

电力电子器件机械应力波的试验研究

李孟川¹, 孟志强^{1†}, 胡毅¹, 王俊¹, 何贇泽^{1,2}, 邹翔¹, 焦文豪¹, 欧阳红林¹

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 福建师范大学福清分校 无损检测技术福建省高等学校重点实验室, 福建 福清 350300)

摘要:通过测试电路与数字滤波技术,探究了一种电力电子器件关断机械应力波的测量方法;通过信号处理与频谱分析得到了机械应力波的时域和频域特征参数,如幅值、峰峰值、峰值频率和频率范围.研究表明:合理设置采样阈值和阻带频率能够测量机械应力波;IKW40T120型IGBT器件在关断40A电流时,关断机械应力波的幅值为5.2mV、峰峰值为9.6mV,时域波形约持续100 μ s且振幅衰减,其幅值频谱明显存在3个频率段,分别为20~100kHz、150~200kHz和290~310kHz,每个频率段具有1个峰值频率点,分别为54kHz、163kHz和299kHz,几乎呈现1倍、3倍、5倍频关系,三峰值频率点对应的峰值差异较大,分别为1.24mV、0.69mV和0.36mV.

关键词:电力电子器件;关断过程;机械应力波;状态监测;可靠性

中图分类号:TN32;TB52

文献标志码:A

Experimental Study of Mechanical Stress Wave in Power Electronics Device

LI Mengchuan¹, MENG Zhiqiang^{1†}, HU Yi¹, WANG Jun¹, HE Yunze^{1,2},
ZOU Xiang¹, JIAO Wenhao¹, OUYANG Honglin¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Fujian Province University Key Laboratory of Nondestructive Testing, Fuqing Branch
of Fujian Normal University, Fuqing 350300, China)

Abstract: This paper studied a method for measuring the mechanical stress wave in power electronic device by means of test circuit and digital filtering technology. Time domain and frequency domain characteristic parameters of mechanical stress wave, such as amplitude, peak-to-peak, peak frequency, and frequency range, were obtained through signal processing and spectrum analysis. The research results show that the mechanical stress wave can be measured by setting the sampling threshold and stopping the band frequency reasonably. When a current of 40 A in IKW40T120 IGBT device is turned off, the mechanical stress wave continues to decay for 100 μ s, and its amplitude and peak-to-peak value are 5.2 mV and 9.6 mV, respectively. The amplitude spectrum clearly has three frequency

* 收稿日期:2018-11-27

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFE0123900), National Key Research and Development Program(2016YFE0123900); 湖南大学青年教师成长计划(531107040974), Young Teacher Growth Plan of Hunan University(531107040974); 湖南大学中青年教师购置小型仪器设备专项(531107040977), Special Purchase of Small Instrument and Equipment by Young and Middle-aged Teachers of Hunan University(531107040977)

作者简介:李孟川(1993—),男,陕西西安人,湖南大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: mengzhiqiang@126.com

segments that are 20~100 kHz, 150~200 kHz and 290~310 kHz. Each frequency segment has one peak frequency point, which is 54 kHz, 163 kHz and 299 kHz, respectively, showing almost 1, 3 and 5 octave relationship. The peaks corresponding to three peak frequency points differ greatly, which are 1.24 mV, 0.69 mV and 0.36 mV, respectively.

Key words: power electronics device; turn-off process; mechanical stress wave; condition monitoring; reliability

电力电子器件和模块在电气节能、新能源发电、电力牵引、智能电网等领域得到了广泛的应用,对国民经济发展起着重要作用^[1]。电力电子器件和模块发生故障或性能退化,会对电力系统和使用电力电子设备的系统正常运行构成危害,并带来巨大的经济损失。因此,高效、简洁、实时的电力电子器件与模块状态监测技术是保障电力电子设备可靠性的重要方式。近年来,电力电子设备应用的迅猛发展对检测技术提出了一些特殊的要求,主要体现为快速检测^[2]、非侵入式检测^[3]、实时在线检测^[4]方面。

