

NPT 型 IGBT 电热仿真模型参数提取方法综述

徐铭伟,周维维,杜 雄,沈 刚,杨 旭

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044)

摘要: 对 NPT 型 IGBT 电热仿真模型的工作原理进行了概述,并将模型参数分为电参数(即基于半导体物理的 Hefner 器件模型参数)和热参数(即反映器件封装传热的 Cauer 网络参数)两大类,然后对近年来模型参数提取方法的研究情况进行讨论。依据提取技术手段的不同将 IGBT 电参数提取方法归纳为仿真提取、经验估计、参数隔离和参数优化 4 类,并从时效性、准确性、复杂性等方面对各种方法进行了比较和评价;从 IGBT 的封装结构和封装瞬态热阻曲线 2 个方向出发讨论了 Cauer 网络参数的提取。最后讨论了一个模型电参数的提取步骤。

关键词: 绝缘栅双极型晶体管; 电热; 仿真; 模型; 参数提取; 热网络; 电参数; 热参数

中图分类号: TM 322

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.01.026

0 引言

近年来,绝缘栅双极型晶体管 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)因其不断改善的电压、电流承受能力和工作频率、功率损耗等性能指标而被广泛应用到机车牵引、开关电源、新能源发电等电能变换和处理领域中^[1],因此 IGBT 的可靠性受到国内外科研工作者的广泛关注。研究表明,与 IGBT 器件结温(T_j)相关的热循环过程和器件封装材料热膨胀系数不一致是致其故障的主要诱因^[2-3],IGBT 的电热仿真模型可以估计结温的变化情况,从而可用于 IGBT 可靠性的评估。国内外对 IGBT 的电热仿真模型开展了大量研究工作^[4-6],其中基于半导体物理并考虑自热效应(Self-heating)的 IGBT A.R.Hefner 器件模型^[6]和反映其封装传热过程的 Cauer 网络^[7-9]联合组成的 IGBT 电热模型准确度较高,并已在 Saber、Pspice 等电路仿真软件中得到应用^[10-11],但是,仿真软件有限的器件模型库无法满足仿真需要,同时出于技术保密的缘故,半导体制造商并不会提供建立电热模型需要的模型参数,因此如何建立一种有效并准确的参数提取方法就显得十分必要。

IGBT 电热仿真模型参数同半导体物理、器件以及封装结构直接相关,无法直接测量,只能通过一定

的技术方法和手段获取。一个有效的参数提取过程是获得有效的电热模型的前提条件;此外,实现模型参数的准确提取对于分析 IGBT 的性能、优化驱动电路的设计、指导其应用以及选型都具有重要意义。在参数提取之后,有效性验证也至关重要,可以让使用者合理选择器件的工作范围。由于非穿通(NPT)型 IGBT 目前在工业领域中已获得了广泛而成熟的应用^[12],本文将以其作为参数提取的研究对象。

本文从 NPT 型 IGBT 电热仿真模型的工作原理出发,首先将模型参数分为电参数和热参数两大类。然后对近年来模型参数提取方法的研究情况进行讨论,依据提取手段的不同将文献中出现的 IGBT 电参数提取方法归纳为 4 类:仿真提取^[13];经验估计,如利用经验公式^[12,14-18]、数据手册^[15-16]或者参数典型范围^[12];参数隔离^[19-27];参数优化,包括直接搜索技术^[14]、模拟退火算法^[28-29]、变量轮换法^[30-32]等。同时归纳 Cauer 网络的参数提取可以从 IGBT 的封装结构^[8-9,33-34]和封装瞬态热阻曲线^[7,35-36]2 个方向出发,并列表给出了提取电参数和热参数的不同方法之间的优缺点。最后对各种提取方法进行了总结,并讨论了一个模型电参数提取步骤,以增强参数提取工作的有序性和可靠性,这对于提高 IGBT 电热仿真模型的应用水平,扩大其使用范围起到了积极的作用。

1 IGBT 电热仿真模型及其参数

IGBT 的电热仿真模型是建立在考虑了半导体自热效应的 Hefner 物理模型基础之上,耦合了受结温影响的器件模型及与散热路径相关的动态热模型。在分析器件损耗特性、辅助电力电子设计以及研究因器件老化衰退引起的变换器端口特性等方面,

收稿日期:2011-08-09;修回日期:2012-10-19

基金项目:科技部国际合作项目(2010DFA72250);国家自然科学基金资助项目(51077137);输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室重点资助项目(2007DA10512711101);中央高校基本科研业务费资助项目(CDJXS11150022)

Project supported by the International Cooperation Project of the Minister of Science and Technology of China(2010DFA-72250),the National Natural Science Foundation of China(51077137),the Key Program in State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology(2007DA10512711101) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China(CDJXS11150022)

