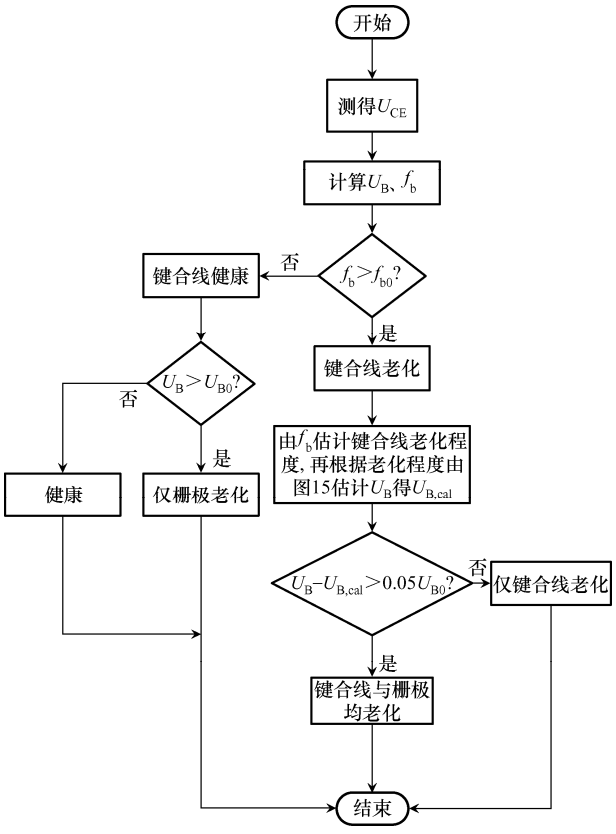


图 20 健康状态监测流程图

Fig. 20 Health status monitoring flowchart

3.3 老化解耦策略适用性分析

3.3.1 不同母线电压

U_{DC} 的改变会改变 U_{CE} 的幅值，进而改变频谱幅值。图 21 为健康模块在不同 U_{DC} 下的 U_{CE} 频谱对比，可看出频谱幅值随着 U_{DC} 的增大而增大，这会影响 U_B。图 22 绘制了不同 U_{DC} 下的 U_B，可以看到虽然不同 U_{DC} 下的 U_B 也不同，但其变化是一致的，U_{DC} 变化并不会影响老化后 U_B 的变化趋势。表 2 汇总了不同 U_{DC} 下 U_B 的实验结果，将其中健康模块 U_{DC}=30 V 下的 U_B 作为基准值 U_{B0}，由式(18)计算 U_{DC}=20 V 下的 U_{B0} 应为 684.07 mV，与实验相差仅 0.62%。对于键合线断 4 根的模块，U_{DC}=30 V 下的 U_B 归一化至 U_{DC}=20 V 下的 U_B 为 745.93 mV，与实验相差仅 0.98%，差距极小，证明本文提出的归一化方法是可行的，且不受老化影响。文献[5]的研究表明在数百伏的母线电压等级下，仍可根据 U_{DS} 频谱的高频部分判断栅极老化，本文实验也验证了这一点，这说明无论是几百伏电压还是几十伏电压，键合线老化或者栅极老化后，U_B 均会增大，不会影响老化判断，只需要考虑基准值的变化。考虑到电压等级对结果和趋势没有影响，因此本文选择几十伏的母线电压进行测试。

