

基于傅里叶级数的功率器件热模型研究

针对功率器件热建模速度与准确度相互制约问题,研究了一种基于傅里叶级数的功率器件热建模仿真方法。方法采用傅里叶级数求解热传导方程以获取器件内部温度分布函数,求解过程建模简单,且容易与电路模型共同建立热电仿真模型。采用Matlab/Simulink平台,建立了一维热电仿真模型。仿真结果表明:该方法仿真同时具备速度快、准确度高的优点。

王嘉炜 陈 丽 唐圣学/河北工业大学电磁场与电器可靠性省部共建重点实验室

0 引言

电力电子等功率器件被广泛应用于电源、电力系统以及电动机驱动等行业领域,对保证其安全可靠运行具有重要意义。现有研究表明,功率器件可靠性主要依赖于器件结温,器件结温每上升 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,其失效率增加1倍。功率器件工作时会产生热量,热量经过封装材料向外传递,因模块内部各种材料之间热膨胀系数不同,材料间会产生不同的机械应力,导致器件失效。通过建模仿真,有助于准确掌握器件内部热分布,有利于功率器件的封装设计,提高功率器件的使用可靠性。

目前,功率器件热建模仿真方法主要有两种:基于物理模型的方法和基于 $R-C$ 热网络模型的方法。基于物理模型方法,如有限元法(FEM),能够建立功率模块复杂的封装结构模型^[1-2],并能获取准确的结果。但是建模复杂,仿真周期长,难以用于功率变换系统级仿真,难与电路仿真软件结合使用。基于

$R-C$ 热网络模型方法虽得到了广泛的应用^[3-5],能方便用于电路仿真软件之中,但是不能获取器件内部各点温度分布,也不能进行多热源分析。另外,热分析之前,必须采用基于物理模型的有限元法或其他参数提取方法提取 $R-C$ 热网络参数,每次封装结构的改变都需重新提取参数^[6]。

本文基于器件的物理结构,以IGBT模块为例,研究了一种功率器件的建模仿真方法。方法利用傅里叶级数求解热传导方程,获取功率模块内部的热分布,具有热分布求解过程简单、易于与电路模型结合仿真的优点。采用Matlab/Simulink平台,建立了IGBT一维热电仿真模型。该方法能够获取器件内部各点暂态热响应,能适用不同封装结构仿真,且仿真速度快,准确度高。本文详细论述了基于傅里叶级数的热传导问题求解过程及建模方法,以一维热模型为例,讨论了热量在多个封装材料层之间过渡问题。最后,进行了仿真验证,并与有限元模型进行了比较。

1 功率模块的热传导

1.1 IGBT模块的结构

IGBT模块主要包括:IGBT芯片、续流二极管(Freewheeling Diode, FWD)半导体芯片、底板、基板、焊料、硅胶和硬塑壳体等。其中,IGBT、FWD半导体芯片是模块实现功率处理功能的核心部件;基板,即覆铜陶瓷基板(Direct Copper Bonded, DCB),起绝缘和导热



王嘉炜/硕士研究生

关键词/Keywords

热模型·
傅里叶级数·
IGBT·
封装·

国家自然科学基金项目(51477040、51377044)。

作用；底板由铜板或铝板制成，起机械支撑和散热作用。典型的IGBT封装模块物理结构如图1所示。

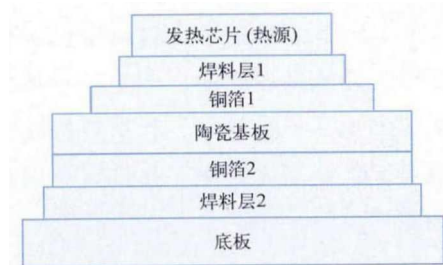


图1 IGBT模块物理结构

1.2 热传导方程

器件工作时，芯片产生热量，热量沿图1所示材料层由中心向外层传递，是一个多层热传导问题。描述热传导物理现象规律的是热传导定理，也是热模型搭建的出发点。以图1一维热分布 $T(x,t)$ 为例，可得单材料层的1-D热传导方程^[7]