国内外专家和学者越来越重视电力电子器件和模块的可靠性研究,对器件和模块的状态监测开展了大量的研究,研究成果主要集中在电力电子器件内部电、磁、热应力信息特征参数的提取。电应力信息的提取方法包括直接提取法和间接提取法^[5],直接提取法^[6-7]是直接检测电力电子器件关键位置的电压或者电流值,实现截压、截流控制及过压、过流保护,不能评估电力电子器件和模块的状态,特别是老化问题,且器件越多,所需要的检测点越多,使实际电路较为复杂;间接提取法^[8]对测量的电信号进行数据处理,利用处理后的信号判断电力电子器件的故障状态,该方法数据处理方式复杂,不利于硬件实现,大部分工作尚处于仿真阶段。磁应力信息的提取方法^[9-10]利用巨磁阻效应,借助内埋于器件和模块内部的巨磁阻磁场传感器以及磁场信号来获取电流和温度信号,检测效果高度依赖于激励频率并且需要改造器件和模块的内部结构。热应力信息的提取方法包含光学非接触式测量法、物理接触式测量法、热敏感电参数法、热阻抗模型法等^[11]。其中,光学非接触测量法^[12]一般采用红外热像仪来测量器件和模块内部的结温,需要打开器件和模块的封装,难以实现在线检测;物理接触式测量法^[13]通常在器件和模块内部预埋热敏电阻来测温,响应速度慢,需要改变器件和模块的结构;热敏感电参数提取法^[14-15]利用与电力电子器件结温密切相关的电学特性来间接测量器件的结温,不适用于对结温要求精确测量的场合;热阻抗模型预测法^[16]通过仿真技

术,利用器件的功耗和热阻模型来计算芯片的结温,只能预测器件正常工作状态下的结温变化,不能反映器件老化带来的测量误差。上述方法难以同时满足快速、非侵入和实时在线检测的需求,不利于保障和提升电力电子器件与模块的可靠性。

声发射是材料内局域源能量快速释放而产生瞬态弹性波的现象,声发射信号能够表征材料的缺陷和物理特性^[17],因而可以用来评判发射源的状态。声发射检测技术具有快速、非侵入式和实时在线检测等特点,在石油、化工、电力和航空航天等领域得到了广泛的研究和应用^[18]。电力系统及新能源发电系统是声发射检测技术的一个主要应用领域,如绝缘子污秽放电检测^[19]、高压电气设备局部放电检测^[20]、风机叶片健康状态检测^[21]。

国外学者在近几年内提出并开展了基于声发射检测技术的电力电子器件与模块状态监测的研究,寄希望于探索电力电子器件与模块在关断和短路故障时出现声发射信号(本文中称为“机械应力波”)的机理,探索一种能够快速、非侵入、可靠监测电力电子器件与模块状态的在线实时检测方法。芬兰拉普兰塔理工大学 Kärkkäinen 等人^[22]利用测试电路和声发射传感器检测了绝缘栅双极型晶体管(IGBT)器件关断过程产生的机械应力波,通过机械应力波传播时延与传感器和功率模块间距离的关系,证明了机械应力波信号来自 IGBT 器件内部;Kärkkäinen 等人^[23]通过短路测试电路和声发射传感器探测到 IGBT 器件门-射极短路和集-射极短路时出现的机械应力波,发现了两种与短路失效模式相关的机械应力波;德国开姆尼茨工业大学 Muller 等人^[24]根据 IGBT 模块关断过程能够产生机械应力波这一现象,借功率循环测试电路和声发射测量系统,提取了 IGBT 模块老化时产生的机械应力波,发现 IGBT 模块的性能退化使关断机械应力波在 50~150 kHz 频率范围内幅值变小。可以看出,机械应力波能够有效反映电力电子器件与模块内部的相关状态,具有进一步研究的意义与价值。

本文通过测试电路与数字滤波技术,探究了电

力电子器件关断机械应力波的测量方法, 获取了 IGBT 器件关断过程产生的机械应力波; 通过信号处理与频谱分析得到了相应机械应力波的时域和频域特征参数, 进一步验证了 IGBT 器件的关断过程能够产生机械应力波这一现象, 为后续电力电子器件机械应力波的产生机理研究奠定了试验基础。

1 试验设计

1.1 试验机理

IGBT 是双极性功率器件, 电子和空穴同时参与导电. 关断过程中, 空穴和电子从漂移区内抽出, 使空穴电流和电子电流同时减小并相互作用, 引起 IGBT 器件内部电磁相互作用并产生电磁应力(安培力或洛伦兹力), 使 IGBT 芯片出现机械振动, 这种机械振动可能成为 IGBT 器件关断时的声发射源.