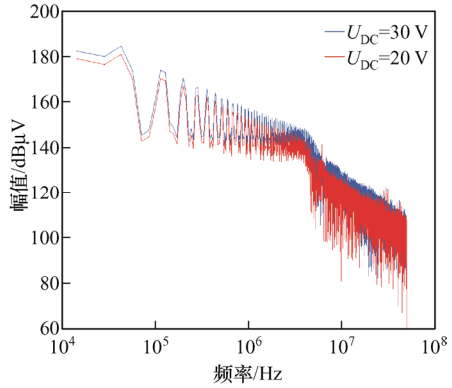


图 21 U_{DC} 对 U_{CE} 频谱的影响

Fig. 21 The impact of U_{DC} on U_{CE} spectrum

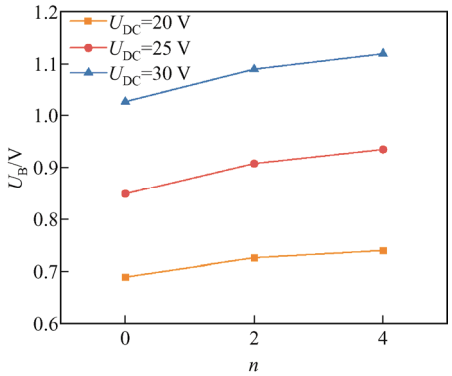


图 22 不同 U_{DC} 对 U_B 的影响

Fig. 22 The impact of different U_{DC} on U_B

表 2 不同 U_{DC} 下 U_B 的变化

Tab. 2 The changes of U_B under various U_{DC}

U_{DC}/V	n	U_B/mV
20	0	688.34
20	4	738.72
30	0	1 026.10
30	4	1 118.90

此外，U_{DC} 的变化也会影响 t_r 和 t_f，进而影响 f_b，根据式(14)可知，随着 U_{DC} 的增大，f_b 减小。图 23 汇总了不同母线电压下 f_b 的实验结果，因 $C_{GC,avg}$ 会随 U_{DC} 的增大而减小，式(14)中 U_{DC} 对 f_b 的影响分为 2 部分，所以不能简单地由式(14)进行 f_b 的归一化。

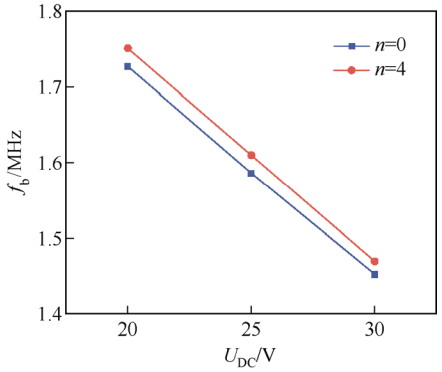


图 23　不同 U_{DC} 对 f_b 的影响

Fig. 23 The impact of different U_{DC} on f_b

根据图 23 的曲线可以进行拟合得到 f_b 与 U_{DC} 之间的关系为

$$f_b = -0.027\ 5U_{DC} + 2.276 \tag{20}$$

当 U_{DC} 变化时，可以由式(20)计算出健康模块在不同 U_{DC} 下的 f_b 作为基准，同时可以看到老化不会影响 f_b 的变化趋势，不会影响老化区分。综上，U_{DC} 的改变不会影响所提方法的适用性。文献[5]和文献[17]的研究是在母线电压为数百伏下进行的，所测试的 t_r 和 t_f 变化趋势与本文在几十伏下所测变化趋势一致，不论是高电压等级还是低电压等级，键合线老化会导致 t_r 和 t_f 均减小，栅极老化会导致 t_r 减小和 t_f 增大，即 f_b 在不同老化下的变化趋势不会随电压等级的变化而变化，不论是高电压还是低电压，键合线老化后 f_b 增大，栅极老化后 f_b 不变。考虑到电压等级对结果和趋势没有影响，可以选择几十伏的母线电压进行测试。

3.3.2　不同结温

U_{GP} 也受结温的影响，图 24 为健康模块在不同结温下的 U_{CE} 频谱对比，可以看出频谱幅值随着结温的升高而减小，这会影响 U_B。图 25 为健康模块在不同结温下的 U_B，结温升高 100 ℃会导致 U_B 减小 77 mV，这个变化相比老化后期并不大，因此如果是为了监测老化后期，可不考虑结温的变化，但如果需要监测老化早期，则需要在确定的结温下监测 U_B，可对图 25 的曲线进行拟合，获得 U_B 与结温的关系，知晓结温即可得到相应温度下的 U_B。虽然结温会影响 t_r 和 t_f，进而影响 f_{b3} 与 f_{b4}，但由式(14)可以看出 f_b 基本不受结温影响，这是因为结温对 f_{b3} 与 f_{b4} 的影响相反，二者叠加会抵消影响。由式(14)计算结温 25 ℃和 125 ℃下的 f_b，结果见表 3，可以看出结温对 f_b 基本无影响，不会影响老化区分。

