DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.05.019　　文章编号：1000-128X(2023)05-0170-07

基于导通饱和压降的IGBT器件结温在线提取方法

王泽群，田小宇，宋致儒，宋文胜
（西南交通大学 电气工程学院，四川 成都 611756）

摘　要：绝缘栅双极型晶体管（Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT）模块的结温与工作性能、寿命及其可靠性密切相关，实现IGBT结温在线监测对电力电子系统可靠性提升与服役寿命的延长有着重要意义。文章基于IGBT的导通压降，分别构建了小电流和大电流饱和压降法结温监测模型和测量电路，实现IGBT结温的精确在线监测。首先，结合IGBT的工作原理，推导了导通压降的表达式；然后，根据小电流和大电流饱和压降的特点，分别建立了其结温监测模型；最后，设计了小电流恒流源电路和导通压降采样电路，并进行试验验证。试验结果表明：小电流饱和压降与IGBT结温呈线性关系，大电流饱和压降与结温呈非线性关系，并且二者实现结温监测的误差分别为1.29%和4.91%。

关键词：IGBT模块；导通压降；结温测量；小电流下的饱和压降法；大电流下的饱和压降法
中图分类号：TN325^{+}.2　　**文献标识码：**A

An online extraction method of junction temperature in IGBT devices with saturation voltage drop

WANG Zequn, TIAN Xiaoyu, SONG Zhiru, SONG Wensheng

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China)

Abstract: The junction temperature, working performance, lifespan, and reliability of insulated gate bipolar transistor (IGBT) modules are closely related. Achieving online monitoring of IGBT junction temperature is of great significance to improve the reliability and extend the service life of power electronic systems. Based on the conduction voltage drop of IGBT, this paper proposed a model and a measuring circuit for monitoring the junction temperature by low-current and high-current saturation voltage drops to achieve accurate online monitoring of IGBT junction temperature. Firstly, combined the operating principle of IGBT, the paper derived the expression for the conduction voltage drop. Then, according to the characteristics of low-current and high-current saturation voltage drop, the junction temperature monitoring models was established. Finally, it designed a low-current constant current source circuit and a conduction voltage drop sampling circuit, and conducted experiments to verify the models. The experimental results show that the low-current saturation voltage drop is linearly related to the IGBT junction temperature, while the high-current saturation voltage drop is nonlinearly related. The measurement errors for both methods are 1.29% and 4.91% respectively.

Keywords: IGBT module; conduction voltage drop; junction temperature measurement; low-current saturation voltage drop method; high-current saturation voltage drop method

基金项目：国家级学生科研训练计划项目（202210613032）
通信作者：宋文胜（1985–），男，工学博士，教授，博士生导师，主要从事电力电子交流传动控制方面的研究；E-mail: songwsh@swjtu.edu.cn
引用格式：王泽群, 田小宇, 宋致儒, 等. 基于导通饱和压降的IGBT器件结温在线提取方法[J]. 机车电传动, 2023(5): 170-176.
Citation: WANG Zequn, TIAN Xiaoyu, SONG Zhiru, et al. An online extraction method of junction temperature in IGBT devices with saturation voltage drop[J]. Electric drive for locomotives,2023(5): 170-176.

0　引言

随着电力电子技术迅速发展和大量普及应用，绝缘栅双极型晶体管（Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT）凭借其耐压等级高、通态电流大等优点，在大功率电力电子变换器中广泛应用。在IGBT工作时，其产生的导通损耗和开关损耗会造成内部结温升高，在极端温度条件下会导致IGBT降频或降功率运行，容易对变流器等大功率变流设备的安全形成威胁。另一方面，结温过高、结温波动等现象会加速IGBT的老化，以至造成永久性损坏[1]。因此，结温是IGBT功率器件状态监测的关键参数，实现IGBT结温状态在线监测对提升电力电子系统的可靠性与安全性有着重要意义。