1.2 机械应力波的状态监测方法

基于机械应力波的电力电子器件与模块的状态监测方法如图 1 所示, 使用声发射测量仪和由压电声发射传感器与前置放大电路构成的测试电路获取电力电子器件和模块的机械应力波, 使用频谱分析、数字滤波等信号处理技术提取机械应力波的特征参数, 采用人工神经网络等智能方法建立特征参数与器件和模块状态的对应关系, 利用这些对应关系反演电力电子器件和模块的状态, 评估电力电子器件和模块的性能. 本试验旨在提取电力电子器件的关断机械应力波, 获取其特征参数.

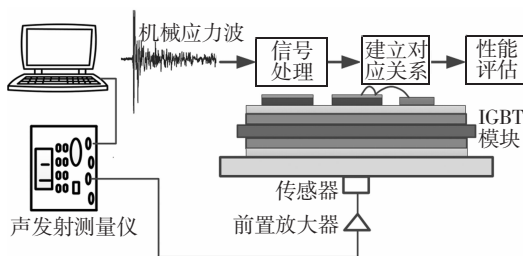


图 1 基于机械应力波的电力电子器件和模块状态监测方法示意图

Fig.1 Schematic diagram of condition monitoring method for power electronics device and module based on mechanical stress wave

1.3 测试电路和试验装置

测试电路如图 2(a)所示, 由 DC100 V 直流电源、储能电容、负载电感、IGBT 器件和快恢复二极管 FRD 组成. IGBT 测试器件的型号为 IKW40T120, 额定工作电压 1 200 V, 额定工作电流 40 A; 储能电容

C 由 6 个 10 mF 的电容器 3 串联 2 并联构成, 等效电容值为 6.67 mF, 由直流电源通过 100 Ω 电阻 R 充电, 在 IGBT 导通期间, 向 150 μH 的负载电感 L 放电. IGBT 器件的驱动信号和集电极电流波形如图 2(b)和图 2(c)所示, 控制 IGBT 器件的开通时间 T_{on} 可控制 IGBT 的关断电流.

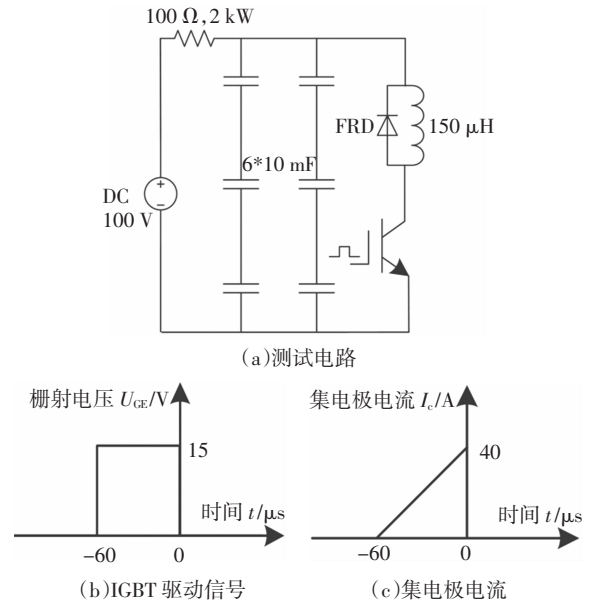


图 2 IGBT 器件的测试电路、驱动信号与集电极电流

Fig.2 The test circuit, trigger signal and collector current for IGBT device

试验中, IGBT 的驱动信号 U_{CE} 为 15 V 的单脉冲, 脉冲宽度 T_{on} 为 60 μs, IGBT 导通期间, 负载电感线性充磁, 负载电流为 40 A 时关断 IGBT, 负载电感的储能通过快恢复二极管释放, 避免产生大的感生电动势击穿 IGBT.