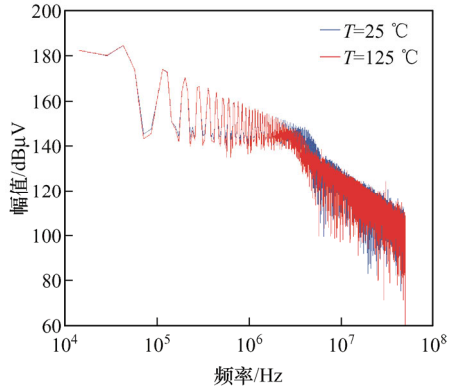


图 24　结温对 U_{CE} 频谱的影响

Fig. 24 The influence of junction temperature on U_{CE} spectrum

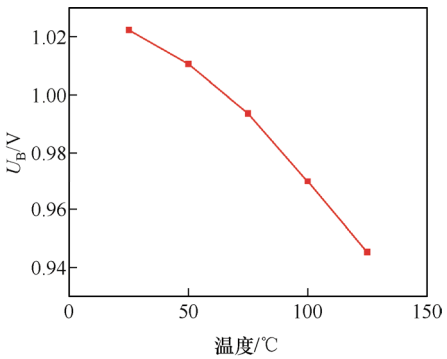


图 25　不同结温对 U_B 的影响

Fig. 25 The influence of different junction temperatures on U_B

3.3.3　不同负载电流

负载电流 I_L 的不同会影响饱和压降的大小，但饱和压降相比 U_{DC} 来说很小，尤其是 U_{DC} 等级较高时，这部分影响可以忽略。但由式(6)知 I_L 增大会导致 U_{GP} 增大，进而影响 t_r 和 t_f。图 26 为健康模块

表 3 不同结温下 f_b 的变化

Tab. 3 The changes of f_b under different junction temperatures

结温/℃	f_{b3}/MHz	f_{b4}/MHz	f_b/MHz
25	1.178	1.770	1.474
125	1.301	1.639	1.470

在不同 I_L 下的 U_{CE} 频谱对比，可以看出频谱幅值随着 I_L 的升高而增大，这会影响 U_B。图 27 为健康模块在不同 I_L 下的 U_B，随着 I_L 的增大，U_B 增大，为了消除 I_L 对 U_B 基准值的影响，可以对图 26 的曲线进行拟合，获得 I_L 与 U_B 的关系，在不同工况中，得到 I_L 即可得到 U_B 基准值。I_L 虽然会影响 U_{GP}，但由式(14)可看出 f_b 基本不受 I_L 影响，这是因为 I_L 对 f_{b3} 与 f_{b4} 的影响相反，二者叠加会抵消影响。最后通过计算不同 I_L 下的 f_b，结果见表 4，表 4 说明 f_b 基本不受 I_L 影响，不会影响老化区分。