热敏电参数法（Temperature Sensitive Electrical Parameter, TSEP）作为被广泛使用的IGBT模块结温测量方法，将待测器件（Device Under Test, DUT）本身作为温度传感器，通过测量受结温影响的外部电气参数来计算结温，无须破坏器件封装结构，并且响应速度快，被认为是最具应用前景的结温测量方法[2]。通过对近年来国内外发表的有关功率器件采用热敏感电参数法提取结温的研究成果进行总结，可以将热敏感电参数法分为静态热敏电参数法[3-4]和动态热敏感电参数法[5-6]。文献[3]提出将饱和电流I_{sat}作为IGBT结温指标，但是该方法在IGBT导通时电流较大，因此需要选择合适的电流测试方法，在保证测试精度的同时，满足各个电流等级下的测试需求。此外，短路电流I_{sc}也可作为热敏电参数[4]，但是该方法需要将IGBT模块置于短路状态，在实际应用中并不常见，而且容易导致IGBT老化加速。门极开通阈值电压$V_{GE(th)}$和关断延迟时间t_{doff}等也常作为热敏电参数提取结温，但上述动态热敏电参数均存在参数难以准确提取、采集电路设计复杂、测量灵敏度低的缺点[5-6]。基于“集电极–发射极”导通电压V_{CE_on}的监测方法应用较为广泛。文献[7-8]使用大电流下饱和电压V_{CE_high}作为结温监测指标，但提出用于监测“集电极–发射极”电压V_{CE}的电路需要使用复杂的箝位二极管，以承压电路或额外电流源注入，增加了采样电路的复杂度。针对小电流饱和电压V_{CE_low}，传统方法需要设计辅助电流源电路，或者利用负载电流过零点时进行饱和电压提取[9-10]。前者对辅助电路成本与复杂度提出要求，后者则依赖于电流的精确检测，检测电路设计更为复杂。

针对上述现状，本文采用广泛研究的“集电极–发射极”导通电压V_{CE_on}作为结温指标进行研究。此外，针对现有文献均未提出过一整套低成本、低复杂度的辅助电流源设计方案，本文提出了基于TL431的小电流饱和压降辅助电流源设计方案。首先，本文结合IGBT功率模块等效电路推导得到其导通压降表达式，分别建立了小电流和大电流工况下导通压降的结温监测模型；然后，设计了一种恒流源电路与导通压降采样电路；最后，搭建了小电流饱和压降试验平台和双脉冲试验平台，开展IGBT结温在线提取试验，以验证结温模型和导通压降采样电路的准确性和有效性。

1　IGBT的导通压降分析

IGBT简化模型如图1所示，IGBT功率器件可由1个MOSFET与1个P-i-N二极管串联组成。

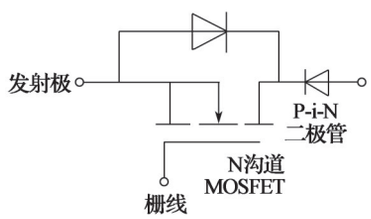


图1　IGBT功率模块简化模型

Fig.1　Simplified model of IGBT power module

当$V_{GE}>V_{GE(th)}$时，IGBT导通。此时，IGBT的导通压降为

$$V_{CE}=V_{PiN}+V_{MOSFET} \tag{1}$$

式中：V_{CE}为IGBT集电极与发射极之间的电压；V_{PiN}为等效二极管正极与负极之间的电压；V_{MOSFET}为等效MOSFET源极与漏极之间的电压差。

P-i-N二极管的电压可以表示为

$$V_{PiN}=\frac{nkT}{q}\ln\left(\frac{I_C}{I_S}+1\right)+I_C R_n \tag{2}$$

式中：n为注入系数（小电流为1，大电流为2）；k为玻尔兹曼常数；T为PN结热力学温度；q为电子电荷；I_C为集电极电流；I_S为反向饱和电流；R_n为基区电阻。

当MOSFET在线性区内工作时，其导通压降主要来自于沟道电阻，可以表示为

$$V_{MOSFET}=I_C R_{CH}=\frac{I_C L_{CH}}{Z\mu_{ni}C_{ox}\left(V_{CE}-V_{CE(th)}\right)} \tag{3}$$

式中：L_{CH}为沟道长度；Z为元胞长度；μ_{ni}为反型层内的电子迁移率；C_{ox}为栅氧层电容。

结合式(1)~式(3)，IGBT的导通压降可以表示为

$$V_{CE}=\frac{nkT}{q}\ln\left(\frac{I_C}{I_S}+1\right)+I_C R_n+\frac{I_C L_{CH}}{Z\mu_{ni}C_{ox}\left(V_{GE}-V_{GE(th)}\right)} \tag{4}$$

