

The Research of Thermal Steady-State Analysis of Power Electronics Based on ANSYS

Jing MA, Shouzhi LI

Xi'an University of Technology, Xi'an, China

Email: bluejing163@163.com, shouzhili@xaut.edu.cn

Abstract: With the continuous development and application of new energy technologies of power system, power electronic technology of power conversion and control is becoming more important. And the temperature is one of the main factors affecting power electronic equipment performance. ANSYS is finite element analysis software with powerful functions in thermal analysis. Fundamental principles and methods of ANSYS thermal analysis are introduced, then analyses the power electronics devices' temperature and its transmission in this article. And obtain temperature field distribution; this is very important for the reasonable design of the heat dissipation for the power electronics devices.

Keywords: ANSYS; finite element; power electronics; thermal analysis

基于 ANSYS 的电力电子热稳态分析的研究

马静, 李守智

¹西安理工大学, 陕西省西安市, 中国, 710048

Email: bluejing163@163.com, shouzhili@xaut.edu.cn

摘要:随着电力系统中新能源技术的发展与应用, 作为电能转换与控制的电力电子技术也越来越重要。而温度是影响电力电子装置性能发挥的重要因素之一。ANSYS 作为有限元分析软件, 在热分析方面具有强大功能。本文在介绍 ANSYS 热分析基本原理与方法的基础上, 对电力电子器件的温度及其传递进行了分析, 给出了温度场分布图, 这对于电力电子器件合理的散热设计十分重要。

关键词: ANSYS; 有限元; 电力电子; 热分析

1 引言

随着现代科学技术的发展, 新能源技术的不断涌现, 人们对其应用越来越关注。风力发电、光伏发电等是近多年的研究热点, 并在电力系统中发挥着日益重要作用。同时对应用于该系统电路中庞大数量的电子元件, 由于不合理的散热设计导致装置体积过大、集成度差、成本增加甚至工作可靠性降低等问题, 温度则是导致这些原因的一个重要因素。如, 局部温度过冷或过热会导致电子器件变形甚至损坏, PN 结的温度也决定了器件容许电流的大小^[1]等等。

热分析主要用于系统或部件的热场分析及热物理参数计算, 如热量大小、热量损失、热梯度和热流密度等。由此可以分析影响温升参数的大小, 从而保证不至于因损耗散发的热量导致器件温度过高而损坏。在器件封装以及装置构成上, 可以根据温度场分布情况来研究散热器的大小及安装, 以及散热参数与方式设计, 包括

一些水冷或风冷流速的大小。

本文应用有限元方法来描述电子元件的几何形状和定解条件获得该元件的温度载荷变化时温度分布的动态模拟图。

2 三维温度场的有限元数学模型

2.1 热传导的数学模型

温度场是研究温度在空间某一瞬间分布的物理量, 它是一个标量场。温度场不随时间变化时称为稳定温度场, 其函数表达式为:

$$T = T(x, y, z) \quad (2-1)$$

式中: T——温度;

x, y, z——空间坐标。

具有稳定温度场的热传导称为稳定热传导。温度随空间位置的变化, 可以用梯度 ∇T 表示, 则在单位时间内, 通过微元面积 ds 的热量可表示为:

$$dT = -\lambda \nabla T \cdot \bar{n} \cdot ds \quad (2-2)$$

式中： λ ——导热系数。

若物体具有内热源，单位时间单位面积内的内热源发热量为 q_v ，则固体热传导方程为：

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + q_v \quad (2-3)$$

式中：

c ——物体的比热容；

ρ ——物体的密度。

当温度变化与时间无关时，处于稳定导热过程时，上式可变为：

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla T) = -q_v \quad (2-4)$$

2.2 定解条件及有限元方程

定解条件及附加初始条件和边界条件，确定了这些条件之后，才能得到唯一的稳定解。由于环境的多变性，一般情况下将边界条件分为三类^[2]：

- 第一类边界条件

第一类边界条件是指物体边界上的温度函数为已知，用公式表示为：

$$T|_{\Gamma} = T_0; \quad T|_{\Gamma} = f(x, y, z, t) \quad (2-5)$$

式中： Γ ——物体边界；

$T|_{\Gamma}$ ——已知温度；

- 第二类边界条件

第二类边界条件是指物体边界上的热流密度为已知，用公式表示为：

$$-k \frac{\partial T}{\partial n}|_{\Gamma} = q; \quad -k \frac{\partial T}{\partial n}|_{\Gamma} = g(x, y, z, t) \quad (2-6)$$

