DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.6.1 **中图分类号**：TM32 **文献标志码**：A

计及动态热扩散边界形变和偏移特性的Cauer模型优化方法

李澳阳[1]，信金蕾[2]，杜明星[1](中国电源学会会员)
(1.天津市新能源电力变换传输与智能控制重点实验室，天津 300384；2.国网天津市电力公司城东供电分公司，天津 300250)

摘要：传统Cauer模型的绝缘栅双极晶体管IGBT(insulated gate bipolar transistor)模块各层有效传热面形状为方形或者圆形，这使得IGBT模块结温计算结果误差较大。基于此，通过对IGBT模块各层有效传热面形状规律进行深入研究，提出了考虑热扩散边界形变特性的Cauer模型，使其更加符合实际情况。研究发现IGBT模块热扩散边界存在偏移现象，进而提出了通过捕捉选定的动态热扩散边界的直径，对动态热扩散边界形变偏移特性的Cauer模型参数进行修正，从而实现IGBT模块结温精确估计的方法。通过仿真和实验验证了提出的计及动态热扩散边界形变和偏移特性的Cauer模型优化方法的正确性和可行性。

关键词：IGBT模块；有效传热面形状；Cauer模型；热边界偏移；结温

Optimization Method for Cauer Model Considering Deformation and Offset Characteristics of Dynamic Thermal Diffusion Boundary

LI Aoyang[1], XIN Jinlei[2], DU Mingxing[1], *Member*, *CPSS*
(1. Tianjin Key Laboratory of New Energy Power Conversion, Transmission and Intelligent Control, Tianjin 300384, China;
2. Chengdong Power Supply Branch Company, State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300250, China)

Abstract: At present, most of the traditional Cauer models assume that the shape of the effective thermal conduction surface of each layer in an insulated gate bipolar transistor (IGBT) module is square or circular, which leads to large errors of the calculation results of IGBT module junction temperature. On this basis, the shape of the effective thermal conduction surface of each layer in the IGBT module are studied, and a Cauer model considering the deformation characteristics of thermal diffusion boundary is proposed to make it more suitable for the actual situation. It is found that a phenomenon of offset occurs at the thermal diffusion boundary of the IGBT module. By capturing the diameter of the selected dynamic thermal diffusion boundary and modifying the parameters of the Cauer model which considerers the deformation and offset characteristics of dynamic thermal diffusion boundary, the junction temperature of the IGBT module can be accurately estimated. The correctness and feasibility of the proposed optimization method for Cauer model consideringthe deformation and offset characteristics of dynamic thermal diffusion boundary were verified by simulation and experimental results.

Keywords: Insulated gate bipolar transistor (IGBT) module; shape of effective thermal conduction surface; Cauer model; thermal boundary offset; junction temperature

绝缘栅双极晶体管IGBT(insulated gate bipolar transistor)具有开关速度快、输入阻抗和输出阻抗低等优点，被广泛应用于高可靠系统场合，如电动汽车、飞机等[1-2]。而高开关频率和大功率运行状态会使IGBT模块产生大量的功率损耗，致使其芯片结温快速上升，结温反映了IGBT模块的健康状态，

收稿日期：2024-04-05；**修回日期**：2024-05-09，2024-07-03；
录用日期：2024-07-22；**网络首发日期**：2024-08-14

对模块故障预防和寿命检测至关重要[3-4]。随着电力电子装置功率密度的不断增大，IGBT 模块的可靠性问题也日益突出[5]。

现有的 IGBT 结温监测方法主要有光学测温法、热敏感电参数 TSEP (temperature-sensitive electrical parameter)法及热网络模型法。其中，光学测量法主要通过红外测温仪和光纤温度传感器进行测量，文献[6]在实验中利用红外传感器对结温进行测量。基于 TSEP 的结温监测方法可以建立结温与温敏电参数之间的关系，如短路电流[7]、导通压降[8]与基于开通集射极电压下降平台的结温检测方法[9]等。文献[10]对比了不同温敏电参数对 IGBT 模块结温估计的精确性。热网络模型法可分为 Foster 模型和 Cauer 模型[11]。但在传统的 Foster 模型中，如果参考点存在温度变化，那么结温将同步变化[12]，这将使误差偏大；Cauer 模型则具有物理意义，可以清晰地展示热流从芯片到散热器的散热过程[13]。文献[14-15]分别选用方形、圆形作为各层材料有效传热面形状计算热阻、热容；文献[16]在计算 IGBT 模块的动态热边界时未考虑热边界偏移现象；文献[17]运用混合热网络模型对 IGBT 结温进行检测；文献[18]则运用 3-D 降阶混合型热模型来进行 IGBT 结温检测。

本文对 IGBT 模块各层有效传热面形状进行了深入探讨和研究，旨在揭示有效传热面形状的变化规律及形状分界层，并探讨该规律的普适性，以获得更贴近实际情况的 Cauer 模型。本文发现了热扩散边界的偏移现象，提出通过获取热扩散边界直径确定热扩散角，进而得到兼顾动态热扩散边界形变和偏移特性的 Cauer 模型，以此获得较为准确的结温。

1 考虑热扩散边界形变的 Cauer 模型研究

1.1 考虑热扩散边界形变的 Cauer 模型的建立方法

IGBT 模块由各类材料按照特定尺寸比例焊接而成，图 1 为焊接式 IGBT 模块的剖面图。在简化分析时，认为热流以固定角度(45°)从上至下传递，且各层的有效传热面形状均为方形，该方法在计算结温时会产生一定的误差。

