

# 电子机箱强迫风冷时PCB板局部表面传热系数的研究

王秋晓,付晓艳,谭健,张光艳

(重庆大学机械工程学院,重庆400044)

**摘要:**电子机箱采用轴流式风机进行强迫通风散热是电力电子元件比较常用的散热方式,通过对轴流式风机出口截面空气流速的分析,可以推论出空气以类似螺纹状形态在机箱内流动,从而猜测电路板位置不同时局部表面传热系数( $h_x$ )变化规律也是不同的。采用实验分析与仿真模型相结合的办法对 $h_x$ 的变化规律进行了研究。实验结果与仿真结果基本吻合,结果表明,当只改变电路板竖直方向的位置时局部表面传热系数 $h_x$ 分布规律也会发生改变,当电路板平行散热风扇中心轴水平放置,且电路板的长边与散热风扇中心轴平行时, $h_x$ 沿电路板的长度方向的变化是先减小后增大的,电路板竖直方向位置的改变主要影响 $h_x$ 沿电路板宽度方向的变化规律,且随着距离轮毂中心距离的增大,电路板上元器件温度较高的位置沿电路板的宽度方向由电路板的中间位置不断向边缘移动。此研究能够为散热风扇安装位置以及电路板的热设计提供重要的依据,对电子设备的热设计具有重要的意义。

**关键词:**电子机箱;散热;强迫风冷;局部表面传热系数

中图分类号:TH6

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2018)01-0157-07

## Study of Local Surface Heat Transfer Coefficient of PCB Board in Electronic Chassis Under Forced Air-cooling

WANG Qiuxiao, FU Xiaoyan, TAN Jian, ZHANG Guangyan

(School of Mechanical Eng., Chongqing Univ., Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The use of axial fans for cooling is one of the common ways for cooling the power electronic components. Through the analysis of the air flow velocity at the outlet section of axial fan, it can be inferred that the air flows is in a similar thread shape in the chassis. When the circuit board position is different, the local surface heat transfer coefficient ( $h_x$ ) is also different. Experimental analysis combined with simulation models were used to study the change law of  $h_x$ . The experimental results were in good agreement with the simulation results, the results showed that the distribution law of the local surface heat transfer coefficient will change when the position of the circuit board is changed only in the vertical direction. When the circuit board parallel cooling fan center axis placed horizontally, and the long side of the circuit board and the cooling fan center axis parallel,  $h_x$  firstly decreased and then increased along the length of the circuit board, the change of the vertical position of the circuit board mainly affected the variation law along the width of the circuit board, and with the distance from the hub center increased, the circuit board on the higher temperature along the width of the circuit board in the direction of the circuit board to move the edge. Which can provide an important basis for the installation of the cooling fan and the thermal design of the circuit board, and has great significance to the thermal design of electronic equipment.

**Key words:** electronic chassis; heat dissipation; forced air-cooling; local heat transfer coefficient

在电子设备中功率的损失基本上都是以热能的形式散发出来,因此在机箱内部会聚集大量的热量,如果热量不能及时的散发出去,将会影响各零部件

及机器整体运行<sup>[1]</sup>。因此电子设备机箱的热设计是同样成为了电路设计师需要充分重视的工作。热传递有基本的3种方式:导热(热传导)、对流和辐射<sup>[2]</sup>。

收稿日期:2017-07-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175529)

作者简介:王秋晓(1963—),男,副教授,博士。研究方向:动平衡技术、数控机床的研制。E-mail: wqxiao1963@163.com

网络出版时间:2018-01-17 23:01:00

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20180117.2301.004.html>

空气强制对流冷却方式是日前电力电子元件常用的散热方式。其普通结构式散热器加风扇的方式<sup>[3]</sup>。一般情况下热流密度小于 $0.4 \text{ W/cm}^2$ 时,可采用强迫风冷<sup>[4]</sup>。在电子设备中,强迫风冷时用到的通风机可分为轴流式和离心式两种<sup>[1]</sup>。