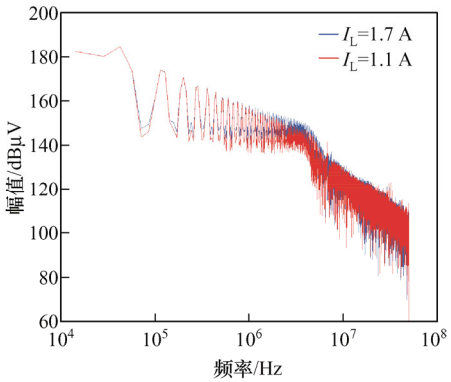


图 26 I_L 对 U_{CE} 频谱的影响

Fig. 26 The influence of I_L on U_{CE} spectrum

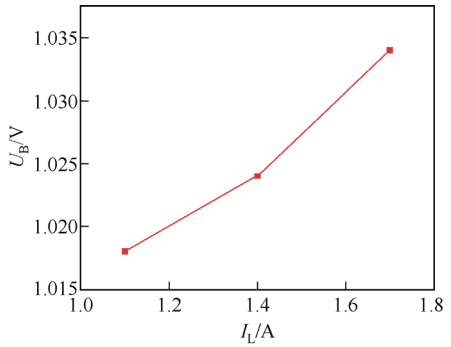


图 27 不同 I_L 对 U_B 的影响

Fig. 27 The effect of different I_L on U_B

表 4 不同 I_L 下 f_b 的变化

Tab. 4 The changes of f_b under different I_L

I_L/A	f_{b3}/MHz	f_{b4}/MHz	f_b/MHz
1.1	1.215	1.721	1.468
1.4	1.178	1.770	1.474
1.7	1.080	1.819	1.450

4 结语

本文提出一种 IGBT 模块老化状态的解耦监测方法，所提方法基于不同老化类型时 U_{CE} 频谱的变化，并进行了理论分析和实验验证。首先，分析了键合线老化以及栅极老化对 U_{CE} 时域的影响，发现键合线老化会使 t_r 和 t_f 减小，而栅极老化会使 t_r 减小、t_f 增大。其次，对时域 U_{CE} 波形进行 FFT，分析不同老化后 U_{CE} 频谱的变化和区别。定义 U_B 作为老化监测量，定义 f_b 作为老化分离量，键合线老化或栅极老化均会使 U_B 增大，而 f_b 基本不受栅极老化影响，二者联合既可判断老化，又可区分老化类型。最后，搭建验证实验平台，实验结果表明 U_B 和 f_b 联合可以区分老化类型，同时进行了不同工况下的适用性分析，得出可不监测结温进行老化区分的结论。

参考文献：

[1] Karki U, González-Santini N S, Peng F Z. Effect of gate-oxide degradation on electrical parameters of silicon carbide MOSFETs [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 67(6): 2544-2552.

[2] Zhang Qinghao, Zhang Pinjia. A novel model of the aging effect on the ON-state resistance of SiC power MOSFETs for high-accuracy package-related aging evaluation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(9): 9495-9504.

[3] Farhadi M, Yang Fei, Pu Shi, et al. Temperature-independent gate-oxide degradation monitoring of SiC MOSFETs based on junction capacitances [J]. IEEE

Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 8308-8324.

[4] Xie Minghang, Sun Pengju, Wang Kaihong, et al. Online gate-oxide degradation monitoring of planar SiC MOSFETs based on gate charge time [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(6): 7333-7343.

[5] Naghibi J, Mohsenzade S, Mehran K, et al. Gate oxide degradation condition monitoring technique for high-frequency applications of silicon carbide power MOSFETs [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(1): 1079-1091.

[6] Moazami A, Mohsenzade S, Akbari K. An online condition monitoring method for IGBT gate oxide degradation based on the gate current in miller plateau [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(9): 9505-9514.

[7] 魏伟伟, 张杨, 徐国卿. IGBT 模块栅氧老化机理分析与表征方法研究[J]. 电源学报, 2021, 19(6): 171-178.
Wei Weiwei, Zhang Yang, Xu Guoqing. Research on mechanism analysis and characterization method for gate oxygen degradation of IGBT module [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(6): 171-178. (in Chinese)

[8] Cai Yumeng, Chen Cong, Zhao Zhibin, et al. Characterization of gate-oxide degradation location for SiC MOSFETs based on the split C-V method under bias temperature instability conditions [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(5): 6081-6093.

[9] 于圣旭, 王智强, 辛国庆, 等. 基于栅极参考电压的 SiC MOSFET 栅极氧化物健康状态在线监测方法[J]. 电源学报, 2024, 22(3): 248-257.
Yu Shengxu, Wang Zhiqiang, Xin Guoqing, et al. Online monitoring method for SiC MOSFET gate-oxide health status based on gate reference voltage [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(3): 248-257. (in Chinese)

[10] 李豪, 成芮俊杰, 向大为, 等. 栅氧老化下 SiC MOSFET 开通瞬态栅极振荡特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(9): 3656-3664, I0027.
Li Hao, Cheng Ruijunjie, Xiang Dawei, et al. Effect of gate oxide degradation on SiC MOSFET gate turn-on oscillation [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(9): 3656-3664, I0027. (in Chinese)

[11] Yang Yanyong, Zhang Pinjia. A novel bond wire fault detection method for IGBT modules based on turn-on gate voltage overshoot [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 7501-7512.

