

## 电子设备用冷板散热特性的二维数值模拟

余莉<sup>1</sup> 蒋彦龙<sup>1</sup> 李萍<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学航空宇航学院, 南京, 210016; 2. 南京审计学院工程管理学系, 南京, 210029)

**摘要:** 冷板是当前最常用的一种电子设备散热方式, 虽然冷板的温度分布是个典型的三维导热型问题, 但人们普遍关心的是冷板加热面、冷却面的二维温度分布情况。本文首先对单片冷板的散热特性进行了分析, 在此基础上建立起相应的数学模型和微分控制方程组。通过将电子设备发热量、对流散热量及厚度方向上的导热热量当成冷板的内热源, 将复杂的三维问题简化为二维问题, 并进行了数值模拟。计算结果与实验结果吻合良好, 为复杂模型的简化计算提供了参考。

**关键词:** 电子设备; 冷板; 散热; 数值模拟

**中图分类号:** TK121

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-2615(2006)04-0419-04

## 2-D Numerical Simulation on Cooling Characteristics of Ventilated Rib in Electronic Equipments

Yu Li<sup>1</sup>, Jiang Yanlong<sup>1</sup>, Li Ping<sup>2</sup>

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. Department of Engineering and Management, Nanjing Audit University, Nanjing, 210029, China)

**Abstract:** Ventilated rib is widely used in cooling electronic equipments. And its heat transfer is a typical 3-D conduction problem, but the temperature profiles of the heating and cooling faces are commonly concerned. Based on qualitative analyses on cooling characteristics of a ventilated rib, the corresponding mathematical model and the control equations are established. By regarding the heat produced by electronic equipments, convection and conduction along the thickness of the ventilated rib as an interior heat source term. The complex 3-D differential equations are simplified as 2-D equations and the numerical simulation is carried out. Computational results are in good agreement with the experimental data.

**Key words:** electronic equipments; ventilated rib; cooling; numerical simulation

## 引言

电子技术的迅速发展, 导致了热流密度的大量增加。目前, 某些大功率元件, 热流密度甚至达到  $200 \text{ W}/\text{cm}^2$ 。由于单个电子元件和电子电路的可靠性取决于其工作温度, 电子部件不均匀的温度分布会影响电子器件甚至是整个系统的工作性能。因此设备内的温升必须予以控制, 运用良好的散热手段有效地解决散热问题已成为当前电子电器设备亟待解决的关键技术, 甚至成为继续提高电子设备功

率的瓶颈问题<sup>[1]</sup>。当前电子设备与器件的散热方式主要有液冷式冷却板, 空气冷却散热器以及直接浸液冷却等多种方式, 国外针对电子器件的高效冷却还提出了微热管冷却以及微通道冷却等方法<sup>[2-4]</sup>, 以达到最佳的散热效果。尽管空气的载热能力远远低于水或者其他液体, 但是由于其价廉、可靠等优点, 仍是当前最常用的冷却方法。单片冷板作为一种高效成熟的换热设备, 在电子设备散热中得到广泛的应用。本文即采用空冷式冷板对电子设备的散热特性开展研究。

收稿日期: 2005-05-24; 修订日期: 2005-07-16

作者简介: 余莉, 女, 副教授, 1969年11月生, E-mail: yuli.happy@163.com。

冷板上的温度控制方程是一个典型的三维导热型问题, 由于翅片的存在, 在数值模拟时, 往往将这个不规则的求解区域分成若干个规则区域, 通过界面上的信息将各个区域联系起来, 然后再求解温度分布。这样处理虽然容易理解, 但是它的分区过程比较麻烦和费时, 同时界面处理也较为复杂, 由此造成了计算的高复杂性。但在实际应用中, 人们往往非常重视冷板加热面或冷却面上的二维温度情况, 本文经过理论分析, 建立起冷板的二维数学模型。模型构造简单, 离散容易, 编程方便, 数值计算结果和试验结果比较吻合, 为今后冷板及类似问题上的二维处理提供了依据。

## 1 电子设备冷板散热的数学模型

典型的电子设备冷板散热物理模型见图1, 本文采用铝制板翅式换热器, 其上肋片通过铣床加工, 不仅减小了接触热阻, 且工艺重复性能很好。在铝板的加热面上, 采用标准加热电阻来模拟电子模块发热量, 控制加热电压和加热电流, 以得到稳定的发热量。由于加热后加热块的温度不会很高, 为此忽略辐射换热热量。通过稳态热平衡的方法, 认为加热器的发热量等于试验件的导热量及自然对流换热热量。为此可以建立该电子设备散热器的三维传热模型<sup>[5, 6]</sup>