试验装置如图 3 所示, 采用 ASMY-6 型声发射测量仪和 VS-45H 型声发射压电传感器测量 IGBT 器件的关断机械应力波, VS-45H 型传感器测量带

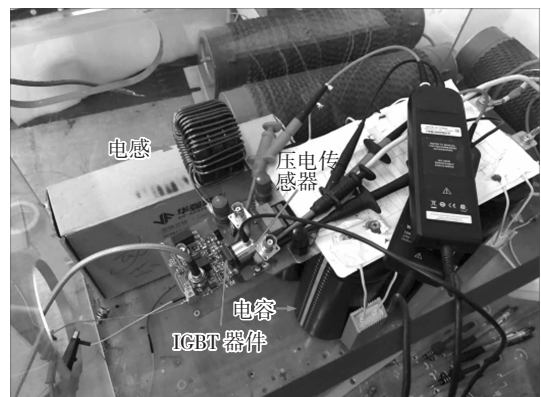


图 3 试验装置图

Fig.3 The site map of experimental setup

宽为 20~450 kHz. 试验前将传感器通过耦合剂贴在 IGBT 器件封装上.通过测试发现,试验现场的环境噪声为 64 dB,故采样阈值设置为 70 dB.

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

试验中,手动设置了 5 次触发脉冲.5 个脉冲触发完成后获得了对应的机械应力波,幅值约为 85 dB(滤波前).图 4 给出了 5 个脉冲对应的机械应力波(A~E),可以看出机械应力波与时间的关系,机械应力波 A 与 B 的时间间隔为 26 s,机械应力波 B 与 C 的时间间隔为 32 s,机械应力波 C、D、E 间的时间间隔约为 40 s.图中,机械应力波 A~E 由 IGBT 器件的关断过程产生,机械应力波 F 由测试现场干扰产生,其幅值略低于检测阈值且密集出现.

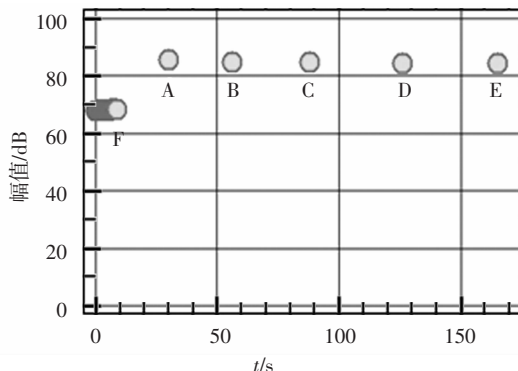


图 4 试验中出现的机械应力波

Fig.4 The mechanical stress waves in experiment

2.2 噪声分析与抑制

图 5(a)和 5(b)分别给出了噪声 F 的时域波形和频谱分量,可以看出噪声的幅值为 2.5 mV,频率组份较为简单,主要集中在 112~116 kHz.因此在处理机械应力波 A~E 时,采用带阻数字滤波器来抑制噪声,阻带频率设置为 105~120 kHz.

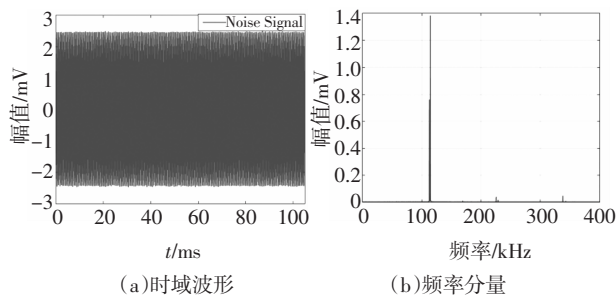


图 5 噪声 F 的时域波形和频率分量

Fig.5 The time domain waveform and frequency components of noise signal F

2.3 关断机械应力波分析

图 6 展示了机械应力波 A~E(已通过带阻滤波器滤除噪声)的时域波形,横坐标的零点表示机械应力波事件开始的时刻.可以看出 A~E 五个机械应力波的时域波形高度相似且呈衰减震荡状,其持续时间在 105~110 μ s 范围内、幅值为 5.2 mV、峰峰值为 9.6 mV.这是由于 A~E 五个机械应力波由同一 IGBT 器件的关断过程产生,且关断电流大小相等,测量系统相同.