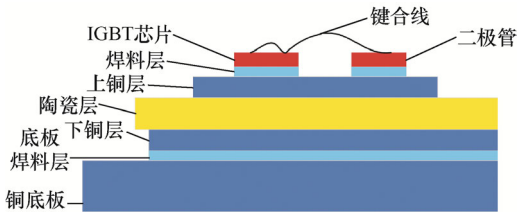


图 1 IGBT 模块剖面

Fig. 1 Profile of IGBT module

由于 IGBT 芯片本身形状为方形，而在有限元仿真时铜底板呈现的等温线形状却均为圆形。基于此，本文提出 IGBT 模块有效传热面的形状存在由方形到圆形渐变的规律的猜想，并通过有限元仿真验证了这一猜想的正确性。IGBT 模块在导通后，根据该模块各层材料中等温线的形状规律，本文提出了陶瓷层以上有效传热面形状为方形，陶瓷层以下为圆形的改进 Cauer 模型。IGBT 模块各层有效传热面形状分布如图 2 所示。

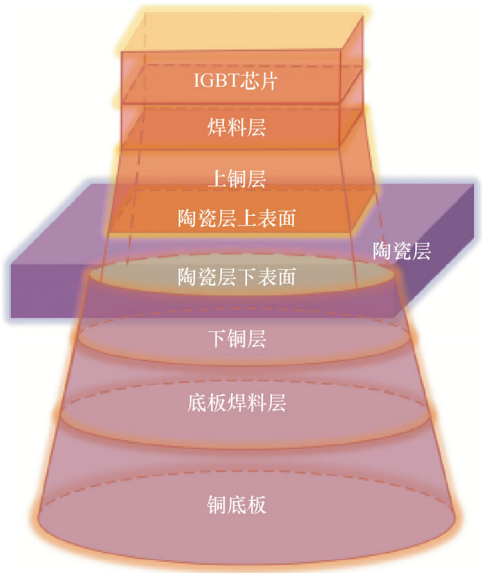


图 2 有效传热面形状分布

Fig. 2 Shape distribution of effective thermal conduction surface

根据 IGBT 模块各层材料有效传热面等温线的形状变化规律，将陶瓷层分为 2 部分，此时 Cauer 模型由 7 层结构变为 8 层，结构细分后的 Cauer 模

型如图 3 所示。图中：P_{loss} 为功率损耗；T_{j} 为 IGBT 芯片温度；R_{chip} 为 IGBT 芯片热阻；R_{solder1} 为焊料层热阻；R_{copper1}、R_{copper2} 分别为上、下铜层热阻；R_{ceramic} 为陶瓷层热阻；R_{solder2} 为底板焊料层热阻；$R_{\mathrm{baseplate}}$ 为铜底板热阻；C_{chip} 为 IGBT 芯片热容；C_{solder1} 为焊料层热容；C_{copper1}、C_{copper2} 分别为上、下铜层热容；C_{ceramic} 为陶瓷层热容；C_{solder2} 为底板焊料层热容；$C_{\mathrm{baseplate}}$ 为铜底板热容。

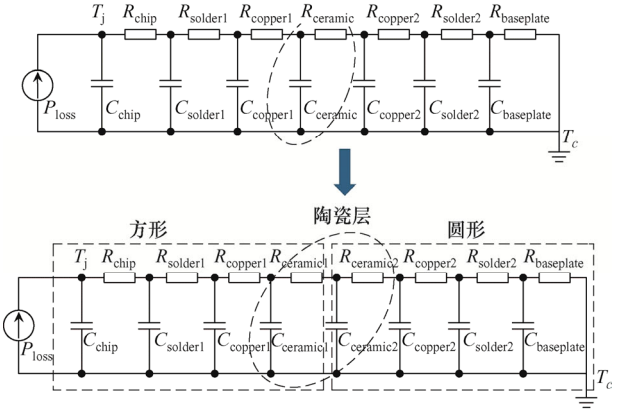


图 3　结构细分后的 Cauer 模型

Fig. 3 Cauer model after structural subdivision

IGBT 模块各层材料热阻 R_{th} 和热容 C_{th} 的计算式分别为

$$R_{\mathrm{th}}=\frac{L}{k\cdot A} \tag{1}$$

$$C_{\mathrm{th}}=c\cdot\rho\cdot A\cdot L \tag{2}$$

式中，L、k、A、c、ρ 分别为 IGBT 模块各层材料的厚度、导热系数、有效传热面积、比热容和密度。

陶瓷层以上方形有效传热面积 A_0 的计算式为

$$A_0=(a+2L\cdot\tan\theta)\cdot(b+2L\cdot\tan\theta) \tag{3}$$

式中：a 和 b 分别为 IGBT 芯片的长度与宽度；θ 为热扩散角。

陶瓷层以下圆形有效传热面积 A_2 的计算式为

$$A_2=\pi\cdot\left(\sqrt{\frac{A_1}{\pi}}+L_1\tan\theta\right)^2 \tag{4}$$

式中：A_1 为陶瓷层内方形与圆形有效传热面交界处的有效传热面积(本文将陶瓷层 90%深度处作为有效传热面形状分界处)；L_1 为方形与圆形有效传热面交界处到以下各层材料的厚度。

1.2　考虑热扩散边界形变的 IGBT 模块有限元分析

本文选取型号为 WGL100B65F23 的 IGBT 模块作为研究对象。表 1 为该型号 IGBT 模块各层材料的尺寸及热参数。依据该材料尺寸参数构建三维模型，并将该模型导入有限元分析软件中，同时输入各层材料的物理参数，从而对 IGBT 模块进行有限元瞬态热仿真实验。