表 1 IGBT 电热仿真模型参数
Tab.1 Parameters of IGBT electro-thermal simulation model

分类	符号	单位	物理描述
几何结构参数	A	cm^2	芯片有效面积
	A_{gl}	cm^2	栅漏极交叠面积
	τ_{HL}	μs	大注入过剩载流子寿命
集电极区参数	I_{sc}	A	发射区电子饱和电流
	N_{B}	cm^{-3}	基区掺杂浓度
	W_{B}	cm	冶金基区宽度
电参数	U_{T}	V	MOS 阈值电压
	K_{psat}	A/V^2	MOS 饱和区跨导
	θ	V^{-1}	横向电场跨导因子
	K_{plin}	A/V^2	MOS 线性区跨导
	C_{gs}	nF	栅源极间电容
	C_{oxd}	nF	栅漏极交叠氧化电容
	τ_{HL1}		τ_{HL} 的温度指数
	I_{sc1}		I_{sc} 的温度指数
	U_{T1}	$\text{V}/^{\circ}\text{C}$	U_{T} 的温度系数
	K_{psat1}		K_{psat} 的温度指数
热参数	K_{phin}		K_{phin} 的温度指数
	热网络参数	R_{thi}	K/W 热阻
		C_{thi}	J/K 热容

热相关参数组成;热参数主要指热网络参数。

在仿真软件当中,IGBT 器件电热模型包括 3 个电气连接端口(栅极 g、集电极 c、发射极 e)和 1 个热连接端口(T_j)^[6]。仿真过程中利用热网络模型实时计算出结温变化并反馈至热连接端口,同时即时修正 IGBT 器件内依赖于结温的器件模型参数及硅(Si)芯片的物理性能,从而影响 IGBT 的开关瞬态和稳态的电气性能,导致开关损耗和通态损耗数值的不断更新,最终会使电路的工作性能也发生变化,其工作过程如图 2 所示。

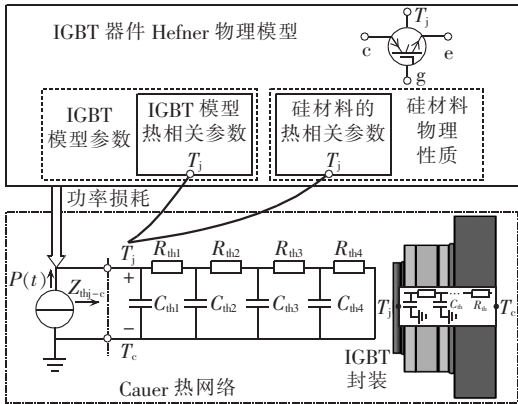


图 2 IGBT 器件电热仿真模型原理图
Fig.2 Schematic diagram of electro-thermal simulation model for IGBT device

2 电参数提取

电参数提取过程是建模 IGBT 的一个重要步骤,提取精度对模型仿真结果有着显著影响。

2.1 参数提取方法

根据参数提取过程的时效性、复杂性、准确性的

不同,IGBT 模型电参数的提取方法可分为 4 类:仿真提取、经验估计、参数隔离、参数优化。本部分主要介绍 Hefner 基本物理模型参数的提取方法,涉及自热效应的热相关参数的提取方法将在下一节简要讨论,因此以下分析将只针对室温 $T_0=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的情况^[6,11]。

2.1.1 仿真提取

通过在一些半导体专业仿真软件(SILVACO、Medici、TSuprem IV 等)中建立 IGBT 器件的工艺模型,然后直接利用工艺仿真之后的器件进行特性仿真,实现工艺仿真和器件仿真的结合,最终从器件仿真得出的特性曲线中提取参数^[13]。

IGBT 工艺仿真模型是建立在对 IGBT 芯片的工艺参数及工艺制作流程掌握的基础之上,建模过程复杂,工艺参数也极难获得,并且部分工艺参数本身就是模型参数,这种方法虽然避免了复杂的参数提取实验,同时基于工艺仿真获得的器件外特性波形更易于为提取参数服务,但是只能对 IGBT 栅极特性参数进行精确提取,而且工艺模型的建立本身就是一个难题。

2.1.2 经验估计

IGBT 建模参数的提取可以依赖参数的经验公式以及半导体制造商产品数据手册(Datasheet)中所包含的工作特性资料,如集-射极最大耐压值 U_{ces} 、关断电流下降时间 $t_{\text{1,off}}$ 、典型的 $I_{\text{c}}-U_{\text{ce}}$ 输出特性曲线(见图 3)、 $U_{\text{gs}}-Q_{\text{g}}$ 栅极充电特性曲线(见图 4)等。表 2 列出了参数提取的部分经验公式^[12,14-18]。