图2为IGBT的伏安特性曲线。由图2可以看出，当IGBT导通电流较大时，电流与导通压降可近似为线性关系；当导通电流较小时，电流与导通压降呈非线性关系。因此，从图2和式(4)可知，IGBT导通压降取决于集电极电流I_C的大小：当I_C较小时，P-i-N二极管的导通压降为IGBT导通压降主要部分，电流与V_{CE}呈非线性关系，表现为负温度系数；当I_C较大时，MOSFET沟道电阻产生的压降为IGBT导通压降主要部分，表现为正温度系数，电流与V_{CE}呈线性关系。

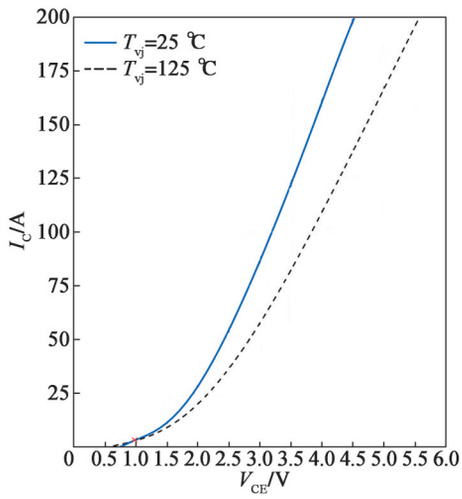


图2 IGBT典型的伏安特性曲线

Fig. 2 Typical volt-ampere characteristic curve of IGBT

2 基于导通压降的结温测量模型

2.1 小电流饱和压降结温测量模型

上述分析表明，电流和结温均会影响小电流下的饱和压降。当电流值很小，并且保持不变时，P-i-N二极管的导通压降为V_{CE}的主要组成部分，如式(2)所示，V_{CE}与节温T_j的关系为

$$T_j = q\frac{V_{CE}}{nk\ln\left(\frac{I_C}{I_S}+1\right)} - q\frac{I_C R_n}{nk\ln\left(\frac{I_C}{I_S}+1\right)} \tag{5}$$

由式(5)可知，当电流一定时，除T_j和V_{CE}外，其余参数为定值，因此饱和压降与温度呈现线性关系，用常数A与B替代式(5)中的常数，经过化简后得到小电流饱和压降测温模型为

$$T_j = A - BV_{CE} \tag{6}$$

其中

$$A = -q\frac{I_C R_n}{nk\ln\left(\frac{I_C}{I_S}+1\right)}$$

$$B = -q\frac{1}{nk\ln\left(\frac{I_C}{I_S}+1\right)}$$

式(6)即为小电流饱和压降法的结温测量模型。

2.2 大电流饱和压降结温测量模型

当电流值较大，并且保持不变时，MOSFET沟道电阻产生的压降为V_{CE}的主要组成部分，如式(3)所示。其中，μ_{ni}与结温相关，其关系可表示为

$$\mu_{ni} = 1360\left(\frac{T_j}{300}\right)^{-2.42} \tag{7}$$

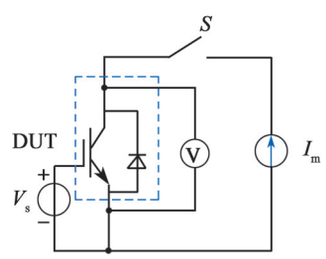
将式(7)代入式(3)可以发现，V_{CE}与T_j为非线性关系，其关系表达式难以求解，并且大电流饱和压降法常用于结温在线监测，其导通电流无法保持恒定，因此需要求解V_{CE}、T_j和I_C三者之间的关系。文献[11]采用多项式拟合的方法来实现V_{CE}、T_j和I_C三者之间的关系式求解，其表达式的最高阶数达到5次幂，使用的方法和得到的结果过于复杂。因此，将式(7)代入式(3)，利用泰勒公式展开，并且忽略3阶以上的高阶项，得到其2阶等效函数，即可得大电流饱和压降测温模型为

$$T_j = a_0 + a_{10}I_C + a_{01}V_{CE} + a_{20}I_C^2 + a_{11}I_C V_{CE} + a_{02}V_{CE}^2 \tag{8}$$

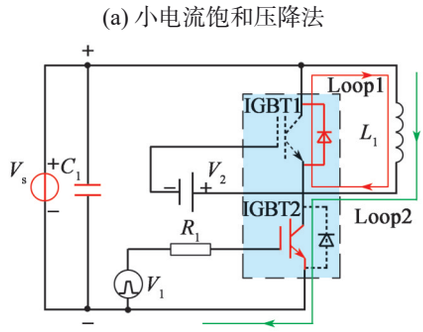
式中：a_0、a_{10}、a_{01}、a_{20}、a_{11}、a_{02}为常数。