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + f(x, y) \quad (1)$$

式中:  $\rho$ ,  $c$ ,  $\lambda$  分别为铝板的密度、定压比热容及导热系数;  $f(x, y)$  为内热源。由于该散热器厚度  $C$  远小于长和宽 ( $A$  和  $B$ ), 为此将板的四周视为绝热边界条件, 上下表面分别为对流散热边界条件。

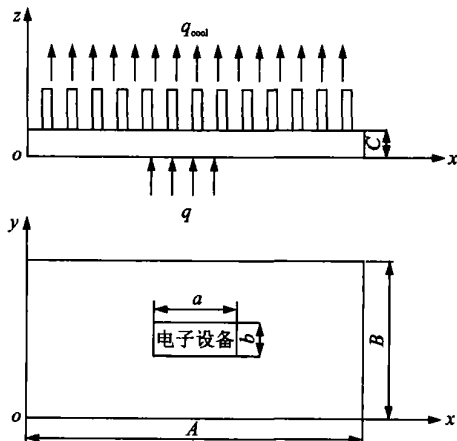


图1 电子设备冷板散热图

由于  $A, B$  远大于  $C$ , 可以认为是无限大平板的传热, 从而将三维问题简化成一维问题, 即计算  $z$  方向上冷板的温度场。但在电子设备的散热问题上, 冷板加热面或冷却面上的二维温度分布情况常常是人们关心的重点。除实验方法外, 可以采用三维计算或将模型简化成二维模型两种方法来获得加热面或冷却面上的温度场情况。三维计算尽管信息量大, 可获得任一厚度上的二维温度情况, 且模型建立准确, 但由于翅片上不规则区域的存在, 计算复杂, 计算节点众多, 耗时较长。为此本文在肋片简化的基础上, 对上述模型进行推导, 得到一种可靠的二维简化模型。

### 1.1 肋片的简化处理<sup>[5]</sup>

在散热面上布置扩展散热片 (肋片), 认为是二次传热面。其中通过一次传热面和二次传热面的热量分别为

$$Q_1 = \alpha F_1 (T_{w2} - T_{air}) \quad (2)$$

$$Q_2 = \alpha F_2 (T_m - T_{air}) \quad (3)$$

式中:  $F_1, F_2$  分别为一次传热面和二次传热面的散热面积;  $T_{w2}, T_m$  分别为所对应传热面上的温度;  $T_{air}$  为空气的温度。在传热上为了计算方便, 可将二次传热面的传热量作如下变换

$$Q_2 = \alpha F_2 \eta (T_{w2} - T_{air}) \quad (4)$$

式中  $\eta$  为肋片效率。这样冷板散热面上的散热量可写成

$$Q = \alpha (F_1 + F_2 \eta) (T_{w2} - T_{air}) = \alpha F_1 (T_{w2} - T_{air}) \quad (5)$$

式中  $\alpha$  为冷却面的当量对流换热系数,  $\alpha = \alpha(1 + \frac{F_2}{F_1} \eta)$ 。

### 1.2 二维模型的建立

由方程(1), 将后两项合并成一项, 在稳态情况下, 得到

$$\lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \bar{q} = 0 \quad (6)$$

式中:  $\bar{q} = \lambda \frac{\partial T}{\partial z} + f(x, y)$ ;  $\lambda$  为常数。

这样在每一个  $z$  面上, 可以将  $z$  方向的进出导热热量当成源项处理。由第3类热边界条件, 在加热面和冷却面上, 单位面积  $z$  向的净导热热量等于对流散热量, 微元分析方法见图2。则

$$\bar{q} = -\alpha (T - T_{air}) + f(x, y)$$

边界面上,  $\alpha$  取相应边界的对流换热系数, 考虑到边界上的三维效应, 对  $\alpha$  乘以权函数  $\omega$  进行修正, 加

热面取1.1,冷却面取0.9。这样,方程可简化为

$$\lambda(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}) + f(x,y) - \alpha w(T - T_{air}) = 0 \tag{7}$$