Li等<sup>[5]</sup>对风扇出口流体机构和雷诺数对风扇出口流体的影响进行了研究,结果表明水平和垂直方向的平均速度、轴向平均速度和平均湍流强度均随着雷诺数的增加而增加。史玉凤等<sup>[6]</sup>对多孔介质有效导热系数的影响因素进行了分析。Boukhanouf等<sup>[7]</sup>通过Flotherm对箱体RF测量组件温度进行研究,发现增大螺旋翅片散热器间冷却空气的流速能够降低RF组件的温度。邓宁华<sup>[8]</sup>对风速与风向对墙体表面传热系数研究,发现风速对墙体表面换热系数有很大的影响。Kumar等<sup>[9]</sup>通过在热交换器内的流体中产生湍流来增强热传递进行研究,得出流量参数对传热有着明显的影响。Lorenzini等<sup>[10]</sup>通过对Giesekus流体在被施加第一类热边界条件(施加温度)并且具有旋转内壁的圆环柱体内壁中只做做切向运动的研究来验证速度分布可以来解析温度分布和传热特性。结果表明对于增加Deborah值时,黏性耗散所依赖的速度梯度更多的集中在旋转壁上。黏性耗散会扭曲速度的分布,使局部温度高于外壁温度。Mohapatra等<sup>[11]</sup>通过对三流体热交换器进行的研究,发现当增加热水的体积流速,空气和正常水的流速不变的情况发现总的传热系数增加。付蕊等<sup>[12]</sup>对湍流流体传热系数与流速的关系研究,发现光滑管和强化管内湍动流体的传热系数分别与流体流速 $0.7285$ 和 $0.7487$ 次方成正比,得出增大流体流速有利于逆流流体间的传热的结论。Li等<sup>[13]</sup>基于可压缩流体的RNG  $k-\epsilon$ 模型对空气倍增器出口流场进行模拟,通过对平均速度和压力的影响进行研究,结果表明出口流场的流量参数分布不均匀,并且出场口的平均速度和压力产在水平方向对称,而不是垂直方向。么鸣涛等<sup>[14]</sup>对车辆减震器热物性对其温升的影响规律进行了研究。

通过以上研究均发现当其他条件确定的情况下,增大流体流速能够增大对流换热的表面换热系数。但却很少有人对轴流式风机对电子机箱内的电路板直接进行散热时,出口截面空气流速对电路板局部表面传热系数的影响。作者主要研究当无风道设计的电子机箱采用R级轴流式风机强迫通风散热时,平行于风扇中心轴平行放置的电路板局部表面传热系数的变化规律,能够为电路设计者进行电路板的热设计时提供依据。

## 1 平壁表面传热系数与风扇出口截面流体速度

随着工业的发展,大型电子机箱散热问题愈加严重,芯片功率增加,体积缩小,热密度急剧上升,这将会严重影响电子设备的寿命。强迫通风散热由于结构简单、成本低、可靠性高等特点,在电子设备中是应用比较广泛的散热方式。

### 1.1 外掠平壁局部表面传热系数计算公式

一般来说,受迫对流的流速相对于自然对流要高,因而它的表面传热系数也要比自然对流要高。对于无相变对流换热,影响 $h$ 的众多因素可表示为 $h = f(u, t_w, t_f, \lambda, \rho, c_p, \mu, \alpha, l)$ ,当常物性掠过平壁对平壁表面进行散热时,平壁局部表面传热系数表达式为<sup>[15]</sup>:

$$h_x = -\frac{\lambda}{(t_w - t_f)_x} \left( \frac{\partial t}{\partial y} \right)_{w,x} = -\frac{\lambda}{\Delta t_x} \left( \frac{\partial t}{\partial y} \right)_{w,x} \quad (1)$$

外掠平壁层流边界层局部表面传热系数为<sup>[15]</sup>:

$$h_{x1} = 0.332 Re_x^{1/2} Pr^{1/3} \frac{\lambda}{x} \quad (x \neq 0) \quad (2)$$

在湍流模型中,外掠平壁湍流局部表面传热系数为<sup>[15]</sup>:

$$h_{x2} = \frac{Nu_x \lambda}{x} = \frac{0.029 Re_x^{0.8} Pr^{1/3} \lambda}{x} = 0.029 \left( \frac{u_\infty}{\nu} \right)^{0.8} Pr^{1/3} \lambda x^{-1/5} \quad (3)$$

式3适用范围为 $0.6 \leq Pr \leq 60, 5 \times 10^5 \leq Re_x \leq 10^7$ 。

整个平壁的平均表面传热系数表达式为<sup>[15]</sup>:

$$h = \frac{1}{A} \int_A h_x dA \quad (4)$$

$$Re_x = \frac{u_\infty x}{\nu} \quad (5)$$

由式(3)、(4)、(5)可以得出,当其他参数都不变的情况下,无论是外掠平壁层流边界层还是湍流边界层平壁局部表面传热系数是随流体速度的增大而增大的,沿流体流动方向随着 $x$ 的增大, $h_x$ 会不断地减小。

### 1.2 R级轴流式风机出口截面速度分布

当电子设备采用轴流式通风机进行强迫通风散热时,气流经过叶栅后气流速度发生变化,下面是对气流经过平面直列叶栅的流动情况的分析如图1所示。

图1中 $w_1$ 为进口气流相对速度; $w_2$ 为出口气流相对速度; $\beta_1$ 为进口气流角; $\beta_2$ 为出口气流角; $C_1$ 为进口气流绝对速度; $C_2$ 为出口气流绝对速度; $u_r$ 为圆周速度。