表 1　IGBT 模块各层材料的尺寸及热参数

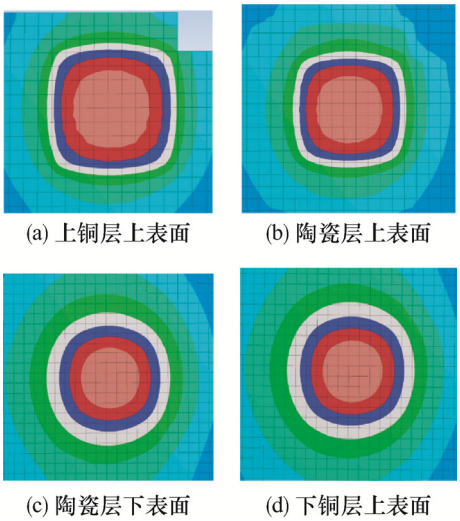
Tab. 1 Size and thermal parameters of materials in each layer of IGBT module

物理层	物理尺寸/(mm·mm·mm)	密度/(kg/m^3)	导热系数/[W/(m·℃)]	比热容/[J/(kg·℃)]
IGBT 芯片	9.00×9.00×0.20	2 330	148.3	700
焊料层	9.00×9.00×0.12	7 300	54.0	230
上铜层	29.00×14.20×0.30	8 900	390.0	390
陶瓷层(Al_2O_3)	30.50×29.00×0.38	3 600	30.0	850
下铜层	29.00×26.50×0.30	8 900	390.0	390
底板焊料层	30.50×29.00×0.12	7 300	54.0	230
铜底板	92.00×32.00×3.00	8 900	390.0	390

本文在有限元瞬态热仿真中，只考虑 IGBT 芯片发热，并对铜底板施加 3 000 W/(m^2·K)的对流换热系数，以模拟工业水冷散热环境，同时对铜底板侧面施加 10 W/(m^2·K)的对流换热系数；此外，将环境温度设定为 25 ℃，传导时间设置为 200 s。

通过有限元仿真软件对 IGBT 芯片设定功率损耗后，IGBT 模块各层材料温度分布如图 4 所示。本文对有效传热面形状的判定方法为：由于各层材料中心区域温度较为集中，使得中心等温线形状呈现圆形，且该区域等温线形状的面积远小于各层

材料的有效传热面积，因此不宜作为有效传热面形状的判定依据；本文通过第 2 或第 3 条等温线的形状，判定各层材料有效传热面形状。通过研究各层材料的等温线形状发现：IGBT 模块上铜层以上各层材料等温线形状更接近方形；下铜层、底板焊料层及铜底板呈现出的等温线更接近圆形；而陶瓷层的上表面等温线为方形、下表面等温线为圆形。由此说明有效传热面形状由方形到圆形的转变是在陶瓷层完成的。



(a) 上铜层上表面 (b) 陶瓷层上表面

(c) 陶瓷层下表面 (d) 下铜层上表面

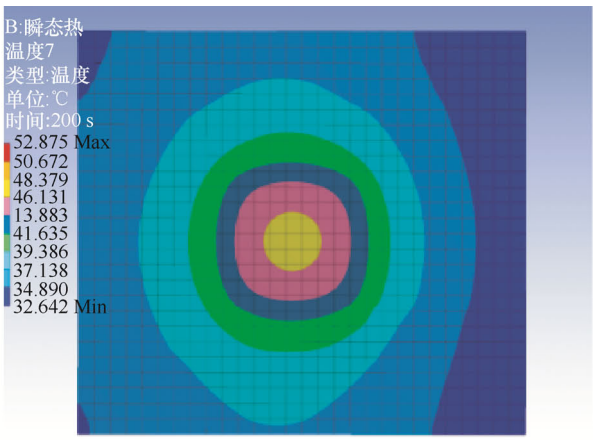
图 4 IGBT 模块各层材料温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of materials in each layer of IGBT module

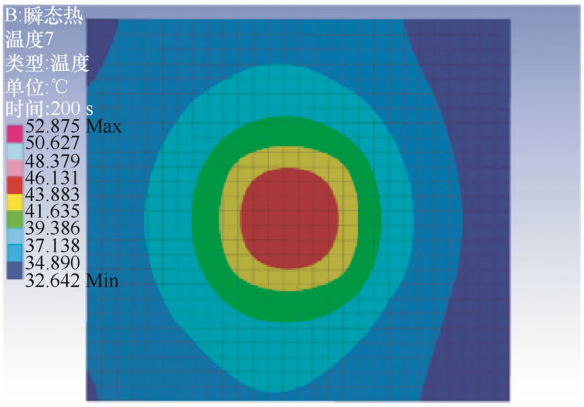
通过对 IGBT 模块的陶瓷层进行细化切割后发现：在陶瓷层 80%深度处时，有效传热面的形状并未完全变为圆形；约在陶瓷层 90%深度及以下，有效传热面的形状才均为圆形，内部温度分布如图 5 所示。此外，在焊料层老化或 IGBT 芯片功耗发生改变时，这一规律同样成立，进一步证明了该规律的普适性。基于此可将陶瓷层 90%深度及以下任意处作为有效传热面形状的分界处，为了简便计算，本文将陶瓷层 90%深度处作为方形与圆形有效传热面形状分界处，即将陶瓷层前 90%区域定义为方形有效传热面，后 10%区域定义为圆形有效传热面。热扩散边界形变分界的位置处于陶瓷层的原因是：陶瓷层的导热系数远小于其他各层材料，这使得陶瓷层的导热性能并不出色，从而使得热扩散边界形变分界处出现在陶瓷层。由于将陶瓷层细分为上、下 2 个部分，此时 Cauer 模型结构由 7 层变为 8 层，据此建立了考虑热扩散边界形变特性的 Cauer 模型。

