

开式机箱电子设备热设计的数值研究

刘明安¹, 董秋霞², 陈 硕³

(1. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西西安 710077; 2. 空军工程大学理学院, 陕西西安 710051; 3. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200030)

摘要: 基于电子设备热分析与热设计的前端设计思想, 应用现代计算流体技术和数值传热技术对某一开式机箱内的电源器件和电路板表面的热行为进行了数值计算, 获得了现有设计条件下设备内部电源与电路板表面的温度分布及平均温度水平; 同时模拟了机箱内冷却气流的流动状态, 给出了不同剖面上的流场分布和温度分布, 分析和讨论了计算结果, 为优化和改善所研究设备的热设计方案提供了理论依据。研究表明, 电子设备的前端热设计与以往的热设计相比具有操作方便, 省时全面的特点。有利于方案优化, 有助于缩短电子产品的开发周期和降低设计成本。

关键词: 电子设备; 开式机箱; 热设计; 数值研究

中图分类号: TH122 文献标识码: A 文章编号: 1009-3516(2005)02-0062-04

随着电子元器件及电子设备功率密度的不断增加, 温度已成为影响其可靠性的主要的因素。资料表明, 电子设备的失效率有 55% 是由于温度超过了规定值而引起的^[1]。10℃法则^[2]给出的电子元器件的失效率随温度增加的变化规律表明, 即便使温度降低 1℃, 也能使设备的失效率降低一个可观的数量。因此, 研究散热方法, 改善散热方式, 提高冷却效果, 对提高电子产品的运行稳定性, 甚至于电子产品的更新换代都具有重要的意义。电子产品的热设计就是利用传热学的基本原理和传热技术来降低发热元器件本身的温度, 使电子设备整机的内部温升降低到所要求的范围内, 以达到减少故障、提高可靠性和延长使用寿命的目的。传统的热设计理论与方法于上世纪六、七十年代逐渐形成^[3,4], 受当时传热学和传热技术发展水平的限制, 只能根据经验类比或利用由以物理相似理论为基础的有限的准则换热公式进行预先估计, 并与实验交替进行来完成整个产品的热设计。这些方法的计算结果准确性较差, 只能做一些简单的定性分析, 并且, 设计周期较长、材料浪费较多、研制成本较高, 严重的影响了电子产品的开发。近年来, 随着传热技术和计算技术的发展, 电子产品热设计的方法也得到了不断改进。目前, 以计算结构力学、计算流体力学和计算传热学为基础的一些新型电子产品热设计技术在逐渐形成^[5~8], 电子设备热设计技术作为一门新的学科已经建立起来^[9], 许多学者与工程技术人员致力这方面的研究工作, 并获得了一些初步的成果^[10~12], 在此基础上, 人们针对以往那种先有产品后做热设计的做法提出了一种新的热设计思想^[13], 即前端热设计。所谓前端热设计是指在产品的预研和开发阶段解决热设计的基本问题, 对热设计方案的可行性进行全面分析, 对设计结果进行准确的预测, 对热设计方案进行分析和优化。本文基于这种前端热设计思想, 应用现代计算流体力学 (CFD) 技术和数值传热技术, 对某开式机箱内的电子设备的电源器件和电路板表面的热行为进行了数值分析, 获得了现有设计条件下设备内部电源与电路板表面的温度分布及平均温度水平, 同时模拟了机箱内冷却气流的流动状态, 给出了不同剖面上的流场分布和温度分布, 分析和讨论了计算结果, 为优化和改善所研究设备的热设计方案提供了理论依据。

1 研究对象

某预研电子设备的结构设计方案如图 1 所示。在一开式方形机箱内有 1 个电源 A, 1 组电路板 B, 1 个风

收稿日期: 2004-09-27

作者简介: 刘明安 (1962-), 男, 陕西眉县人, 博士, 主要从事传热与环境控制技术研究。

扇C,1个通风口D。机箱尺寸 $0.2 \times 0.1 \times 0.12 \text{ m}^3$ 。箱内电源尺寸为 $0.04 \times 0.04 \times 0.03 \text{ m}^3$,其耗散功率为 5.0 W 。电路板共4块,尺寸为 $0.1 \times 0.05 \times 0.0016 \text{ m}$,材料为FR-4,印刷电路材料为纯铜,板与板之间的距离为 0.02 m ,单板耗散功率 1.0 W 。带有长格子的圆形通风口直径 0.04 m ,通风面积比为 0.7 。排风式风扇直径 0.04 m ,其毂直径 0.02 m ,风流量为 $0.001 \text{ m}^3/\text{s}$ 。受系统安装条件的限制,进出风口只能设置在前后壁面,冷却介质为系统外部的空气。

