

海拔高度对计算机散热影响的研究

黄延平

(1. 长春理工大学机电工程学院, 吉林长春 130022; 2. 无锡工艺学院机电系, 江苏无锡 214206)

摘 要: 中国海拔 1km 以上地区占全国总面积 65%, 属于高原国家. 计算机等电子设备的散热能力受海拔高度的影响很大, 电器的散热的好坏直接影响元器件的寿命、运算速度和使用的稳定性等. 为了研究海拔高度对电子设备的散热的影响, 依据热力学的基本理论, 引入了海拔高度参数, 对建立在海平面基础上的茹卡乌斯数学模型、Chilton-Colburn 方程等传热计算模型进行了修正, 建立了一套不同海拔高度电器热分析计算方法, 解决了海拔高度参数和电器散热关系的问题. 其分析结果符合国际电工委员会实验标准, 并用 Ansys Icepak4.5 电子热设计专用软件进行了验证. 为不同海拔高度地区计算机等电器设备热设计和寿命评估提供了理论基础.

关键词: 海拔高; 空气密度; 散热; 茹卡乌斯数学模型

中图分类号: TK121 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)12-2442-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.12.016

Research on the Effects of Altitude in Computer Heat Dissipation

HUANG Yan-ping

(1. College of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

2. Department of Mechanical Engineering, Wuxi Institute of Art & Technology, Wuxi, Jiangsu 214206, China)

Abstract: The areas at an altitude of 1000m and above account for 65% of the total area of China, therefore, China is a plateau country. For electronic devices such as computers, cooling ability is much affected by attitude, and electric heat dissipation directly affects the service life of components, computing speed, stability, etc. To study the effects of altitude on the cooling of electric devices, the altitude parameters are introduced to modify the Zukauskas mathematical model, Chilton-Colburn model, and other heat transfer models, according to the fundamental theory of thermodynamics. Electrical heat calculation method for the electronic devices at different altitudes is proposed, and the relationship between the altitude and electrical cooling capability is revealed. The analysis result conforms to the international electro-technical commission standard experiment and is verified by the specialized thermal design software Ansys Icepak4.5, which provides theoretical basis for the thermal design and the life-span evaluation of the electric devices, such as computers, at different altitudes.

Key words: high altitude; air density; heat dissipation; zukauskas mathematical model

1 引言

计算机性能的三大指标是, 计算速度、计算机散热能力、电池的续航能力. 其中, 散热能力的好坏反过来又影响运算速度, 散热不好, CPU 的工作温度过高, 影响计算机的运算速度, 严重时经常会经常死机甚至烧毁主板. 同时如果计算机长时间在高温状态下运行, 也会降低 CPU 等各种封装体及其他元器件的使用寿命. 这就要求进行热设计时, 要进行合理、精确的传热计算, 要考虑到对散热影响的各种因素. 计算机的散热主要方法是加装排风扇, 采用强迫对流的热传导方式进行散热. 对流传热和气体的温度、密度、运动粘度及压强等空气性能有直接的关系, 而空气的这些性质受所在地区的海拔高度影响

很大. 高海拔地区的大气压小, 温度、密度低, 空气运动粘度值小, 相对平原地区来说, 对流传热效果不好, 会引起计算机工作温度升高. 中国海拔 1km 以上地区占全国总面积 65%, 水电、风电、石油、煤炭等资源的 70% 都在新疆、内蒙等高原地区. 因此, 研究不同海拔高度对计算机、手机等电器设备的散热影响, 对高原地区人们正常的生产和生活具有重要的现实意义.