1.3 考虑热扩散边界形变的 Cauer 模型的精确性验证

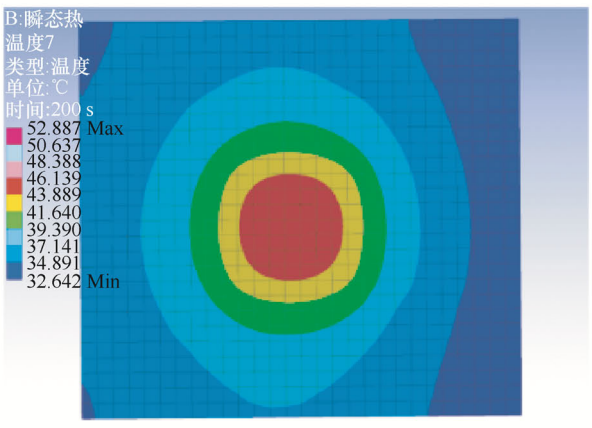
为简单验证该模型的准确性，假定 IGBT 模块



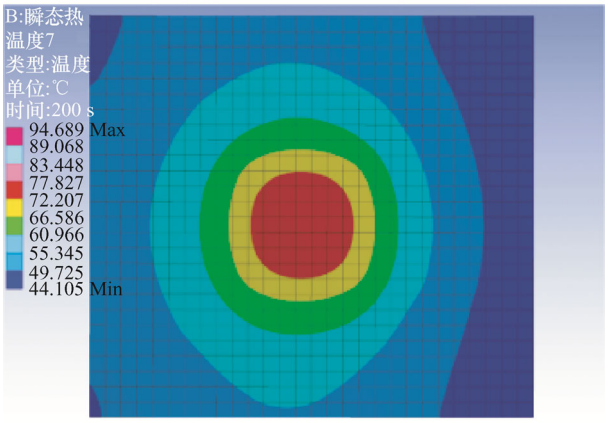
(a) 健康IGBT模块陶瓷层80%深度处



(b) 健康IGBT模块陶瓷层90%深度处



(c) 焊料层10%空洞率下陶瓷层90%深度处



(d) 健康IGBT模块150 W下陶瓷层90%深度处

图 5　IGBT 模块陶瓷层内部温度分布

Fig. 5 Temperature distribution inside ceramic layer of IGBT module

的 θ=45° 。通过计算，获得本文所提考虑热扩散边界形变特性的 Cauer 模型(本文所提改进 Cauer 模型)各层的热参数，并进行结温估计，不同工况下的计算对比结果如图 6 所示。通过对比传统 Cauer 模型与本文所提改进 Cauer 模型在结温预测方面的性能，证实了本文所提改进 Cauer 模型在计算 IGBT 模块结温时的精确性。

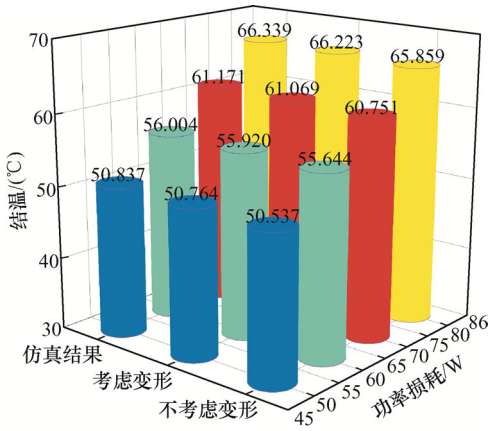


图 6　不同工况下模型结温计算对比结果

Fig. 6 Comparison ofjunction temperature calculation results of model under different operating conditions

在焊料层老化、环境温度变化及铜底板对流系数改变的情况下，本文所提的有效传热面形状渐变的过程规律依然适用，对 IGBT 芯片结温估计也表现出较高的准确性。受篇幅限制，本文不再逐一阐述。

2　热扩散边界偏移现象及对流系数对偏移程度的影响

2.1　热扩散边界偏移现象及原因

传统 Cauer 模型认为 IGBT 芯片导通后，其热量会以 45° 固定角度呈对称形式向下进行传导。若热量均匀地向芯片两侧传导，会使铜底板左、右两侧关于 IGBT 芯片对称处的温度相同，但实际情况并非如此，铜底板左、右两侧等温线产生了偏移现象。以对 IGBT 芯片施加 60 W 的功率损耗为例，研究铜底板的温度分布情况，有限元仿真下等温线的偏移现象如图 7 所示。图中位置①、②处的温度分别为 θ=45° 固定条件下，铜底板左、右两侧对称位置的边界温度，但二者温度并不相同，位置①处温度为 38.081 ℃，位置②处温度为 37.106 ℃，温度相差为 0.975 ℃；位置③处温度为 37.106 ℃，位置③相对于位置①向左发生了位置偏移。产生偏移现象的原因为：受 IGBT 模块自身结构的限制，IGBT 芯片正下方铜底板左、右两侧物理面积空间存在较大差异，物理面积空间大的一侧散热性能更优，而铜底板散热效率低的一侧会产生更多的热量堆积，致使该侧的温度梯度更小，进而造成动态热扩散边界发生偏移。由此可见，IGBT 芯片热量向下传导时并非是对称均匀的。IGBT 模块的实际热量传递示意如图 8 所示。