3 电路与参数设计

在进行在线提取IGBT结温之前，需对IGBT的导通压降V_{CE}与结温T_j进行校准试验，原理图如图3所示。其中，图3(a)为基于恒流源的小电流饱和压降法原理图，图3(b)为基于双脉冲测试平台的大电流饱和压降法原理图。测试方法如下：将DUT置于图4所示的恒温加热台上进行加热处理，使其达到热平衡的状态，忽略IGBT的内部功率损耗，近似将其壳温等效成结温。在芯片加热到某个确定温度并保持恒定时，运行试验电路，进行导通压降V_{CE}的测量。利用离线标定程序中获取的结温T_j与导通压降V_{CE}关系，即可反推出加热后的芯片结温T_j。



(a) 小电流饱和压降法



(b) 大电流饱和压降法

图3 导通压降法测量结温原理图

Fig. 3 Schematic diagram for measuring junction temperature by conduction voltage drop

3.1 恒流电流源电路设计

TL431是一个有良好热稳定性能的三端可调分流基准电压源，通过TL431设计恒流源电路，其工作原理如图5所示。TL431使用2个电阻R_1和R_2调节其输出电压介于V_{ref}~36 V，这里V_{ref}=2.5 V。其中，A为阳极，K为阴极，V_{ref}为设定电压U_O的输出端，阳极在使用时



图4　恒温加热台

Fig. 4　Thermostatic heating table

需要接地，阴极在使用时需要通过限流电阻接电源。由于TL431内部存在2.5 V的基准电压，当R_1和R_2的阻值确定时，通过分压引入反馈量。若输出U_O增大时，反馈量增大，分流增加会导致U_O下降，反之U_O上升。特别地，需要保证TL431工作时通过阴极的电流大于1 mA，最大不能超过100 mA，否则就会损坏TL431。

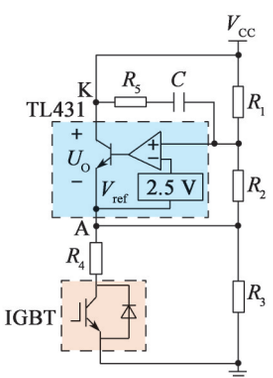


图5　恒流源电路

Fig. 5　Circuit of constant current source

恒流源的等效电路主要包括4部分：①电压放大器：用来放大误差电压，反相输入端接入内部V_{ref}=2.5 V，同相输入端接入电阻分压得到的采样电压；②NPN型晶体管：用于调节负载电流的大小；③恒流源输出端：使用恒压输出与恒定电阻R_4配合输出；④RC电路构成PI控制器。

3.2　恒流电流源参数设计

如图5所示，R_2并联于电压放大器的同相输入端与反相输入端之间，其两端电压V_{R2}=V_{ref}=2.5 V，其中V_{ref}为TL431内部基准电压，由“虚短虚断”原理可得R_1两端的电压为

$$V_{R1}=\frac{V_{ref}}{R_2}R_1 \tag{9}$$

同理，由于R_1、R_2和R_3为串联关系，R_3两端的电压为

$$V_{R3}=V_{CC}-V_{R1}-V_{R2} \tag{10}$$

式中：V_{CC}为电源电压

小电流测试法标定电流I_m为

$$I_m=\frac{V_{R3}-V_{CE}}{R_4} \tag{11}$$

由式(11)可知，设计恒流源I_m时，恒流源输出的稳定性与IGBT导通压降V_{CE}有关。因此，为保证标定电流近似恒定，必须使其变化量ΔI_m恒小于1 mA，即有

$$\Delta I_m=\frac{\Delta V_{CE}}{R_4}<1\ \text{mA} \tag{12}$$

式中：ΔV_{CE}为IGBT工作在饱和状态时，集电极与发射极之间的电压变化量。

ΔV_{CE}会伴随结温的升高而增大，当IGBT温度在30~150 ℃时，ΔV_{CE}一般介于0.05~0.40 V。为保证恒流源设计准确性，取ΔV_{CE}=0.4 V，代入式(12)可得

$$R_4\geqslant 400\ \Omega \tag{13}$$

通过式(13)确定R_4，即可计算出其他电路参数，具体如表1所示

表1　恒流电流源电路设计主要参数

Table 1　Main parameters of constant current source circuit

参数名称	参数值	参数名称	参数值或说明
R_1/kΩ	2.0	R_5/kΩ	5.1
R_2/kΩ	1.0	C/pF	1 000
R_3/kΩ	1.8	V_{CC}/V	12
R_4/Ω	400	IGBT	FF100R12KS4