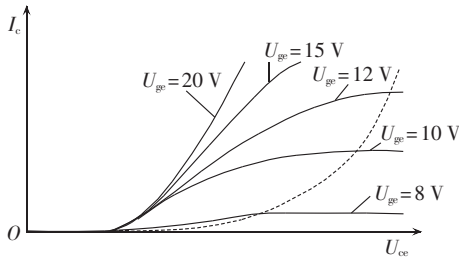


图 3 IGBT 输出特性
Fig.3 Output characteristics of IGBT

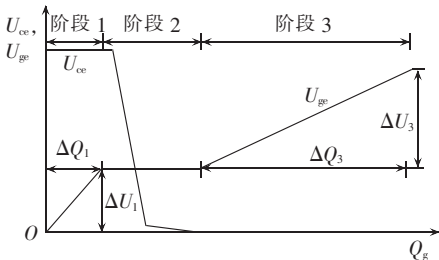


图 4 IGBT 栅极充电特性

Fig.4 Gate charging characteristics of IGBT

经验估计方法操作简单,耗时短,但是由于参数经验公式比较粗糙,数据手册提供的也仅是平均值或者额定瞬态数据,造成这种方法提取到的参数值

表 2 IGBT 模型参数经验公式
Tab.2 Empirical equations of IGBT model parameters

参数	典型取值范围及经验提取公式
A	$A=I_{cm}/J$
τ_{HL}	$t_{1,off}=1.15\tau_{HL}$
I_{sc}	$10^{-14}\sim 10^{-12}\text{ A}$
N_B	$N_B=[60(E_g/1.1)^{3/2}/U_{BR}]^{4/3}\times 10^{16}$ $1/(C_{oes}-C_{res})^2=2U_{ce}/[qN_B\epsilon_{si}(A-A_{gl})^2]$
W_B	$W_B=1.76\times 10^{-6}\times U_{BR}^{1.231}$ $W_B\approx W_{bcj}=\sqrt{2\epsilon_{si}U_{BR}/(qN_B)}$
U_T	同 IGBT 模型状态变量 I_{ms} 函数
K_{Pout}	同 IGBT 模型状态变量 I_{ms} 函数
θ	同 IGBT 模型状态变量 I_{ms} 函数
K_{Pfin}	同 IGBT 模型状态变量 I_{ms} 函数
C_{gs}	$C_{gs}=\Delta Q_1/\Delta U_1$
C_{out}	$C_{out}=\Delta Q_3/\Delta U_3-\Delta Q_1/\Delta U_1$
A_{gl}	$A_{gl}/A\approx\min(C_{res})/\min(C_{oes})$

精度也最低,在大多数情况下,其只被用作参数优化的初值。

2.1.3 参数隔离

采用参数隔离,逐次分离出特定参数影响显著的电气特性并进行相应的电气测量,将测量数据与物理方程进行曲线拟合,确定这些参数的取值。图 5 为 IGBT 模型参数提取方法的序列图^[19-22]。

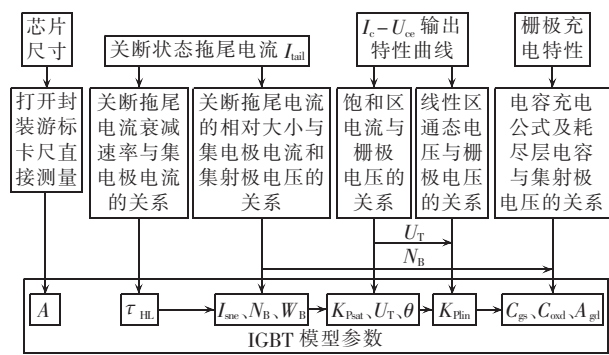


图 5 IGBT 模型参数提取方法的序列图
Fig.5 Procedure of IGBT model parameter extraction

针对参数隔离实验过程中出现的一些问题如关断尖峰电压太大,不利于 τ_{HL} 的提取; N_B 的模型拟合公式较复杂;栅极充电过程的三阶段特性等,一些参数提取改进实验和模型参数拟合的改进公式相继提出,如通过增大栅极关断电阻,充分延长关断过程的电压上升阶段可以抑制尖峰电压, τ_{HL} 提取公式可以简化为式(1)^[12,23]:

$$-\frac{d\ln I_c}{dt}=\frac{1}{\tau_{HL}} \tag{1}$$

根据 IGBT 的拖尾电流随电压的增大而减小,直至随电压变化的空间电荷区扩展到场终止层边缘后保持恒定的特点,一种根据 IGBT 拖尾电流提取 N_B 的新方法被提出^[24],但是这种方法必须事先知道 W_B 的值,可操作性不强;此外,采用恒流源电路对关断状态下的 IGBT 栅极电容充电,从栅极电压充电时的

三阶段特性提取 C_{gs} 、 C_{out} ,并认为此时的米勒平台电压就是开通门槛电压 U_T ,同时提出根据对 IGBT 施加一定的 du/dt 时,内部电容充、放电引起的位移电流特性来提取 A_{gl} ,并设计了一种位移电流测试电路^[25](见图 6),这种方法最大的特点是 A_{gl} 的提取不依赖于 N_B ,而且实验条件也较简单。