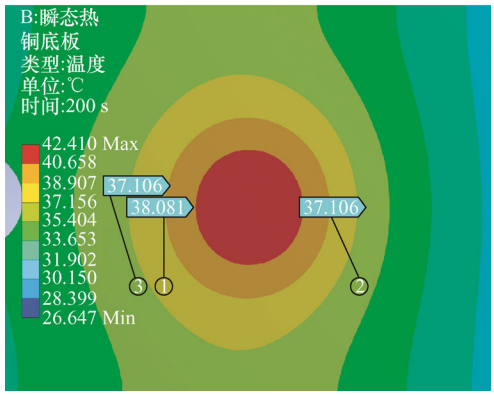


图 7　等温线偏移现象

Fig. 7 Phenomenon of isotherm offset

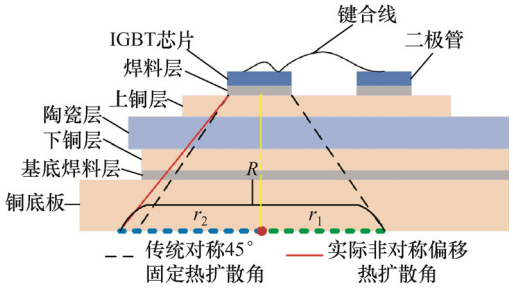
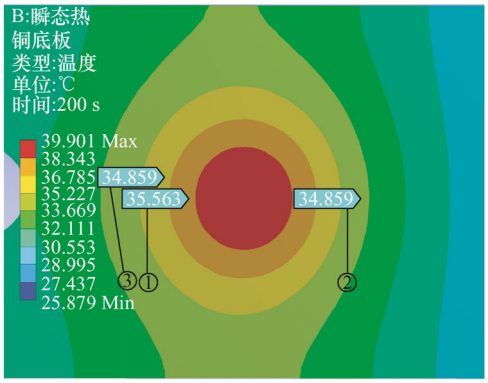


图 8 IGBT 模块实际热量传递示意图

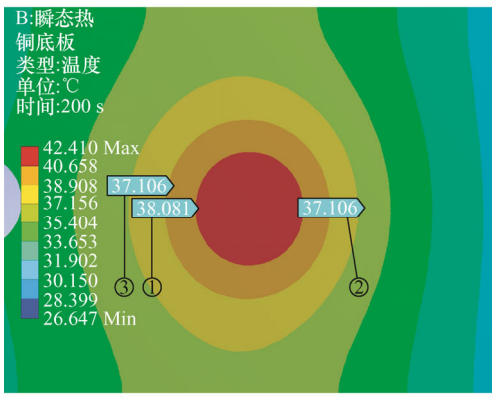
Fig. 8 Schematic diagram of actual thermal conduction in IGBT module

2.2 铜底板对流系数对热扩散边界偏移程度的影响

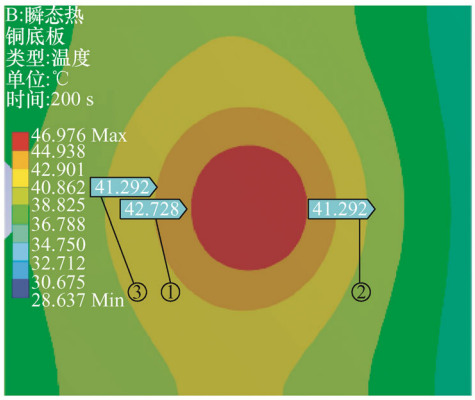
为了研究铜底板对流系数对铜底板热扩散边界偏移程度的影响，对 IGBT 芯片施加固定的功率损耗(本文将其设置为 60 W)，对铜底板分别施加 4 000、3 000 和 2 000 W/(m^2·K)的对流换热系数，其他条件保持不变，铜底板温度分布如图 9 所示，其中，位置①与位置③之间的距离表示热扩散边界的偏移程度。由图可见，随着散热条件变差，偏移现象愈发显著。这归因于对流换热系数的减小会加剧铜底板左、右两侧散热效率的不对称性。因此，



(a) 4 000 W/(m^2 · K)对流系数



(b) 3 000 W/(m^2 · K)对流系数



(c) 2 000 W/(m^2 · K)对流系数

图 9 不同对流系数下铜底板的温度分布

Fig. 9 Temperature distribution of copper baseplate under different convection coefficients

在处理热扩散边界的热参数提取问题时，考虑偏移现象具有重要意义。

3 热扩散边界形变和偏移特性下 Cauer 模型动态热边界的选取

如图 8 所示，IGBT 模块由于热扩散边界偏移现象产生的影响，在 IGBT 模块功率损耗发生波动时，若只获取铜底板一侧的动态热边界，即图中的 r_1 或 r_2，推导出的 θ 会比真实值偏大或偏小，导致结温计算不精确。因此，本文通过得到动态热扩散边界的直径 R 推出 θ，使结温计算结果更精确。

通过有限元仿真分析，将选定的不同偏移热扩散边界代入本文所提改进的 Cauer 模型，结温计算误差如图 10 所示。由图可知，IGBT 芯片损耗每增加 10 W，选取合适的热扩散边界温度约增加 2.2 ℃。根据此规律，当 IGBT 芯片功率损耗为 80 W 时，选取 42.1 ℃作为其热扩散边界温度；当 IGBT 芯片功率损耗为 85 W 时，选取 43.2 ℃作为其热扩散边界温度；当 IGBT 芯片功率损耗为 90 W 时，选取 44.3 ℃作为此功率下的热扩散边界温度。在实际使用中，IGBI 模块随着温度的升高，芯片损耗会略微波动增加。为了提高结温计算的精准度，每 5 W 更新一次动态热扩散边界比每 10 W 更新一次更为准确。以 IGBT 功率损耗为 85~89 W 为例，选取