式中： q ——热流密度(常数)；

$g(x, y, z, t)$ ——热流密度函数。

- 第三类边界条件

第三类边界条件是与物体相接触的流体介质的温度和换热系数已知，用公式表示为：

$$-k \frac{\partial T}{\partial n}|_{\Gamma} = \alpha(T - T_f)|_{\Gamma} \quad (2-7)$$

式中： T_f ——流体介质的温度；

α ——换热系数。

- 初始条件

初始条件是指传热过程开始时物体在整个区域中所具有的温度为已知值，用公式表示为：

$$T|_{t=0} = \varphi(x, y) \quad (2-8)$$

式中： $\varphi(x, y)$ ——已知温度函数。

2.3 温度场分布的数学模型

根据上述传导理论，温度场的控制方程为：

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left[\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \right] + Q \quad (2-9)$$

式中： λ ——导热系数；

ρ ——物体密度；

c ——比热容；

Q ——热源强度，指 t 时刻内热生成率的大小。

根据变分原理，上式亦可转化为泛函的极值，取泛函 $I[T(x, y, z, t)]$ 为：

$$I(T) = \iint_{\Omega} \left[\alpha \left(\frac{1}{2} T^2 - T_f T \right) - \bar{q} T \right] ds + \iiint_{\Omega} \left\{ \frac{\lambda}{2} \left[\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \right] + \left(c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - Q \right) T \right\} dx dy dz \quad (2-10)$$

可以证明，此泛函取极小值时所对应的欧拉方程既满足控制方程，同时也满足三类边界条件。

温度场有限元方程的建立：在 R 域内，将待求场域剖分为有限数量个(总数为 e_1)单元，采用线性插值，则单元 e (节点数为 K)内任意点的 T 值均可以近似的用其节点 T 值的线性插值关系来表示，即：

$$\tilde{T}(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^K N_i^e T_i = [N]^e \{T\}^e \quad (2-11)$$

3 ANSYS 有限元模型

对于电力电子器件而言，从热流传递角度总可以近似等效为某种几何实体。以广泛用于整流电路的二极管与晶闸管为例，无论是螺栓型还是平板型可以近似等效为一圆柱体，如下图 1(a)所示。考虑其通过的电流是半波以及相应的发热变化，可以对晶闸管施加谐振响应的温度载荷设为 $T = A|\sin 2\theta|$ ，其中 A 为一系数用来确定在不同情况下温度的大小， θ 可以看作导通角。

3.1 建模

利用 ANSYS 软件自带的实体建模工具来建立模型。分析模型可以视为轴对称，为了简化计算在圆柱纵截面上选取矩形二维有限元模型进行分析，如图 1(b)所示。

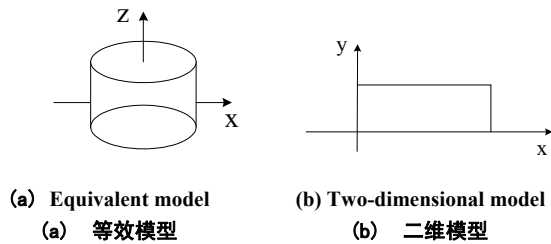


Figure (1) Solid model
图1 实体模型

经过划分网格之后的有限元模型如下图 2。

3.2 求解

设定热分析的边界条件及初始条件，设定分析状态为稳态。在这里可以选取外部温度为 60°C，具体温度的大小可以根据 A 值在查看结果中进行设置，根据温度的不同大小来设定不同的 A 值，也可以查看在不同导通角度下的温度分布。

3.3 求解结果与分析

由设定的求解条件可以得到达到稳态时整个物体的温度场分布，并可以绘制温度场的温度趋势图。图 3 为几个不同角度下元件半径方向的温度分布图。当 $\theta=0^\circ$ 时，最外侧温度为 0°C，温度统一不变，内部不产生热传递。当 θ 逐渐增大时，外侧温度也逐渐升高，并通过热传递的方式向内传递温度，内部温度逐渐升高，当 $\theta=90^\circ$ 时，外侧温度也应该是 0°C，但是累积前面的温度会有余量，使得外侧温度很低但并不为 0，当 $\theta=120^\circ$ 时，温度值相当于当 $\theta=30^\circ$ 时的温度值。从图中可以看出外侧与内部存在着一定的温度梯度，这个梯度与材料特性也有很大的关系。图 4 所示为 θ 等于 15° 和 120° 时温度沿元件半径方向的温度趋势图，从两个图对比可以看到温度趋势基本相同，但是随着温度的变化，材料的一些性能参数也随着变化，将会影响到温度的传导。