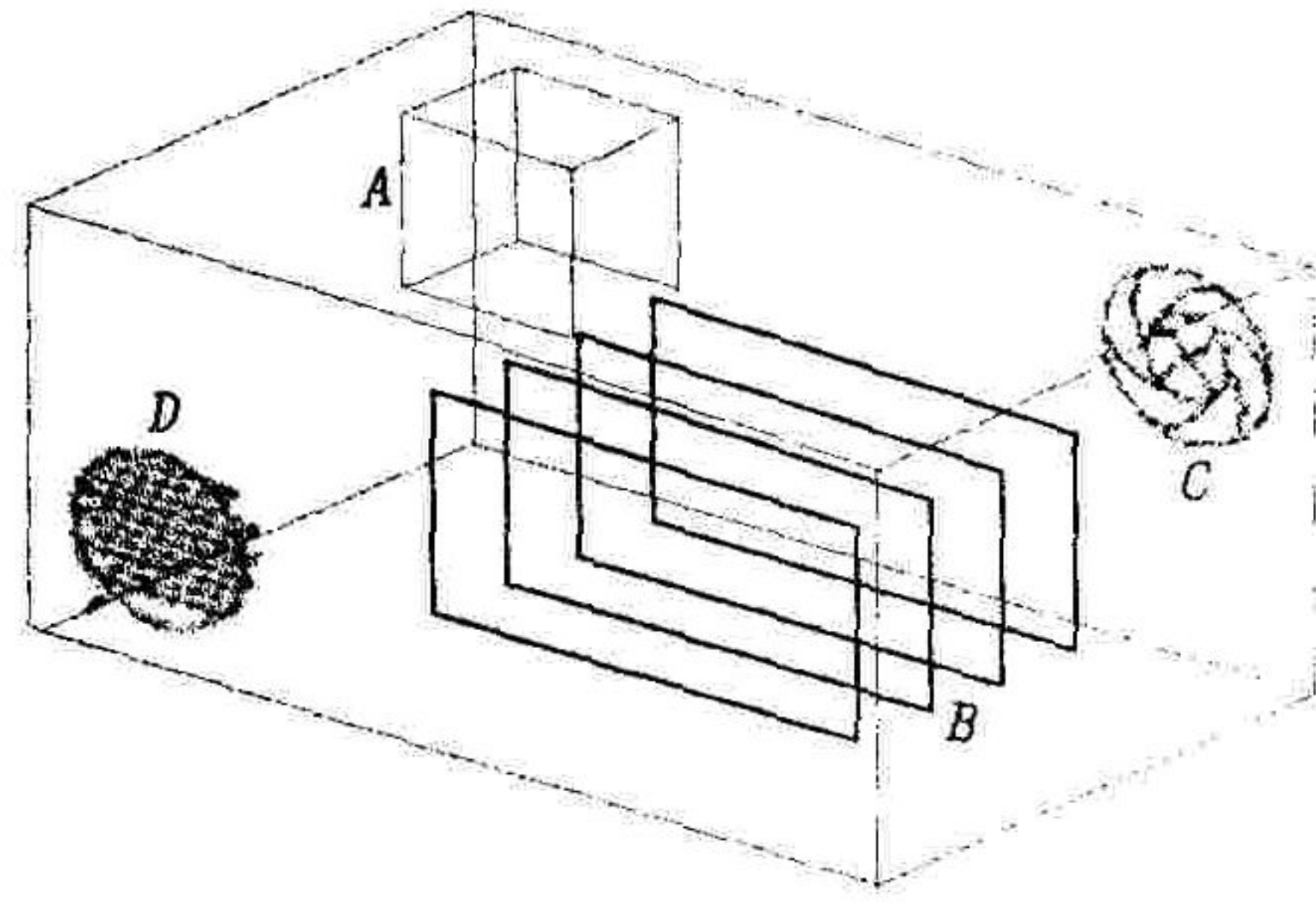


图1 结构设计简图

2 控制方程

研究对象所采用的冷却方式是一个典型的以空气为传热介质的强迫对流换热方式。在直角坐标系中采用 Einstein 求和的符号规则,其质量守恒、动量守恒和能量守恒方程可写成如下形式:

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + S_i \quad (2)$$

式中应力张量为

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (3)$$

其中: δ_{ij} 为 Kroneker 算符,当 i 与 j 相等时其值为1;当 i 与 j 不相等时其值为0。 t 为时间, ρ 为密度, p 为压力, u 为速度, x 为空间坐标变量, μ 为分子粘性系数, S_i 为源项。

流体区域的能量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k + k_t \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} + S_h \quad (4)$$

固体区域的能量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho h = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \dot{q} \quad (5)$$

式(4)、(5)是以焓的形式写出的能量方程。 k 为分子导热系数, k_t 为湍流导热系数, T 为温度, $\dot{q}$ 为热源。 h 和 k_t 可按下式计算,

$$h = \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p dT \quad (6)$$

$$k_t = \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \quad (7)$$

式(7)中的 μ_t 为湍流粘性系数。

3 计算方法

上述椭圆型方程描述的是一有回流的对流换热问题,求解对流换热问题的关键是确定流场。因上述设备正常工作时具有稳定的耗散功率和冷却风流量,故可视为稳态问题,从而略去方程中的时间项。本文采用控制容积法离散控制方程,在每一个控制容积上积分控制方程,以达到所产生的离散方程在每一个控制容积上都守恒的目的。如图2所示,取整个机箱内的空间为求解区域,采用结构化网格分割该求解区域,考虑到接近电源和电路板表面时求解变量有较大的梯度,故在此处对网格进行了加密处理,将整个求解区域划分为68 040个小控制容积。计