43.2 ℃作为热扩散边界温度，结温计算准确性更高，计算结果对比如图 11 所示。

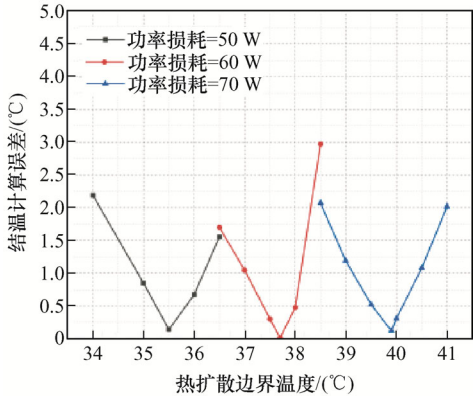


图 10　热扩散边界的结温计算误差

Fig. 10 Calculation error of junction temperature for thermal diffusion boundary

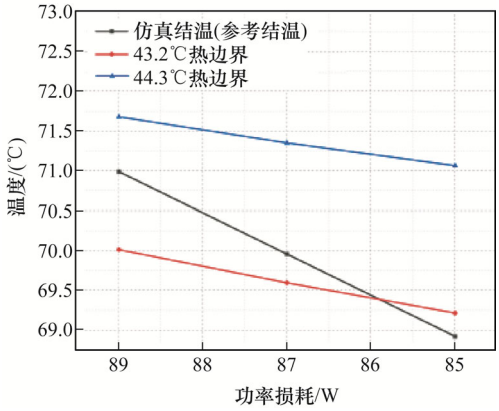


图 11　不同热边界与不同功率损耗下结温计算结果对比

Fig. 11 Comparison of calculation results under different thermal boundaries

本文主要研究当 IGBT 模块工作一段时间后，其功率损耗在发生波动时的结温估计。图 12 为功率损耗分别为 90 W 与 94 W 工况下的热扩散边界分布。选取 90 W 工况下的 44.3 ℃热扩散边界作为 90~94 W 区间内的动态热扩散边界；随着 IGBT 芯片功率损耗的增大，44.3 ℃动态热扩散边界的位置也会略微移动。图 13 对比分析了本文所提改进 Cauer 模型在考虑与不考虑动态热边界偏移现象下的结温计算结果。由图可知，考虑动态热扩散边界偏移现象下的模型结温计算结果更加精确。因此，通过仿真验证了计及动态热扩散边界形变和偏移特性的 Cauer 模型的正确性与可行性。

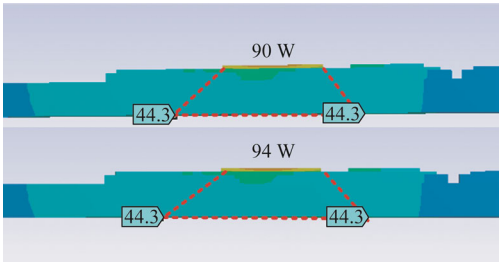


图 12　功率损耗波动下的热扩散边界

Fig. 12 Thermal diffusion boundary under power loss fluctuations

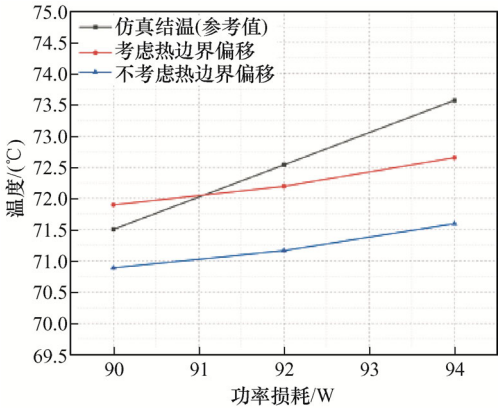


图 13　热边界偏移现象下的计算结果对比

Fig. 13 Comparison of calculation results under phenomenon of thermal boundary offset

4　实验验证

为验证本文所提计及动态热扩散边界形变和偏移特性的 Cauer 模型的准确性，以型号 WGL100B65F23 的 IGBT 模块作为研究对象，对 IGBT 模块施加 8~12 W 的功率损耗进行实验。实验平台如图 14 所示，IGBT 模块的输入为可编程直流电源，为保持模块的导通状态，对其栅极施加 15 V 的固定电压。可编程直流电源可调节 IGBT 模块的功率损耗，通过测量模块的集射极饱和压降和集电极电流，计算出 IGBT 模块的功率损耗。采用红外测温仪准确测量 IGBT 芯片温度，并去除模块内部硅胶，同时对 IGBT 芯片进行涂黑处理，以提高表面发射率与结温测量的准确性。

本文选取各功率范围内动态热扩散边界的方法为：使用固定 θ=45° 计算热阻、热容，并代入传统 Cauer 热网络模型，计算得到较为准确的芯片结

温。基于此，本文以 θ=45° 对应的铜底板位置 S_1 与 S_2 为基准，分别在其间隔 4 mm 处布置光栅光纤温度传感器 S_3、S_4。光栅光纤温度传感器的位置与间距可根据精度需求适当调整，以使结温预测更加精准，传感器位置如图 15 所示。