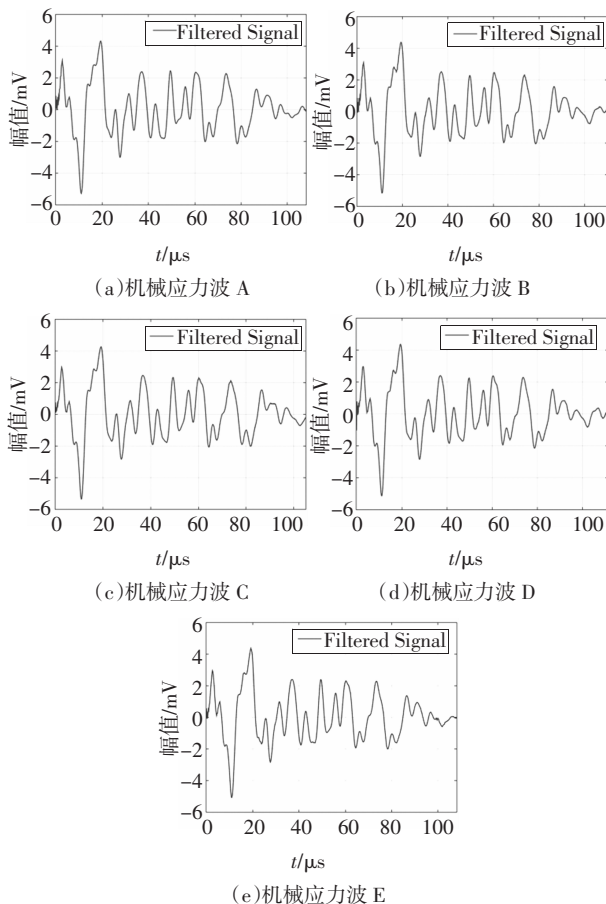


图 6 机械应力波 A~E 的时域波形

Fig.6 The time domain waveforms of mechanical stress waves A~E

对机械应力波 A~E 进行傅里叶变换,得到其频率分量.机械应力波采样频率 f_s 为 5 MHz,机械应力波 A~E 的数据长度 N 为 552.图 7 显示了机械应力波 A~E 的幅频特性曲线,发现其幅频特性曲线相似,具有 3 个峰值频率点,分别为 54 kHz、163 kHz 和 299 kHz,呈现出接近 1 倍、3 倍、5 倍频的关系;峰值频率点的幅值差异较大,分别为 1.24 mV、0.69 mV 和 0.36 mV.此外,还发现机械应力波 A~E 的频率范围相同,且具有 3 个可明显区分的频率段,分别为 20~100 kHz、150~200 kHz 和 290~310 kHz,并

在第一个频率段存在3个明显的频率分量,其幅值是线性衰减的.

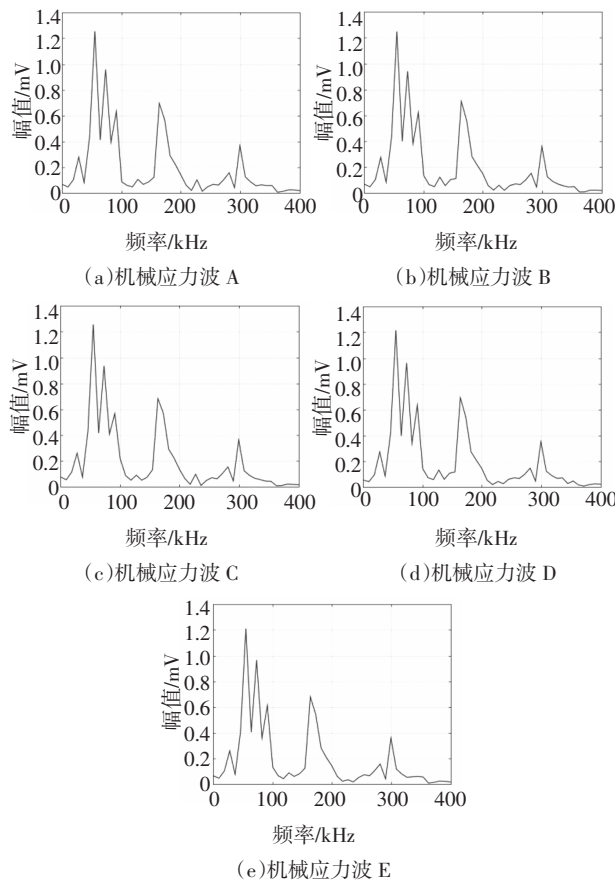


图7 机械应力波A~E的幅频特性曲线

Fig.7 The amplitude-frequency characteristic curves of mechanical stress waves A~E

2.4 小结

测试现场存在噪声(112~116 kHz, 2.5 mV),通过带阻数字滤波技术可以滤除该噪声,从而得到IGBT器件关断过程产生的机械应力波.对测量的关断机械应力波进行时域和频域分析后,如表1所示,发现其时域和频域特征高度相似,机械应力波A~E的幅值(绝对值最大值)为5.2 mV、峰峰值为9.6 mV、峰值频率为54 kHz、163 kHz和299 kHz,频率范围为20~100 kHz、150~200 kHz和290~310 kHz,进一步验证了IGBT器件的关断过程能够产生机械应力波.