对计算机温度场热设计的方法有很多, 大部分设计人员使用的是各种仿真软件, 边界条件设定复杂, 仿真的结果误差大. 采用经验公式的实验方法, 可以根据传热计算模型的特点和尺寸, 选择适合的经验公式和分析方法, 计算的结果更接近实际情况, 试验法进行热分析和热优化设计时, 对电子器件尺寸、热参数修改起来

更方便更直观.但这方面研究文献相对来说比较少,热设计时也忽略了海拔高度的影响因素,通常的情况下加一个修正系数,修正误差约在 20% 以上.本文以一台计算机模型为研究对象,根据传热理论与高海拔气体流动特点,引入了海拔高度参数,对茹卡乌斯数学公式和 Chilton-Colburn 方程(奇尔顿·柯尔本)等典型传热理论进行了修正^[1],在此基础上,结合不同海拔高度空气性质对计算机温升的影响,建立起来了较为精确的传热计算理论,并将计算结果和仿真结果进行对比,驻明了本文提出修正后的数学模型是合理准确的.

2 模型的建立与计算方案

2.1 模型的建立

实验模型的组成如图 1 所示.是一个系统级封装的模型,简化为 5 部分,PCB 板、风扇、散热器、芯片和百叶窗.该封装体散热有两个途径,一是风扇进行的强制对流散热;二是用铝制散热器的传导散热.散热器散热翅片共 36 个($N_T \times N_L = 6 \times 6$),截面形状为圆形($D = 20\text{mm}$),翅片采用顺排方式,间距($S_T = 30\text{mm}$; $S_L = 30\text{mm}$).PCB 板的材料为 FR-4,导热系数 $0.35\text{W/m}\cdot\text{K}$.铝制散热器的导热系数是 $205\text{W/m}\cdot\text{K}$.风扇是台湾建准公司的计算机专用风扇(Sunon.Pmd121),风扇的体积流量是非线性的.用于散热的百叶窗大小为 $150 \times 190\text{mm}$,设定打开率为 50%.散热器下面有一个 300W 的电子芯片热源.

2.2 计算方案和确定边界条件

针对该模型,选择了海平面和海拔高度为 4km 两个海拔高度进行强迫对流的散热分析.海拔高度不同空气性能会有很大的改变.依据空气的物理性质数据作为两个海拔高度计算的边界条件,用本文修正后的传热计算模型对计算机散热进行分析,求解计算机进出口的温度差、热传导速率、确定风扇工作点和风扇的功率等.海拔 4km 高时,空气密度仅是海平面的 66.8%;压力是海平面大气压的 60%,这些都对热量传导有很大影响.

3 数学模型

3.1 该实验模型使用的数学模型

根据所建的模型特点,散热装置是一组圆形的管簇散热方式,使用茹卡乌斯数学模型进行求解^[2].茹卡乌斯数学模型:

$$\overline{N_{ud}} = CR_{ed}^m P_r^n \left(\frac{P_r}{P_{rs}} \right)^{1/4} \quad (1)$$

$$\left[\begin{array}{l} N_L \geq 20 \\ 0.7 \leq P_r \leq 500 \\ 1000 \leq R_{ed, \max} \leq 2 \times 10^6 \end{array} \right]$$

因为本文实验模型 $N_L = 6 < 20$,应该对公式(1)进行修改,

$$\overline{N_{ud}} |_{(N_L < 20)} = C_2 \overline{N_{ud}} |_{(N_L \geq 20)} \quad (2)$$

式(2)中的修正系数 C_2 可以通过查表得到,本例中因为 $N_L = 6$,查表可以得到 $C_2 = 0.94$.

该实验模型使用的对数平均温差公式:

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_s - T_i) - (T_s - T_o)}{\ln \left(\frac{T_s - T_i}{T_s - T_o} \right)} \quad (3)$$

T_s ; T_i ; T_o 分别是管族表面温度、空气进口温度和出口温度.

针对本实验模型各部件形状及尺寸建立起来的对数平均温差求解公式:

$$\frac{T_s - T_o}{T_s - T_i} = \exp \left(- \frac{\pi D N \bar{h}}{\rho V N_T S_{Tc_p}} \right) \quad (4)$$

其中 N 是管簇中总的管数, N_T 是管簇横向排数, V 是流体速度.