电子机箱散热风扇一般为R级散热风扇。轴流通风机的流型可概括为<sup>[16]</sup>: $(C_{1u} + C_{2u})r^\alpha = K$ ,R级轴

流式风机,由于没有前导流器,只有叶轮<sup>[16]</sup>,所以

$$C_{1u} = 0, C_{2u} r^a = K。$$

因此在一般设计中变环量指数 $a = 0 \sim 1, a \neq 1$ ,且 $C_{2u} r^a = K$ 常数,因此可以得出 $C_{2u} = Kr^{-a}$ 。

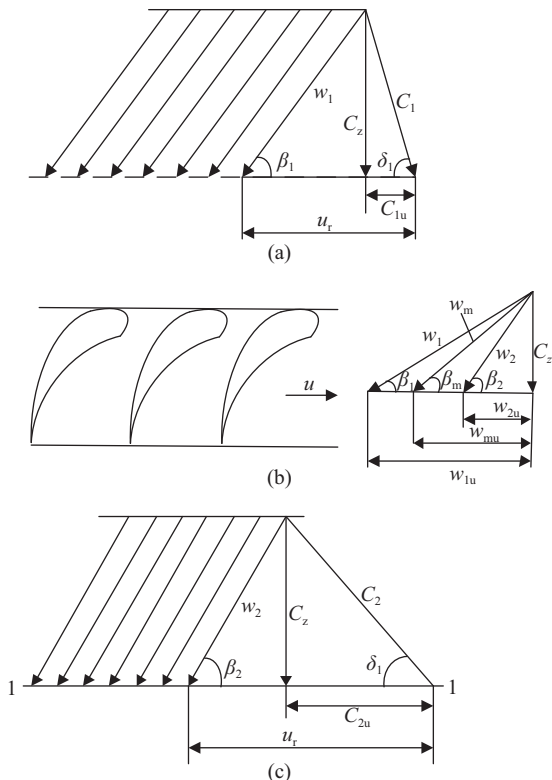


图1 气流流过平面直列叶栅的速度三角形

Fig.1 Velocity of the airflow through the plane inline cascade

且变环量设计时的轴流风机轴向速度分布为<sup>[16]</sup>:

$$C_z^2 = C_{z0}^2 + 2\omega K(r^{1-a} - r_0^{1-a}) + \frac{1-a}{a} K^2(r^{-2a} - r_0^{-2a}) \quad (6)$$

$$C_{z0} = \frac{q_v}{\frac{\pi}{4} D^2 (1-d^2)} \quad (7)$$

当 $a = 1$ 时, $C_{2u} r = \text{const}$ 常数,为等环量设计<sup>[16]</sup>:

$$C_z = C_{z0} = \frac{q_v}{\frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)} \quad (8)$$

当 $a = 0$ 时,

$$C_z^2 = C_{z0}^2 + 2\omega K(r - r_m) - 2K^2 \ln \frac{r}{r_m} \quad (9)$$

其中:

$$K = \frac{(p_{f,ths})_m (3-a)(1-\bar{d}^2)}{2\rho\omega r_1^{1-a}(1-\bar{d}^{-3-a})} \quad (10)$$

式中: $(p_{f,ths})_m$ 为轴流风机级的平均理论全压; $r_m$ 为叶轮叶片平均半径; $\bar{d}$ 为轮毂比, $\bar{d} = D/d$ 。

在任一出口截面处的相对速度为<sup>[16]</sup>:

$$W_2 = \sqrt{C_z^2 + (u - \frac{\Delta C_u}{2})^2} = \sqrt{C_z^2 + (u - \frac{C_{2u}}{2})^2} \quad (11)$$

圆周速度为:

$$u = \omega r = \frac{n\pi r}{30} \quad (12)$$

采用R级轴流式散热风扇对电子设备中电路板进行散热时,无论风机采用等环量设计还是变环量设计,离开叶轮的空气均具有轴向速度和圆周速度,由此可以推论在流动惯性作用下,空气在箱体并不是平行于中心轴流出箱体,而是具有一定以螺旋形态流出。以下将进行仿真及实验验证,从而可以得出平壁表面传热系数的分布规律。