3 结论

本文使用测试电路和声发射测量仪提取了IGBT器件关断时产生的机械应力波,并对关断机械应力波进行了带阻滤波、时域分析和频域分析,得

表1 机械应力波A~E的特征参数

Tab.1 The characteristic parameters of mechanical stress waves A~E

事件	幅值/mV	峰峰值/mV	峰值频率/kHz	频率范围/kHz
A	5.30	9.65	54, 163, 299	20~100
				150~200
				290~310
B	5.20	9.60	54, 163, 299	20~100
				150~200
				290~310
C	5.35	9.65	54, 163, 299	20~100
				150~200
				290~310
D	5.15	9.55	54, 163, 299	20~100
				150~200
				290~310
E	5.10	9.50	54, 163, 299	20~100
				150~200
				290~310
平均值	5.22	9.59	54, 163, 299	150~200 290~310

出了以下结论:

1)同一IGBT器件在同一状态(未老化)下关断相同大小的电流,机械应力波的特征参数(幅值、峰峰值、峰值频率、频率范围)高度相似,进一步验证了IGBT器件的关断过程会产生机械应力波.

2)测试现场存在噪声,通过设置声发射测量仪的采样阈值并使用数字滤波技术,可以降低噪声对IGBT器件机械应力波测量的影响.

3)IKW40T120型IGBT器件在关断40 A电流时,关断机械应力波的幅值为5.2 mV、峰峰值为9.6 mV,其幅频特性曲线具有3个峰值频率,分别为54 kHz、163 kHz和299 kHz,其频率范围为20~100 kHz、150~200 kHz和290~310 kHz.

参考文献

- [1] 赵争鸣,袁立强,鲁挺,等.我国大容量电力电子技术与应用发展综述[J].电气工程学报,2015,10(4):26—34.
ZHAO Z M, YUAN L Q, LU T, *et al.* Overview of the developments on high power electronic technologies and applications in China [J]. Journal of Electrical Engineering, 2015, 10(4): 26—34. (In Chinese)
- [2] 秦阳,胡海兵,朱建鑫,等.大容量电力电子装置动态模拟技术研究[J].电力电子技术,2016,50(6):74—76.
QING Y, HU H B, ZHU J X, *et al.* Research on dynamic simulation