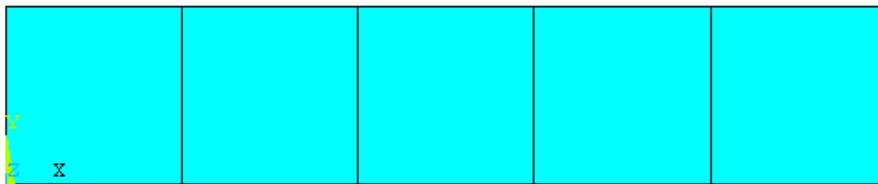
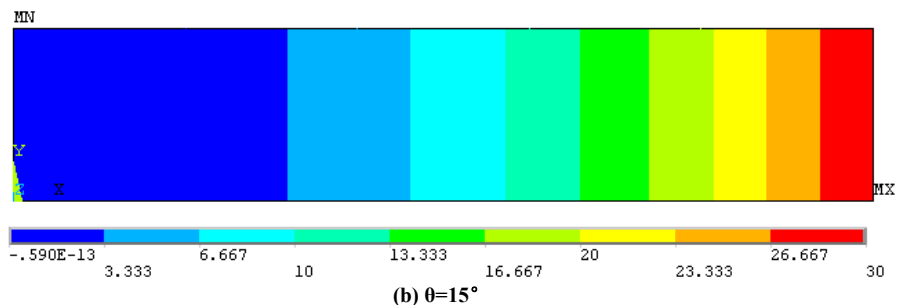


