

IGBT 多物理场建模技术与应用研究概述

耿学锋¹, 何赞泽^{1*}, 李孟川¹, 任丹彤¹, 邹翔¹, 赵俊蒙¹, 李运甲²

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南省长沙市 410082;

2. 电力设备电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学), 陕西省西安市 710049)

An Overview of IGBT Multiphysics Modeling Technology and Application

GENG Xuefeng¹, HE Yunze^{1*}, LI Mengchuan¹, REN Dantong¹, ZOU Xiang¹, ZHAO Junmeng¹, LI Yunjia²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China; 2. The State Key Laboratory of Electrical Insulation for Power Equipment (Xi'an Jiao tong University), Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: As the key component of power conversion, IGBT plays a quite important role in power electronics. However, it is hard to characterize the behavior of IGBTs or to describe the mechanisms of the components since multi-physics fields interacted with each other complicatedly inside the IGBTs and the effect of these fields vary with the application scenarios of the component. The multi-physics simulation technology can describe the internal laws of the IGBT during operation from the perspective of the field, which provides an effective way to overcome the above-mentioned difficulties. In this paper, the existed researches have been summarized. The latest multi-physics modeling technologies and applications of multi-physics analysis in IGBT were discussed. Also, several problems and challenges faced by the model were identified. In addition, the future development trends of multi-physics simulation technology in IGBTs, such as reduced order method technology, nonlinear solution technology, electric-magnetic-thermal-mechanical coupling technology, multi-scale simulation technology, and digital twin technology, were also analyzed. It can be predicted that with the application of wide-bandgap semiconductor materials, multi-physics modeling technology will further play a significant role in the fields of mechanism revelation, packaging optimization, condition monitoring, failure analysis and so on.

KEY WORDS: insulated gate bipolar transistor (IGBT);

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52077063); 湖南省科技创新计划项目科技人才专项(2018RS3039); 电力设备电气绝缘国家重点实验室开放基金(EIPE20202)。

General Program of National Natural Science Foundation of China (52077063); Science and Technology Talent Special Project of Hunan Science and Technology Innovation Plan (2018RS3039); Open Fund of State Key Laboratory of Electrical Insulation for Power Equipment (EIPE20202).

multi-physics field; modeling technology; condition monitoring; electric-magnetic-thermal-mechanical

摘要: IGBT 作为电能变换的核心器件, 在电力电子中的地位不言而喻。然而 IGBT 内部复杂的多物理场交互及不同的应用场景使人们难以对其行为特性以及机理进行精确描述。多物理场仿真从场的角度刻画 IGBT 在运行过程中的内部规律, 为解决上述问题提供了有效手段。文中总结前人研究成果, 梳理当下 IGBT 的多物理场建模技术以多物理场分析在 IGBT 中的应用现状, 归纳所存在的问题和难点, 并分析未来该技术在 IGBT 中继续应用发展的趋势, 如模型的降阶、非线性求解、电磁热力全耦合、多尺度协调、数字孪生等技术。可以预见, 随着宽禁带半导体材料的应用, 多物理场建模技术将进一步在机理揭示、封装优化、状态监测和失效分析等领域发挥重要作用。

关键词: IGBT; 多物理场; 建模技术; 状态监测; 电磁热力

0 引言

电力电子器件在智能电网、特种电源、高铁牵引、新能源发电、电动汽车等领域的应用越来越广泛^[1]。绝缘门极双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)是继双极结型晶体管(bipolar junction transistor, BJT)、金属-氧化物-半导体场效应晶体管(metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET)之后的新一代场控型电力半导体器件, 集二者的优点于一身, 不仅拥有较高的开关频率和较高的耐压能力而且还兼备电导调制效应。因此, IGBT 成为了目前市场的主流功率器件, 正逐渐朝着高压、高频的方向发展。

市面上 IGBT 主要分为焊接式 IGBT 和压接式 IGBT 两种。焊接式 IGBT 应用场合较广泛, 如风

电变流器；而压接式 IGBT 由于更易串联、不易失效的优点，多用于柔性直流输电系统^[2]，如直流断路器。

IGBT 内部所涉及的物理场十分复杂，电、磁、热、力多个物理场的交互作用，导致在 IGBT 的设计、生产及应用过程中必须根据实际情况对其物理场进行充分考虑。以焊接式 IGBT(如图 1 所示模块)分析为例，在芯片的设计过程中，需要考虑元胞导通时的电热效应，尽量避免热击穿问题的发生；在对器件进行封装时，需要对 IGBT 模块进行综合热管理，以合理的散热能力保证功率芯片的性能；同时焊料层，引线等部位由于温度循环、功率循环等过程也会疲劳失效，引发焊料层空洞、键合线脱落等问题，加速器件的损坏，故需要对此过程中 IGBT 的内部应力进行分析；在 IGBT 等器件组成的电力电子系统中，电磁干扰(electromagnetic interference, EMI)问题也会影响周围器件、电路的工作，因此电磁兼容问题也应在考虑范畴。然而针对这些问题所要进行的实验成本昂贵，电路复杂，细节繁琐，费时且费力。而压接式 IGBT 则更为复杂，不同物理场之间的交互作用更强，由于多芯片压接封装的原因，压力、温度、芯片、结构的差异都会导致较为严重的“均流”问题，直接对压接式 IGBT 的可靠性造成威胁。

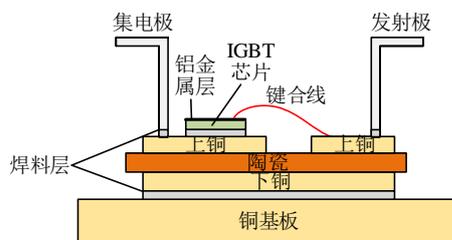


图 1 IGBT 模块示意图

Fig. 1 The structure of IGBT Model

多物理场建模及分析是解决上述问题的有效手段，而当下所存在的 IGBT 多物理场耦合模型大致可以分为电与磁耦合、电与热耦合和电、热与力耦合 3 类，近年来都取得不少成果。譬如：在电磁耦合方面，文献[3]提取不同功率模块的寄生参数，并进行电磁耦合，模拟功率模块的近磁场，查明其电磁干扰来源，对功率模块封装的设计有一定意义。文献[4]归纳电力系统电磁暂态仿真中 IGBT 的建模技术，论述其在变换器控制保护、系统暂态研究及硬件在环测试中的应用领域，分析并给出了关于现有技术方法的限制和建议。在电热耦合方面，

文献[5]提出了基于 Matlab 和 COMSOL 的多速率电热联合仿真方法，具有较高的精度和较快的速度。文献[6]则进一步考虑了不均匀的功率损耗和冷却条件，提出了一种适用于电力电子系统设计的瞬态 3D 热建模方法，并通过建立不均匀的损耗模型并将其应用到基于 Matlab 和 COMSOL 的场路耦合中，改进电热的场-路协同仿真。在电热力耦合方面，文献[7]通过建立电热力模型，并提出了 IGBT 模块的退化模型，利用该模型可得到模块各层的温度分布以及键合线的应变从而进一步根据计算需求合理表征键合线的退化程度，为功率模块的设计和寿命评估提供重要的参考。文献[8]分别在 PSpice 和 COMSOL 中构造了 IGBT 的电气模型和热力耦合模型，并通过 Matlab 脚本的控制文件实现了兼顾速度和精度的电热力模型，解决了以往电热力模型无法对 IGBT 电气特性进行描述的问题。相对于传统焊接式 IGBT，压接式 IGBT 内部物理场耦合的研究起步较晚，且耦合关系更复杂，但文献[9]通过试验分析压接式 IGBT 接触电阻和接触热阻与应力的关系，突破温度场与应力场、电场与应力场之间的耦合关系，建立了压接式 IGBT 的电热力全耦合模型。文献[10]提出计及内部材料疲劳的压接型 IGBT 电热力建模方法，并分别分析了单芯片 IGBT 的内部薄弱部分和多芯片压接式 IGBT 器件应力分布。文献[11]对近年来压接式 IGBT 内部多物理场耦合问题进行综述，重点剖析了压接式 IGBT 多场耦合问题中的关键耦合变量、模型简化进展和计算方法现状。

利用上述模型可以对 IGBT 的不同工况、不同尺度进行多物理场模拟，为探索 IGBT 失效机理、提高其可靠性、优化封装设计提供更大的可能。同时电力电子作为一门实验学科，其理论发展仍然长路漫漫^[12]，使用多物理场对 IGBT 进行分析亦是在探索电力电子器件的本质，完善相关理论基础，为电力电子技术的进一步发展注入新的活力。

本文以 IGBT 的多物理场仿真作为切入点，综述 IGBT 多物理场建模技术与其应用现状；梳理 IGBT 多物理场建模技术的难点与局限性；探讨未来 IGBT 多物理场模型研究的方向。

1 理论基础

1.1 电磁场描述

芯片由数以万计的元胞“并联”构成，由半导

体物理, IGBT 元胞的 I - V 特性, 可表示为

$$i_c = \frac{\mu_n C_{ox} Z}{(1 - \alpha_{pnp}) 2L} [2(u_{ge} - u_{th})u_{ce} - \lambda u_{ce}^2] \quad (1)$$

式中: i_c 为集电极电流, A; μ_n 为电子的漂移系数; C_{ox} 为栅氧电容, F; Z 为元胞节距, m; α_{pnp} 为内部等效 PNP 晶体管的放大倍数; L 为栅极附近形成的沟道长度, m; u_{ge} 为栅射电压, V; u_{th} 为阈值电压, V; u_{ce} 为集射电压, V; λ 为常系数。

故芯片的损耗密度可表示为

$$p_{chip} = i_c \times u_{ce} \quad (2)$$

由电磁场理论, IGBT 器件内部有:

$$\nabla \times H(t) = J(t) + \frac{\partial D(t)}{\partial t} \quad (3)$$

在电流作用下, 由焦耳定律, IGBT 除芯片外其他部分所产生的欧姆损耗:

$$p_{package}(t) = J(t) \cdot E(t) \quad (4)$$

考虑到 IGBT 不同区域的电流和磁场相互作用, 产生电磁力:

$$f(t) = J(t) \times B(t) \quad (5)$$

本构关系式为

$$\begin{cases} J(t) = \delta E(t) \\ D(t) = \varepsilon E(t) \\ B(t) = \mu H(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中: δ 为介质的电导率, S·m, 与温度有关; ε 为电介质的绝对介电常数 F/m; μ 为介质的磁导率, H/m; J 为电流密度, A/m²; E 为电场强度, V/m; H 为磁场强度 A/m; B 为磁感应强度, T; f 为电磁力密度, N/m²。

1.2 热场描述

根据电流的热效应, 可将损耗密度代入热流方程求解温度:

$$\rho C \frac{\partial T(t)}{\partial t} + \nabla \cdot q(t) = p(t) \quad (7)$$

$$p(t) = \begin{cases} p_{chip}(t), & \text{芯片内部} \\ p_{package}(t), & \text{芯片外部} \end{cases} \quad (8)$$

本构关系式为

$$q(t) = -k \nabla T(t) \quad (9)$$

式中: ρ 为介质的密度, kg/m³; C 为介质的比热容, J/(kg·K); T 为温度, K; q 为热流密度, W/m²; p 为热损耗密度, W/m³; k 为介质的热导率, W/(m·K),