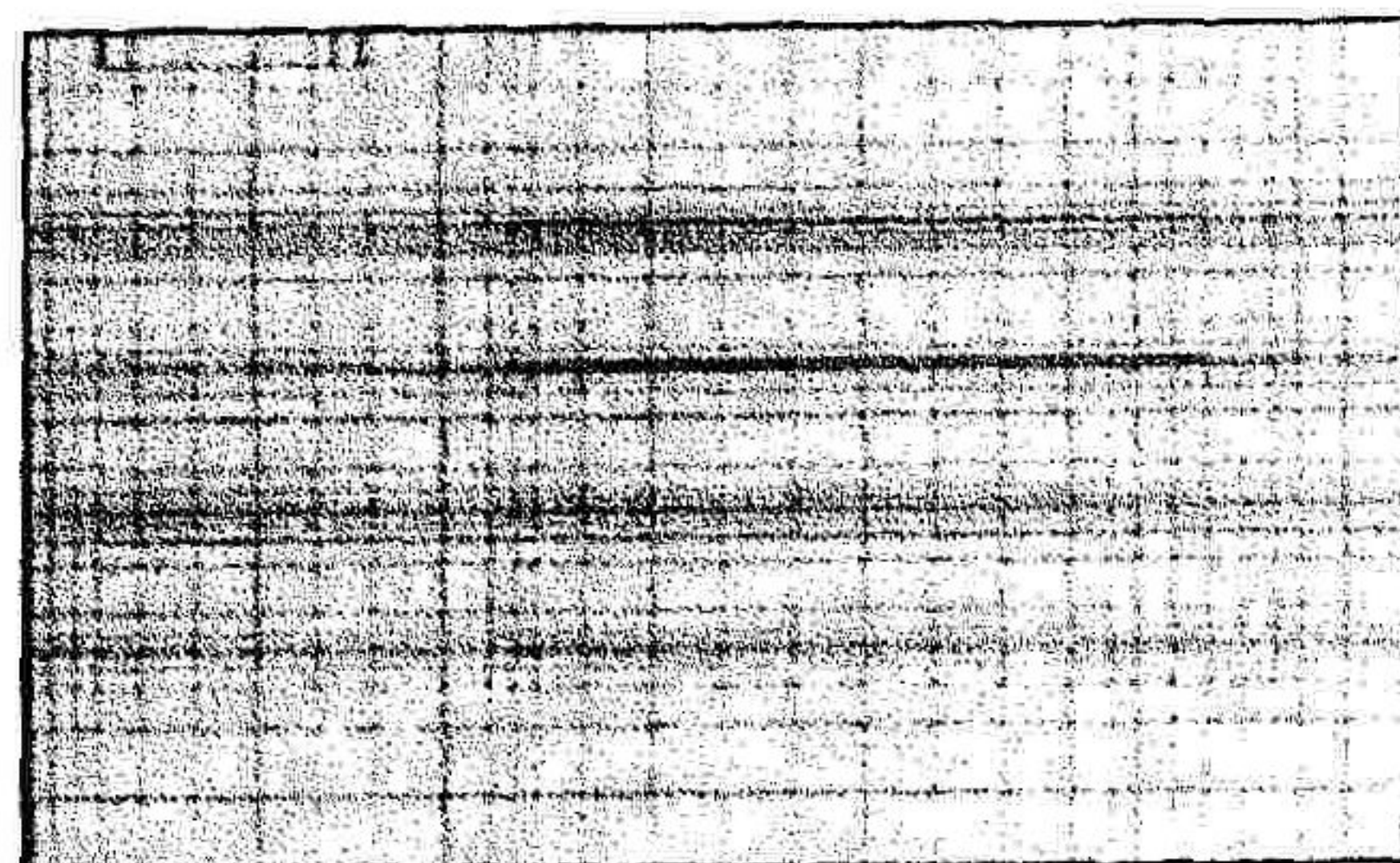


图2 整个计算区域网格划分示意图

算中将冷却空气视为不可压缩流体;核心区和壁面区的湍流模型分别采用标准 $k-\varepsilon$ 模型和 RNG $k-\varepsilon$ 模型;用 Simple 算法求解压力速度偶合问题;并引入多重网格技术以加快收敛速度和提高计算精度。受机箱外部实际安装条件的限制,箱壳被简化为一表面换热的物理边界,箱内与外界的热交换通过通风口和换气扇所组成的通路进行;外界空气温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

4 计算结果及讨论

图3~图6是由计算得到的设备各组件及设备机箱内部各空间位置上的温度云图和速度矢量图。由图3可以看出设备内部电路板和电源的温度水平及其分布,当环境温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,电路板上最高的温度为 $41.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,出现在从前向后数据的第一块板子上,最低的温度为 $26.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,出现在第4块板子上,电路板的平均温度为 $37.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。电源表面的温度分布为 $21.1\sim 40.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,其平均温度为 $27.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,电路板和电源表面的不同的温度分布是由于机箱内部不同位置的冷却效果不同所致。冷却气流的冷却效果与其流态有关,从图4~6可以看出,机箱内不同空间截面上的冷却气流流动速度的大小和方向是不同的,最大的风速为 0.864 m/s ,最小的风速接近于零,电路板间的平均风速只有 0.1 m/s 左右。受进排气口的位置及系统内部结构的影响,在系统内部有回流产生,局部区域只有微弱流动。一方面,回流区及弱流动区域的热量不能及时的被冷却气流带走,另一方面,回流区的冷却气流已从其上游携带了一定的热量,本身的温度也比一次流的温度高,冷却效果差,从而导致了这些区域的温度较高。电路板局部 $41.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度水平是在环境温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况下得到的,环境温度升高后,该值同样也会跟进升高,这就意味着该设备的现有热设计方案对其工作环境的要求比较苛刻。