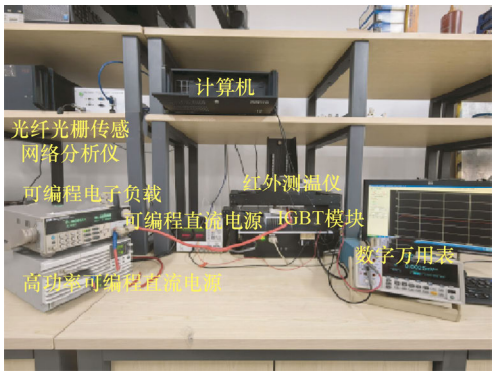


图 14 实验平台

Fig. 14 Experimental platform

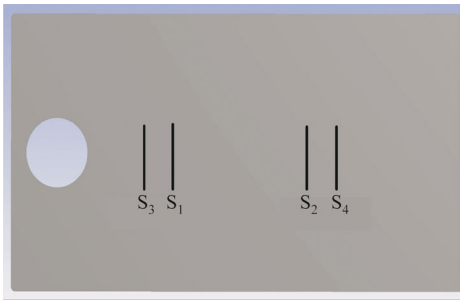


图 15 光栅光纤温度传感器位置

Fig. 15 Positions of grating optical fiber temperature sensors

图 16~图 18 分别为 8、10 和 12 W 功率损耗工况下，4 根光栅光纤温度传感器所测位置的温度值。

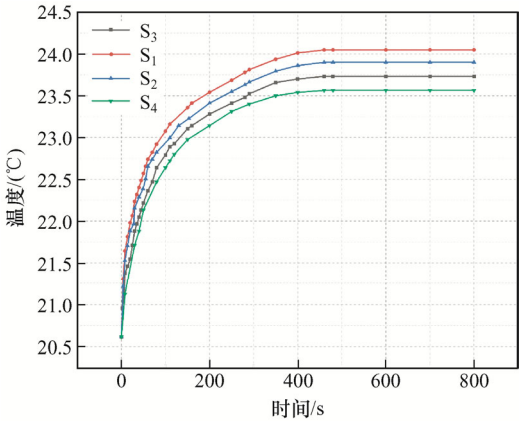


图 16 8 W 功率损耗工况下温度传感器测温值

Fig. 16 Temperature measured by temperature sensor at 8 W power loss

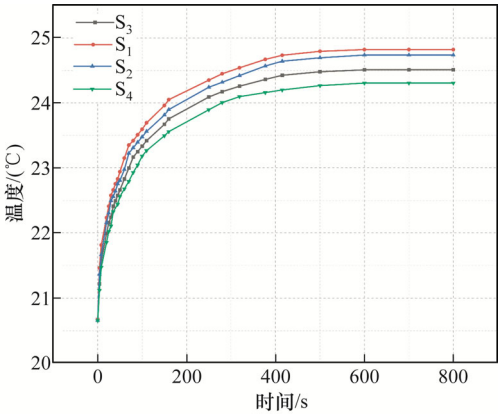


图 17 10 W 功率损耗工况下温度传感器测温值

Fig. 17 Temperature measured by temperature sensor at 10 W power loss

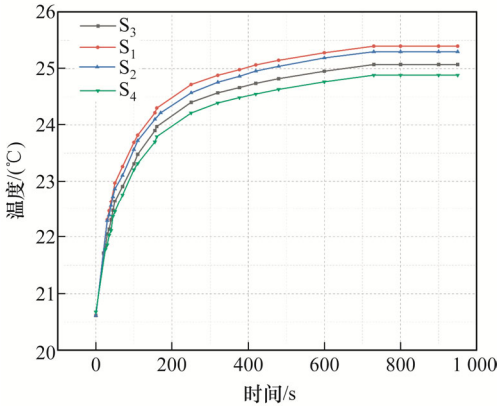


图 18 12 W 功率损耗工况下温度传感器测温值

Fig. 18 Temperature measured by temperature sensor at 12 W power loss

可通过光栅光纤温度传感器读数确定选定动热扩散边界的直径，并以此计算本文所提改进 Cauer 模型的热参数，进行结温计算。图 19、图 20 分别为功率损耗为 10 W 与 12 W 工况下各热网络模型的结温计算结果对比，其中，M_1 为本文所提的考虑动态热边界偏移效应的改进 Cauer 模型，M_2 为未考虑动态热边界偏移变化效应的改进 Cauer 模型。

对 IGBT 芯片施加 8 W 的功率损耗，并采用 θ=45° 确定热扩散边界的初始位置；达到稳态时，S_2 处温度为 23.9 ℃，将该温度作为 8~12 W 的动态热扩散边界温度，此时散热条件较差一侧的 23.9 ℃温度边界位于 S_1 与 S_3 之间，如图 16 所示。当 23.9 ℃温度边界延伸至 S_3 位置时，在铜底板散热条件较好的一侧，该温度边界位于 S_2 与 S_4 之间，

可通过 S_2 与 S_4 的读数得到热边界直径，进而利用本文所提模型计算 IGBT 芯片结温。

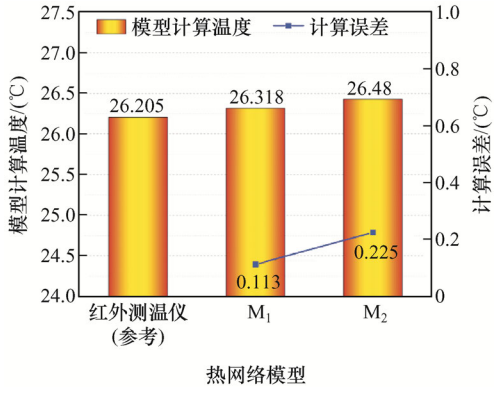


图 19　10 W 工况下结温计算结果对比

Fig. 19 Comparison of calculation results of junction temperature at 10 W power loss

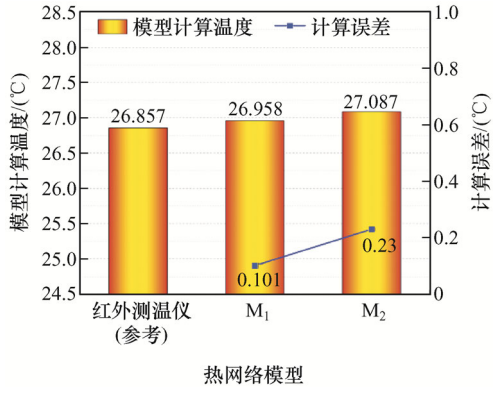


图 20　12 W 工况下结温计算结果对比

Fig. 20 Comparison of calculation results of junction temperature at 12 W power loss

在 IGBT 芯片功率损耗为 8 W 时，使用红外测温仪测得准确的芯片结温为 25.9 ℃，利用本文所提模型计算得到的芯片结温约为 26.2 ℃，误差为 0.3 ℃。通过实验结果可以看出，考虑动态热边界偏移变化效应的改进 Cauer 模型计算结果更加准确，验证了该模型计算 IGBT 芯片结温的可行性。

5　结论

本文首先通过有效传热面的划分对传统 Cauer 模型进行了改进，研究了热扩散边界偏移现象对结温计算的影响，并通过偏移现象下确定的热扩散边界直径进行结温估计，主要研究工作如下。