与温度有关。

1.3 应力场描述

而温度的变化会在 IGBT 内部产生热应力和热膨胀, 二者共同影响内部材料的应变。在焊接式 IGBT 中热弹性理论方程可写为:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x(t) - \mu(\sigma_y(t) + \sigma_z(t))}{E} + \alpha \Delta T \quad (10)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y(t) - \mu(\sigma_x(t) + \sigma_z(t))}{E} + \alpha \Delta T \quad (11)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z(t) - \mu(\sigma_x(t) + \sigma_y(t))}{E} + \alpha \Delta T \quad (12)$$

压接 IGBT 由于其封装的特殊性, 热弹性理论方程可修正为:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x(t) - \mu(\sigma_y(t) + \sigma_z(t))}{E} + \alpha \Delta T \quad (13)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y(t) - \mu(\sigma_x(t) + \sigma_z(t))}{E} + \alpha \Delta T \quad (14)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z(t) - \mu(\sigma_x(t) + \sigma_y(t)) + F}{E} + \alpha \Delta T \quad (15)$$

式中: ε_x 、 ε_y 、 ε_z 分别为 3 个法向方向的应变, m/m; E 为各向同性材料的弹性模量, Pa; σ_x 、 σ_y 、 σ_z 为 3 个法向方向的热应力, Pa; μ 为各向同性材料的泊松比; α 为材料的热膨胀系数, 1/K; ΔT 为不同时刻的温度变化, K; F 为压接式 IGBT 芯片所承受的压力, Pa, 方向为 z 方向。

需要特别指出的是, 压接式 IGBT 中电极与芯片材料分界面不连续, 需要通过压力作用而紧密贴合, 实现导电和传热。芯片与电极分界面之间的导电能力和导热能力由接触电阻 R_E 和接触热阻 R_T , 其中 R_E 和 R_T 与接触压力 F_c 呈负相关:

$$R_E \propto \frac{1}{F_c} \quad (16)$$

$$R_T \propto \frac{1}{F_c} \quad (17)$$

两种封装的多物理场耦合模式见图 2。要注意, IGBT 内部电磁力一般情况下相较于热应力和外加恒力十分微弱。经调研, 文献[13]通过有限元电磁力的仿真, 得出 IGBT 模块中热应力占主导地位结论, 但仿真和实验结果均显示瞬态电磁力在高频大电流脉冲作用下会显著增大。而文献[14]指出在超高短路电流流过 IGBT 模块母排时, 母排间所产生的电磁力在爆炸过程中导致整个模块变形; 文

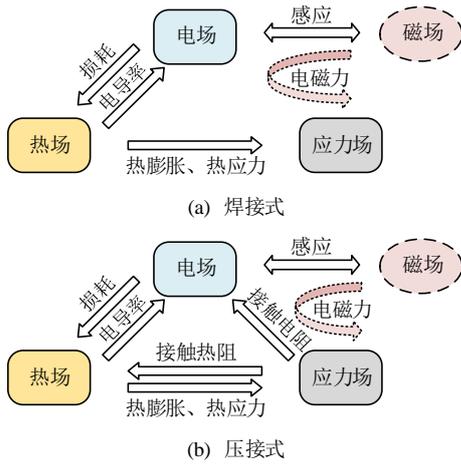


图 2 不同封装 IGBT 的多物理场耦合
 Fig. 2 Multi-physics coupling mode of IGBTs in different packages

献[15]指出直流断路器用压接式 IGBT 器件在切断大电流时，凸台间电流会导致垂直于凸台产生较大的横向剪切力。综上所述可以认为磁场主要通过电场作用形成电磁力来影响应力场，而由于在常规工况下电磁力在耦合中的贡献相对较小，而 IGBT 内部的电磁交互过于复杂，以至于绝大多数文献在对 IGBT 进行多物理场建模(如电热力耦合)分析时将其忽略。

2 IGBT 多物理场建模技术概况

考虑到绝大多数文献在进行多物理场耦合建模时忽略 IGBT 内部电磁力的作用。本节对当下所存在的多物理场建模技术进行总结时，根据模型的耦合方式和应用场合将其简单归纳为电磁耦合技术、电热耦合技术和电热力耦合技术。

2.1 电磁耦合技术

IGBT 作为全控型开关，在电路中频繁处于开断的状态，因此通过 IGBT 的电流和 IGBT 两端的电压也在随着 IGBT 的开通关断而不断变化，其内部必然存在电场和磁场的交互。电磁模型实质上就是在解释 IGBT 的电特性规律以及揭示 IGBT 对外电路的影响。本小节从电气模型和 EMI 模型的角度来对电磁耦合模型进行介绍。电气模型描述 IGBT 电气特性，而 EMI 模型则描述 IGBT 周围的磁场和电磁干扰。

2.1.1 电气模型

电气模型主要分为数值模型、物理模型、行为模型以及混合模型^[16-18]。数值模型主要利用 TCAD 等半导体仿真软件求解泊松方程、载流子运输方程以及连续性方程，精确的模拟半导体电气特性。然

而数值模型计算复杂、时间成本极高，更加适用于极小时间尺度(ns、 μ s 级)下的半导体器件级仿真。物理模型，同样利用半导体物理学方法进行建模，基于 IGBT 的工作机理与结构，采用数学的方法不断逼近其近似解，计算精度较高，仿真速度也有所提升。该方法主要以 Saber、PSpice 等电路仿真软件实现为主，时间尺度较小(ns、 μ s、ms 级)，适合于电路级仿真，应用最为广泛。行为模型主要根据 IGBT 的外特性利用电容电阻电感等电路元件进行等效建模，通常会忽略其内部物理过程。该方法适用于中时间尺度下(ms、s 级)电力电子系统级仿真，仿真速度较快、效率较高，常被用来计算开关损耗。混合模型将高精度的数值模型和高简易度的行为模型进行综合，时间尺度适中(μ s 级)，利用有限差分法或有限元法计算载流子分布再与外电路进行耦合；另外也有文献利用电路元器件求解有限差分方程后与外电路耦合计算并取得了不错的效果^[19]。不同模型的特点见表 1，仿真性能的对比如图 3 所示。不同模型适用范围不同，在实际应用时应根据实际需求进行权衡，选择适合的模型进行分析。

表 1 IGBT 电气模型分类及特点

Table 1 Classification and characteristics of IGBT's electrical model

模型	时间尺度	模型维度	适用场合
数值模型	na、 μ s 级	2 维、3 维	器件研制领域
物理模型	ns、 μ s、ms 级	1 维	组件级仿真
行为模型	ms、s 级	1 维	系统级仿真
混合模型	μ s 级	1 维、2 维	器件级仿真

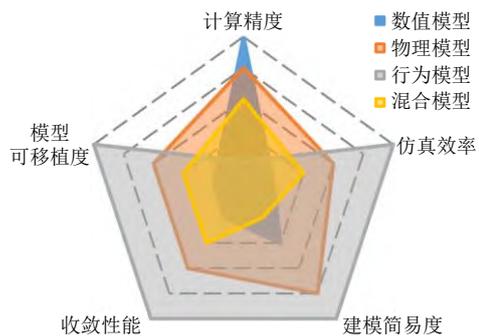


图 3 IGBT 不同电气模型间仿真性能对比
 Fig. 3 Comparison of simulation performance between different electrical models of IGBT

2.1.2 EMI 模型

随着功率器件逐渐朝向高频、高功率密度、小体积的方向发展，IGBT 的 EMI 问题也日渐显露出来。调研结果显示，主要有单一有限元法和电磁场-电路联合法对功率器件的 EMI 进行建模分析。

单一有限元法通过 ANSYS MAXWELL 对 IGBT 建立了近磁场模型的方法来对功率器件的 EMI 问题进行研究。比如，文献[3]通过有限元软件对 3 种不同封装形式的 IGBT 模块进行近磁场分析，研究了磁场发射的原因主要是 EMI 噪声电流并且功率模块母线之间形成的环路电流是主要的近磁场发射源。

电磁场-电路联合法则是主要结合 ANSYS Q3D、ANSYS Simplorer 和 ANSYS HFSS 软件对 IGBT 的 EMI 进行仿真预测。文献[20]通过 HFSS-Simplorer 联合仿真模拟功率模块的 EMI，证实实验近场探测到结果，其中详细的建模流程如图 4 所示。

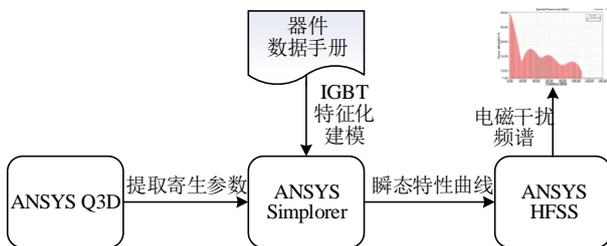


图 4 功率模块 EMI 有限元仿真建模流程

Fig. 4 FEM modeling process of EMI of power module

有限元法和电磁场-电路联合法的特点如表 2 所示，图 5 是关于两种方法的仿真性能对比图。

表 2 有限元法和电磁场-电路联合法的对比

Table 2 Comparison of FEM method and electromagnetic field-circuit combined method

方法	频率条件	模型用途	适用场合
单一有限元法	稳态、低频	近磁场模拟	封装设计
电磁场-电路联合法	瞬态、高频	电磁辐射模拟	EMI/EMC

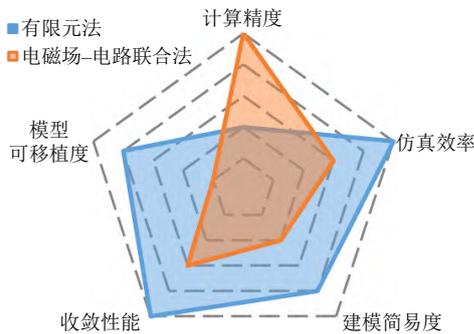


图 5 有限元法和电磁场-电路联合法之间仿真性能对比

Fig. 5 Comparison of simulation performance between FEM method and electromagnetic field-circuit combined method

2.2 电热耦合技术

电热耦合模型主要被用在焊接式 IGBT 中，这是因为相对于焊接式 IGBT，压接式 IGBT 中增加

了压力与接触电阻、压力与接触热阻的耦合，其内部物理场更适合使用电热力模型进行模拟，因此本节电热耦合模型主要针对于焊接式 IGBT。但无论是焊接式 IGBT 还是压接式 IGBT，本小节所讨论的电热耦合模型都是在进行电热力三场耦合时十分重要的一个环节。从建模角度而言，在对 IGBT 进行电热耦合仿真时，需要重点考虑电气模型、传热模型及电热联合技术。而电气模型在 2.1.1 节已经详细介绍，本节着重介绍传热模型和电热联合技术。

2.2.1 传热模型

传热模型主要用于求解 IGBT 内部的温度分布，主要分为热路法、有限元法、网络拓扑法。

热路法利用等效比拟的方法，将热阻、热容分别等效为电阻、电容置于电路仿真软件中对温度进行求解，主要包括 Cauer 模型和 Foster 模型。Cauer 模型如图 6(b)所示，原理简单、物理意义明确，求解容易，仿真速度较快，效率较高，在工程上被广泛应用。而 Foster 模型(见图 6(c)所示)一般只能用来求解计算结温，没有明确的物理意义。若想要获得内部其他结构层的温度值可根据器件手册拟合其瞬态热阻抗曲线，转化为 Cauer 模型进行求解。但热路法的缺点也很明显：一方面是热路法在进行仿真过程中由于理想化地认为热量自上而下传播，没有考虑热量在器件结构中的横向传播，因此只能得到器件各层结构的平均温度；另一方面是在仿真过程中，由于各层结构实际拥有厚度，因此仿真得到的温度具有不连续性。可以通过建立三维热路模型并利用有限元法计算瞬态热阻抗以解决常规热路法只能模拟温度纵向传播的弊病^[21]；另外，适当增加网络的层数也是提高求解连续性的一种思路。