## 2 机箱采用R级轴流式风机强迫通风散热的仿真模型

### 2.1 电子设备中顺时针旋转风扇的空气流动迹线

利用Flotherm软件对R级轴流式风扇为在电子机箱中空气流动迹线进行仿真,结果如图2所示。

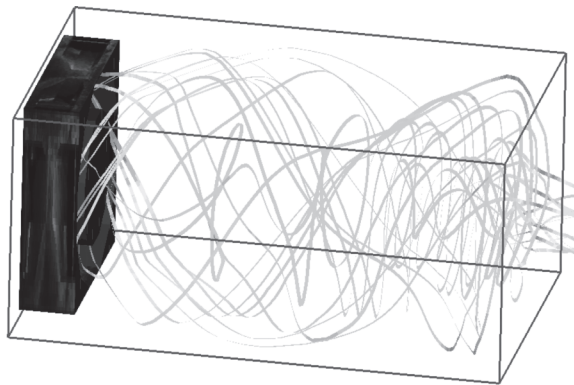


图2 空气在箱体内的流动迹线图

Fig.2 Air flow chart in the electronic box

设仿真中散热风扇为顺时针旋转,即面向出风口风扇为顺时针旋转,通过仿真结果可以看出,空气在箱体内的流动确实是以类似螺旋状的形态流出从出风口流出箱体。由此可知当箱体内水平放置一块电路板时,空气掠过电路板表面时,空气流动方向与轴向速度之间是有一定夹角的,夹角大小与轴向速度和圆周速度有关(设箱体内壁为光滑平面),电路板任意一点处局部表面传热系数分布并不均匀,而是随空气流速变化而变化的。

### 2.2 电路板表面温度变化规律的仿真分析

当箱体结构及风机型号一定,在电子机箱内水平放置一块电路板,散热风扇垂直于地面竖直放置,电路板与轮毂中心水平方向的距离也是固定不变的,沿竖直方向改变电路板的位置,通过对电路板处于不同位置时的温度分布进行仿真,即可得出电路

板表面传热系数变化规律。

将一块印制电路板水平放置于箱体内部, 电路板尺寸为 $L \times W = 150 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 风扇出风口截面轮毂中心为原点, 环境温度设为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。电路板上安装有 20 个相同元器件, 每个元器件均为扁平封装的 IC 芯片, 每个元器件功率设为 $0.8 \text{ W}$ , 图 3 为电子设备的 3D 模型。

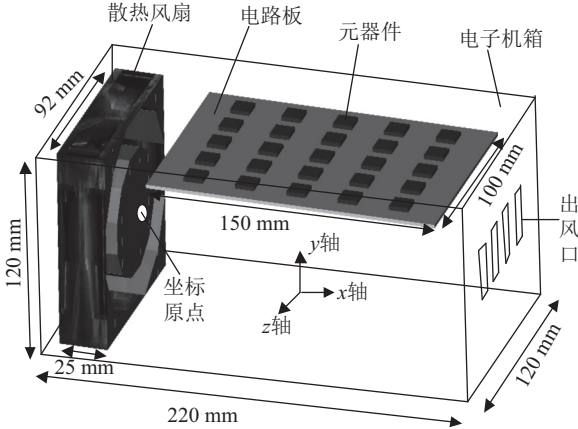


图 3 电子设备 3D 模型

Fig.3 Electronic equipment 3D model

芯片在电路板上的位置如图 4 所示。设 $U_{ij}$ 表示为元器件,  $i$ 表示元器件所在行数,  $j$ 表示所在列数, 元器件坐标为设 $U_{ij}(x, y, z)$ 。