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + \frac{\alpha}{k} q(x,t) = \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中， α 为材料层的热扩散率， $\alpha = k/(c\rho)$ ； t 为时间变量； x 为空间变量； k 为热传导率； ρ 为质量密度； c 为材料热容； q 代表热源。

式(1)的初始条件为

$$T(x,t)|_{t=0} = \varphi(x) \quad (2)$$

$\varphi(x)$ 为已知，是 $t=0$ 时器件的温度分布。其边界条件分为三类。

1) 规定了边界上的温度值

$$T(x,t)|_{x=x_0} = \Psi_1(t) \quad (3)$$

式中， $\Psi_1(t)$ 为器件边界温度分布，是已知函数。

2) 规定了边界上的热流密度值

$$T_x(x,t)|_{x=x_0} = \Psi_2(t) \quad (4)$$

式中， $\Psi_2(t)$ 为器件边界热流密度值，是已知函数。

3) 规定了边界面与周围流体间的表面换热系数 H 和周围流体的温度

$$T(x,t)|_{x=x_0} + HT_x(x,t)|_{x=x_0} = \Psi_3(t) \quad (5)$$

式中， $\Psi_3(t)$ 为周围流体的温度，是已知函数。

针对图1所示结构，为了简化，假设整个封装层的初始温度为 T_0 ，即初始条件为

$$T(x,t)|_{t=0} = T_0 \quad (6)$$

热流从顶部向下流动，所以边界条件可表示为

$$T_x(x,t)|_{x=0} = q(t) \quad (7)$$

式中， $q(t)$ 为电路中功率损耗值。

2 基于傅里叶级数热建模

2.1 热传导傅里叶求解

对于式(1)和边界条件2)求解的问题，将 $T(x,t)$ 展开为傅里叶级数，即

$$T(x,t) = \sum_{m=0}^{\infty} T_m(t) \cos\left(\frac{m\pi x}{W}\right) \quad (8)$$

将式(8)代入式(1)可得

$$\sum_{m=0}^{\infty} \left[T_m'(t) + \frac{m^2 \pi^2 \alpha^2}{W^2} T_m(t) \right] \cos \frac{m\pi x}{W} = q(x,t) \quad (9)$$

将式(9)右边也展开为傅里叶余弦级数可得

$$\sum_{m=0}^{\infty} \left[T_m'(t) + \frac{m^2 \pi^2 \alpha^2}{W^2} T_m(t) \right] \cos \frac{m\pi x}{W} = \sum_{m=0}^{\infty} q_m(t) \cos \frac{m\pi x}{W} \quad (10)$$

式中， $q_m(t)$ 为 $q(x,t)$ 的傅里叶余弦级数的第 m 个傅里叶系数。比较两边的系数，可得 $T_m(t)$ 的微分方程如下。

1) $m > 0$ 时

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{2\alpha}{W} \left[\frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x=0} (-1)^m - \frac{\partial T}{\partial x} \bigg|_{x=0} - \frac{\alpha \pi^2 m^2}{W^2} T_m(t) \quad (11)$$

2) $m = 0$ 时

$$\frac{dT_0(t)}{dt} = \frac{\alpha}{W} \left[\frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x=0} - \frac{\partial T}{\partial x} \bigg|_{x=0} \quad (12)$$

将初始条件式(2)代入式(1)，得

$$\sum_{m=0}^{\infty} T_m(0) \cos \frac{m\pi x}{W} = \varphi(x) = \sum_{m=0}^{\infty} \varphi_m \cos \frac{m\pi x}{W} \quad (13)$$

式中， φ_m 为 $\varphi(x)$ 的傅里叶余弦级数的第 m 个傅里叶系数，由基本函数族 $\cos(m\pi x/W)$ 的正交性可知，式(11)两边对应的同一基本函数的傅里叶系数必然相等，于是得到 $T_m(t)$ 的非零初始条件为

$$T_0(0) = \varphi_0 = \frac{1}{W} \int_0^W \varphi(x) dx \quad (14)$$

$$T_m(0) = \varphi_m = \frac{2}{W} \int_0^W \varphi(x) \cos \frac{m\pi x}{W} dx \quad (15)$$