有限元法(见图 7)则通过建立 3D 模型、赋予其材料属性(如热导率、热膨胀系数等)、对芯片施加热激励(通常由电气模型计算获得)、添加合理的边界条件并使用离散单元求解热传导方程，获得其温

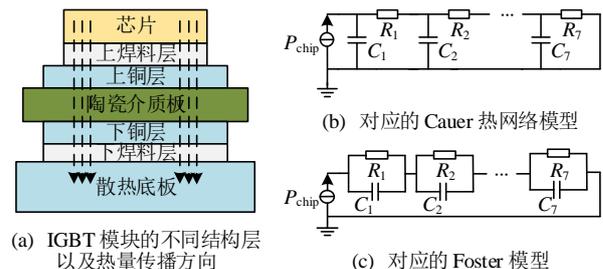


图 6 IGBT 模块的热路模型

Fig. 6 Equivalent RC model of IGBT module

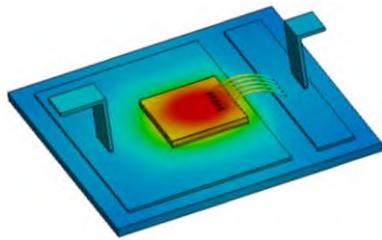


图7 使用 FEM 进行电热仿真得到的温度分布
Fig.7 Temperature distribution obtained by electrothermal simulation using FEM

度分布。该方法求解较为精确，相比热路法，有限元法能获得器件不同结构、各个位置的温度值。与此同时，该方法也带来了更大的计算量；另外，有限元方法对使用者的要求较高，需要使用者能够合理地施加边界条件、剖分网格以及对模型进行简化以得到正确的模拟结果。

热路法虽然简单高效，但是求解不连续；有限元法虽然求解精度较高，但是求解时间较长，且需要使用商业有限元软件，缺乏对 IGBT 温度场的特殊处理技术和方法。为此文献[16,22]提出网络拓扑法。如图 8 所示^[16]，网络拓扑法将三维单元传热节点分为点、线、面 3 种，并等效出各个节点之间的

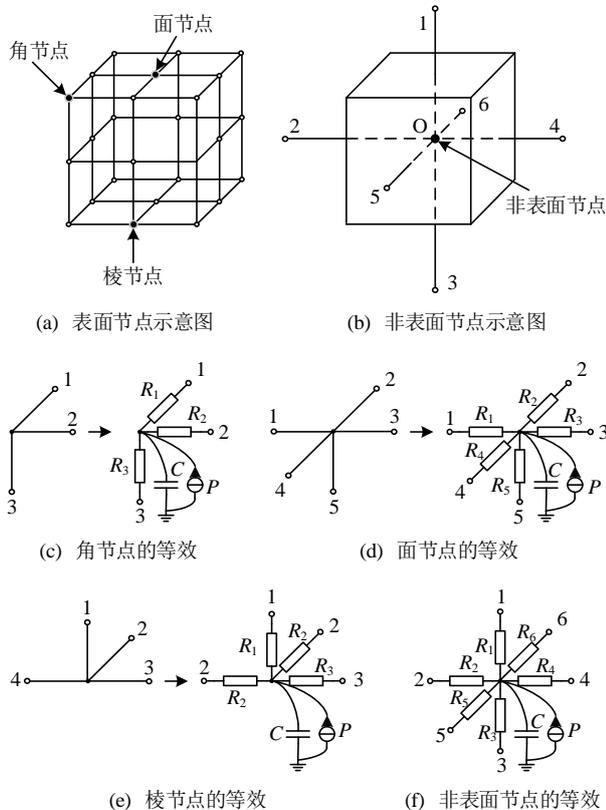


图8 网络拓扑法的 RC 等效原则
Fig.8 The principle of RC equivalence in network topology method

RC 热路，从而将热传导方程转化为大型三维 RC 网络进行求解，且物理意义清晰，并在计算过程中采用宽频 ENOR 降阶算法大大降低了计算复杂度^[23]。相比热路法，网络拓扑法计算精度高；相比有限元法，网络拓扑法计算速度快，且不依赖于商业有限元软件。IGBT 传热模型分类及特点见表 3 所示，图 9 为不同传热模型之间仿真性能对比示意图。

表3 IGBT 传热模型分类及特点
Table 3 Classification and characteristics of IGBT's thermal models

方法	适用时间尺度	求解连续性	适用场合
热路法	小时间尺度	差	工程快速计算
有限元法	稳态或大时间尺度	好	全面精确评估
网络拓扑法	时间尺度适中	较好	全面快速求解

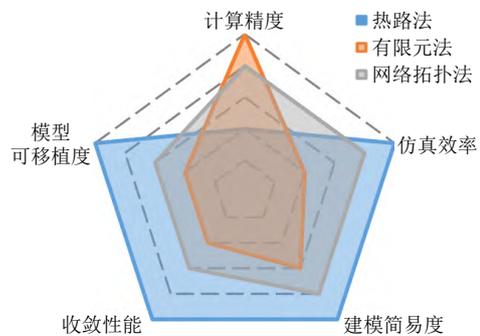


图9 不同传热模型间仿真性能对比
Fig.9 Comparison of simulation performance between different thermal models

2.2.2 电热模型的动态联合

IGBT 的损耗 P 是电热耦合的桥梁，其值需要通过电气模型计算得到，然后作为传热模型的载荷输入，最终得到温度场的分布。目前为止，在进行电热联合仿真时通常可以归纳为直接法和松弛法。直接法表示在同一仿真环境下进行的耦合方式，有电路-热路法、有限元法；松弛法表示在不同仿真环境下进行的耦合方式，由于在仿真时需要关注不同物理场的步长以对时间尺度进行匹配，同时需要解决不同物理场之间数据传递问题，故松弛法相较于直接法实施难度更大，场路耦合法即为松弛法。

电路-热路法在电路仿真(一般为物理模型或行为模型)时计算得到其损耗，同时搭建热路 Cauer 模型，进行温度的仿真，得到器件各层结构的温度。但是该模型一般为电热单向耦合，没有考虑温度对器件损耗的影响。文献[24]构建了基于 Saber 的电热耦合模型，利用器件手册拟合损耗与集电极电

流、温度的关系，建立开关损耗和通态损耗的行为模型，然后作为载荷输入到热路模型中，计算得到的温度值又迭代到损耗模型中，完成电热双向耦合。该方法在实现电热双向耦合的同时效率较高且容易收敛，但是丢失了对电磁瞬态行为的描述。

单一有限元法则利用有限元软件通过对 IGBT 模块进行 3D 建模，然后赋予内部材料不同属性，并施加电流激励，进行电场和热场的耦合，得到电场和温度场的分布。有限元法的优点之一是可以对 IGBT 进行电热双向耦合，同时又能得到精确的结果。但是精确的计算也给仿真带来了庞大的计算量，导致仿真所带来的计算成本较高，消耗时间较长。而且有限元软件中对电场的描述不够精确，比较适合于低频条件下的电热仿真。

针对 IGBT 计算模拟快速性和精确性无法兼得的状况，不少学者进行了一些探索。其中典型的方法是将电路仿真和有限元的热模拟结合起来，即场路耦合法。文献[25-26]利用 Icepak 和 PSpice 对 IGBT 模块进行电热双向联合仿真，思路如图 10 所示^[5,25-26]，并且兼顾了计算的效率和精度。文献[5]利用 Simulink 和 COMSOL 联合仿真，在场路耦合过程中进一步考虑了键合线发热损耗的影响，使得模型更加精确。在耦合过程中，因电路仿真和热场仿真的时间尺度的不同而导致计算量过大的问题(详见 4.1、5.4 节)也在场路耦合中得到一定的解决(见图 11^[5])。文献[27-28]利用该思路对 MPS 结构 SiC 二极管和动态雪崩工况下的 IGBT 进行电热联合仿真，皆取得了较好的效果。

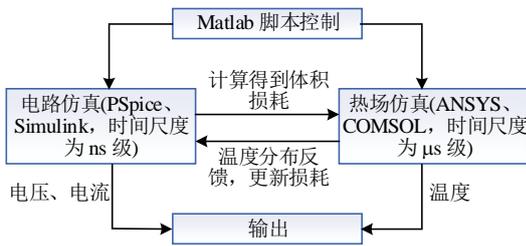


图 10 场路耦合的思路

Fig. 10 The method of field-circuit coupling

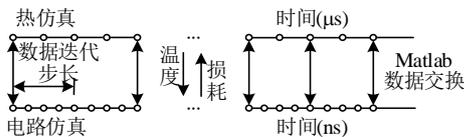


图 11 电热耦合时不同时间尺度处理方法

Fig. 11 Treatment methods of different time scales in electrothermal coupling

表 4 给出 IGBT 电热联合仿真技术的分类及特点，图 12 给出了不同电热联合仿真技术的仿真性能对比示意图。

表 4 IGBT 电热联合仿真技术的分类及特点

Table 4 Classification and characteristics of IGBT's electrothermal simulation technologies

分类	限制条件	适用场合
电路-热路法	求解温度不连续	瞬态
单一有限元法	电场模型不准确	稳态、低频瞬态
场路耦合法	长时间求解困难	瞬态

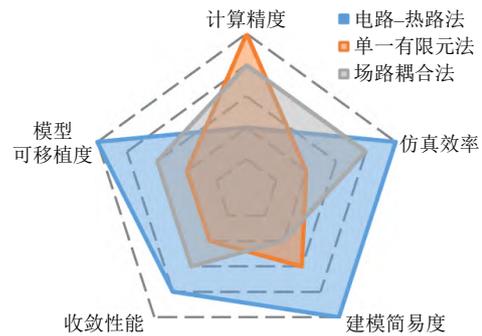


图 12 不同电热联合仿真技术的仿真性能对比

Fig. 12 Comparison of simulation performance between different electrothermal simulation technologies

2.3 电热力耦合技术

不同封装结构的 IGBT 在进行电热力耦合时不完全相同。由第 1 节可知，区别在于压接式 IGBT 的热场和应力场、电场与应力场有着更强的耦合关系，即存在接触热阻和接触电阻。故可以认为在焊接式 IGBT 中只需要考虑在电-热的双向耦合和热-力的单向耦合，而压接式 IGBT 中内部物理场存在力-电耦合和热-力双向耦合的情况^[9]，在进行建模时难度更高、其模型更复杂，因此有必要对二者分开讨论。

2.3.1 焊接式 IGBT 的电热力联合仿真

对于焊接式 IGBT，在进行电热力耦合时原理相对简单，只需把电热模型的输出(即温度分布)作为激励加载到应力场中即可得到 IGBT 各个位置的应力、应变分布。研究应力应变分布的意义在于能够对 IGBT 进行疲劳分析、寿命预测等重要评估。耦合方式因问题复杂度的不同而多种多样，但主要体现在模型细节方面的优化。譬如：文献[7,29]采取单向的电热场路耦合的结果输入到应力场中得到应变分布；文献[30-32]考虑温度对材料电导率的影响，利用电热双向耦合的结果与应力场再耦合，其中文献[32]在中还考虑了焊料层的力学粘塑性，