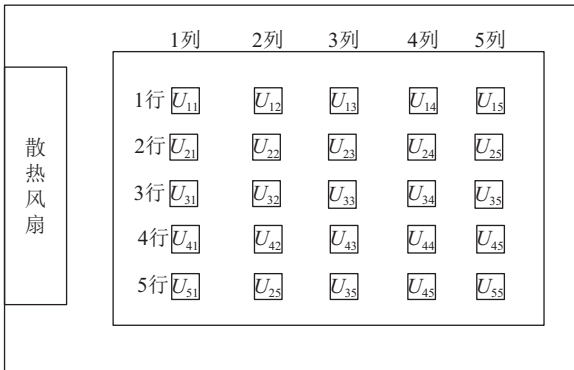


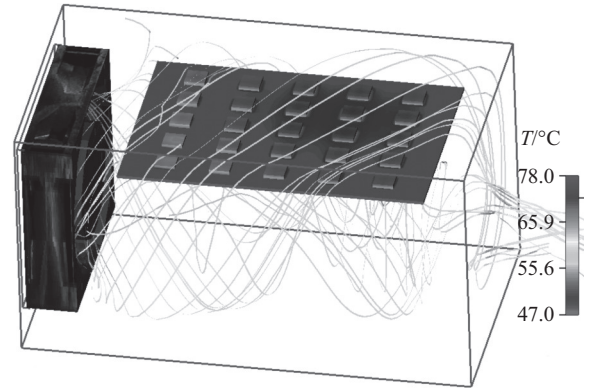
图 4 元器件在电路板上的分布图

Fig.4 Distribution of components on the circuit board

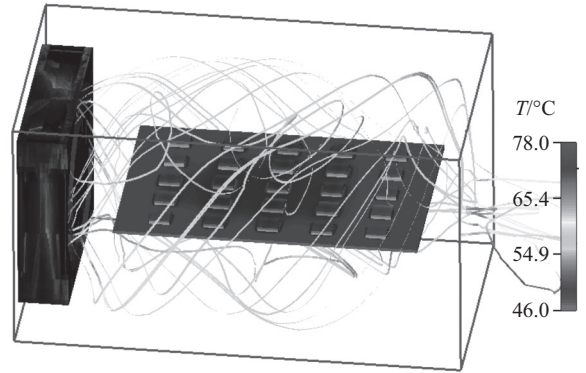
沿竖直方向改变电路板位置, 使得电路板中心位置坐标分别为 $(100, 0, 38)$ ,  $(100, 0, 0)$ ,  $(100, 0, -38)$ 。通过仿真分析, 可以得出电路板在不同位置处的温度分布, 仿真结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出, 由于电路板所处位置不同, 电路板表面空气流向不同, 电路板上电子元器件的温度分布也不相同。

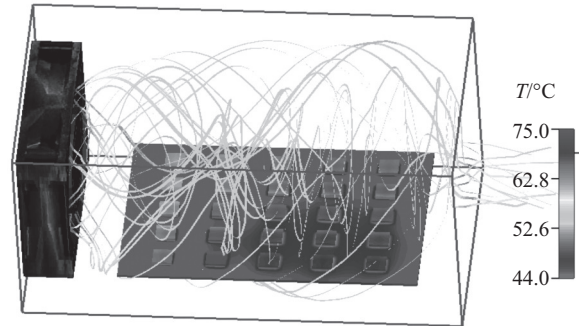
通过分析仿真结果, 得出不同位置的电路板, 温度较高的芯片所处位置是不同的。取不同位置的电路板上温度较高的 4 个元器件, 得出表 1 所示结果。



(a) 电路板中心坐标为  $(100, 0, 38)$  时温度分布



(b) 电路板中心坐标为  $(100, 0, 0)$  时平板温度分布



(c) 电路板中心坐标为  $(100, 0, -38)$  时平板温度分布

图 5 平板位于不同位置时的温度分布图

Fig.5 Temperature profile of the circuit board at different locations

表 1 不同位置的电路板上温度较高的元器件

Tab.1 Higher temperature components on the circuit board with different locations

电路板中心坐标	温度较高的 4 个芯片
$(100, 0, 38)$	$U_{13}, U_{14}, U_{23}, U_{24}$
$(100, 0, 0)$	$U_{32}, U_{33}, U_{34}, U_{23}$
$(75, 0, -38)$	$U_{43}, U_{44}, U_{53}, U_{54}$

在同一电路板上, 当元器件 $x$ 轴坐标相同时, 元器件温度变化规律不仅与 $y$ 轴坐标有关, 而且与 $z$ 轴坐标有关: 1) 当 $z=38$ 时, 随着 $y$ 轴坐标的增大, 元器件温度基本是不断降低的; 2) 当 $z=0$ 时, 随 $y$ 轴坐标的增

大, 芯片温度是先升高后降低, 此时温度较高的芯片主要位于电路板的中间位置, 芯片温度分布均匀性较好; 3) 当  $z=-38$  时, 随着  $y$  轴坐标的增大, 元器件温度基本是不断升高的。

当元器件  $y$  轴坐标相同时, 元器件的温度变化规律与  $z$  轴坐标无关, 只与  $x$  轴坐标变化相关, 随着  $x$  轴坐标值的增大元器件的温度变化是先升高后降低。当  $z \neq 0$  时, 在同一行中第 4 列元器件温度较高; 且当  $z=0$  时, 中间位置处的元器件温度较高。随着电路板中心点  $z$  轴坐标的增大, 温度较高的芯片的位置沿  $y$  轴负方向不断向电路板的边缘移动。

### 3 实验验证及结果分析

#### 3.1 实验设备

为了验证仿真结果的正确性, 根据仿真模型搭建相应的实验装置, 风扇旋转方向也是相同的, 实验参数如表 2 所示。

表 2 实验模型参数

Tab.2 Parameters of the experimental model

实验器材	数值
电子机箱	$H_1=120\text{ mm}$ , $W_1=120\text{ mm}$ , $D_1=220\text{ mm}$
实验线路板	$L=150\text{ mm}$ , $W=100\text{ mm}$
实验电源	鸿海科技 AC-DC 12V、5V
温度计	UT300S
轴流式散热风扇	SUNON SF23092A
实验电阻	18 $\Omega$ , 3 W