3.3　大电流饱和压降采样电路设计

大电流饱和压降法的采样电路选择文献[11]所提电路，如图6所示。相比于传统的二极管箝位的V_{CE}采样电路，该采样电路的优点在于结构简单，不需要增加额外的电流源，因此不会影响主电路的正常工作。在图6中，V_{CE_on}为待测导通压降；Q_1为小电流MOSFET管，控制信号与IGBT的门极信号相同，在IGBT关断时，Q_1关断，阻断高压串入测量电路，采样电路输出为0。并联在R_4两端的R_5、C_1组成的串联回路不会对电压V_a产生影响，V_a通过RC电路后变成大小为V_b的方波进入隔离运算放大器。在IGBT导通时，Q_1导通，测量电路工作，实现导通压降的测量；U_1为隔离运放，实现功率电路与测试电路的隔离。

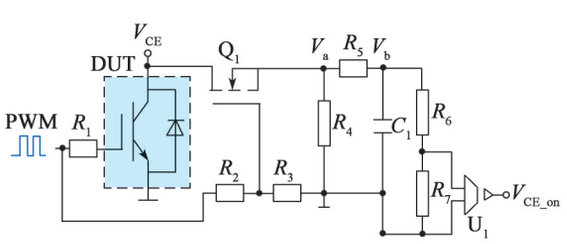


图6　大电流饱和压降法采样电路

Fig. 6　High-current saturation voltage drop sampling circuit

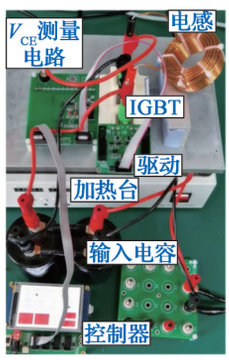
4　试验验证

4.1　试验平台的搭建

为了验证小电流饱和压降法测量结温的可行性，本研究设计了基于恒流源电路的试验平台，如图7所示。



(a) 小电流饱和压降结温监测试验平台



(b) 大电流饱和压降结温监测试验平台

图 7　试验平台图

Fig. 7　Diagram of experimental platform

4.2　恒流源设计效果验证

依据设计电路图搭建试验平台对恒流源进行验证，在结温分别为 30 ℃与 140 ℃的条件进行测试，测试波形如图 8 和图 9 所示。

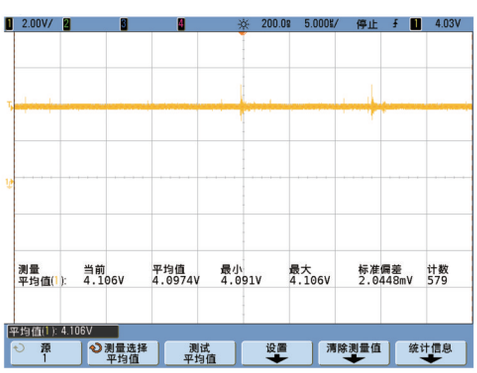


图 8　30 ℃输出电压波形

Fig. 8　Waveform of output voltage(T_j= 30 ℃)

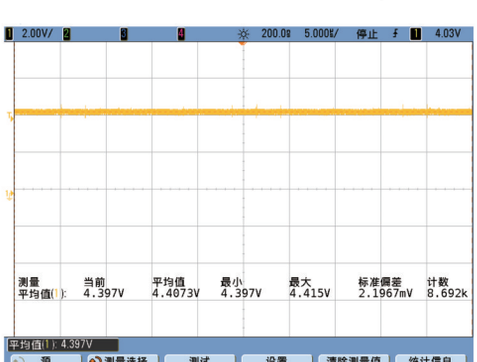


图 9　140 ℃输出电压波形

Fig. 9　Waveform of output voltage(T_j= 140 ℃)

在结温为 30 ℃时，测试电路的小电流大小为

$$I_m = \frac{V_{CE}}{R_4} = \frac{4.0974}{400} = 10.24\ \text{mA} \tag{14}$$

在结温为 30~140 ℃变化时，恒流源电流变化量为

$$\Delta I_m = \frac{\Delta V_{CE}}{R_4} = \frac{4.397 - 4.0974}{400} = 0.749\ \text{mA} \tag{15}$$