2.2 热电模型实现

图2为采用Simulink平台下Plecs工具箱搭建的基于傅里叶级数的单材料层一维IGBT热电模型。其中,图2a为一个Buck电路,电路中功率器件损耗采用了Plecs工具箱中的查表方法计算,具有速度快、准确度高的特点;图2b为利用Plecs工具箱中的Probe探针模块测量器件损耗功率,测量输出即为基于傅里叶热模型的输入热流 P_{in} ,其中矩阵 A

和 B 由封装层的材料特性以及几何尺寸决定。热模型输出为傅里叶级数系数,经过利用式(8)可得到各个材料层温度分布。

需要指出的是,根据每层材料接触面积是相同的,假设热接触是理想的,即上层材料层流出的热量全部流入下一材料层,且材料层接触面边界温度相同,这样简化处理了热量在不同材料层的传导问题。

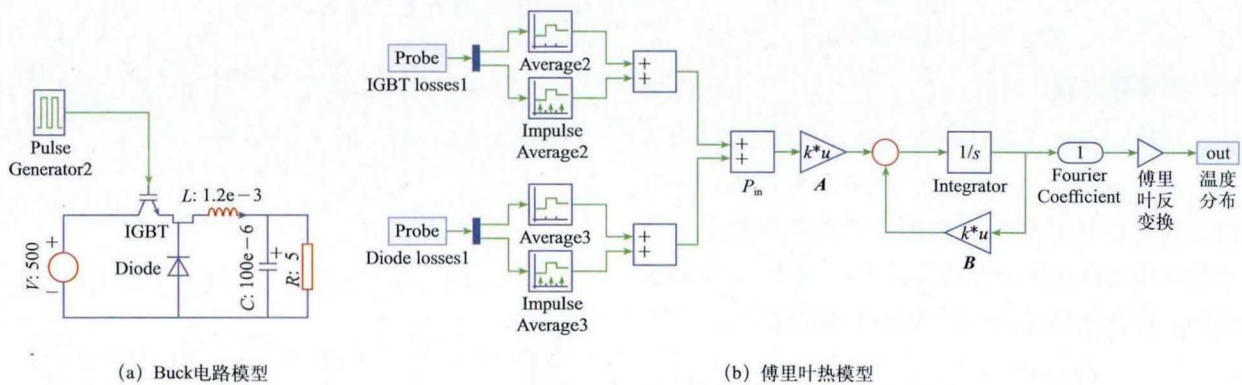


图2 单层1-D傅里叶热电模型

3 仿真实例

为了验证本文方法的有效性,以IGBT模块为例,搭建一维热分布仿真模型。其材料层参数和厚度分别如表1和表2所示。

表1 材料参数

材料	热导率 k /[W/(m·K)]	密度/(kg/m ³)	比热容 C /[J/(kg·K)]
硅片	147	2 330	712
氮化铝	180	3 260	800
铜	401	8 930	385
焊料	60	8 510	134

表2 材料厚度

材料	硅芯片	焊料层1	铜箔1	基板	铜箔2	焊料层2	底板
厚度	0.25	0.05	0.3	0.64	0.3	0.08	3

(单位: mm)

为了简化分析,首先考虑单材料层热仿真。设硅片的厚度为250 μm ,导热面积为1 cm^2 ,损耗功率固定100 W,则热流量为100 W/cm^2 。傅里叶级数项 $m=7$,热流量持续输入时间为1.5 ms,图3为不同位置和时刻仿真结果。为了比较,图3中还给出了采用有限元软件Flotherm仿真的结果。从图

3可见,结果很接近,差异最大不超过5%,说明本文方法准确度高。并且,本文方法仿真时间只需7 ms,而Flotherm有限元模型仿真时间为8'16",说明本文方法速度快。