电子设备的实物图如图 6 所示。

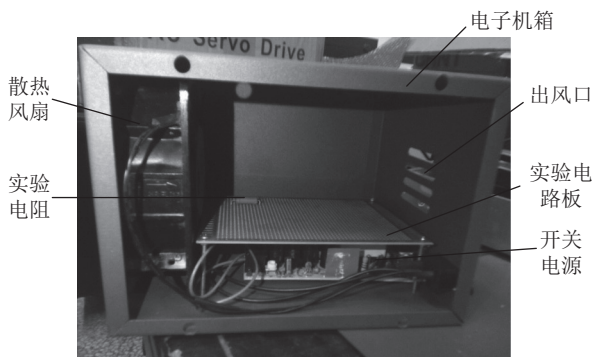


图 6 电子设备实物

Fig.6 Physical of the electronic equipment

在电子机箱内的电路板上放置一个实验电阻, 电阻连接在开关电源的 5 V 的输出端, 此时电阻功率约为 1.39 W。

实验分为 3 组, 即电路板中心坐标分别为 (100, 0, 38)、(100, 0, 0)、(100, 0, -38) 3 个不同位置。在每组实验中电路板位置不变, 只改变电阻在电路板上的位置, 使得电阻位于电路板上不同的位置, 实验电

阻在电路板上所处的位置如图 7 所示。并采用 UT300S 红外线测温仪测量不同位置处的电阻的温度, 并对结果进行分析, 从而可以得电路板表面时局部表面传热系数的变化规律。为避免对实验电阻温度测量的影响, 开关电源放置在机箱的底端。

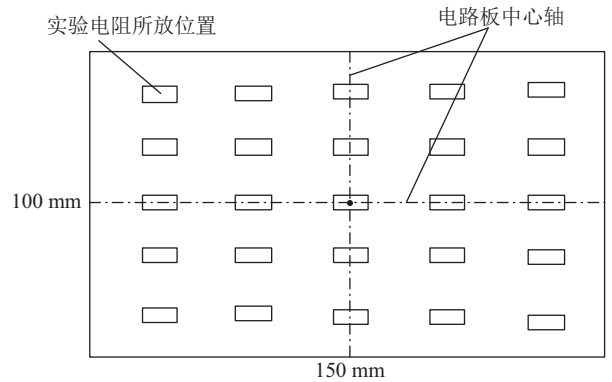


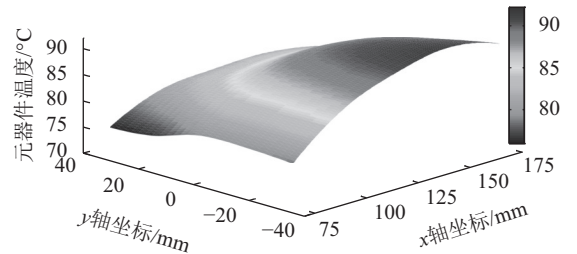
图 7 电阻在电路板所放置的不同的位置

Fig.7 Resistors placed in different positions on the board

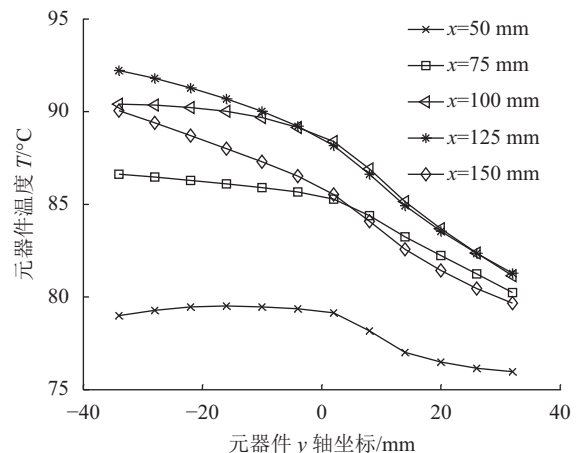
#### 3.2 实验结果分析

通过软件 MATLAB 对实验数据进行分析, 可得到电路板上不同位置上温度变化规律的 3 维曲面图。

对电路板中心坐标为 (100, 0, 38) 时所得到的结果进行分析所得温度变化规律图如图 8 所示。



(a) 电路板中心坐标为 (100, 0, 38) 时温度分布



(b) 沿  $y$  轴方向温度变化曲线

图 8 电路板中心坐标为 (100, 0, 38) 时实验结果

Fig.8 Experimental results of the circuit board when the center of the circuit board is (100, 0, 38)