(1)通过研究 IGBT 模块各层材料有效传热面形状的变化规律，发现了有效传热面形状的渐变过程，并对模块各层有效传热面形状的判定进行了详细划分。

(2)通过有限元仿真对 IGBT 模块在不同工况、芯片焊料层老化情况下，有效传热面形状的变化规律进一步分析探讨，证明了有效传热面形状变化规律的普适性，提出了热扩散边界形变特性的 Cauer 模型。

(3)发现了 IGBT 模块热扩散边界的偏移现象，对产生该现象的原因进行了解释，并研究了铜底板对流换热系数对偏移现象的影响。

(4)针对动态热扩散边界偏移现象，本文提出了计及动态热扩散边界形变和偏移特性的 Cauer 模型。通过测量偏移动态热扩散边界下的直径，对 IGBT 模块热阻、热容进行修正，并进行结温计算，使计算结果更接近 IGBT 模块实际状况，同时通过仿真实验验证了该模型预测结温的可行性。

参考文献：

[1] Guo Weisheng, Ma Mingyao, Wang Hai, et al. A thermal estimation method for IGBT module adaptable to operating conditions [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(6): 6147-6152.

[2] 杨涛. 电力电子技术在新能源发电领域中的应用[J]. 电子世界, 2020(8): 169-170.
Yang Tao. Application of Power Electronics Technology in the Field of New Energy Power Generation [J]. Electronics World, 2020(8): 169-170. (in Chinese)

[3] Meng Heli, Wang Yanhao, Zheng Xiahui, et al. Study of IGBTs reliability under coupled electrical-thermal environment [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(4): 4260-4268.

[4] Huang Yongle, Jia Yingjie, Luo Yifei, et al. Lifting-off of Al bonding wires in IGBT modules under power cycling: Failure mechanism and lifetime model [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(3): 3162-3173.

[5] Du Mingxing, Xin Jinlei, Wang Hongbin, et al. Bond wire lift-off monitoring based on intersection point movement characteristic in IGBT module [J]. Microelectronics Journal, 2021, 116: 105202.

[6] Zarebski J, Górecki K. The electrothermal large-signal model of power MOS transistors for SPICE [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(5): 1265-1274.

[7] Xu Zhuxian, Xu Fan, Wang Fei. 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.

[8] 肖凯, 王振, 严喜林, 等. 基于导通压降的大容量 IGBT 模块结温观测与误差分析研究[J]. 电源学报, 2024, 22(3): 127-137.
Xiao Kai, Wang Zhen, Yan Xilin, et al. Observation and error analysis of junction temperature of large-capacity IGBT module based on on-state voltage drop [J]. Journal of Power Supply, 2024,22(3):127-137. (in Chinese)

[9] 王惠民, 许智亮, 丁菊霞, 等. 基于开通集射极电压下降平台的功率器件结温监测方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(15): 4682-4696.
Wang Huimin, Xu Zhiliang, Ding Juxia, et al. A junction temperature monitoring method for power devices based on turn-on collector-emitter voltage drop platform [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(15): 4682-4696. (in Chinese)

[10] 俞恒裕, 王俊, 江希, 等. SiC MOSFET 与 Si IGBT 器件温度敏感电参数对比研究[J]. 电源学报, 2020, 18(4): 28-37.
Yu Hengyu, Wang Jun, Jiang Xi, et al. Comparative study on temperature-sensitive electrical parameters of SiC MOSFET and Si IGBT [J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(4): 28-37. (in Chinese)

[11] Wang Ze, Qiao Wei, Qu Liyan. A real-time adaptive IGBT thermal model based on an effective heat propagation path concept [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(4): 3936-3946.

[12] Xu Mengqi, Ma Ke, Liu Bo, et al. Modeling and correlation of two thermal paths in frequency-domain thermal impedance model of power module [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(4): 3971-3981.

[13] Wu Rui, Wang Huai, Pedersen K B, et al. A temperature-dependent thermal model of IGBT modules suitable for circuit-level simulations [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(4): 3306-3314.

[14] Du Mingxing, Guo Qiuya, Wang Hongbin, et al. An improved cauer model of IGBT module: Inclusive void fraction in solder layer [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2020, 10(8): 1401-1410.

[15] Tian Chuyu, Tan Yaxiong, Wu Jianfa, et al. Thermal network model of IGBT module based on the influence of temperature [C]// 2021 International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). Chongqing, China, 2021: 1-6.

[16] Dong Chao, Hu Jingwei, Du Mingxing. Parameter extraction method for Cauer model considering dynamic thermal diffusion boundaries in IGBT module [J]. Microelectronics Journal, 2023, 131: 105643.

[17] 王兆萍, 信金蕾, 杜明星. 混合热网络模型的构建及其结温估计方法[J]. 电源学报, 2024, 22(3): 30-37.
Wang Zhaoping, Xin Jinlei, Du Mingxing. Construction of hybrid thermal network model and estimation method for its junction temperature [J]. Journal of Power Supply, 2024,22(3):30-37. (in Chinese)

[18] 田野, 卜凯阳, 李楚杉, 等. 用于 IGBT 模块温度观测的 3-D 降阶混合型热模型[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 5104-5120.
Tian Ye, Bu Kaiyang, Li Chushan, et al. A hybrid 3-D reduced-order thermal model for temperature observation of IGBT modules[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(16): 5104-5120. (in Chinese)



李澳阳

作者简介：

李澳阳(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：电力电子器件可靠性。E-mail：1693475884@qq.com。

信金蕾(1996—)，男，硕士研究生，工程师。研究方向：电力电子器件可靠性。E-mail：13302197371@163.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等。E-mail：dumx@tjut.edu.cn。

(责任编辑：孙美菊)