Figure (2) finite element model
图2 有限元模型



(a) $\theta=0^\circ$



(b) $\theta=15^\circ$

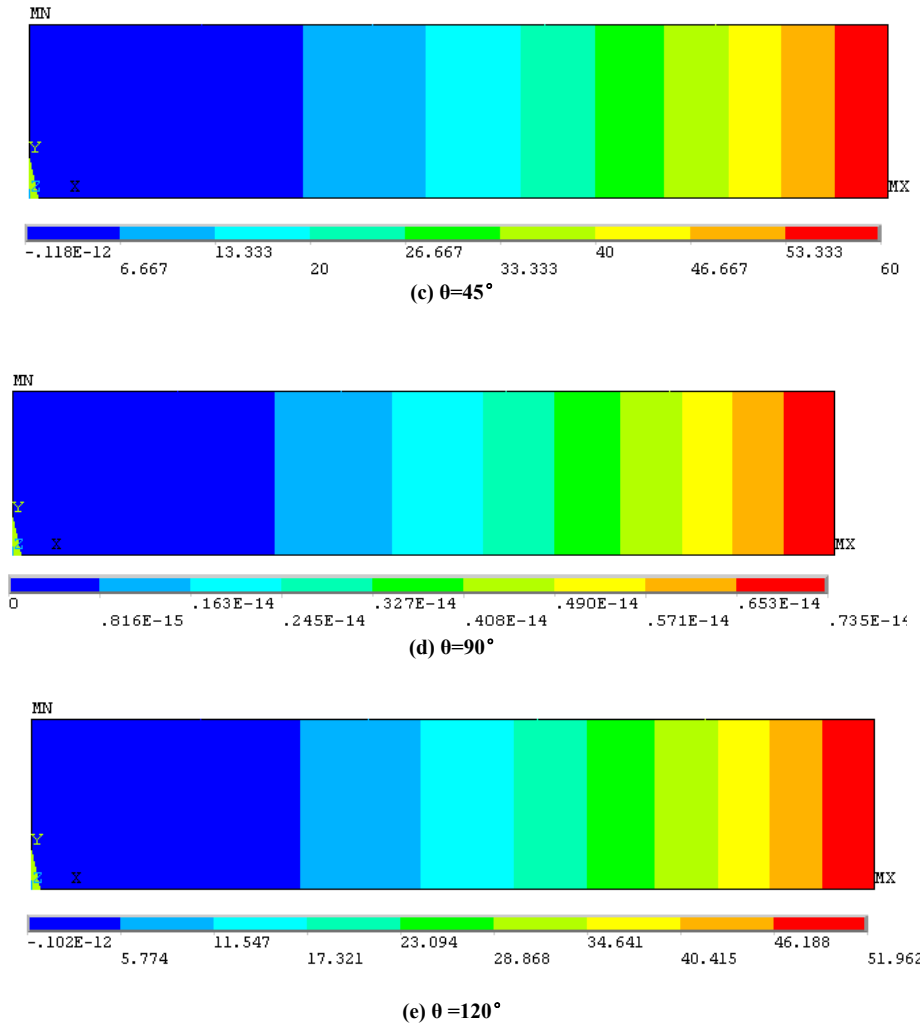


Figure (3) Different angle distribution of temperature field
图 3 不同角度下温度场的分布图

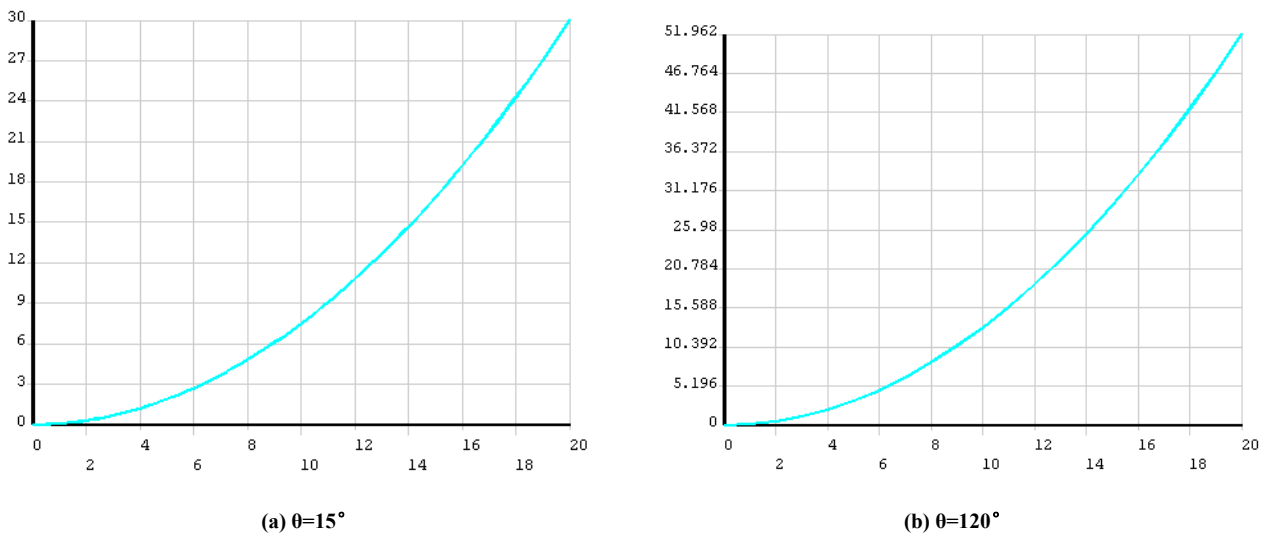


Figure (4) Temperature trend diagram for two different angles
图 4 两个不同角度下的温度趋势图

4 结论

由于热传导及其过程的复杂性,使得器件及装置的理论热分析十分复杂而难以工程实用。但是,应用基于有限元的 ANSYS 对温度及其传导过程进行模拟,不仅在计算速度上较快,而且由于是实体模拟,具有很高的工程实用价值。通过 ANSYS 进行建模和模拟分析,可以对器件甚至装置的散热设计提供参考数据。根据温度及其传导分布,可以合理设计散热装置的体积大小,并且可以确定风速及水冷等的流速对温度的影响[3]。

References (参考文献)

- [1] Kawase Y, Miyatake T. Thermal analysis of steel blade quenching by induction heating [J].IEEE Transactions on Magnetics.2000,36(4):1788-1791.
- [2] Zeng Pan, Fundamentals of Finite Element Analysis[M], Qing Hua Press , 2008, 12.258-271.
曾攀,有限元分析基础教程[M],清华大学出版社,2008,12,258-271.
- [3] Thermal analysis training manual.
热分析培训手册.