模型准确度较高,但计算速度较慢。而文献[8]应用文献[5,25-26]的研究成果到应力场中,建立了电热能够双向耦合的多速率电热力模型,保证精度的基础上提高了计算速度。

2.3.2 压接式 IGBT 的电热力联合仿真

相较于焊接式 IGBT,压接式 IGBT 则需进一步考虑压力对接触电阻、接触热阻的影响,将应力场和电场、应力场和热场紧密联系起来。在对压接式 IGBT 进行多物理场建模时需要首先拟合压力与接触电阻和接触热阻的关系,方可进行物理场之间的耦合分析。文献[33]中提出三维有限元多物理场耦合模型和基于场路耦合的多物理场耦合模型。其中三维有限元模型将电气模型简化为与压力相关的损耗模型并直接耦合到温度场中完成与力的双向耦合,适用于稳态工况;而基于场路耦合的多物理场耦合模型则根据瞬态工况的特点,解耦压力与电场、热场的关系,将模型降阶为特殊的“电热耦合”进行仿真。目前为止,针对压接式 IGBT 的电热力全耦合模型以及经过简化的电热力耦合、热力耦合模型已经存在^[9-10,33-34]。

图 13 为 IGBT 多物理场模型简化进展^[11],图中椭圆、矩形分别表示场、路模型;实、虚线分别表示已经实现的和仍未实现的模型;红色箭头表示压接式相对于焊接式多考虑的部分;黑色箭头表示焊接式和压接式共有的部分。可见 IGBT 无论是压接式还是焊接式,在模型简化方面仍然存在热路与压力难以耦合以及难以对力场进行简化的不足之处。另外,在对 IGBT 进行多物理场建模是一项极其耗费计算资源的工作,不建议盲目建立三维多物理场全耦合模型,而应该针对特定工况确定重点要考虑的物理场后再进行物理场的简化与解耦,合理权衡求解速度和精度。

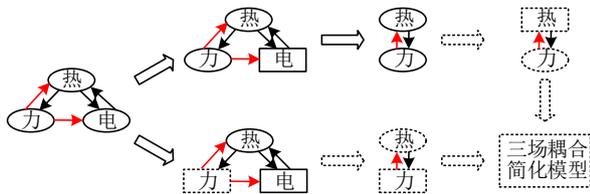


图 13 IGBT 多物理场简化模型进展
Fig. 13 Progress of simplified model of IGBT multi-physics field

3 IGBT 多物理场分析典型应用

多物理场建模在 IGBT 的应用场合较多,涉及

到 IGBT 的设计、生产、应用、保护等各个领域。本节着重从机理揭示、封装优化、状态监测、失效分析的角度(见图 14)总结当前多物理场建模技术在 IGBT 中典型应用。机理揭示的环节较为基础,是探究 IGBT 的实质,描述 IGBT 物理特性的重要环节,其通过揭示 IGBT 内部电磁能量变换、热损耗与热传递、应力变化规律以更好地服务于封装设计、状态监测、失效分析。

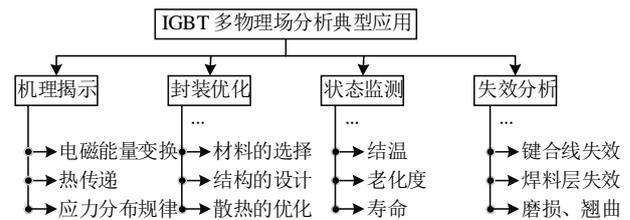


图 14 IGBT 多物理场分析的典型应用

Fig. 14 Typical applications of IGBT multi-physics field analysis

3.1 机理揭示

多物理场耦合技术应用广泛的一个最重要原因是可以对 IGBT 内部物理场的耦合规律进行探究,省去繁琐的实验步骤。由于有限的测量手段和高昂的实验成本,难以通过实验探究不同老化状态下各物理场的变化规律,多物理场耦合技术提供了有力的手段。通过多物理场耦合技术,可以方便模拟功率模块工作时的近磁场分布规律^[3];可以方便模拟不同类型焊料层空洞、不同老化程度焊料层、不同种类热冲击以及多芯片热源等工况等对芯片温度的影响^[35-37];可以方便研究不同热循环方式、功率密度、工作频率、短路工况下器件内部应力场分布规律以及影响因素^[34,38-41];还可以方便研究压接式 IGBT 中电流密度、温度、压力、封装内外结构(如凸台、汇流母排等)相互之间的作用机制^[42-46];只有对器件内部物理场进行准确的刻画与描述才能有效地对器件进行封装优化、结温监测、老化评估、寿命预测、失效分析。

3.2 封装优化

3.2.1 封装优化模型

多物理场耦合技术对 IGBT 封装设计十分重要,一般通过有限元分析,可以得到不同封装结构、不同封装材料的电学特性和热力学特性,从而在结构和材料上对封装进行优化,最大限度发挥芯片的性能。IGBT 的封装形式可分为焊接式和压接式两种。焊接式封装最常见的失效即为键合线脱落

和焊料层脱离。通过多物理场建模可以仿真温度循环和功率循环,并对封装材料的选择与结构的改善^[14,47]、键合线的设计^[30,48]、散热系统的优化^[49]提供一定的指导。压接式不存在键合线和焊料层,采用双面散热技术,相比焊接式封装更不容易出现封装失效。但是也可利用多物理场耦合技术确定压接式 IGBT 电场集中部位^[50]和较薄弱部位^[34]并采取相关措施提高封装性能。同样地,利用多物理场耦合技术也可对压接式 IGBT 的封装材料与结构以及散热能力进行改进^[38,51-53]。

3.2.2 多目标优化算法

多物理场耦合技术还可以结合优化算法,优化封装模型,改变以往只能人为地对单一目标进行优化的劣势,有利于提高器件封装的定制化水平以及可靠性。NSGA-II 算法支持多目标优化和约束,能够有效规避模型陷入局部最优解,非常适合解决全局最大值/最小值问题。文献[54]为提高功率循环次数和温度循环次数,以低封装热阻和低应变能量为优化目标,而文献[55]在其基础上建立电热力模型同时以低寄生电感、低热阻、低应变能量为目标,二者都采用 NSGA-II 算法进行求解,得到了多目标优化设计 Pareto 最优解。然而 Pareto 最优解并不代表着所有目标最优,而是一种目标之间的相互折中,这也符合功率模块在封装设计时面临的矛盾。

3.3 状态监测

3.3.1 结温监测

温度是表征 IGBT 性能最重要的参数之一,精确的结温提取对于 IGBT 的健康管理具有重要意义^[56]。利用 2.2 所述电热模型即可对 IGBT 的结温进行监测:有限元法^[7]较准确但速度较慢;RC 热路法^[21,57]速度较快但评估不精确;场路耦合法^[5,25-26]是利用多物理场进行结温监测可行之选,不失精度和速度,多用于短路等特殊工况。

3.3.2 老化评估

键合线和焊料层状态是表征 IGBT 寿命的重要指标。利用多物理场耦合技术可以对键合线和焊料层的状态进行一定的评估。量化的形式有多种,比如温度变化判断失效程度^[58]、最大热应力映射模块分层率^[59]、温度梯度评估焊料层空洞^[31-32,60]、键合线应变分布函数表征其退化程度^[7]等。可以看出,当前尚未有一种方法能够同时对多种老化进行评估,这也是受多物理场分析的局限性所致。功率器件在不同应用场合应根据其评估成本、被重点关注

的老化区域选择合适的评估方式。

3.3.3 寿命预测

与老化评估不同,寿命预测旨在衡量出当下器件的剩余寿命,以采取一定的措施更换器件或者延长其寿命,保障系统的可靠运行。功率模块的寿命预测模型主要有解析模型和物理模型两类:解析模型需要利用结温、频率、电压、电流建立与功率循环次数的关系,常见的有 Coffin-Manson、Coffin-Manson-Arrhenius、Norris-Landzberg、Bayerer 4 种模型,可通过功率循环实验结合多物理场分析实现,缺点是只能在特定情况下适用,不少文献进一步考虑疲劳累积效应,正在逐渐完善解析寿命预测模型^[61-62];物理模型则利用多物理场模拟并分析热循环过程中引线和焊料层的能量密度、应变、应力等力学特性,可分为基于应力的寿命模型和基于应变的寿命模型,考虑到物理模型所需要的参数都难以通过实验测得,所以物理模型主要通过多物理场分析实现,同样也有文献对考虑疲劳效应的物理寿命模型进行补充和研究^[63]。

3.4 失效分析

不同的封装形式失效方式不同,机理不同,但都可以利用多物理场耦合技术以查明失效原因、分析失效机理。焊接式器件的失效方式主要为焊料层和键合线的失效。通过多物理场耦合技术,可以查明键合线脱落^[30,64]和焊料层剥离的机理和原因^[64],温度循环和功率循环分别容易导致焊料层失效和键合线失效;探究 IGBT 失效模式的影响和作用机制,功率循环时开通时间对 IGBT 模块的失效模式也会有一定的影响^[65];分析一些局部损伤(如裂纹)引起 IGBT 失效的机理^[63]。而文献[66-67]主要对压接式 IGBT 的常见失效模式进行研究,其中文献[66]研究了外部施加压力和功率循环作用下,边界处 IGBT 芯片出现边界翘曲的失效模式。而文献[67]研究了压接式 IGBT 芯片在外部压力作用和内部材料热膨胀作用下,引起微动磨损的失效机制。

关于 IGBT 多物理场分析在典型应用中的量化表征指标、手段和效果详见表 5。

表 5 IGBT 多物理场分析在典型应用的量化效果

Table 5 Quantitative effects of IGBT multi-physics analysis in typical applications

角度	典型应用	表征指标	量化手段	量化效果
	电磁瞬变	磁感应强度	电磁耦合	★
机理揭示	热场传递	温度	电热耦合	★★★★★
	应力分布	应力	电热力耦合	★★★★★

续表

角度	典型应用	表征指标	量化手段	量化效果
材料选择				★★★★★
封装优化	结构设计	温度、应力、应变	电热力耦合	★★
散热优化				★★★★★
结温监测	温度		电热力耦合	★★★★★
状态监测	老化评估	温度、应力、应变、温度梯度	电热力耦合	★★★★
寿命预测	应力、应变、能量密度		电热力耦合	★★
引线失效				
失效分析	焊层失效	温度、应力	电热力耦合	★★★★★
	磨损、翘曲			

4 难点和不足

文献[8]所建立的是一个基于 PSpice 和

COMSOL 的电热力联合仿真模型，其仿真流程以及仿真结果详见图 15^[8]。模型采用场路耦合的思路首先进行电热联合仿真，然后把温度场的计算结果导入到应力场中，从而得到电热力三场耦合的结果。该模型成功地对短路状态下 IGBT 的电热力状态进行预测分析。但是 IGBT 大多数情况下处于非短路的常规工况，温度在短时间内变化不明显，此时就需要精确瞬态仿真长时间的电热力特性，而这也是暂时无法解决但又必须面对的多物理场协同计算挑战，详见 4.1 节；另外，IGBT 多物理场分析