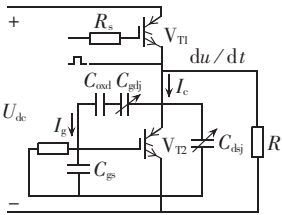


图 6 位移电流测试电路
Fig.6 Test circuit of displacement current

针对参数提取实验多而繁,文献[26-27]设计了一套可重构的参数提取系统,它极大简化了实验的复杂性且具有较高的精度。

通过实验测量 IGBT 的电气特性,隔离并提取到特定参数,这类方法参数取值精度最高,但是实验条件要求苛刻,针对不同参数要分别进行实验测量,同时参数提取方程较复杂。因此改进参数提取实验,积极消除杂散参数的影响;以及进一步优化参数的物理模型方程是参数隔离将要关注的重点。

2.1.4 参数优化

模型参数优化过程就是通过优化算法不断修正参数取值使仿真波形向实测波形逼近的过程,图 7 为参数优化的基本流程。

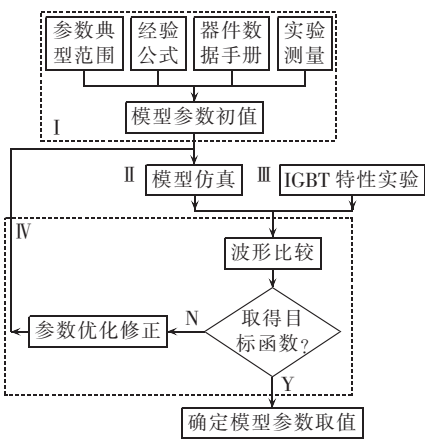


图 7 参数优化过程
Fig.7 Procedure of parameter optimization

参数优化是近些年发展起来的一种参数提取方法,根据图 7,参数优化过程大致分为 4 个部分:提取模型参数初值(I)、获得仿真波形(II)、获得实验波形(III)、参数优化过程(IV),其中参数优化过程是核心。参数优化的目标函数常写成式(2)的形式:

$$y=\sqrt{\sum\left(\frac{x_{sim}-x_{meas}}{x_{meas}}\right)^2} \tag{2}$$

其中, x_{sim} 和 x_{meas} 分别表示优化变量的仿真值和实验值, 它们可以是某个波形 (U_{ce} 、 U_{ge} 、 I_c) 的瞬时采样值^[16, 28-29], 也可以取能够反映波形特征的参数, 如栅极米勒平台电压、开关时间或者开关过程中的电压、电流变化率等^[30-32]。文献[14]认为参数提取最终的目的是准确地估计 IGBT 的功率损耗。本文把 IGBT 对应的开通和关断过程中每个瞬时采样点的电压、电流波形归一化之后幅值的误差平方和作为误差目标函数(见式(3)、(4)), 并通过比较开关损耗的瞬时值来寻找仿真和实验波形的同步点, 从而最终实现该目的。当取得目标函数后, 通过优化算法进行参数优化过程。表 3 列出了 5 种参数优化算法的优缺点。

$$f_e = SSE\left(\frac{U_{ce,on}}{U_{dc}}\right) + SSE\left(\frac{I_{c,on}}{I_c}\right) +$$
$$SSE\left(\frac{U_{ce,off}}{U_{dc}}\right) + SSE\left(\frac{I_{c,off}}{I_c}\right)$$
$$SSE(x) = \sum (x_{sim} - x_{meas})^2$$

(3)

(4)

表 3 优化算法比较

Tab.3 Comparison among optimization algorithms		
优化算法	优点	缺点
最速下降法	方法简单,易于实施和改进	对参数初值较依赖,局部收敛性
模拟退火算法	对变量初值要求不严,易于实现,有较好的全局收敛性	计算时间长,算法自身存在问题(初始温度和退火速度)
遗传算法	编码简单,易于与其他算法综合	收敛速度与全局收敛性存在矛盾,对参数初值依赖度较高
变量轮换法	原理简单,编程容易并且优化过程简便	收敛慢,耗时,参数取值的搜索范围较小
Hooke & Jeeves 算法	收敛速度快,适合于处理参数较多的情况	算法较复杂,对参数初值较依赖

通过参数优化提取模型参数,这种方法实验条件简单,参数取值准确度比较高,但是由于需要提取的模型参数较多,优化算法的运行耗时严重,并常常只能局部收敛,不能获得全局最优值。此外,参数初值的选择以及电压、电流大范围变化时的参数优化取值准确性也是需要考虑的问题。

2.2 电参数提取方法优缺点比较

文中讨论的 4 种电参数提取方法的优缺点总结如表 4 所示,可以看出,各种参数提取方法具有互补

表 4 模型电参数提取方法优缺点

Tab.4 Advantages and disadvantages of model electrical parameter extraction methods		
参数提取方法	优点	缺点
经验估计	操作简单易行,无需实验并且时间周期短	误差最大,针对有限的参数
参数隔离	精度最高,参数提取思想简单,参数提取时间适中	实验条件要求较高,数学处理方法较复杂
参数优化	精度较高,实验条件简单,无需考虑 IGBT 的结构	耗时长,优化算法复杂,还需考虑收敛性和参数初值等问题
仿真提取	精度较高	工艺仿真模型构建复杂且只能用于提取栅极特性参数