测试数据满足式(12)的理论分析结果，即表 1 所示的恒流源参数符合设计要求。

4.3　小电流饱和压降法试验验证

通过仿真软件 MATLAB 中 Curvefitting 工具对试验数据进行拟合，可以得到 IGBT 结温 T_j 与导通压降 V_{CE} 之间拟合曲线，如图 10 所示。

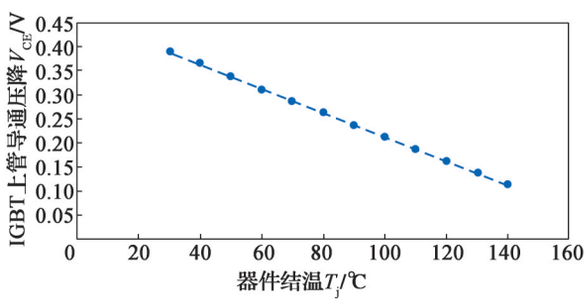


图 10　T_j 与 V_{CE} 之间曲线拟合关系

Fig. 10　Curve fitting between temperature T_j and on-voltage drop V_{CE}

其对应的数学模型为：

$$T_j = 185.56 - 400V_{CE} \tag{16}$$

$$C_T = -40\ (\text{mV}/10\ ℃) \tag{17}$$

式中：C_T 代表测试所得小电流饱和压降的灵敏度。

图 9 的确定系数（R-square）为 0.999 7，这表征拟合模型与真实测量结果吻合度高[11]，即拟合效果良好，说明可以实现对 IGBT 结温的高精度监测。小电流饱和压降法的灵敏度如式(17)所示，该指标反映了每 10 ℃结温变化所对应的热敏感电参数的变化量，C_T 足够大表明该方法可以在结温发生变化时，实时监控 ΔV_{CE} 的大小。

将在线监测方法所得的数学模型应用于实际电路，测量所得的数据如表 2 所示。

表 2　测试结果与实际结温比较（I_C=10 mA ）

Table 2　Comparison between test results and actual junction temperature　℃

对比项目	导体压降 V_{CE}/V					
	0.389	0.339	0. 287	0.236	0.186	0.138
实际温度	30.00	50.00	70.00	90.00	110.00	130.00
预测温度	29.96	49.96	70.76	91.16	111.16	130.36
误差/%	0.13	0.08	1.09	1.29	1.05	0.28

由表 2 可知，实际温度与预测温度的误差最大不超过 1.29%，本文提出的小电流饱和压降法结温监测模型拟合效果良好。

4.4　大电流饱和压降法试验验证

基于双脉冲测试平台和图 5 所示的测量电路，其工作电路波形如图 11 所示。在图 11 中，V_{CE_m} 为测试电路

的输出电压，V_{CE_on}为DUT的导通压降，I_C为导通电流。

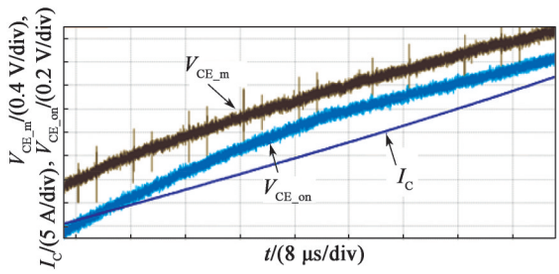
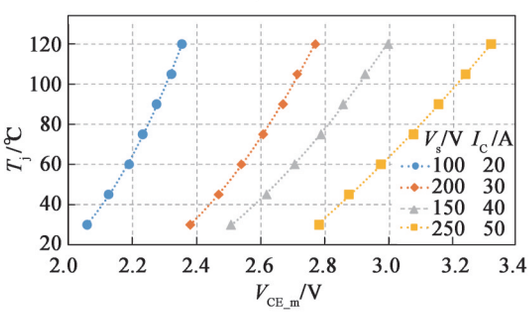