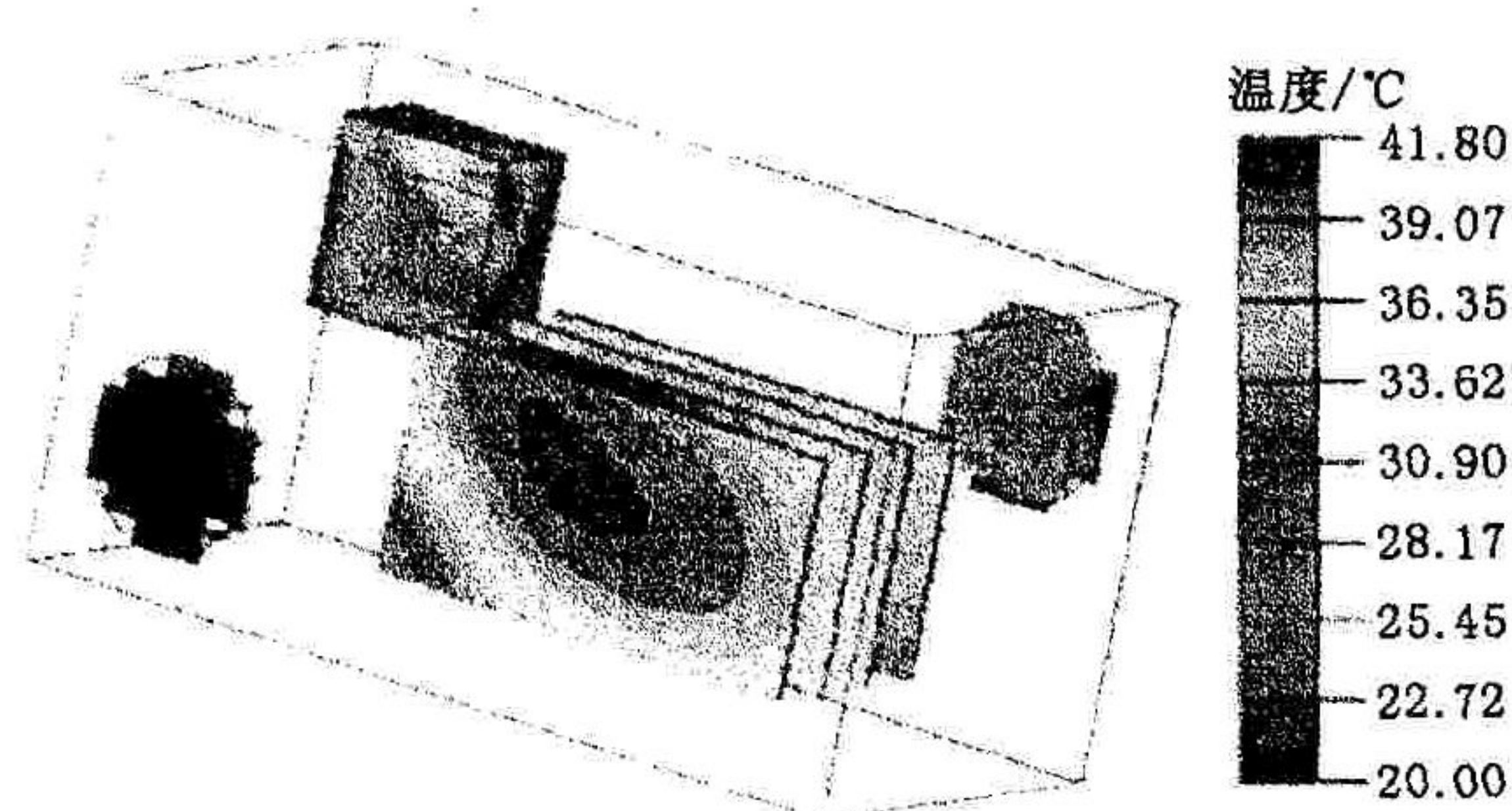


图3 电源、电路板、风扇及通风口的温度分布

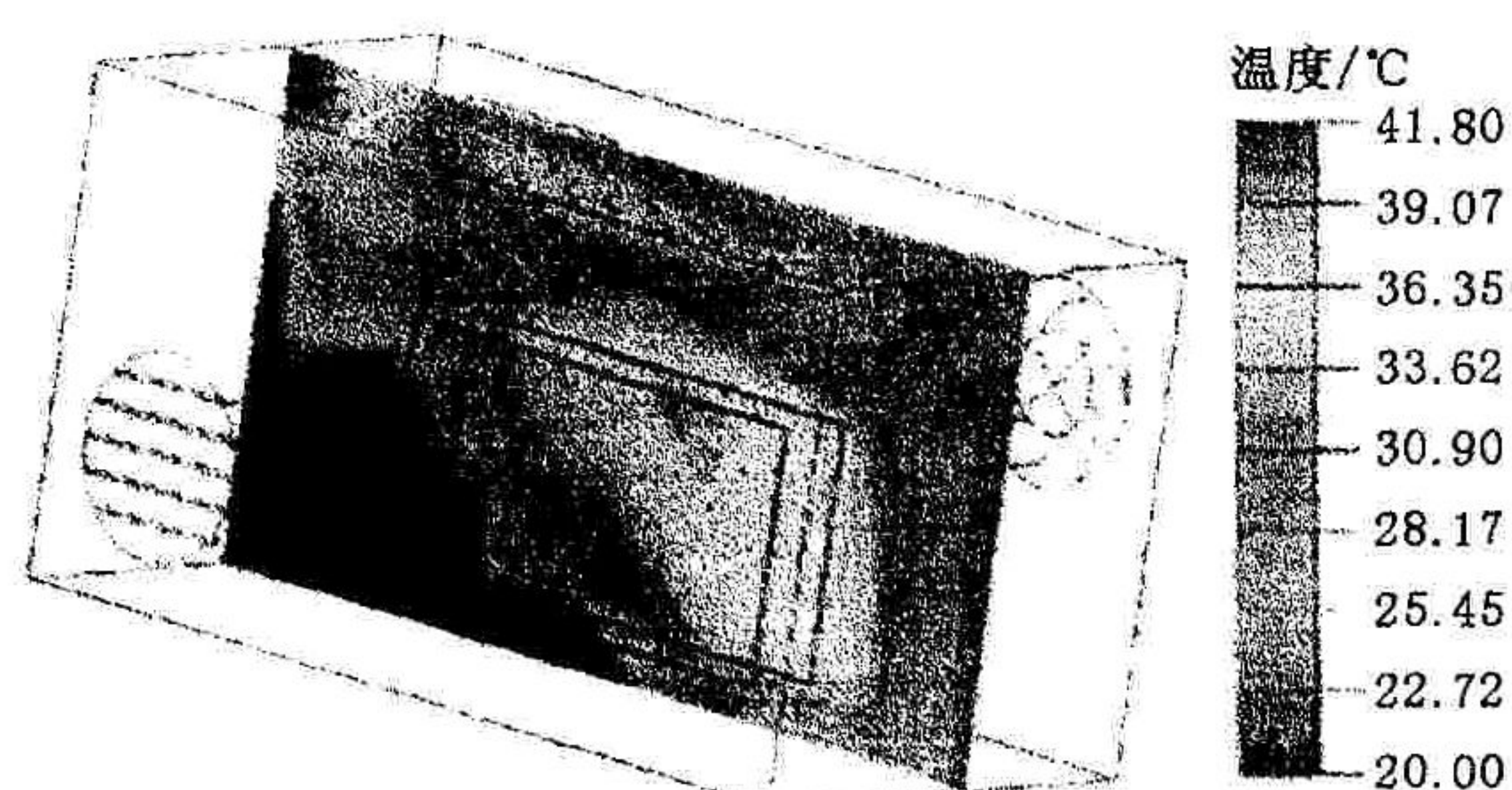


图4 机箱内前、后、中间截面上的温度和速度矢量分布

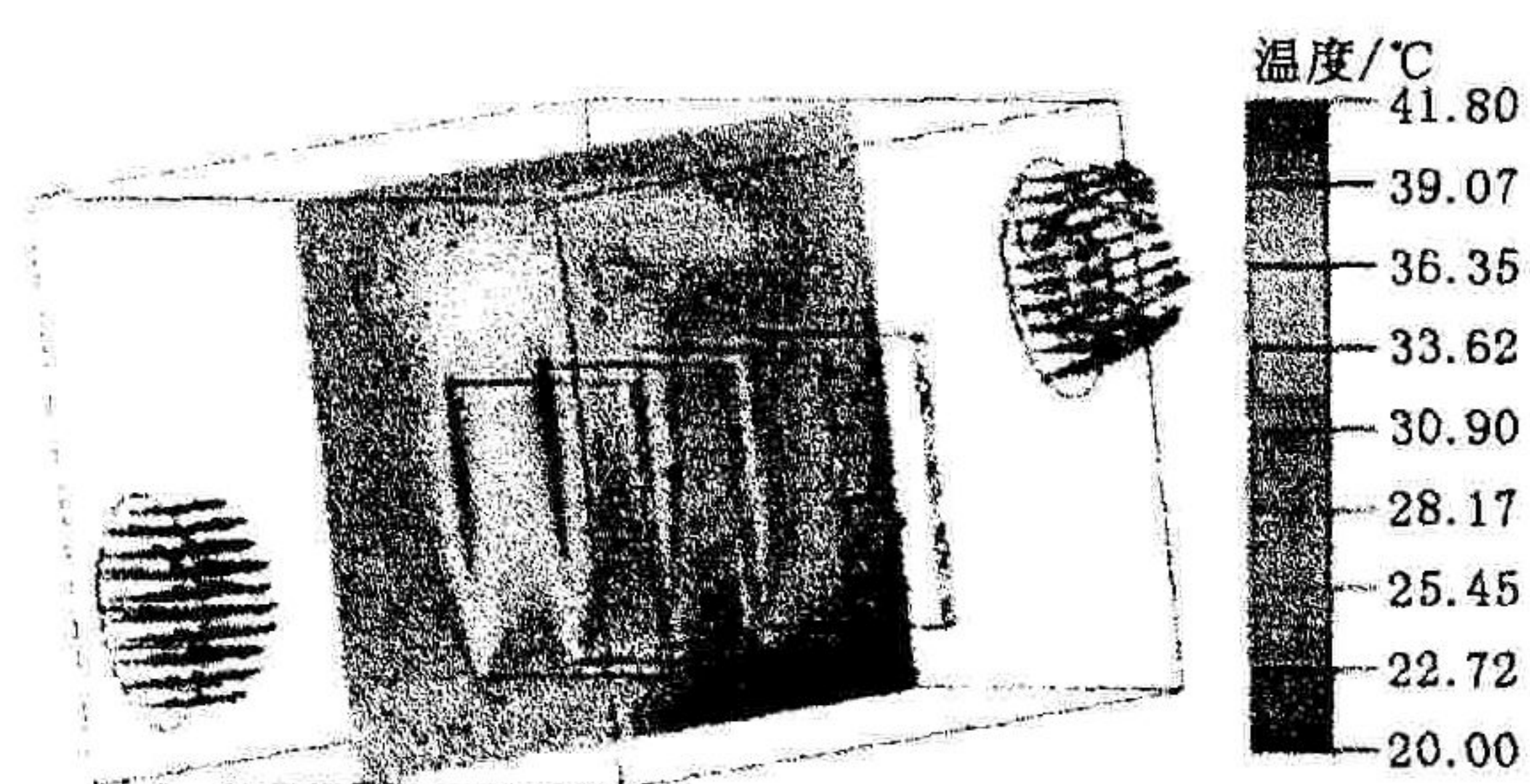


图5 机箱内左、右、中间截面上的温度和速度矢量分布

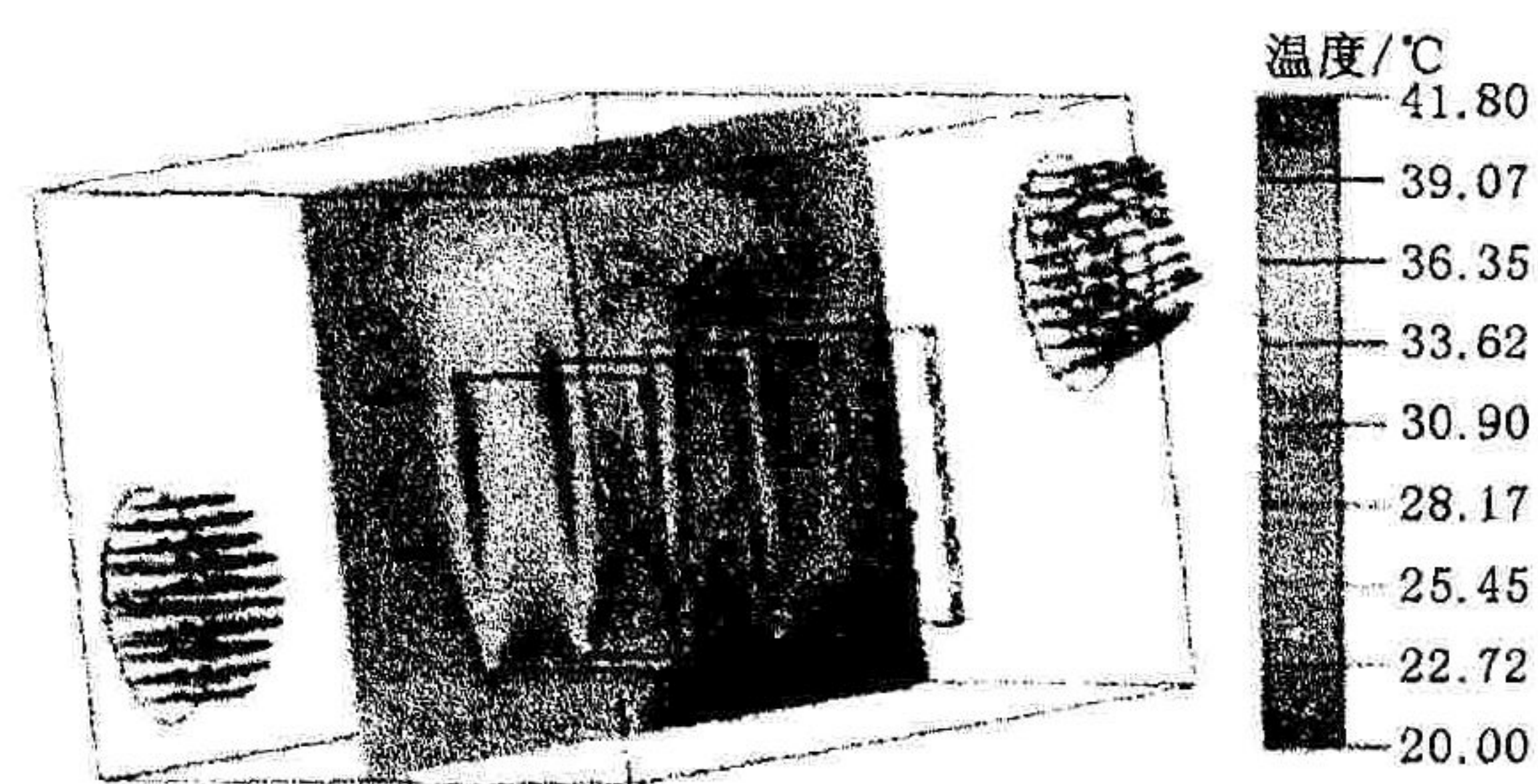


图6 机箱内上、下、中间截面上的温度和速度矢量分布

研究还试算了将进出风口对称的设置左右壁面上的情况。在这种情况下,各电路板两侧的风道较为通畅,且流过电路板表面的冷却气流无回流现象,冷却效果好,使电路板的最高温度降低了近 $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。然而,由于该方案使电源处于流动死角区域,冷却效果较差,其最高温度上升了近 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,况且,进出风口设置在左右壁面的方案也不符合只能在前后壁面设置进出风口的整机安装条件的限制。针对进出风口的位置受安装环

境限制这一特殊情况,研究提出可通过两种思路改善其热设计:一是调整进出风口的设计尺寸及风扇转速,增大冷却风流量;二是在机箱内进风口与电源之间的通路上增设导风板,设计风道,分流冷却气流,改善整机的冷却效果。本文倾向于采用第二种思路,并对在机箱内进风口与电源之间的通路上增设3块大小不同的导风板的情况进行了计算,结果较为满意。考虑到篇幅有限,对于详细的优化过程及优化结果将另作论述。