性,经验估计可以为参数优化提供初值,从而加快优化算法的计算速度;而对于隔离实验比较复杂的参数利用参数优化来取值,剩下的参数仍进行参数隔离,也可以缩短参数提取过程时间,提高精度。此外,在进行参数提取工作之前,进行敏感性分析,重点关注那些对 IGBT 稳态和瞬态电气特性影响显著的参数^[26, 41-42];在提取到参数数值之后,通过参数有效性验证来辨识在大范围改变电压、电流时参数提取数值的准确性^[30-32],从而可以提高参数提取方法的有序性和可靠性。

2.3 热相关参数的获得

第 1 节列出了 IGBT 模型中受结温影响的参数及其关系式^[11],分别提取到多个结温(25~125℃)下这些参数的数值,然后利用相关表达式进行曲线拟合,便可以获得这些热相关关系(指数)的取值,从而在 IGBT 器件模型中融入了自热效应。

3 热参数提取

IGBT 电热模型的热参数主要用来表示 IGBT 由结到壳的热传导过程,主要是反映由结到壳的瞬态热阻的热网络参数^[7-9]。

3.1 热网络参数提取

IGBT 的实际传热结构(由 PN 结到外壳)通常可以利用集中等效的传热模型来描述,主要有 2 种一维等效传热网络^[7-9]:Cauer 网络、Foster 网络,如图 8 所示,热阻、热容(RC)网络可以方便地以电路网络的形式在电路仿真器里实现热电模拟,经常被用于半导体器件的热分析。

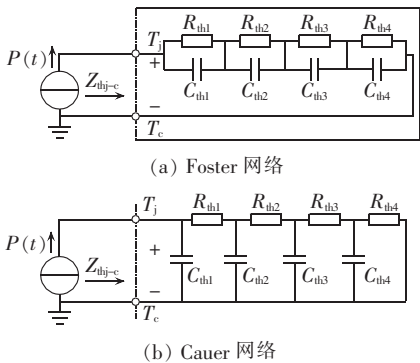


图 8 Foster 和 Cauer 传热网络

Fig.8 Foster thermal network and Cauer thermal network

根据电路等效原理,Cauer 网络总能等值为 Foster 网络,而且 Cauer 网络在一定程度上反映了器件内部传热的物理本质,因此本文以 Cauer 网络作为研究对象来介绍如何提取热网络中热阻、热容的取值,而且热网络应用的意义也在于其能够模仿器件封装结构的瞬态热阻变化。所以 Cauer 热网络参数值的确定可以从器件封装结构和器件封装热响应 2

个方面着手。

3.1.1 根据器件封装几何结构确定 Cauer 热网络参数 [8-9,33-34]

一维热传导是 IGBT 最主要的传热方式,图 9 为 IGBT 器件的典型封装结构,Cauer 网络同其内部传热本质关系紧密,因此网络参数 R_{thi} 、 C_{thi} 可以用来表示 IGBT 从结到壳的各层材料(硅芯片、锡焊层、绝缘衬底、铜基板)的热阻和热容,其取值可以通过各层材料的物理性质和结构参数计算得到,如式(5)、(6)所示。

$$R_{th}=d/(\lambda_{th}S) \tag{5}$$

$$C_{th}=c\rho dS \tag{6}$$

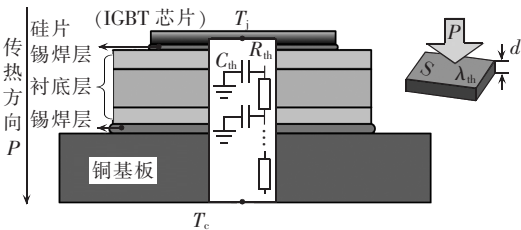


图 9 IGBT 典型封装结构示意图
Fig.9 Typical package structure of IGBT

3.1.2 根据器件封装的瞬态热响应曲线 $Z_{thj-c}(t)$ 确定 Cauer 热网络参数 [7,35-36]

通常功率半导体器件的生产厂商都会在数据手册里给用户 提供器件的瞬态热阻抗曲线,它可以表示为对 IGBT 施加幅度为 P 的单脉冲功率方波直至其结温达到稳态,如式(7)所示:

$$Z_{thj-c}(t)=\frac{T_j(t)-T_c(t)}{P}=\frac{\Delta T_{jc}}{P} \tag{7}$$

从网络的角度来看,Cauer 网络零初始条件下的阶跃响应可以等效为 IGBT 的瞬态热阻抗曲线,并且可以通过一个由网络元素 R 、 C 组成的分析近似函数式(8)来表示:

$$Z_{thj-c}(t)=A_0+\sum_{i=1}^4 A_i e^{-a_i t} \tag{8}$$

其中, A_i 、 a_i 是通过曲线拟合技术获得的常数, R_{thi} 、 C_{thi} 可以通过 A_i 、 a_i 作适当的变化求得。

为了简便,Cauer 网络的转移函数也可以通过拉普拉斯变换转化成频域的形式,如式(9)所示。利用该式在频域内进行曲线拟合就可以直接获得 R_{thi} 和 C_{thi} 的数值。

$$Z_{thj-c}(s)=\{sC_{th1}+[R_{th1}+(sC_{th2}+\cdots+R_{th4}^{-1})^{-1}]^{-1}\}^{-1} \tag{9}$$