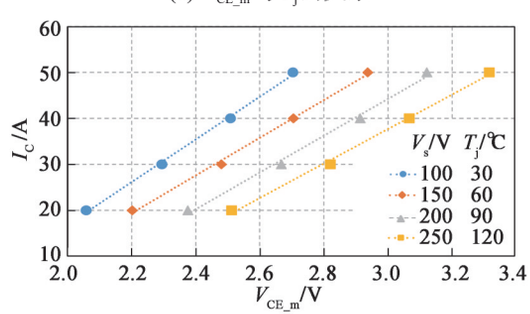
图11　测量电路工作波形

Fig. 11　Operating waveform of the measurement circuit

通过调整双脉冲试验平台参数，结温在30~120 ℃变化，电压在100~250 V变化，电流在20~50 A变化，得到如图12所示的V_{CE}、T_j和I_C之间的关系图。



(a) V_{CE_m}与T_j的关系



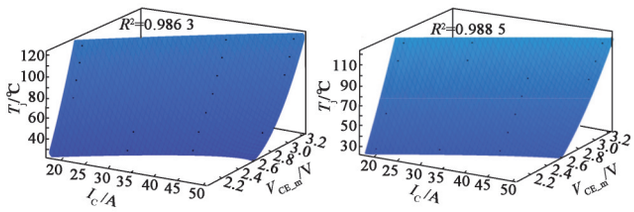
(b) V_{CE_m}与I_C的关系

图12　V_{CE}、T_j与I_C之间的关系

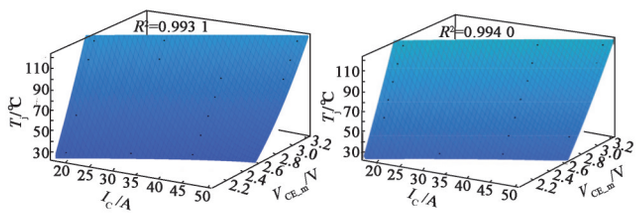
Fig. 12　Relationship between V_{CE},$T_j$and I_C

从图12可知，V_{CE}与I_C呈线性关系，V_{CE_m}与T_j呈非线性关系，这与理论分析是相符的。

基于式(8)所示的大电流“饱和压降-结温”模型，使用仿真软件MATLAB中Curvefitting工具对试验数据进行拟合，可以得到不同输入电压下的拟合结果，具体如图13和式(18)所示。



(a) 输入电压100 V　　(b) 输入电压150 V



(c) 输入电压200 V　　(d) 输入电压250 V

图13　不同输入电压的拟合结果

Fig. 13　Fitting results of different input voltages

$$\begin{cases} T_j=-85.3+5.804I_C-108V_{CE_m}+0.2058I_C^2-9.916I_CV_{CE_m}+129.7V_{CE_m}^2,\ V_S=100\ \text{V} \\ T_j=-101.4+4.014I_C-67.62V_{CE_m}+0.1729I_C^2-8.13I_CV_{CE_m}+107.2V_{CE_m}^2,\ V_S=150\ \text{V} \\ T_j=-272+0.7586I_C+93.69V_{CE_m}+0.1591I_C^2-6.42I_CV_{CE_m}+65.06V_{CE_m}^2,\ V_S=200\ \text{V} \\ T_j=-314.9-2.762I_C+181V_{CE_m}+0.1143I_C^2-3.778I_CV_{CE_m}+28.47V_{CE_m}^2,\ V_S=250\ \text{V} \end{cases} \tag{18}$$

式(18)为不同输入电压的大电流饱和压降结温监测数学模型。从图13可知，在输入电压分别为100 V、150 V、200 V、250 V时，拟合结果的R-square值分别为0.986 3、0.988 5、0.993 1、0.994 0，这表明拟合结果与实际模型高度吻合。表3为不同输入电压的大电流饱和压降结温监测模型的仿真结果与实际温度的对比表。

从表3可知，大电流饱和压降法结温测量的最大误差为4.93%，这验证了所提大电流饱和压降结温监测模型的正确性。

表3　大电流饱和压降结温测量试验结果

Table 3　Measurement results of saturation voltage drop and junction temperature test under high current

测量项目	V_S=100 V		V_S=150 V		V_S=200 V			V_S=250 V		
	I_C=20 A	I_C=50 A	I_C=30 A	I_C=40 A	I_C=40 A	I_C=50 A	I_C=20 A	I_C=50 A	I_C=30 A	I_C=40 A
V_{CE_m}/V	2.231 5	3.204 0	2.318 0	2.704 8	2.762 4	3.050 2	2.375 0	2.873 2	2.759 2	3.066 0
预测温度/°C	75.40	116.28	28.52	57.57	58.79	75.64	91.35	45.08	108.55	116.74
实际温度/°C	75.00	120.00	30.00	60.00	60.00	75.00	90.00	45.00	105.00	120.00
误差/%	0.53	3.10	4.93	4.05	2.02	0.85	1.50	0.18	3.38	2.72