单位管长的热传递速率求解公式:

$$q' = N(\bar{h} \pi D \Delta T_{lm}) \quad (5)$$

流体通过管簇压力下降的求解公式,压差是一个重要的参数,根据这个参数我们可以计算出风机的阻力,确定风机工作点,进而计算出排风扇的功率.

$$\Delta p = N_L \chi \left(\frac{\rho V_{\max}^2}{2} \right) f \quad (6)$$

摩擦因子 f 和修正因子 χ 可以根据计算出的雷诺数和散热翅片的尺寸和排列方式查表得出.

3.2 海拔高度和气体性质之间的关系

研究表明,气体的性质中受海拔高度影响最大的有空气的密度、压力、运动粘度和空气的环境温度.海拔高度对空气的分子量、空气的比热等性质影响比较小,都可以忽略不计,这样就重点研究对空气性质影响较大的几项.

温度 空气温度和海拔高度的关系:

$$T(z) = 15^\circ\text{C} - 0.0065(z) \quad (7)$$

公式中 $T(z)$ 代表温度, z 是代表海拔高度.海平面的温度一般认为是 15°C .

大气压强 大气压强和海拔高度的关系(公式推导略):

$$P(z) = P_0 [1 - (2.25577)(10^{-5})(z)]^{5.2559} \quad (8)$$

式(8)中 $P(z)$ 代表大气压, z 是海拔高度, P_0 是海平面的标准大气压 (101.08kPa).

密度 高海拔地区的气体是由干燥空气和含有水蒸汽的气体两部分组成,气体的密度和湿度、温度及压强有关.不同海拔高度的密度公式为:

$$\rho(z) = \frac{p(z)}{R_{da} T(z) [1 + 1.608 w(z)]} [1 + w(z)] \quad (9)$$

P 为压强, w 为空气湿度, T 为温度, z 为海拔高度. 为了简化研究, 引入了空气的密度比 $\xi(z)$, 其值是不同海拔高度空气密度和海平面的空气密度之比.

$$\xi(z) = \frac{\rho(z)}{\rho} = \frac{p(z)[1+w(z)]}{R_{da}T(z)[1+1.608w(z)]} \cdot \frac{R_{da}T(1+1.608w)}{p(1+w)} \quad (10)$$

在海拔 4000m 之内, 湿度对空气密度的影响可以忽略不计. 公式(10)就简化为:

$$\xi(z) = \frac{\rho(z)}{\rho} = \frac{T \times p(z)}{T(z)p} = [1 - (2.2557 \cdot 10^{-5})(z)] 5.2559 \times \frac{T(z)}{T} \quad (11)$$

雷诺系数修正:

雷诺系数是特定区域内流体的惯性力和粘黏性力之比. 传热理论通常简化为用公式(12)求解雷诺数.

$$Re_L = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (12)$$

对于本文所使用的是同一实验模型, 其封闭体的各种尺寸是不变的, 只有海拔高度发生了改变, 从公式(12)中可以看出, 只是空气密度发生了改变, 应用密度比 $\xi(z)$ 这个参数可以很方便的得出不同海拔高度雷诺系数的求解公式:

$$Re_L(z) = \xi(z) Re_L \quad (13)$$

热交换系数的修正:

对外部流动的热交换来说, 可以用 Chilton-Colburn 方程(奇尔顿·柯尔本类似)求解对流的热交换系数:

$$\bar{h} = j \frac{\rho c_p u_\infty}{Pr^{2/3}} \quad (14)$$

根据实验研究 Pr 、 c_p 、 u_∞ 三个参数在海拔 4000m 之内变化很小, 只有 1.7% 的量, 为了方便研究假定这 3 个参数值是恒定的. 不同海拔高度热交换系数可以写成:

$$\bar{h}(z) = j_z \frac{\rho(z) c_p u_\infty}{Pr^{2/3}} \quad (15)$$

在这个公式中只有传热因子 j 和空气密度 ρ 是变

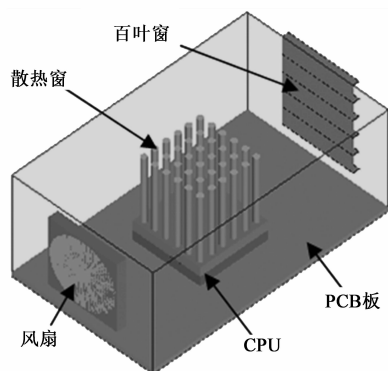


图1 仿真模型示意图

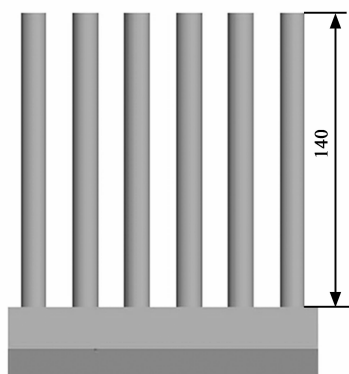


图2 散热器

量, 和海拔高度 z 有关. 联合公式(14)、公式(15)和公式(11)可得:

$$\bar{h}(z) = \bar{h} \frac{j_z}{j} \xi(z)$$

Kakaç 和 Liu 等研究发现^[3], 不同海拔高度传热因子 j 有 $\frac{j_z}{j} = 1 + 5 \times 10^{-5}(z)$, 那么上面公式进行修正后可以写成:

$$\bar{h}(z) = [1 + 5 \times 10^{-5}(z)] \bar{h} \xi(z) \quad (16)$$

4 实例计算与分析

对该实验模型进行海平面和海拔高度是 4km 两种情况散热分析; 通过计算压差来确定风扇的工作点, 最后计算出不同海拔高度风扇的运行功率.

4.1 在海平面上热分析

实验模型的相关尺寸如图 2 和图 3 所示. 排数 $N_L = 6$; 列数 $N_T = 6$. 对流空气温度和速度分别为 15℃ 和 5m/s. 电子芯片有 300w 的功率发热源, 为了保证 CPU 正常工作, 铝制散热器表面温度不能超过 75℃. 求解计算机排风口的温度 T_o ; 散热器翅片的传热速率 q ; 散热风扇的压差 Δp ; 和散热风扇的功率 W .

假定: 稳态条件对流; 热辐射的影响忽略; 忽略散热器温度变化对空气物性的影响. 空气的常物性查有关手册.

(1) 根据不可压缩流体的质量守恒定律, 气体通过散热器翅片的最大流体速度是:

$$V_{\max} = \frac{S_T}{S_T - D} V = \frac{24}{24 - 12} \times 5 = 10 \text{ m/s}$$

(2) 计算最大流体速度时的雷诺系数,

$$Re_{D, \max} = \frac{V_{\max} D}{\nu} = \frac{10 \times 0.012}{14.82 \times 10^{-6}} = 8097$$

(3) 根据茹卡乌斯数学模型公式(1)计算平均的努

塞尔数 $\overline{Nu}_D = CR_{\rho}^m P_r^n \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{1/4}$, 根据雷诺数和顺排的特

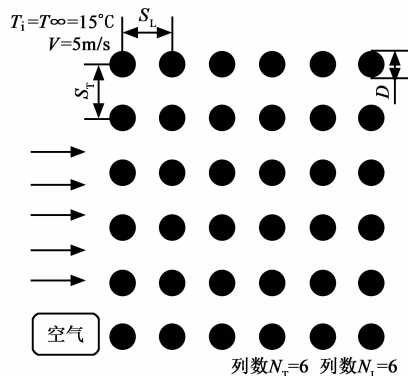


图3 对流示意图

点,可知该模型的 $C = 0.27, m = 0.63, n = 0.36$

$$\overline{N_{\mu D}} = 0.27 \times 8097^{0.63} \times 0.710^{0.36} (\frac{0.710}{0.7})^{0.25}$$
$$= 69.44$$