3.2 热网络参数提取方法优缺点比较

热参数的提取实现了 IGBT 的动态热电仿真的功能,可以更加真实地模拟其工作性能。本文主要对 Cauer 网络的参数提取方法进行了讨论,各种方法的优缺点如表 5 所示,从表中可以看出,2 类提取方法所需的条件不同,且建立的热网络所实现的功能也

不同,对于 IGBT 电热仿真模型而言,估计到的结温还可以为其可靠性评估服务。

表 5 Cauer 网络参数提取方法优缺点
Tab.5 Advantages and disadvantages of Cauer network parameter extraction methods

参数提取方法	优点	缺点
根据 IGBT 封装结构	可获得各层材料的平均温度	封装结构参数不易获得
根据瞬态热阻曲线	方法简单易行	只能估计结温,瞬态热阻曲线不易获得

4 结论

参数提取是 IGBT 建模过程的一个重要步骤,决定了器件模型仿真的精度。本文概述了 NPT 型 IGBT 电热仿真模型的工作原理,并将模型参数分为电参数和热参数两大类进行了总结。基于以往电参数提取文献的讨论,并根据电参数提取过程的复杂性、时效性、准确性的不同,将电参数提取方法总结为 4 类:经验估计、参数隔离、参数优化、仿真提取。讨论并总结了不同方法的优缺点,根据比较结果,笔者认为未来电参数提取工作的重点将是不同方法的优化与综合,为了提高 IGBT 电热仿真模型的应用水平和扩大其使用范围,同时增强参数提取工作的有序性和可靠性,建议器件模型参数提取可以按照如下步骤进行:

- a. 鉴别所选用的 IGBT 器件的结构类型,确定所需要提取的模型参数;
- b. 进行参数敏感性分析,确定各个参数对 IGBT 工作性能的影响趋势;
- c. 参数提取,确定相应 IGBT 的参数值;
- d. 参数有效性验证,确定参数提取的精度和适用范围。

最后本文介绍了用于描述 IGBT 实际传热结构的一维集总传热网络,从器件封装结构和器件封装热响应 2 个方面考虑了其中 Cauer 网络热阻、热容参数值的提取,并讨论了各个方法的优缺点,从而为实现 IGBT 的结温估计提供了方便。

参考文献:

[1] 王树振,单威,宋玲玲. IGBT 绝缘栅双极晶体管发展简述[J]. 微处理机,2008,29(2):41-43.
WANG Shuzhen,SHAN Wei,SONG Lingling. Development of IGBT[J]. Microprocessors,2008,29(2):41-43.
[2] CIAPPA M. Selected failure mechanisms of modern power modules [J]. Microelectronics Reliability,2002(42):653-667.
[3] YANG Shaoyong,XIANG Dawei,BRYANT A,et al. Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: a review[J]. IEEE Trans on Power Electronics,2010,25(11): 2734-2752.
[4] SHENG Kuang,WILLIAMS B W,FINNEY S J. A review of IGBT models[J]. IEEE Trans on Power Electronics,2000,15