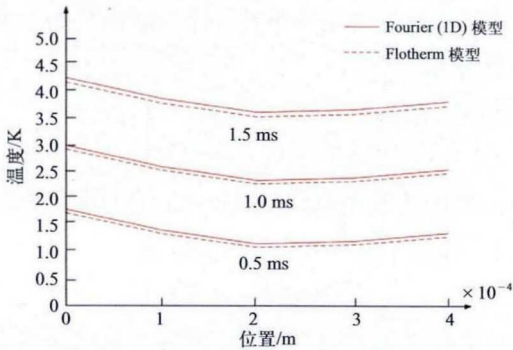


图3 1-D Fourier热模型和Flotherm仿真结果比较

为了进一步说明本文方法的有效性,本文进行了多层材料的一维热仿真,其中热流量仍为100 W/cm^2 材料层参数同表1和表2,持续时间为1~3 s。为了准确获取温度分布,取各层材料上的点为温度观测点,如图4所示。图5为其中3个监测点温度在5 s内的变化情况。由图5可看出,本文方

法所得结果与Flotherm的结果非常接近,为了获取较高准确度, Flotherm模型中取了978 944个网格单元,仿真时间达18'55",而本文模型中傅里叶阶数只需取到3,即取 $m=3$,仿真时间只需80 ms。因此,本文方法具有速度快,准确度高的优点。为了更清楚地观察所选监测点在热流刚输入时温度的暂态响应,图6为更为准确的温度暂态响应过程。

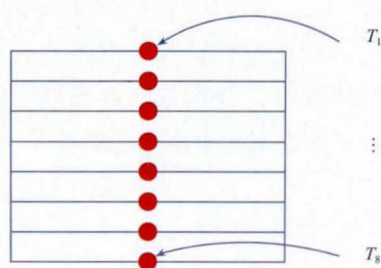


图4 材料交界处的监测点

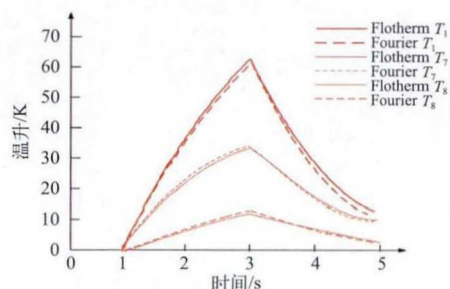


图5 1-D Fourier热模型与FLOTHERM仿真结果比较

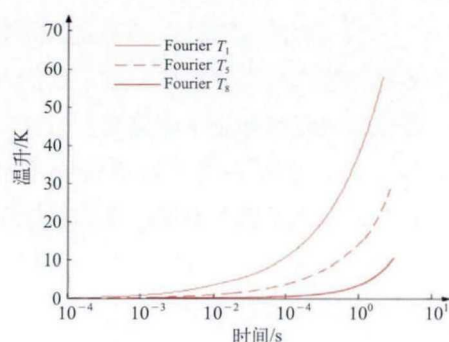


图6 温升暂态响应

4 结束语

提出了采用Simulink平台的功率器件、基于傅里叶级数热仿真建模方法。方法采用傅里叶级数原理搭建热仿真模型,具有建模简单,仿真速度快,精度高的优点。以一维IGBT为例进行了验证,并与有限元法进行比较,表明本方法有效可行。

参考文献

- [1] 郑利兵, 韩立, 刘钧, 等. 基于三维热电耦合有限元模型的IGBT失效形式温度特性研究 [J]. 电工技术学报, 2011, 26 (7): 242-246.
- [2] 郑军, 王晓宝, 关艳霞. 基于Ansys的大功率IGBT 模块内部传热研究 [J]. 电力电子技术, 2011, 45 (1): 104-105.
- [3] 陈明, 胡安, 唐勇, 等. 绝缘栅双极型晶体管传热模型建模分析 [J]. 高电压技术, 2011, 37 (2): 453-459.
- [4] 胡建辉, 李锦庚, 邹继斌, 等. 变频器中的 IGBT 模块损耗计算及散热系统设计 [J]. 电工技术学报, 2009, 24 (3): 159-163.
- [5] 黄佐流. 变压器油导向冷却方法的流体及传热分析 [J]. 电气工程学报, 2015, 10 (12): 50-57.
- [6] Ciappa M, Fichtner W, Kojima T, et al. Extraction of accurate thermal compact models for fast electro-thermal simulation of IGBT modules in hybrid electric vehicles [J]. Microelectronics Reliability, 2005, 45 (9): 1694-1699.
- [7] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.

(收稿日期: 2016-05-09) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告