由于该实验模型管子的排数是 6, 小于 20 还要用公式(2)对努塞尔数进行修正.

$$\overline{N_{\mu D}}|_{(N_L < 20)} = C_2 \overline{N_{\mu D}}|_{(N_L \geq 20)}$$
$$= 0.94 \times 69.44 = 65.27$$

(4)平均的热交换系数:

$$\bar{h} = \overline{N_{\mu D}} \frac{k}{D} = 65.27 \times \frac{0.0253}{0.012}$$
$$= 137.62 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

(5)排风口的温度 T_o :

$$T_o = T_s - (T_s - T_i) \exp(-\frac{\pi D \bar{N} h}{\rho V N_T S_T c_p})$$
$$T_o = 75 - (75 - 15)$$
$$\cdot \exp(-\frac{3.14 \times 0.012 \times 36 \times 137.62}{1.1614 \times 5 \times 6 \times 0.024 \times 1007}) = 300.1 \text{K}$$

(6)对数的平均温差:

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_s - T_i) - (T_s - T_o)}{\ln(\frac{T_s - T_i}{T_s - T_o})} = 54.32 \text{K}$$

(7)单位管长的热传递率:

$$q = N(\bar{h} \pi D \Delta T_{lm}) = 10.14 \text{kW}/\text{m}$$

(8)排风扇的压差:

$$\Delta p = N_L \chi (\frac{\rho V_{\max}^2}{2}) f = 73.17 \text{Pa}$$

修正系数 χ 和摩擦阻力系数可依据该实验模型的雷诺数、散热翅片尺寸和排列方式根据图 4 查得. 该摩擦因子和修正系数图表已经由美国热力学学会批准使用.

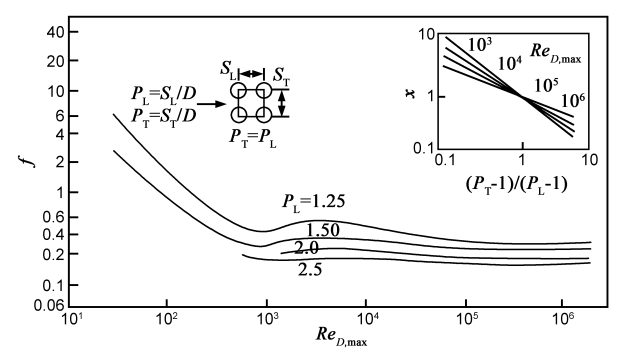


图4 摩擦因子和修正系数表

$$W = \forall \times \Delta p = V N_T S_T L \Delta P = 7.38 \text{W}$$

4.2 在 4km 高海拔地区该模型的热分析

因为海拔高度增加到 4km, 空气的环境温度、密度、大气压等都发生了明显的改变, 而这些参数对强迫对流传热会有很大的影响^[4]. 本文在 2.2 部分已经引入高

度参数对温度、密度、压强和传热因子等主要热参数进行了修正, 把这些修正了的热参数用在茹卡乌斯数学模型、数平均温差模型、雷诺系数模型、热交换系数模型和压差求解模型中, 从而得到新的数学模型, 再用这些新的数学模型对处在 4km 高海拔地区的计算机实验模型进行分析.

海拔 4km 空气物理性质的修正:

- (a)温度: $T(z) = 15^{\circ}\text{C} - 0.0065(z)$
- (b)压强: $P(z) = P_0[1 - (2.25577)(10^{-5})(z)]^{5.2559}$
- (c)密度:
- $$\rho(z) = \frac{p(z)}{R_{da} T(z) [1 + 1.608 w(z)]} [1 + w(z)]$$
- (d)密度比:
- $$\xi(z) = \frac{\rho(z)}{\rho} = \frac{T \times p(z)}{T(z) p}$$
$$= [1 - (2.2557 \cdot 10^{-5})(z)] 5.2559 \times \frac{T(z)}{T}$$
- (e)传热因子: $\frac{j_z}{j} = 1 + 5 \times 10^{-5}(z)$