由上述研究还可以看出,电子设备的前端热设计方法与以往的热设计相比具有操作方便,省时全面的特点,有利于方案优化,有助于缩短电子产品的开发周期和降低设计成本。

参考文献:

- [1] 谢德仁. 电子设备热设计工作点评[J]. 电子机械工程, 1999, (1): 27-28.
- [2] 齐永强, 何雅玲, 张伟, 等. 电子设备热设计的初步研究[J]. 现代电子技术, 2003, (1): 73-79.
- [3] 傅军. 电子设备冷却技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 1989.
- [4] 赵婷受, 秦狄辉, 王世萍. 电子设备的热控制与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1992.
- [5] 刘明安, 董秋霞, 陈硕. 多元件电路板空间热状态的数值模拟[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2001, 2(3): 40-43.
- [6] 丁延卫, 卢镔. 空间光学传感器热设计中的计算数值模拟[J]. 光学技术, 2002, 28(5): 401-406.
- [7] 吕召会. 某电源模块的热设计及分析[J]. 电子机械工程, 2002, 18(1): 48-50.
- [8] 郭京明. 某雷达发射机冷却系统的设计[J]. 电子机械工程, 2002, 18(4): 33-35.
- [9] 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.
- [10] 董素君, 刘猛, 王浚. 飞机吊舱系统计算机仿真研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(6): 671-674.