- of large-capacity power electronic equipment [J]. *Journal of Power Electronics*, 2016, 50(6):74—76. (In Chinese)
- [3] 王伟, 于建成, 姚程, 等. 非侵入式低压配电网短路事故检测及定位方法[J]. *中国电力*, 2017, 50(5):78—83.
WANG W, YU J C, YAO C, *et al.* Non-intrusive fault detecting and locating method in low-voltage distribution network [J]. *Journal of Electric Power*, 2017, 50(5):78—83. (In Chinese)
- [4] 马皓, 徐德鸿. 电力电子装置在线检测与故障诊断系统[J]. *电测与仪表*, 1999, 36(4):40—42.
MA H, XU D H. Online detection and fault diagnosis system of power electronic device [J]. *Electrical Measurement and Instrumentation*, 1999, 36(4):40—42. (In Chinese)
- [5] 任磊, 韦微, 龚春英, 等. 电力电子电路功率器件故障特征参数提取技术综述 [J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(12):3089—3101.
REN L, WEI Z, GONG C Y, *et al.* Fault feature extraction techniques for power devices in power electronic converters: a review [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35 (12): 3089—3101. (In Chinese)
- [6] CELAYA J R, SAXENA A, SAHA S, *et al.* Prognostics of power MOSFET [C]// *IEEE International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs*. San Diego: IEEE, 2011: 160—163.
- [7] XIONG Y, CHENG X, SHEN Z J, *et al.* Prognostic and warning system for power-electronic modules in electric, hybrid electric, and fuel-cell vehicles [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(6):2268—2276.
- [8] XIANG D, RAN L, TAVNER P, *et al.* Condition monitoring power module solder fatigue using inverter harmonic identification [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, 27(1):235—247.
- [9] BRAUHN T J, SHENG M, DOW B A, *et al.* Module-Integrated gmr-based current sensing for closed loop control of a motor drive [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, 53(1): 222—231.
- [10] SCHNEIDER P E, HORIO M, LORENZ R D. Integrating GMR field detectors for high-bandwidth current sensing in power electronic modules [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2012, 48(4):1432—1439.
- [11] 李武华, 陈玉香, 罗皓泽. 大容量电力电子器件结温提取原理综述及展望[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(13):3546—3557.
LI W H, CHEN Y X, LUO H Z. Review and prospect of junction temperature extraction principle of high power semiconductor devices [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(13):3546—3557. (In Chinese)
- [12] LI K, TIAN G Y, CHENG L, *et al.* State detection of bond wires in igbt modules using eddy current pulsed thermography [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(9):5000—5009.
- [13] JI B, SONG X, CAO W, *et al.* In situ diagnostics and prognostics of solder fatigue in igbt modules for electric vehicle drives [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 30(3):1535—1543.
- [14] 祝冲冲, 王祥, 罗皓泽. 基于热敏感电参数法的大容量 IGBT 模块动态结温在线检测研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(9):2686—2693.
ZHU C C, WANG X, LUO H Z. Dynamical junction temperature online extraction with thermal sensitive electrical parameters for high power IGBT modules [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(9):2686—2693. (In Chinese)
- [15] XU Z, XU F, WANG F F. Junction temperature measurement of igbts using short circuit current as a temperature sensitive electrical parameter for converter prototype evaluation [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(6):3419—3429.
- [16] 唐云宇, 林燎源, 马皓. 一种改进的并联 IGBT 模块瞬态电热模型[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(12):88—96.
TANG Y Y, LIN L Y, MA H. An improved transient electro-thermal model for paralleled igbt modules [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(12):88—96. (In Chinese)
- [17] 全国无损检测标准化技术委员会. 无损检测国家标准汇编: 综合、声发射检测、泄漏检测、应力测定[M]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 139—140.
National Non-Destructive Testing Standardization Technical Committee. *Compilation of non-destructive testing national standards: comprehensive, acoustic emission testing, leak detection, stress measurement* [M]. Beijing: China Standard Press, 2016: 139—140. (In Chinese)
- [18] 沈功田. 声发射检测技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 2—20.
SHEN G T. *Acoustic emission technology and application* [M]. Beijing: Science Press, 2015: 2—20. (In Chinese)
- [19] 田双双, 靳一林, 舒乃秋. 绝缘子污秽放电声发射信号特征量提取的研究[J]. *中国电力*, 2016, 49(7):15—19.
TIAN S S, JIN Y L, SHU N Q. Research on the characteristics extraction of acoustic emission signal from contaminated insulator discharge [J]. *China Electric Power*, 2016, 49(7):15—19. (In Chinese)
- [20] 卫志刚, 张涛, 刘孝. 在役超高压变压器局部放电声发射定位检测[J]. *无损检测*, 2009, 31(8):610—613.
WEI Z G, ZHANG T, LIU X. The location testing to partial discharge of in-service extra-high voltage transformer using acoustic emission [J]. *Nondestructive Testing*, 2009, 31(8):610—613. (In Chinese)
- [21] 朱永凯, 潘仁前, 陈盛票. 基于声发射传感器阵列的风机叶片结构健康监测方法[J]. *无损检测*, 2010, 32(10):753—756.
ZHU Y K, PAN R Q, CHEN S P. Structural health monitoring of wind turbine blade based on sensor array and acoustic emission [J]. *Nondestructive Testing*, 2010, 32(10):753—756. (In Chinese)
- [22] KÄRKKÄINEN T J, TALVITIE J P, KUISMA M, *et al.* Acoustic emission in power semiconductor modules—first observations [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(11):6081—6086.
- [23] KÄRKKÄINEN T J, TALVITIE J P, KUISMA M, *et al.* Acoustic emission caused by the failure of a power transistor [C]// *Proceedings of IEEE Applied Power Electronics Conference & Exposition*. Charlotte: IEEE, 2015: 2481—2484.
- [24] MULLER S, DRECHSLER C, HEINKEL U, *et al.* Acoustic emission for state-of-health determination in power modules [C]// *Proceedings of IEEE International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices*. Leipzig: IEEE, 2016: 468—471.