5　结束语

由温度诱发的器件失效是影响电力电子装备可靠性的重要因素，因此大容量功率器件结温的精确提取和检测是电力电子系统损耗计算、寿命预测、健康管理和可靠性评估的基础。本文阐述了IGBT模块的工作特性，分别对大电流和小电流饱和压降法测量IGBT结

温进行了理论分析，构建了结温监测模型，设计了小电流饱和压降法的恒流源和大电流饱和压降法的V_{CE}监测电路。在此基础之上，搭建了小电流饱和压降法和双脉冲试验平台，对结温T_j和导通压降V_{CE}进行测量与拟合，分别验证了小电流饱和压降法中恒流源设计和参数计算的正确性，以及大电流饱和压降法的结温监测模型和V_{CE}测量电路的正确性。试验结果表明，小电流饱和压降与IGBT结温呈线性关系，大电流饱和压降与结温呈非线性关系，验证了理论分析的正确性，通过小电流和大电流饱和压降实现结温监测的最大误差分别为1.29%和4.93%。

参考文献：

[1] 周雒维, 吴军科, 杜雄, 等. 功率变流器的可靠性研究现状及展望[J]. 电源学报, 2013, 11(1): 1-15.
ZHOU Luowei, WU Junke, DU Xiong, et al. Status and outlook of power converter's reliability research[J]. Journal of power supply, 2013, 11(1): 1-15.

[2] 陈杰, 邓二平, 赵雨山, 等. 高压大功率器件结温在线测量方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6677-6687.
CHEN Jie, DENG Erping, ZHAO Yushan, et al. Review of on-line junction temperature measurement methods of high voltage power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6677-6687.

[3] AICHINGER T，RESCHER G，POBEGEN G. Threshold voltage peculiarities and bias temperature instabilities of SiC MOSFETs[J]. Microelectronics reliability, 2018, 80: 68-78.

[4] 杨舒萌, 孙鹏菊, 杜雄, 等. 基于组合短路电流的不受老化影响的IGBT模块结温测量方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5770-5778.
YANG Shumeng, SUN Pengju, DU Xiong, et al. Junction temperature measurement of IGBT based on combined short-circuit current that not affected by aging effect[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5770-5778.

[5] VEMULAPATI U R, BIANDA E, TORRESIN D, et al. A method to extract the accurate junction temperature of an IGCT during conduction using gate-cathode voltage[J]. IEEE transactions on power electronics, 2016, 31(8): 5900-5905.

[6] BARLINI D, CIAPPA M, MERMET-GUYENNET M, et al. Measurement of the transient junction temperature in MOSFET devices under operating conditions[J]. Microelectronics reliability, 2007, 47(9/10/11): 1707-1712.

[7] 杨旭, 葛兴来, 柴育恒, 等. 一种基于反向串联稳压二极管钳位的IGBT导通压降在线监测电路[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(12): 4547-4561.
YANG Xu, GE Xinglai, CHAI Yuheng, et al. An online monitoring circuit for IGBT conduction voltage drop based on reverse series zener diodes clamping[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4547-4561.

[8] YANG Y, ZHANG P. In situ junction temperature monitoring and bond wire detecting method based on IGBT and FWD on-state voltage drops[J]. IEEE transactions on industry applications, 2022, 58(1): 576-587.

[9] AVENAS Y, DUPONT L, KHATIR Z. Temperature measurement of power semiconductor devices by thermo-sensitive electrical parameters−a review[J]. IEEE transactions on power electronics, 2012, 27(6): 3081-3092.

[10] 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.

[11] 赵蕤, 杨柯欣, 唐涛, 等. 基于一种新型导通压降采样电路的IGBT器件结温在线监测方法[J/OL]. 电源学报: 1-14. (2022-04-27) [2023-01-22]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20220426.1744.006.html.
ZHAO Rui, YANG Kexin, TANG Tao, et al. Online monitoring method of IGBT device junction temperature based on a novel on-state voltage drop sampling circuit[J/OL]. Journal of power supply: 1-14. (2022-04-27) [2023-01-22]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20220426.1744.006.html.

收稿日期：2022-06-11
修回日期：2023-06-27