将对流散热项、电子设备散热量当成源项处理,冷板的四周边缘认为是绝热边界条件。则源项  $s = f(x,y) - \alpha(T - T_{air})$ ,可线性化处理成  $s = s_c + s_p T_{po}$

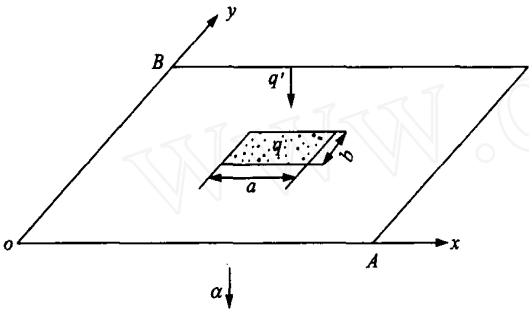


图2 二维模型的简化

在  $\frac{A}{2} - \frac{a}{2} < x < \frac{A}{2} + \frac{a}{2}, \frac{B}{2} - \frac{b}{2} < y < \frac{B}{2} + \frac{b}{2}$  处,加热面和冷却面上均取  $f(x,y) = q$ ; 其余位置上取  $f(x,y) = 0$ 。加热面上:  $\alpha$  取加热面上的对流换热系数,考虑  $z$  向的导热散热项,对  $\alpha$  乘以1.1进行修正。冷却面上:  $\alpha$  取散热面上的对流换热系数  $\alpha$ ,考虑  $z$  向的导热吸热项,对  $\alpha$  乘以0.9进行修正。

2 方程求解

2.1 方程离散

为了对上述微分方程进行离散求解,作如下假设:

- (1)冷板边缘及肋端处绝热;
- (2)冷板的导热系数及空气的对流换热系数视为定值。

对方程(7)采用控制容积法进行离散处理,得  $a_p T_p = a_e T_e + a_w T_w + a_n T_n + a_s T_s + b \tag{8}$

式中:  $a_e = \frac{\lambda \Delta y}{(\delta x)_e}; a_w = \frac{\lambda \Delta y}{(\delta x)_w}; a_n = \frac{\lambda \Delta x}{(\delta y)_n}; a_s = \frac{\lambda \Delta x}{(\delta y)_s}; a_p = a_e + a_w + a_n + a_s - s_p \Delta x \Delta y;$   
 $b = s_c \Delta x \Delta y。$   $(\delta x)_w, (\delta x)_e, (\delta x)_n, (\delta x)_s$  分别为  $p$  到  $w, e, n, s$  的控制容积点之间距离<sup>[6]</sup>。

2.2 有关参数值的确定

冷板结构见图1,考虑计算精度兼顾计算工作量,对160 mm × 260 mm 的冷板取32 × 52个网格节点。主要参数如下:

肋片长150 mm,肋片厚2 mm,肋片间距5 mm;

肋片板及肋片的导热系数均为164 W/(m · ℃);空气在加热面的对流换热系数经计算<sup>[7]</sup>取为73 W/(m<sup>2</sup> · ℃),在冷却面的对流换热系数经计算<sup>[7]</sup>取为128 W/(m<sup>2</sup> · ℃);板中心热源的散热量为50 W。

3 数值求解结果及分析

为了对数值离散结果进行校核,进行了相应的实验,实验装置由冷板、发热元件、热电偶、稳压电源、通讯模块和计算机等组成<sup>[5-7]</sup>,见图3。采用标准的加热电阻来模拟电子模块发热,控制加热电压和加热电流,以获得稳定的发热量。热电偶所测温度由通讯模块ADAM 4520和AMAD 4018采集并进入计算机系统,组态王软件(KINGVIEW 6.03)作为数据监控和测试的平台。冷板二维加热、冷却面的温度测试点见图4。图5则是通过简化的二维模型,采用自编程序所得的数值计算结果。数值计算结果和实验结果的比较见图6。数值计算结果和试验结果也比较吻合,其中实验值与计算值最大误差为1.11 ℃,最小差距仅为0.34 ℃,充分证明了本文的二维简化模型是可靠的。