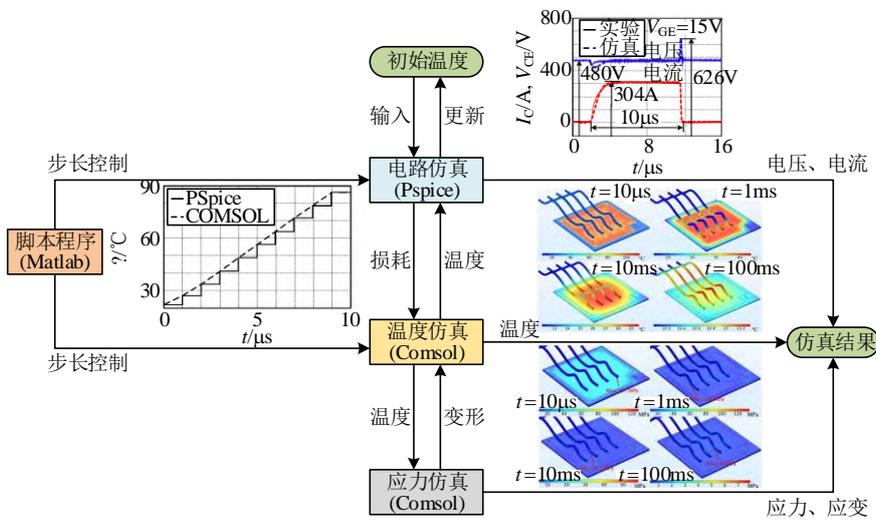


图 15 基于 PSpice 和 COMSOL 的 IGBT 电热力仿真案例

Fig. 15 Electro-thermal-stress simulation of IGBT based on PSpice and COMSOL

4.1 多物理场建模的难点

多物理场建模的难点主要在于不同物理场之间协同计算的处理，如图 16。上述案例模型借助场路耦合的思路在一定程度上缓解了多物理场联合仿真时带来的计算困难，但是在对 IGBT 进行长时间瞬态多物理场仿真时仍然需要克服物理场之间协同处理时所面对的问题，具体表现为：

1) 不同物理场下时间尺度的匹配。不同物理场处理的时间尺度不同，如在进行电气仿真时，由于电磁场的瞬态特性，软件仿真的时间步长通常是微秒甚至 ns 级；而在进行热场仿真时，通常仿真时间步长是 ms 甚至 s 级。在进行电热仿真时，根据电磁场和热场的特性，若仿真时间步长按照电磁场时间尺度进行匹配，则会导致计算量巨大，求解困难；若仿真时间步长按照热场时间尺度进行匹配，则会导致计算结果不够精确，影响求解准确度。因此在进行长时间、瞬态的多物理场耦合仿真时，还需要能够合理匹配不同物理场时间尺度的交互策略，实现仿真精度和效率的折中。

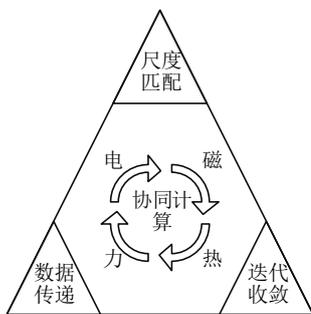


图 16 物理场之间的协同计算处理

Fig. 16 Coordinated calculation processing between different physics

2) 不同物理场之间数据的传递。多物理场建模方法通常分为直接耦合法和间接耦合法。直接耦合法通过直接对各物理场偏微分方程进行联立求解，计算量较大，难以收敛，计算效率低下。而间接耦合法使用上一个物理场的计算结果作为下一

个物理场的激励,按照耦合顺序逐一对各个物理场求解,易收敛、计算效率较高。在进行多物理场耦合时,为了兼顾计算的精度和效率,多数多物理场建模技术采用间接耦合法。在进行间接耦合时,需要利用网格来完成各物理场之间的数据传递,然而由于不同物理场的特性不同,各自采用的网格剖分方法不同。在进行网格剖分时,若不同物理场采用一致的方法,为了兼顾不同物理场对网格划分的要求,需增加网格数目,而降低了计算效率。如果对不同物理场采用适宜的网格剖分方式,在提高计算效率的同时也带来了数据在传递过程中的丢失。

3) 迭代求解的收敛性问题。影响结果收敛性的因素主要包括介质材料的非线性度、网格划分的精细度和结构的不规整度。在对 IGBT 进行多物理场建模时,介质材料的非线性现象是影响其求解的一个重要因素。以 IGBT 电热分析为例,芯片的热阻和电阻是随温度非线性变化的物理量,芯片导通产生损耗,导致温度的上升;而温度的上升反过来又会影响电阻和热阻,导致损耗的变化和传热特性的改变最终带来温度的改变。在这个过程中,需要在电场和热场之间进行反复迭代计算,直到计算误差缩小到合理范围内停止计算。反复迭代计算的过程使得多物理场求解难以收敛,增加了计算难度。网格划分的精细度通常根据计算机的算力进行匹配,适当的精细度有助于折中计算精度与计算速度。结构的不规整度主要通过影响数据的传递和网格的划分来影响求解的收敛性。

4.2 多物理场分析的局限性

多物理场耦合技术固然有不少优势,但是其“局限性”也需要被深刻认识:

1) 数值的稳定性。多物理场耦合分析的本质是联立求解各物理场的偏微分方程,控制计算误差亦是其保障其结果收敛的核心任务。IGBT 内部材料多为非线性材料,在考虑非线性效应时,多物理场耦合结果往往难以收敛,甚至得不到结果。

2) 硬件的依赖性。多物理场耦合分析需要借助计算机进行计算模拟,计算机的性能决定了多物理场耦合时的计算能力。在对 IGBT 进行多物理场耦合分析时,由于 IGBT 体积小、结构层薄、网格划分困难,欲求得精确结果,对计算机算力要求较高。比较典型的情况便是多物理场耦合技术难以同时对多种老化状态进行评估,这便是受硬件限制带来的无法处理过大的计算量所致。

3) 方法的滞后性。在面对复杂问题求解时,当下多物理场分析往往采用“粗放式”模拟,即不断地堆叠计算机的性能。这是由于数值计算方法落后于计算机硬件的发展而导致的,使得计算机的硬件资源不能被充分利用。因此,多物理场计算方法仍需创新突破,以匹配计算机日益增强的算力。

4) 结果的可靠性。相较于实验,仿真模拟的优势在于缩短研发周期、降低实验成本。然而,欲通过多物理场建模技术精确模拟随时间变化的实际工况难度较高。多物理场耦合技术当前更多被用于“定性地”揭示内部机理,起到与实验相互验证的作用。

5 趋势

多物理场建模技术已经广泛应用到 IGBT 的研究之中,但是由于实际物理场的复杂性和计算机模拟本身的缺点(如消耗计算资源较大、仿真难以收敛等),多物理场建模技术还需要进一步的发展以满足更多的应用场合,分析更加复杂的机理。本节主要探讨 IGBT 多物理场建模技术的未来发展趋势。

5.1 模型的降阶技术

多物理场仿真技术受限于硬件资源,当模型考虑因素较多时会导致计算量太大以至于在短时间内无法求解,且由于数据交换等问题不同的软件之间进行耦合时不够方便。因此,需要突破一种能够提取不同物理场下关键仿真参数的降阶技术(reduced order method, ROM)以耦合多种物理场,实现快速计算。当前的降阶的技术方法有多种,包括本征正交分解(proper orthogonal decomposition, POD)法、响应面法、深度学习法等(见图 17)。三者原理不同:特征正交分解法采取数值方法,利用低阶奇异矩阵表征高阶系统特征;响应面法采取函数拟合,通过大量的多物理场仿真结果拟合一个能够

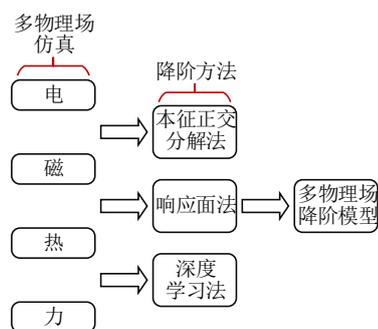


图 17 多物理场模型降阶技术

Fig. 17 ROM of Multi-physics Field

代替未知、真实状态的响应面曲线,用以快速计算得到结果。深度学习法则将多物理场仿真结果进行“数据集训练”,达到降阶的效果。

事实上,模型降阶技术可以看作是一种“数据处理技术”,即首先进行多次仿真得到单个或多个物理场下的结果,然后抛弃冗余信息,经过一定的“采样”,着重提取关键参数信息,根据需要对结果进行适当“内插”,得到降阶模型。该技术虽以牺牲部件模型的空间离散为代价,来有效减小模型的计算量,提高计算效率,但在求解多场耦合问题(如多尺度、非线性问题)时有一定的指导价值。

5.2 非线性求解

非线性问题一直是导致多物理场模型难以收敛、计算量较大的重要原因之一。非线性问题一般分为材料非线性、几何非线性、边界非线性。以材料非线性为例,不少学者在对 IGBT 进行建模的时候适当忽略了材料的非线性影响,赋予材料恒定的参数值。然而事实上,随着温度、应力发生变化,器件内部各层材料的可能电参数、热参数、结构参数也会发生变化。欲得到精确的计算结果,对器件进行准确的评估,便需要考虑材料的非线性问题,以建立精确的模型。然而非线性问题的求解难度相对较高,在计算机算力一定的条件下采用简单迭代法和牛顿迭代法仍不能很好地解决当下在进行多物理场耦合时遇到的非线性难题。

5.3 电磁热力全耦合

纵观当下所存在的 IGBT 多物理场模型,受到计算方法、硬件设备、时间成本等限制,几乎不存在电磁热力的全耦合。事实上,电磁热力模型的建立不仅有利于封装优化设计和状态监测的进行,而且对于完善 IGBT 的理论有重要的作用。近年来,逐渐有学者开始关注并证明 IGBT 内部会产生机械应力波(声发射),寄希望于建立一套快速、无损、在线的状态监测方法,探索 IGBT 可靠性问题的潜在解决方案^[68-72]。然而,IGBT 内部应力波产生机理复杂,解释尚不清晰。文献[73-75]目前已经对多种电力电子器件产生的机械应力波进行试验结果分析和初步的理论研究,旨在破解电力电子器件产生机械应力波的原因和影响因素^[76],本文希望建立电磁热力交互的 IGBT 全耦合模型以对 IGBT 行为进行最精确地描述,从而完善 IGBT 应力波产生理论。另外,若能够对 IGBT 的行为进行精确的描述,也能够最大程度的发挥 IGBT 的性能,减小损失。

当下的多物理场耦合模型多以电热力双向间接耦合方式为主,电磁热力双向直接的全耦合模型也是未来 IGBT 多物理场耦合技术的发展方向。

5.4 多尺度协调

多尺度的协调之于多物理场建模甚至于电力电子学的发展与进步意义重大。截至目前,IGBT 多尺度问题的研究仍然属于早期阶段,文献[18,77-78]主要研究了不同时间尺度下功率器件的开关特性并提出了“离散状态事件驱动”的多时间尺度瞬态模型连接切换思想和仿真方法;文献[79]则基于不同的仿真尺度建立了适用于器件级到系统级的传热模型。然而上述文献都没有考虑多物理场之间的交互。文献[80]建立了小时间尺度下考虑位移电流的 IGBT 电路-电磁场模型,但为提高计算效率运用降阶策略最终使得模型无法体现“微观”的机理。文献[81]提出了适用于电力电子变换器的尺度划分方法及多尺度交互策略,对多尺度和多物理场的电力电子变换器建模方法进行初探。总的来说,当前的多尺度协调还有待发展,主要体现在:

1) 多时间尺度的协调。一方面,单一物理场下需要根据不同应用场合切换不同的时间尺度进行计算。譬如:在工程应用时,为了兼顾计算效率与精确度,器件级、组件级、系统级的电力电子设备所涉及的时间尺度是不同的。小尺度计算一般用来精确描述 IGBT 的瞬态行为,大时间尺度计算通常用来对电力电子系统进行模拟以避免出现“计算灾难”。另一方面,不同物理场之间的时间尺度也需要被合理协调。以电热分析为例,尤其是在第三代宽禁带半导体发展的大背景之下,IGBT 的电磁模型必须建立在更小的时间尺度之下。而 IGBT 的热行为,因热时间常数较大,时间尺度较大。这就使得电磁问题和热问题因时间尺度差异在耦合时极为不便。因此若要求对 IGBT 的多物理场行为进行精确描述,时间尺度的协调性必不可少。

2) 多空间尺度的协调。以器件级仿真为例,每个 IGBT 芯片微观下一般由数万个元胞构成,每个元胞由若干个不同的掺杂区域组成。在进行多物理场宏观模拟时,一般只是把芯片层当作特殊的“电阻”对待,而无法真正有效地模拟由元胞构成的芯片的特性。同时,芯片损耗带来的温度分布不均匀也会作用于元胞,导致芯片的电特性发生变化(比如均流问题)。因此,空间尺度的协调性也要被考虑。

5.5 数字孪生

数字孪生技术是新兴的一代技术,是同时基于模型驱动和数据驱动的虚拟模型,能够借助数据模拟物理实体在环境中的行为。2016年 ANSYS 与 GE 合作共同打造基于模型的数字孪生技术,整合 ANSYS 的工程仿真和 GE 的 Predix 平台,最终在 GE 的发动机上得到数字孪生的应用,大修次数减小,节省了上千万的成本。当前的研究以单一的多物理场模型或数据驱动模型为主,鲜有文献同时结合多物理场和大数据建模。文献[82]使用热路模型准确预测了海上风力发电机功率变换器的损伤累积效应和剩余寿命,但最后仅仅为最佳的运维策略建立了数字孪生平台框架,在技术上并没有实现。文献[83]基于多物理场和深度学习建立了发电机的模型来预测电机的故障,但是深度学习的输入数据来自于仿真结果而不是传感器,因此并不具备实时性,不算真正意义上的“数字孪生”;文献[84]基于数据驱动建立的模型虽然可用于监测 Buck 电路内部电容和 MOSFET(见图 18^[84])的退化,但并没有结合多物理场模型,难以对内部的机理进行准确刻画。

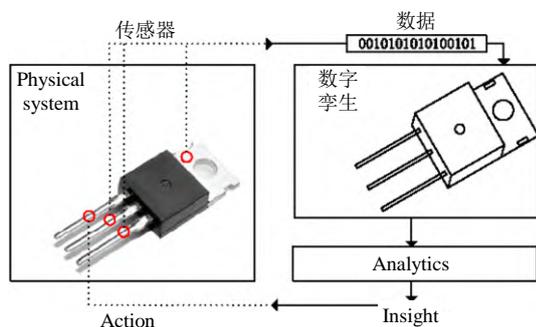


图 18 数字孪生的应用案例^[84]

Fig. 18 Example of the application of digital twin

物理模型对机理的刻画常常较为清晰但却带来了庞大的计算量;基于数据驱动模型虽准确度较高,却往往对机理刻画有限,因此如何能够将物理模型和数据模型结合并应用到电力电子器件中也是一个需要考虑的问题。未来融合数据驱动和物理模型思路有两种:

1) 多物理场模型为主,采用数据驱动的方法对模型参数进行修正。

2) 多物理场模型和数据驱动并行使用,最后依据二者的可靠度进行加权,得到评估结果。

6 结论

多物理场建模及分析技术因其克服试验周期

长、研发成本高等缺点,能够在高保真还原器件材料结构特性的基础上对复杂交互的内部物理场进行耦合计算,在 IGBT 的设计、生产、应用方面都发挥着重要作用。本文系统阐述了现存 IGBT 的多物理场建模技术和应用情况,并分析了所存在的问题和未来的发展趋势,结论如下:

1) IGBT 多物理场建模技术主要包括电磁耦合、电热耦合、电热力耦合技术,可应用于焊接式和压接式 IGBT。如何实现多物理场间的协同计算,解决不同物理场间时间尺度的匹配、数据的传递、迭代的收敛问题,以折中计算精度和计算效率是多物理场建模技术的难点。

2) IGBT 多物理场分析的典型应用可根据其应用目的和场景分为机理揭示、封装优化、状态监测、失效分析。然而 IGBT 多物理场分析的局限性也很明显,主要表现在数值的稳定性较差、对硬件的依赖性较高、计算方法较硬件的发展相对滞后以及结果的可信度不够。

3) 未来的 IGBT 多物理场建模及分析会着重解决模型的降阶技术、非线性求解技术、电磁热力全耦合技术、多尺度协调技术以及数字孪生技术,朝着简洁化、精确化、高效化、多尺度化、数字化的方向发展。

随着新一代宽禁带半导体材料的应用,IGBT 的频率会越来越高、功率密度也会越来越大,多物理场建模及分析技术在 IGBT 中将会得到进一步的应用和发展。希望本文可为日后电力电子器件的多物理场建模技术及应用的研究提供参考。

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 Zhengming, YUAN Liqiang, LU Ting, 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] 唐新灵,张朋,陈中圆,等.高压大功率压接型 IGBT 器件封装技术研究综述[J].中国电机工程学报,2019,39(12):3622-3638. TANG Xinling, ZHANG Peng, CHEN Zhongyuan, et al. Review of high voltage high power press pack IGBT package technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 3622-3638(in Chinese).
- [3] ZHANG Boyi, ZHAO Hui, WANG Shuo. Near magnetic field emission analysis for IGBT and SiC power

- modules[C]//2020 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI). Reno: IEEE, 2020: 411-416.
- [4] 沈卓轩, 姜齐荣. 电力系统电磁暂态仿真 IGBT 详细建模及应用[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 235-247. SHEN Zhuoxuan, JIANG Qirong. Detailed IGBT modeling and applications of electromagnetic transient simulation in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 235-247(in Chinese).
- [5] 贾英杰, 肖飞, 罗毅飞, 等. 基于场路耦合的大功率 IGBT 多速率电热联合仿真方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(9): 1952-1961. JIA Yingjie, XIAO Fei, LUO Yifei, et al. Multi-rate electro-thermal simulation method for high power IGBT based on field-circuit coupling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(9): 1952-1961(in Chinese).
- [6] HANINI W, AYADI M. Electrothermal modeling of the Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) using pspice: application to DC-DC converter[J]. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, 2021, 32(2): 507-521.
- [7] PEDERSEN K B, PEDERSEN K. Dynamic modeling method of electro-thermo-mechanical degradation in IGBT modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2): 975-986.
- [8] JIA Yingjie, XIAO Fei, DUAN Yaoqiang, et al. PSpice-COMSOl-based 3-D electrothermal-mechanical modeling of IGBT power module[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(4): 4173-4185.
- [9] DENG Erping, ZHAO Zhibin, LIN Zhongkang, et al. Influence of temperature on the pressure distribution within press pack IGBTs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(7): 6048-6059.
- [10] 李辉, 王晓, 姚然, 等. 计及内部材料疲劳的压接型 IGBT 器件可靠性建模与分析[J]. 中国电力, 2019, 52(9): 30-37. LI Hui, WANG Xiao, YAO Ran, et al. Reliability modeling and analysis of press-pack IGBTs considering internal material fatigue[J]. Electric Power, 2019, 52(9): 30-37(in Chinese).
- [11] 张一鸣, 邓二平, 赵志斌, 等. 压接型 IGBT 器件封装内部多物理场耦合问题研究概述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6351-6364. ZHANG Yiming, DENG Erping, ZHAO Zhibin, et al. A review of the multiphysics coupling problem in press pack IGBT[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6351-6364(in Chinese).
- [12] 赵争鸣, 施博辰, 朱义诚. 对电力电子学的再认识: 历史、现状及发展[J]. 电工技术学报, 2017, 32(12): 5-15. ZHAO Zhengming, SHI Bochen, ZHU Yicheng. Reconsideration on power electronics: the past, present and future[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(12): 5-15(in Chinese).
- [13] 辛威. IGBT 功率模块中引线键合布局与应力分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017. XIN Wei. Wire bonding layout and stress analysis of IGBT power module[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [14] LI Daohui, QI Fang, PACKWOOD M, et al. Explosion mechanism investigation of high power IGBT module[C]//2018 19th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE). Toulouse: IEEE, 2018: 1-5.
- [15] 赵志斌, 邓二平, 张朋, 等. 换流阀用与直流断路器用压接型 IGBT 器件差异分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(19): 125-133. ZHAO Zhibin, DENG Erping, ZHANG Peng, et al. Review of the difference between the press pack IGBT using for converter valve and for DC breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(19): 125-133(in Chinese).
- [16] 陈佳佳. IGBT 电力电子系统多时间尺度多物理场数学模型与计算方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2019. CHEN Jiajia. Multi-physics and multi-time scale modeling and solution methodology of an insulated gate bipolar transistor based power electronics system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019(in Chinese).
- [17] 丁顺. IGBT 串联均压控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018. DING Shun. Control for voltage-sharing of series-connected IGBTs[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018(in Chinese).
- [18] 施博辰, 赵争鸣, 蒋焯, 等. 功率开关器件多时间尺度瞬态模型(I): 开关特性与瞬态建模[J]. 电工技术学报, 2017, 32(12): 16-24. SHI Bochen, ZHAO Zhengming, JIANG Ye, et al. Multi-time scale transient models for power semiconductor devices (part I): switching characteristics and transient modeling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(12): 16-24(in Chinese).
- [19] NING Puqi, MENG Jinlei, WEN Xuhui. A finite differential method based IGBT model in PSPICE[C]//2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Charlotte: IEEE,