通过图8(a)可以看出,实验电阻温度沿 $x$ 轴方向温度是先升高后降低的,温度变化主要沿 $y$ 轴方向基本是不断升高的。

当电路板中心坐标为 $(100, 0, 0)$ 时,电阻温度变化规律如图9所示。

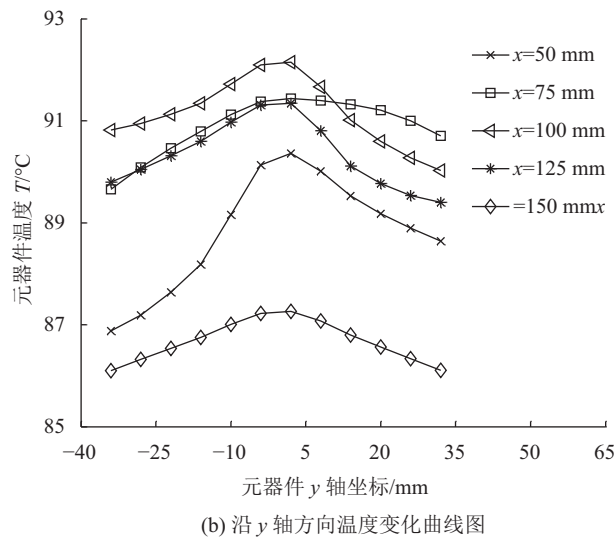
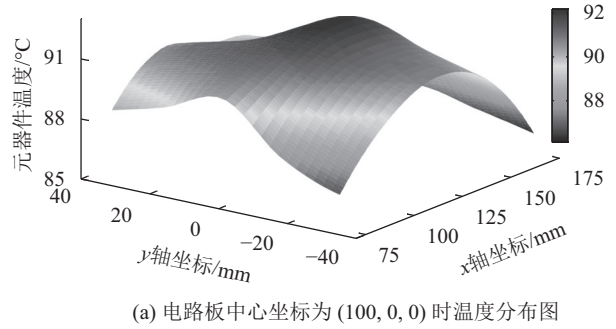


图 9 电路板中心坐标为 $(100, 0, 0)$ 时实验结果

Fig.9 Experimental results of the circuit board when the center of the circuit board is  $(100, 0, 0)$

当电路板中心坐标为 $(100, 0, -38)$ 时,电阻温度变化规律如图10所示。

通过实验结果可以得出,当电阻在电路板上不断改变位置时,电阻的温度沿 $x$ 轴正方向即电路板长度方向,电阻的温度变化均是先升高后减小,如图11所示。

当电路板与轴流式散热风扇轮毂中心在同一水平方向时,电阻在电路板中间位置温度较高,并沿着 $x$ 轴正方向板和 $y$ 轴正方向电阻的温度均是先增高后降低;当电路板沿竖直方向移动至轮毂中心上方时,电阻温度沿着 $y$ 轴正方向是温度不断降低的;当电路板位于轮毂中心的下方时,电阻的温度沿 $y$ 轴的正方向是不断升高的。电路板位于不同位置是,电阻温度所处位置是不同的。

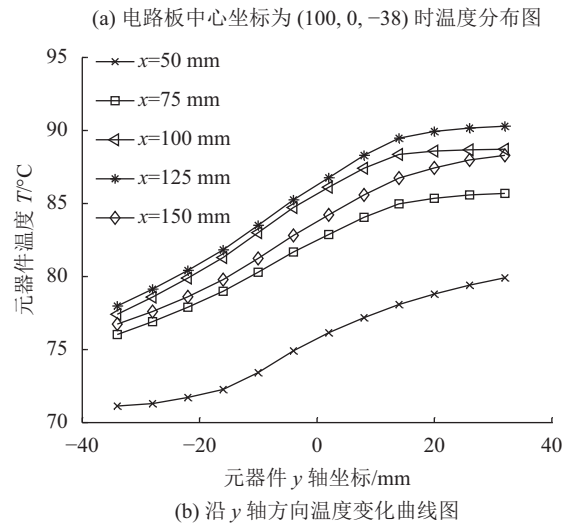
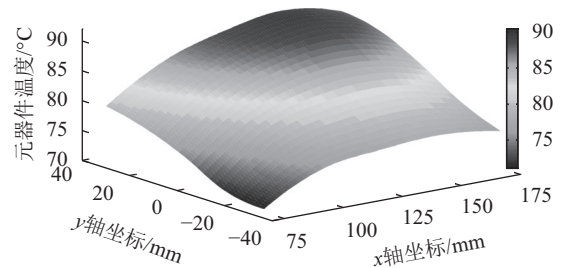


图 10 电路板中心坐标为 $(100, 0, -38)$ 时实验结果

Fig.10 Experimental results of the circuit board when the center of the circuit board is  $(100, 0, -38)$

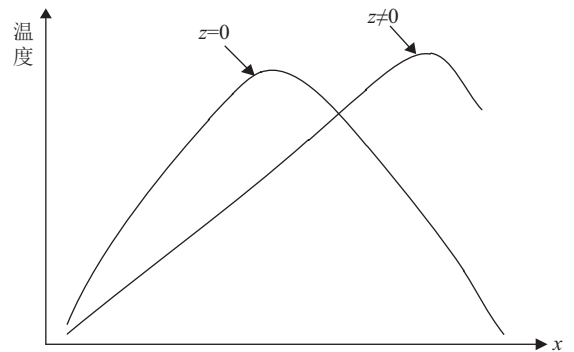


Fig.11 Change of resistanc's temperature along the  $x$ -axis direction

## 4 结 论

通过对当电子机箱采用R级轴流式散热风扇进行强迫通风散热时电路板的温度分布规律进行了研究,从而可得出电路板局部表面传热系数的变化规律。电路板平行于轴流式风机中心轴水平放置,且电路板的长边平行于风扇中心轴,当从风机的出风口正视风机为顺时针旋转时,可得出以下结论:

1)在同一电路板上,沿电路板的长度风向,电路板局部表面传热系数是先降低后增大的。

2)当电路板位于风扇中心轴上方时,电路板局部表面传热系数沿电路板宽度方向是不断降低的。

3)当电路板与风扇中心轴在同一水平面时,电路板表面传热系数沿电路板的长度方向和宽度方向均是先减小后增大的,在电路板中间位置时较小,因此在电路板的中间位置,元器件的温度较高。且此时元器件的温差较小,温度分布比较均匀。

4)当电路板位于风扇中心轴下方时,电路板局部表面传热系数沿电路板的宽度方向是不断减小的。

#### 参考文献:

- [1] Su Shiming, Li Wei. Simulation analysis of heat exhaust of electron equipment chassis[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2013, 28(3): 64–67. [苏世明, 李伟. 电子设备机箱散热仿真分析[J]. *光电技术应用*, 2013, 28(3): 64–67.]
- [2] 余建祖. 电子设备热设计及分析技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 1–19
- [3] Yu Xiaoling, Feng Quanke. Heat dissipation ability of general cooling technology for electronic system[J]. *The World Of Inverters*, 2009(7): 76–78. [余小玲, 冯全科. 电力电子设备常用散热方式的散热能力分析[J]. *变频器世界*, 2009(7): 76–78.]
- [4] Lv Hongtao. Discussion on cooling techniques for electronic equipment[J]. *Electro Mechanical Engineering*, 2011, 27(5): 8–11. [吕洪涛. 电子设备散热技术探讨[J]. *电子机械工程*, 2011, 27(5): 8–11.]
- [5] Li H, Jin X H, Deng H S, et al. Experimental investigation on the outlet flow field structure and the influence of Reynolds number on the outlet flow field for a bladeless fan[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 100: 972–978.
- [6] Shi Yufeng, Li Hong, Sun Wence. Experiment and numerical simulation of effective thermal conductivity of porous media[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2011, 43(3): 198–203. [史玉凤, 刘红, 孙文策. 多孔介质有效导热系数的实验与模拟[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2011, 43(3): 198–203.]
- [7] Boukhanouf R, Haddad A. A CFD analysis of an electronics cooling enclosure for application in telecommunication sys-

tems[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30(16): 2426–2434.

- [8] Deng Ninghua. Experimental study of the effect of wind speed on the heat transfer coefficient of wall surface[D]. Changsha: Hunan University, 2001 [邓宁华. 风速风向对墙体表面换热系数影响的实验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2001.]
- [9] Kumar A, Chamoli S, Kumar M. Experimental investigation on thermal performance and fluid flow characteristics in heat exchanger tube with solid hollow circular disk inserts[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 100: 227–236.
- [10] Lorenzini M, Daprà I, Scarpi G. Heat transfer for a giesekus fluid in a rotating concentric annulus[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 122: 55–58.
- [11] Mohapatra T, Padhi B N, Sahoo S S. Experimental investigation of convective heat transfer in an inserted coiled tube type three fluid heat exchanger[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 117: 297–307.
- [12] Fu Rui, Bian Yunxia, Guo Yanyan. Study of the relationship between heat transfer coefficient and velocity of turbulent fluid[J]. *Journal of Dalian Minzu University*, 2011, 13(1): 95–95. [付蕊, 卞云霞, 郭燕燕, 等. 湍动流体传热系数与流速的关系研究[J]. *大连民族学院学报*, 2011, 13(1): 95–95.]
- [13] Li H, Deng H S, Lai Y B. Numerical and experimental research on the outlet flow field for the air multiplier[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 93: 652–659.
- [14] Yao Mingtao, Gu Liang, Guan Jifu. Analysis of thermo-physical properties on influence rules of vehicular twin-tube shock absorber[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2011, 43(2): 241–246. [么鸣涛, 顾亮, 管继富. 车辆双筒式减振器热物性影响规律分析[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2011, 43(2): 241–246.]
- [15] 昌泽舟. 轴流式通风机实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 68–140
- [16] 王厚华. 传热学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2006: 94–135.

(编辑 黄小川)

引用格式: Wang Qiuxiao, Fu Xiaoyan, Tan Jian, et al. Study of local surface heat transfer coefficient of PCB board in electronic chassis under forced air-cooling[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(1): 157–163. [王秋晓, 付晓艳, 谭健, 等. 电子机箱强迫风冷时PCB板局部表面传热系数的研究[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(1): 157–163.]