图3 试验装置

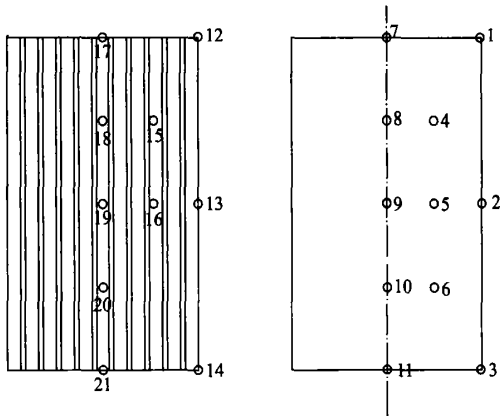


图4 热电偶及热源布置图

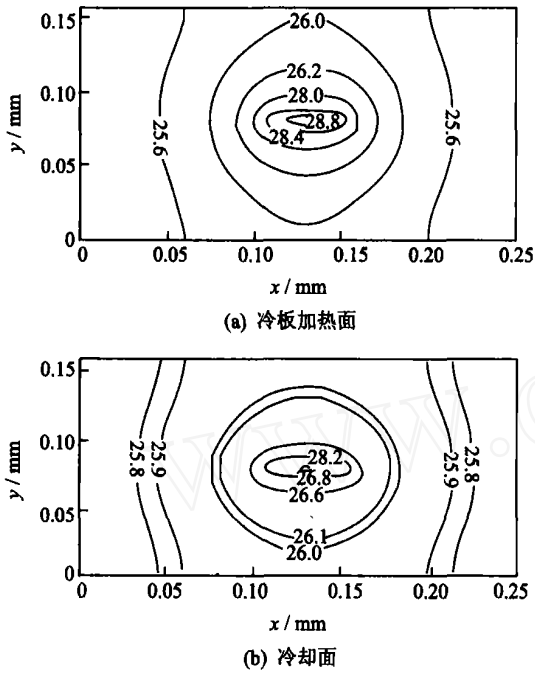


图5 二维温度场

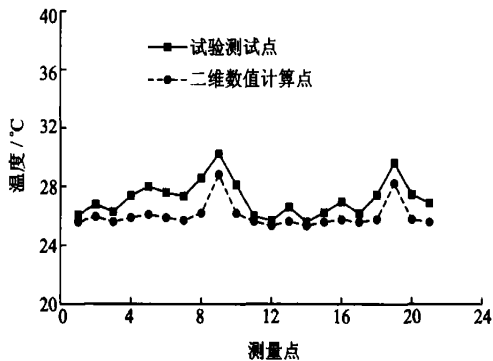


图6 二维数据结果与实验结果的对比

## 4 结束语

随着电子技术的发展,电子设备的发热量越来越大,如何更有效地将电子设备发热量尽快散发出去,成为制约电子技术发展的瓶颈问题。数值模拟具有经济、信息量大等优点。但由于翅片的存在,在数值模拟时,往往将这个不规则的求解区域分成若干个规则区域,通过界面上的信息将各个区域联系

起来,然后再求解温度的分布。这样处理使得分区过程比较麻烦和费时,且界面处理比较复杂,造成了计算复杂,同时三维计算节点众多,耗时较长,而节点之间信息的传递也有可能使误差放大。人们所关注的往往是加热面、冷却面的温度分布情况,内部的温度往往不是关注的重点。针对当前所关注的表面二维温度分布缺少二维模型这种情况,本文在相应简化的基础上,将对流散热量和厚度方向的导热项当成内热源处理,建立了二维模型。所得计算结果和实验结果吻合良好,证实所建模型正确、可行。

该模型构造非常简单,离散容易,编程方便,大大节省了编程时间和数值计算时间,对将来定性地分析加热面、冷却面的二维温度场情况具有重要的意义,为类似问题提供了借鉴。

## 参考文献:

- [1] 斯坦博格 D S. 电子设备冷却技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 1998: 1-123
- [2] Hopkins R, Faghri A. Flat miniature heat pipe with micro capillary grooves[J]. Journal of Heat Transfer, 1999, 121(1): 102-109
- [3] 陈文虎, 俞勤芳. 电子设备冷却用空芯冷板的性能研究[J]. 南京航空航天大学学报, 1995, 27(3): 351-356
- [4] Wang Y, Vafai K. Analysis of flow and heat transfer character of asymmetrical flat heat pipe[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1992, 35(9): 2087-2099
- [5] 杨世铭. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987: 32-59
- [6] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 78-186
- [7] Kitamura Y, Ishizuka M, Nakagawa S. Numerical and experimental study of the effect of inclination on the thermal behaviour of natural convection inside a thin electronic equipment casing[J]. Journal of Power and Energy, 2004, 218(7): 501-508