- 2015: 1078-1083.
- [20] DUTTA A, ANG S S. Electromagnetic interference simulations for wide-bandgap power electronic modules[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(3): 757-766.
- [21] 马铭遥, 郭伟生, 严雪松, 等. 用于电动汽车功率模块热分析的紧凑型热网络模型[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5796-5805.
- MA Mingyao, GUO Weisheng, YAN Xuesong, et al. Compact thermal network model for thermal analysis of power modules in electric vehicle[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5796-5805(in Chinese).
- [22] CHEN Jiajia, YANG Shiyong, REN Zhuoxiang. A network topological approach-based transient 3-D electrothermal model of insulated-gate bipolar transistor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2020, 56(2): 7509404.
- [23] CHEN Jiajia, HU Sideng, QIANG Zhou, et al. A broadband enhanced nodal-order reduction methodology for large-scale equation sets of 3-D transient field problems[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2020, 56(3): 7514004.
- [24] 申越. 基于 Saber 的 IGBT 模块电热联合仿真的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- SHEN Yue. Electro-thermal coupling simulation for IGBT module based on saber[D]. Xi'an: Xidian University, 2017(in Chinese).
- [25] WU Rui, IANNUZZO F, WANG Huai, et al. An Icepak-PSpice co-simulation method to study the impact of bond wires fatigue on the current and temperature distribution of IGBT modules under short-circuit[C]//2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Pittsburgh: IEEE, 2014: 5502-5509.
- [26] WU Rui, IANNUZZO F, WANG Huai, et al. Fast and accurate Icepak-PSpice co-simulation of IGBTs under short-circuit with an advanced PSpice model[C]//7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014). Manchester: IET, 2014.
- [27] 贾英杰, 肖飞, 段耀强, 等. MPS 结构 SiC 二极管场路耦合建模及多速率电热联合仿真分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5585-5594.
- JIA Yingjie, XIAO Fei, DUAN Yaoqiang, et al. Field-circuit coupling modeling and multi-rate electro-thermal co-simulation analysis of merged PiN schottky SiC diode[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5585-5594(in Chinese).
- [28] 马天兆, 罗毅飞, 贾英杰, 等. 考虑芯片电热应力分布的 IGBT 动态雪崩工况电热联合仿真[J/OL]. 中国电机工程学报, (2021-01-09). <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.201920>.
- MA Tianzhao, LUO Yifeng, JIA Yingjie, et al. IGBT electro-thermal simulation under dynamic avalanche condition considering distribution of electro-thermal stress on chip[J/OL]. Proceedings of the CSEE, (2021-01-09). <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.201920>(in Chinese).
- [29] JIANG Maogong, FU Guicui, LENG Hongyan, et al. Method to predict lifetime of IGBT under power cycling based-on fast electro-thermo-mechanical model[C]//2018 19th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE). Toulouse: IEEE, 2018: 1-6.
- [30] 周文栋, 王学梅, 张波, 等. IGBT 模块键合线失效研究[J]. 电源学报, 2016, 14(1): 10-17.
- ZHOU Wendong, WANG Xuemei, ZHANG Bo, et al. Research on failures of bonding wire in IGBTs module[J]. Journal of Power Supply, 2016, 14(1): 10-17(in Chinese).
- [31] 陈民铀, 高兵, 杨帆, 等. 基于电-热-机械应力多物理场的 IGBT 焊料层健康状态研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 252-260.
- CHEN Minyou, GAO Bing, YANG Fan, et al. Healthy evaluation on IGBT solder based on electro-thermal-mechanical analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 252-260(in Chinese).
- [32] 高兵. 基于温度梯度及统计特性的 IGBT 模块失效评估方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- GAO Bing. Study on failure evaluation method of IGBT module based on temperature gradient and statistic characteristic[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016(in Chinese).
- [33] 邓二平. 压接型 IGBT 器件内部电-热-力多物理场耦合模型研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2018.
- DENG Eeping. Modelling the electro-thermo-mechanical multi-physics coupling model for press pack IGBTs[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2018(in Chinese).
- [34] 潘艳, 李金元, 李尧圣, 等. 柔直换流阀用压接式 IGBT 器件物理场建模及内部压强分析[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 40-45.
- PAN Yan, LI Jinyuan, LI Yaosheng, et al. Physical field modeling and internal pressure analysis of press-pack IGBT device based VSC-HVDC converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 40-45(in Chinese).
- [35] 孙海峰, 王亚楠. 基于有限元方法的 IGBT 热模型仿真[J]. 电力科学与工程, 2019, 35(6): 15-22.
- SUN Haifeng, WANG Yanan. IGBT thermal model

- simulation based on finite element method[J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2019, 35(6): 15-22(in Chinese).
- [36] 徐玲, 周洋, 张泽峰, 等. IGBT 模块焊料层空洞对模块温度影响的研究[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2014, 9(2): 125-129.
XU Ling, ZHOU Yang, ZHANG Zefeng, et al. Influence of solder void to thermal distribution of IGBT module[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2014, 9(2): 125-129(in Chinese).
- [37] 赵雨山, 邓二平, 陈彦, 等. 电动汽车用 IGBT 全桥模块(6 in 1)的热耦合作用机制[J]. *中国电机工程学报*, (2020-12-31). <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.201025>.
ZHAO Yushan, DENG Erping, CHEN Yan, et al. Thermal coupling mechanism of IGBT full-bridge module (6 in 1) for electric vehicles[J]. *Proceedings of the CSEE*, (2020-12-31). <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.201025>(in Chinese).
- [38] 李安琦, 邓二平, 任斌, 等. 不同结构压接型 IGBT 器件压力分布对比[J]. *中国电力*, 2019, 52(9): 10-19, 29.
LI Anqi, DENG Erping, REN Bin, et al. Comparison of clamping force distribution within press-pack IGBTs of different structures[J]. *Electric Power*, 2019, 52(9): 10-19, 29(in Chinese).
- [39] BAHMAN A S, IANNUZZO F, UHRENFELDT C, et al. Modeling of short-circuit-related thermal stress in aged IGBT modules[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, 53(5): 4788-4795.
- [40] 张经纬, 邓二平, 赵志斌, 等. 压接型 IGBT 器件单芯片子模组功率循环试验仿真[J]. *半导体技术*, 2017, 42(10): 736-743.
ZHANG Jingwei, DENG Erping, ZHAO Zhibin, et al. Power cycling test simulation for the single-chip submodule of press-pack IGBTs[J]. *Semiconductor Technology*, 2017, 42(10): 736-743(in Chinese).
- [41] 张雪垠. 基于 FEM 的功率 IGBT 模块功率循环可靠性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
ZHANG Xueyin. Research on IGBT module power cycling reliability based on FEM method[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014(in Chinese).
- [42] 周静, 康升扬, 李辉, 等. 内部压力不均对压接式 IGBT 器件电热特性的影响分析[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(16): 3408-3415.
ZHOU Jing, KANG Shengyang, LI Hui, et al. Simulation of influence of unbalanced clamping force on electro-thermal characteristics of press-pack IGBT devices[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(16): 3408-3415(in Chinese).
- [43] 赵子豪. 压接式 IGBT 多物理场模型与封装压力均衡研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
ZHAO Zihao. Research on multi-physics model and clamping pressure balance of press-pack IGBTs[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019(in Chinese).
- [44] 邓真宇, 陈民铀, 赖伟, 等. 多芯片并联压接式 IGBT 热-力不均对电流分布的影响分析及建模[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(23): 7699-7710.
DENG Zhenyu, CHEN Minyou, LAI Wei, et al. Analysis and modeling of the influence of thermal-force unevenness of multi-chip parallel press-pack IGBT devices on current distribution[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(23): 7699-7710(in Chinese).
- [45] 顾妙松, 崔翔, 彭程, 等. 电极结构与空间布置对压接型 IGBT 器件内部多芯片并联均流的影响(I): 计算研究[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(7): 2318-2329.
GU Miaosong, CUI Xiang, PENG Cheng, et al. Influence of electrode structure and arrangement on current sharing performance inside a multi-chip press-pack IGBT device (part I): analysis and calculation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(7): 2318-2329(in Chinese).
- [46] 顾妙松, 崔翔, 彭程, 等. 外部汇流母排对压接型 IGBT 器件内部多芯片并联均流特性的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(1): 234-245.
GU Miaosong, CUI Xiang, PENG Cheng, et al. Influence of the external busbar on current sharing performance inside a multi-chip press-pack IGBT device[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(1): 234-245(in Chinese).
- [47] 张霁方. 基于有限元法的 IGBT 模块封装散热性能及热应力的仿真研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
ZHANG Rufang. Simulation on thermal performance and thermal stress based on finite element method[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015(in Chinese).
- [48] SUH I W, JUNG H S, LEE Y H, et al. Numerical prediction of solder fatigue life in a high power IGBT module using ribbon bonding[J]. *Journal of Power Electronics*, 2016, 16(5): 1843-1850.
- [49] 黄西平, 张良钰, 孙强, 等. 高频窄脉冲工况下 IGBT 瞬时热场的有限元分析[J]. *计算机仿真*, 2013, 30(8): 113-115, 134.
HUANG Xiping, ZHANG Liangyu, SUN Qiang, et al. Finite element analysis of IGBT transient thermal field of high frequency narrow pulse condition[J]. *Computer Simulation*, 2013, 30(8): 113-115, 134(in Chinese).
- [50] 郑重, 杜赫, 邱馨仪, 等. 高压直流断路器用压接式 IGBT 芯片封装设计[J]. *智慧电力*, 2018, 46(10): 55-62.

- ZHENG Zhong, DU He, HAO Xinyi, et al. Packing design for press pack IGBT used in HVDC breaker[J]. Smart Power, 2018, 46(10): 55-62(in Chinese).
- [51] 李辉, 龙海洋, 姚然, 等. 不同封装形式压接型 IGBT 器件的电-热应力研究[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(8): 76-84.
- LI Hui, LONG Haiyang, YAO Ran, et al. Study on electro-thermal stress of press pack IGBT devices with different package forms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(8): 76-84(in Chinese).
- [52] RAJAGURU P, LU H, BAILEY C, et al. Electro-thermo-mechanical modelling and analysis of the press pack diode in power electronics[C]//2015 21st International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC). Paris: IEEE, 2015: 1-6.
- [53] RAJAGURU P, ORTIZ-GONZALEZ J A, LU Hua, et al. A multiphysics modeling and experimental analysis of pressure contacts in power electronics applications[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2017, 7(6): 893-900.
- [54] JI Bing, SONG Xueguang, SCIBERRAS E, et al. Multiobjective design optimization of IGBT power modules considering power cycling and thermal cycling[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2493-2504.
- [55] 曾正, 李晓玲, 林超彪, 等. 功率模块封装的电-热-力多目标优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(17): 5161-5171.
- ZENG Zheng, LI Xiaoling, LIN Chaobiao, et al. Electric-thermal-stress oriented multi-objective optimal design of power module package[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(17): 5161-5171(in Chinese).
- [56] 李武华, 陈玉香, 罗皓泽, 等. 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 Wuhua, CHEN Yuxiang, LUO Haoze, et al. 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).
- [57] 李辉, 刘盛权, 李洋, 等. 考虑多热源耦合的风电变流器 IGBT 模块结温评估模型[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2): 51-56.
- LI Hui, LIU Shengquan, LI Yang, et al. Junction temperature evaluation model for IGBT module of wind-power converter considering multi-thermal coupling[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 51-56(in Chinese).
- [58] ZHENG Libing, HAN Li, LIU Jun, et al. Investigation of the temperature character of IGBT solder delamination based the 3-D thermal-electro coupling FEM[C]//2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Chengdu: IEEE: 2010: 1-4.
- [59] 翟超, 郭清, 盛况. IGBT 模块封装热应力研究[J]. 机电工程, 2013, 30(9): 1153-1158.
- ZHAI Chao, GUO Qing, SHENG Kuang. Research of thermal stress in IGBT module[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2013, 30(9): 1153-1158(in Chinese).
- [60] GAO Bing, YANG Fan, CHEN Minyou, et al. A temperature gradient-based potential defects identification method for IGBT module[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3): 2227-2242.
- [61] 陈民铀, 陈一高, 高兵, 等. 计及焊料层疲劳累积效应的 IGBT 模块寿命评估[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(20): 6053-6061.
- CHEN Minyou, CHEN Yigao, GAO Bing, et al. Lifetime evaluation of IGBT module considering fatigue accumulation of solder layers[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(20): 6053-6061(in Chinese).
- [62] 赖伟. 计及低强度热载荷疲劳累积效应的 IGBT 功率器件寿命模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- LAI Wei. Study on lifetime modeling of IGBT module considering fatigue accumulative effect of narrow junction temperature cycles[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016(in Chinese).
- [63] 江南, 陈民铀, 徐盛友, 等. 计及裂纹损伤的 IGBT 模块热疲劳失效分析[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2017, 51(4): 825-833.
- JIANG Nan, CHEN Minyou, XU Shengyou, et al. Thermal fatigue of IGBT module considering crack damage[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2017, 51(4): 825-833(in Chinese).
- [64] 董少华, 朱阳军, 丁现朋. 基于 ANSYS 的 IGBT 模块的失效模式[J]. 半导体技术, 2014, 39(2): 147-153, 158.
- DONG Shaohua, ZHU Yangjun, DING Xianpeng. Failure mode of the IGBT module based on ANSYS[J]. Semiconductor Technology, 2014, 39(2): 147-153, 158(in Chinese).
- [65] 陈杰, 邓二平, 张一鸣, 等. 功率循环试验中开通时间对高压大功率 IGBT 模块失效模式的影响及机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7710-7721.
- CHEN Jie, DENG Eeping, ZHANG Yiming, et al. Influence and mechanism analysis of load pulse duration on failure mode of high power IGBT module under power cycling condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7710-7721(in Chinese).
- [66] TINSCHERT L, ÅRDAL A R, POLLER T, et al. Possible