[12] Mandeya R, Chen Cuili, Pickert V, et al. Gate-emitter pre-threshold voltage as a health-sensitive parameter for IGBT chip failure monitoring in high-voltage multichip IGBT power modules [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(9): 9158-9169.

[13] Chu Chengpeng, Dong Chao, Du Mingxing, et al. Aging monitoring of bond wires based on differential mode conducted interference spectrum for IGBT module [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2021, 63(4): 1274-1283.

[14] 柴育恒, 葛兴来, 张林林, 等. 一种基于开通栅极电压的新型 IGBT 键合线老化监测方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(1): 244-254.
Chai Yuheng, Ge Xinglai, Zhang Linlin, et al. A novel bonding wires aging monitoring method for IGBT based on the turn-on gate voltage [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(1): 244-254. (in Chinese)

[15] Yang Jianxiong, Che Yanbo, Guo Xiaojiang, et al. In situ monitoring chip failure in multichip IGBT modules using turn-on delay time extracted from auxiliary emitter voltage [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2024, 12(3): 2912-2922.

[16] Mamee T, Lou Zaiqi, Hata K, et al. Estimating of IGBT bond wire lift-off trend using convolutional neural network (CNN) [J]. IEEE Access, 2024, 12: 96936-96945.

[17] Liu Jingcun, Zhang Guogang, Chen Qian, et al. In situ condition monitoring of IGBTs based on the miller plateau duration [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 769-782.

[18] Costa F, Magnon D. Graphical analysis of the spectra of EMI sources in power electronics [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(6): 1491-1498.

[19] Hao Bin, Peng Cheng, Tang Xinling, et al. Calculation

(下转第 102 页)

self-shunt static excitation device in reconstruction of the excitation system of power plant [J]. Metallurgical Power, 2014(12): 5-8. (in Chinese)

[20] Schaefer R C. Applying static excitation systems [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 1998, 4(6): 41-49.

[21] Schaefer R C. Retrofitting static exciter regulators for rotating exciter systems [C]// Conference Record of Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference. Atlanta, GA, USA, 2002: 1-7.

[22] 赵静波, 周前, 杨文莉, 等. 阻抗测量的扰动电压自适应控制策略[J]. 电源学报, 2025, 23(1): 111-119.
Zhao Jingbo, Zhou Qian, Yang Wenli, et al. Adaptive control strategy of disturbance voltage for impedance measurement [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(1): 111-119. (in Chinese)



李华

作者简介：

李华(1986—)，女，博士，高级工程师。研究方向：电力系统规划。E-mail：lh_jy@ln.sgcc.com.cn。

陆明璇(1996—)，女，硕士，助理工程师。研究方向：电力系统规划。E-mail：2870525679@qq.com。

李汶铮(2000—)，男，硕士研究生。研究方向：电力系统稳定性分析与控制。E-mail：1660770123@qq.com。

董文凯(1992—)，男，通信作者，博士，助理研究员。研究方向：电力系统稳定性分析与控制。E-mail：596167281@qq.com。

韩震焘(1986—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：配电网规划。E-mail：hrclark@163.com。

谢小荣(1975—)，男，博士，教授。研究方向：电力系统稳定性分析与控制。E-mail：xiexr@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑：耿越)

(上接第 19 页)

and analysis for spectrum characteristics parameters of switching device for reduced EMI generation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(5): 5444-5454.

[20] Sun Pengju, Gong Can, Du Xiong, et al. Condition monitoring IGBT module bond wires fatigue using short-circuit current identification [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(5): 3777-3786.



李亚辉

作者简介：

李亚辉(1999—)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：电力电子器件可靠性。E-mail：l20184331@126.com。

杜明星(1980—)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，教授。研究方向：电力电子器件可靠性。E-mail：dumx@tjut.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)