- [11] 陈旭, 毕人良. 电子设备冷却中热电制冷的设计与应用[J]. 计算机工程与科学, 2001, 23(4): 43-48.
- [12] Bar-Cohen Avram, Lyengar Madhusudan. Least-Energy Optimization of Air-Cooled Heat Sinks for Sustainable Development[J]. IEEE Transaction on Components and Packaging Technologies, 2003, 26(1): 16-25.
- [13] 宋洪涛, 宾鸿赞. 热仿真技术在电子设备结构设计中的作用[J]. 应用科技, 2001, 28(8): 4-6.

(编辑: 门向生)

Investigation on Thermal Design for Opening Cabinet of Electronic Equipment by Numerical Simulation

LIU Ming-an¹, QIU Xia², CHEN Shuo³

(1. The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China; 2. The Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710051, China; 3. School of Mechanical and Power Energy Engineering of Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Based on the new concept of advance thermal analysis and design for electronic equipment, the thermal behavior of the power components and the printed circuit board (PCB) in an opening cabinet are simulated numerically using calculation fluid dynamic method. Temperature values and their profiles on the face of PCB and power supply are obtained, and so are their spatial modes in cabinet. The results are discussed and analyzed, which provides a theoretical basis for optimizing and improving the thermal design of the electronic equipment. The research shows that the advance thermal design for electronic equipment, compared to the traditional one, is easy in operation, advantageous to optimization and of low cost.

Key Words: electronic equipment; opening cabinet; thermal design; numerical simulation