- failure modes in Press-Pack IGBTs[J]. *Microelectronics Reliability*, 2015, 55(6): 903-911.
- [67] DENG Erping, ZHAO Zhibin, XIN Qingming, et al. Analysis on the difference of the characteristic between high power IGBT modules and press pack IGBTs[J]. *Microelectronics Reliability*, 2017, 78: 25-37.
- [68] 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.
- [69] KÄRKKÄINEN T J, TALVITIE J P, IKONEN O, et al. Sounds from semiconductors-acoustic emission experiment with a power module[C]//2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications. Lappeenranta: IEEE, 2014: 1-6.
- [70] DAVARI P, KRISTENSEN O, IANNUZZO F. Investigation of acoustic emission as a non-invasive method for detection of power semiconductor aging[J]. *Microelectronics Reliability*, 2018, 88-90: 545-549.
- [71] BEJGER A, KOZAK M, GORDON R. Acoustic emission of monolithic IGBT transistors[J]. *New Trends in Production Engineering*, 2018, 1(1): 755-760.
- [72] BEJGER A, KOZAK M, GORDON R. The use of acoustic emission elastic waves as diagnosis method for insulated-gate bipolar transistor[J]. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 2020, 19(4): 186-196.
- [73] 李孟川, 孟志强, 胡毅, 等. 电力电子器件机械应力波的试验研究[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2019, 46(4): 74-79.
- LI Mengchuan, MENG Zhiqiang, HU Yi, et al. Experimental study of mechanical stress wave in power electronics device[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2019, 46(4): 74-79(in Chinese).
- [74] LI Mengchuan, HE Yunze, MENG Zhiqiang, et al. Acoustic emission-based experimental analysis of mechanical stress wave in IGBT device[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(11): 6064-6074.
- [75] 何赞泽, 邹翔, 李孟川, 等. 30V 条件下功率 MOSFET 器件应力波理论与试验研究[J]. *中国电机工程学报*, (2021-01-06). <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.201780>.
- HE Yunze, ZOU Xiang, LI Mengchaun, et al. Theoretical and experimental study on stress wave of power MOSFET under 30 volts[J]. *Proceedings of the CSEE*, (2021-01-06). <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.201780>(in Chinese).
- [76] HE Yunze, LI Mengchuan, MENG Zhiqiang, et al. An overview of acoustic emission inspection and monitoring technology in the key components of renewable energy systems[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 148: 107146.
- [77] 蒋焯, 赵争鸣, 施博辰, 等. 功率开关器件多时间尺度瞬态模型(II): 应用分析与模型互联[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(12): 25-32.
- JIANG Ye, ZHAO Zhengming, SHI Bochen, et al. Multi-time scale transient models for power semiconductor devices (part II): Applications analysis and model connection[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(12): 25-32(in Chinese).
- [78] 檀添, 赵争鸣, 李昂洋, 等. 基于离散状态事件驱动的电力电子瞬态过程仿真方法[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(13): 41-50.
- TAN Tian, ZHAO Zhengming, LI Boyang, et al. Discrete state event driven based methods for transient simulation of power electronic converters[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(13): 41-50(in Chinese).
- [79] 刘宾礼, 罗毅飞, 肖飞, 等. 适用于器件级到系统级热仿真的 IGBT 传热模型[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(13): 1-13.
- LIU Binli, LUO Yifei, XIAO Fei, et al. IGBT thermal model for thermal simulation of device to system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(13): 1-13(in Chinese).
- [80] 马瑜涵, 陈佳佳, 胡斯登, 等. IGBT 电力电子系统小时间尺度动态性能分析与计算的电磁场-电路耦合模型[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(13): 14-22.
- MA Yuhuan, CHEN Jiajia, HU Sideng, et al. A coupled 3D finite element-circuit model for the numerical analysis of small time scale transients of an insulated gate bipolar transistor power electronics device[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(13): 14-22(in Chinese).
- [81] 刘运华, 张波, 谢帆, 等. 多尺度和多物理场的电力电子变换器建模方法初探[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(16): 61-69.
- LIU Yunhua, ZHANG Bo, XIE Fan, et al. Preliminary study on modeling methods with multiscale and multiphysics for power electronic converters[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(16): 61-69(in Chinese).
- [82] SIVALINGAM K, SEPULVEDA M, SPRING M, et al. A review and methodology development for remaining useful life prediction of offshore fixed and floating wind turbine power converter with digital twin technology perspective[C]//2018 2nd International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA). Singapore:

IEEE, 2018: 197-204.
 [83] H N. Digital Twin Modelling of High Voltage DC Generator[D]. Trondheim: NTNU, 2019.
 [84] PENG Yingzhou, ZHAO Shuai, WANG Huai. A digital twin based estimation method for health indicators of DC-DC converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(2): 2105-2118.



耿学锋

在线出版日期: 2021-06-11。

收稿日期: 2021-01-24。

作者简介:

耿学锋(1998), 男, 博士研究生, 研究方向为电气设备的多物理场建模, gengxuefeng_hnu@163.com;



何赟泽

*通信作者: 何赟泽(1983), 男, 副教授, 博士生导师, 湖湘青年英才, 研究方向为状态监测与故障诊断, hejicker@163.com;



李孟川

李孟川(1993), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子装备状态监测与故障诊断, 845827293@qq.com;



任丹彤

任丹彤(1997), 女, 硕士研究生, 研究方向为状态监测与故障诊断, heyzswd@163.com;



邹翔

邹翔(1995), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子状态监测与故障诊断, hnuer@hnu.edu.cn;



赵俊蒙

赵俊蒙(1999), 男, 本科生, 研究方向为状态监测与故障诊断, 827106683@qq.com;



李运甲

李运甲(1983), 男, 副教授, 博士生导师, 研究方向为 MEMS 传感器及 MEMS 器件的封装与系统集成, liyunjia@xjtu.edu.cn。

(责任编辑 吕鲜艳)

An Overview of IGBT Multiphysics Modeling Technology and Application

GENG Xuefeng¹, HE Yunze^{1*}, LI Mengchuan¹, REN Dantong¹, ZOU Xiang¹, ZHAO Junmeng¹, LI Yunjia²

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

2. The State Key Laboratory of Electrical Insulation for Power Equipment (Xi'an Jiao tong University))

KEY WORDS: insulated gate bipolar transistor (IGBT); multi-physics field; modeling technology; condition monitoring; electric-magnetic-thermal-mechanical

The physical field involved in the Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) is very complex. The use of multi-physics modeling and analysis technology (MMAT) can provide greater possibilities for exploring IGBT's failure mechanisms, improving its reliability, and optimizing package design. In addition, the use of MMAT to analyze IGBTs is also aimed to explore the essence of power electronic devices and enriching related theories. This article takes the IGBT multi-physics simulation as the starting point, summarizes the IGBT multi-physics modeling technology and its application status, sorts out the difficulties and limitations of IGBT multi-physics modeling technology, and further discusses the future multi-physics model research direction of IGBT.

As for the IGBT multi-physics modeling technology, it can be divided into three types of models: 1) electro-magnetic coupling, 2) electro-thermal coupling, and 3) electro-thermal-stress coupling according to the coupling mode and application. The electro-magnetic model is mainly used to describe the electrical characteristics of the IGBT and reveal the influence of the IGBT on the external circuit. The electro-thermal model is mainly used to describe the heat conduction law of IGBT under the effect of heating. The electro-thermal-stress model considers the effect of the stress field on the basis of the electrothermal model, which includes the influence of electric and thermal fields on the stress field, as well as the reaction of the stress field on the electric and thermal fields. The interaction of the internal physical fields of the IGBT is summarized in Fig 1. Fig 1(a) and (b) respectively represent the multi-physics coupling relationship in the IGBT module and the press-pack IGBT. Meanwhile, The IGBT multi-physics modeling also encounter the following challenges in the processing of coordinated calculations: 1) Matching of time scales between different physics, 2) Data transfer between different physics and

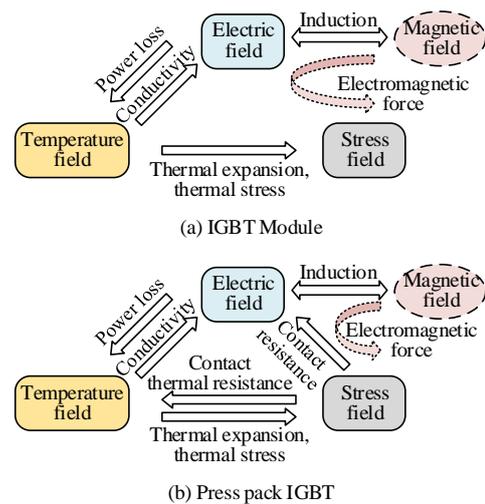


Fig. 1 Multi-physics coupling mode of IGBTs in different packages

3) The problem of iterative convergence.

Furthermore, the typical applications of current multi-physics analysis techniques in IGBTs are summarized, which includes mechanism revealing, packaging optimization, condition monitoring and failure analysis, as shown in Fig. 2. However, the limitations of IGBT multi-physics analysis are also obvious, which are mainly reflected in 1) the poor numerical stability; 2) high dependence on hardware; 3) the relatively lagging development of calculation methods than hardware; and 4) the lack of credibility of the results.

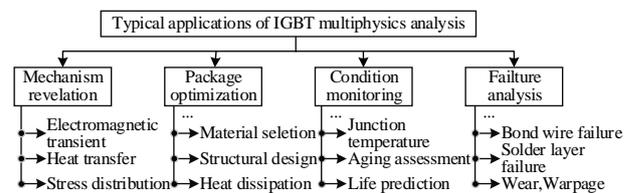


Fig. 2 Typical applications of multi-physics field analysis in IGBT

Finally, the future trends of MMAT are also discussed. These trends mainly include model reduction technology (ROM), nonlinear solution, full electromagnetic and thermal coupling, multi-scale coordination, digital twins and so on.