- (6):1250-1266.
- [5] SIGG J, TRKES P, KRAUS R. Parameter extraction methodology and validation for an electro-thermal physics-based NPT IGBT model[C]//IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. New Orleans, USA: IEEE, 1997: 1166-1173.
 - [6] HEFNER A R, GAITHERSBURG M D. A dynamic electro-thermal model for the IGBT[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1994, 30(2): 394-405.
 - [7] BAGNOLI P E, CASAROSA C, CIAMPI M, et al. Thermal Resistance Analysis by Induced Transient (TRAIT) method for power electronic devices thermal characterization-part I: fundamentals and theory[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1998, 13(6): 1208-1219.
 - [8] Infineon. Thermal equivalent circuits model[EB/OL]. (2008-06-15). <http://www.infineon.com/dgdl/AN2008-03+Thermal+equivalent+circuit+models.pdf>.
 - [9] Infineon. Thermal modeling of power-electronic systems[EB/OL]. (2001-04-01). <http://www.infineon.com/dgdl/Thermal+Modeling.pdf?folderId=db3a304412b407950112b426db703ad9&fileId=db3a30431441fb5d011472fd33c70aa3&sId=db3a30433a747525013a9802425f7226>.
 - [10] XIANG Dawei, YANG Shaoyong, LI Ran, et al. Change of terminal characteristics of a Voltage-Source-Inverter(VSI) due to semiconductor device degradation[C]//13th European Conference on Power Electronics and Applications(EPE'09). Barcelona, Spain: [s.n.], 2009: 1-10.
 - [11] REICHL J V. Inverter dynamic electro-thermal simulation with experiment verification[D]. Virginia, USA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005.
 - [12] 李平. NPT型IGBT电气模型及参数提取[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
 - LI Ping. The parameter extraction of NPT IGBT electrical model[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.
 - [13] 杨玲玲. 新颖IGBT器件的设计与建模[D]. 厦门: 厦门大学, 2009.
 - YANG Lingling. Design and modeling of new IGBT devices [D]. Xiamen: Xiamen University, 2009.
 - [14] BRYANT A T, KANG Xiaosong, SANTI E, et al. Two-step parameter extraction procedure with formal optimization for physics-based circuit simulator IGBT and p-i-n diode models[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2006, 21(2): 295-309.
 - [15] KANG X, SANTI E, HUDGINS J L, et al. Parameter extraction for a physics-based circuit simulator IGBT model[C]//IEEE Applied Power Electronics Conference(APEC'03). Miami Beach, FL, USA: IEEE, 2003: 946-952.
 - [16] CHIBANTE R, ARAÚJO A, CARVALHO A. A simple and efficient parameter extraction procedure for physics based IGBT models[C]//Proceedings of 11th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC'04). Riga, Latvia: [s.n.], 2004: 1-9.
 - [17] BALIGA B J. Fundamentals of power semiconductor devices[M]. New York, USA: Springer Press, 2008: 876-887.
 - [18] YUAN S C. Non-destructive parameters extraction for IGBT spice model and compared with measurements[J]. Solid-State Electronics, 2005, 49(1): 123-129.
 - [19] HEFNER A R. Semiconductor measurement technology: INSTANT-IGBT network simulation and transient analysis tool[R]. Washington, USA: U.S. Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, 1992.
 - [20] HEFNER A R, BOUCHÉ J S. Automated parameter extraction software for advanced IGBT modeling[C]//The 7th Workshop on Computers in Power Electronics(COMPEL 2000). Blacksburg, USA: [s.n.], 2000: 10-18.
 - [21] WITHANAGE R, SHAMMAS N, TENNAKON S, et al. IGBT parameter extraction for the Hefner IGBT model[C]//The 41st International Universities Power Engineering Conference(UP-EC'06). Newcastle, England: [s.n.], 2006: 613-617.
 - [22] KARLSSON J. The concept of IGBT modeling and the evaluation of the PSPICE IGBT model[D]. Vaxjo, Sweden: ALSTOM Power, 2002.
 - [23] TANG Yong, CHEN Ming, WANG Bo. An improved method for IGBT base excess carrier lifetime extraction[C]//Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices. Chengdu, China: IEEE, 2009: 206-210.
 - [24] 唐勇, 胡安, 陈明. 场终止型IGBT基区掺杂浓度计算的新方法[J]. 半导体技术, 2009, 34(3): 217-220.
 - TANG Yong, HU An, CHEN Ming. Novel method for calculating base doping concentration of field stop IGBT[J]. Semiconductor Technology, 2009, 34(3): 217-220.
 - [25] 唐勇, 胡安, 陈明. IGBT栅极特性与参数提取[J]. 电工技术学报, 2009, 24(7): 76-80.
 - TANG Yong, HU An, CHEN Ming. IGBT gate characteristics and parameter extraction methods[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2009, 24(7): 76-80.
 - [26] RODRÍGUEZ M A, CLAUDIO A, COTOROGA M, et al. Reconfigurable special test circuit of physics-based IGBT models parameter extraction[J]. Solid-State Electronics, 2010, 54(11): 1246-1256.
 - [27] COTOROGA M, CLAUDIO A, RODRÍGUEZ M A. Parameter extraction method for the PSPICE model of the PT- and NPT-IGBT's by electrical measurement[C]//Proceedings of IEEE International Power Electronics Conference(CIEP2002). Guadalajara, Mexico: IEEE, 2002: 101-106.
 - [28] CHIBANTE R, ARAÚJO A, CARVALHO A. A FEM punch-through IGBT model using an efficient parameter extraction method[C]//Proceedings of IEEE Conference on Industrial Electronics Society. Raleigh, USA: IEEE, 2005: 679-684.
 - [29] CHIBANTE R, ARAÚJO A, CARVALHO A. Finite-element modeling and optimization-based parameter extraction algorithm for NPT-IGBTs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(5): 1417-1427.
 - [30] 高艳霞, 郭水保, 陈伯时. IGBT的数理仿真模型及其参数辨识[J]. 电力电子技术, 2006, 40(5): 135-137.
 - GAO Yanxia, GUO Shuibao, CHEN Boshi. Mathematical-physical simulation model of IGBT and its parameter identification[J]. Power Electronics, 2006, 40(5): 135-137.
 - [31] 郭水保. IGBT参数辨识及其有效性验证[D]. 上海: 上海大学, 2006.
 - GUO Shuibao. The parameters identification and validation of IGBT[D]. Shanghai: Shanghai University, 2006.
 - [32] 苗盈瀛. 基于优化算法的IGBT模型参数辨识及其有效性验证[D]. 上海: 上海大学, 2007.

- MIAO Yingying. The parameter identification and validation of the IGBT model based on optimization algorithm[D]. Shanghai: Shanghai University, 2007.
- [33] HU Wei, WEN Xuhui, WEN Huiqing, et al. Research on loss model and junction temperature of IGBT for electric vehicles using PSPICE[C]//International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2008). Wuhan, China; [s.n.], 2008: 4123-4126.
- [34] BARTRAM M, SCHREY M, KUHN H, et al. A new approach to optimize IGBT-heatspreader-combinations allows "real-time" simulation of IGBT-chip-temperature[C]//35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Aachen, Germany: IEEE, 2004: 1450-1456.
- [35] RAJAPAKSE A D, GOLE A M, WILSON P L. Electromagnetic transients simulation models for accurate representation of switching losses and thermal performance in power electronic systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(1): 319-327.
- [36] LUO Zhaohui, AHN H, NOKALI M A E. A thermal model for insulated gate bipolar transistor module[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19(4): 902-907.
- [37] 李强, 林明耀, 胡敏强, 等. 基于 PSPICE 仿真的 IGBT 功耗计算[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(1): 31-33.
- LI Qiang, LIN Mingyao, HU Minqiang, et al. IGBT power loss estimation based on PSPICE simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(1): 31-33.
- [38] 熊妍, 沈燕群, 江剑, 等. IGBT 损耗计算和损耗模型研究[J]. 电源技术应用, 2006, 9(5): 55-60.
- XIONG Yan, SHEN Yanqun, JIANG Jian, et al. Study on loss calculation and model for IGBT[J]. Power Supply Technologies and Applications, 2006, 9(5): 55-60.
- [39] MANTOOTH H A, HEFNER A R J. Electro-thermal simulation of an IGBT PWM inverters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1997, 12(3): 474-484.
- [40] HEFNER A R. Device models, circuit simulation, and computer-controlled measurement for the IGBT [C]//IEEE Workshop Computers in Power Electronics. [S.l.]: IEEE, 1990: 233-243.
- [41] 李南, 高艳霞, 龚幼民. IGBT 模型参数变化对外特性的影响分析[C]//上海市电机工程学会 2006 年学术年会. 上海, 中国: [出版者不详], 2006: 68-71.
- LI Nan, GAO Yanxia, GONG Youmin. The external characteristics analysis of IGBT based model parameters change[C]//2006 Annual Conference of the Shanghai Society of Electrical Engineering. Shanghai, China; [s.n.], 2006: 68-71.
- [42] 陈永淑, 周维维, 周生奇. IGBT 器件可靠性评估中建模及参数提取研究[J]. 电力电子, 2010(3): 70-74.
- CHEN Yongshu, ZHOU Luowei, ZHOU Shengqi. Investigation on the IGBT modeling and parameter extraction for reliability assessment[J]. Power Electronics, 2010(3): 70-74.

作者简介:

徐铭伟(1986-), 男, 河南平顶山人, 硕士研究生, 研究方向为电力电子器件建模与仿真(E-mail: xumingwei@cqu.edu.cn);

周维维(1954-), 男, 四川都江堰人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 研究方向为电力电子技术、电路理论及应用、电能质量分析与控制等;

杜 雄(1979-), 男, 湖北宜昌人, 教授, 博士, 研究方向为电力电子拓扑与控制、电能质量监测与治理、新能源发电;

沈 刚(1984-), 男, 四川自贡人, 硕士研究生, 研究方向为电力电子器件可靠性状态评估;

杨 旭(1986-), 男, 四川自贡人, 硕士研究生, 研究方向为电力电子器件可靠性在线监测。

Review of parameter extraction methodology for electro-thermal simulation model of NPT IGBT

XU Mingwei, ZHOU Luowei, DU Xiong, SHEN Gang, YANG Xu

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The working principle of the electro-thermal simulation model for NPT-IGBT is outlined. Its parameters are grouped into electrical parameters(semiconductor physics-based Hefner IGBT model parameters) and thermal parameters(Cauer network parameters for device package heat transfer). The recent parameter extraction methods are discussed and divided into four classes according to the extraction techniques: extraction simulation, empirical estimation, parameter isolation and parameter optimization, which are compared and evaluated in timeliness, accuracy and complexity. The Cauer network parameter extraction is discussed in two aspects: IGBT encapsulation structure and transient thermal resistance curve. An effective procedure of model parameter extraction is discussed.

Key words: insulated gate bipolar transistors; electro-thermal; computer simulation; models; parameter extraction; thermal network; electrical parameter; thermal parameter