用以上 5 个修正因子对茹卡乌斯数学模型等数学模型进行修正, 求得实验模型在 4km 海拔地区的热分析数据:

- (1)雷诺数: $R_{eL}(z) = \xi(z) R_{eL} = 5050.68$.
- (2)热交换系数:
- $$\bar{h}(z) = [1 + 5 \times 10^{-5}(z)] \bar{h} \xi(z) = 103.22$$
- (3)排风口的温度 T_{oz}
- $$T_{oz} = T_{sz} - (T_{sz} - T_{iz}) \exp(-\frac{\pi D \bar{N} h(z)}{\rho(z) V N_T S_T c_p})$$
$$= 276.02 \text{K}$$

在这里我们使用对流进口空气温度 T_{sz} 是 -11°C , 是海拔 4km 地区室外环境温度. 如果假设该实验模型是在室内工作环境温度设为 15°C , 排气口的温度可达到 303.17K, 和海平面排气口温度 300K 比较, 温度上升了 3.17°C . 这个计算的结果也符合国际电工委员会实验标准, 海拔高度每上升 1km, 电器平均温升上升 1°C 左右. 也证明了对茹卡乌斯数学模型修正是合理的.

(4)对数的平均温差:

$$\Delta T_{lmz} = \frac{(T_{sz} - T_{iz}) - (T_{sz} - T_{oz})}{\ln(\frac{T_{sz} - T_{iz}}{T_{sz} - T_{oz}})} = 53.92 \text{K}$$

(5)单位管长的热传递率:

$$q'_z = N(\bar{h}(z) \pi D \Delta T_{lmz}) = 7.55 \text{kW}/\text{m}$$

(6)排风扇的压差:

$$\Delta p_z = N_L \chi (\frac{\rho_z V_{\max}^2}{2}) f = 45.73 \text{Pa}$$

高海拔地区风扇压差下降幅度比较大, 仅是海平

面压差的 63% 左右, 由于气压的减少, 空气密度也有很大的降幅, 单位体积里空气质量减少, 对流带走的热量降低, 计算机等电器设备在高海拔地区散热效果不好, 电器设备温升会很高. 再有我们注意到压差计算公式, $\Delta p_z \propto \rho(z) V^2$, 压差和空气密度、速度平方成正比关系, 这点对电器热设计很重要.

(7) 排风扇的功率:

$$W_z = \dot{V} \times \Delta p_z = V N_T S_T L \Delta P_z = 4.6 W$$

因为密度的下降, 单位体积内空气分子质量少, 风扇的阻力降低, 所以在实现相同体积流量的对流散热中, 高海拔地区风扇功率下降.

4.3 使用 Ansys.Icepak14.5 电子设备热分析专用软件进行验证

Ansys.Icepak14.5 为电子产品的热分析提供 CFD 分析能力^[5]. 在 ANSYS FLUENT 求解器基础上, ANSYS Icepak 使用了高级求解技术和精确的网格功能, 为电子产品提供快速、精确的热分析结果. 是目前计算机等电子产品热设计应用最广泛的软件^[6]. 使用本文建立起来的实验模型并把数值计算时的已知条件作为仿真的边界条件, 进行仿真实验, 结果如表 1 所示.

从表 1 中可以看出, 采用本文热分析理论计算得到的结果和 Ansys.Icepak14.5 仿真结果是一致的^[7,8], 说明了所建的数学模型是合理正确的, 该计算方法对计算机进行热设计具有很好的实用性.

表 1 计算结果验证

海拔高度	方法	出口温度	风扇压差
海平面	理论计算	300.1K	73.17Pa
	仿真计算	295.91K	71.98Pa
4km	理论计算	276K	45.73Pa
	仿真计算	274K	44.37Pa

图 5 是该实验模型热对流流迹仿真示意图. 比较直观的看到热对流流体的运动轨迹. 从图中可以看出散热器和散热风扇之间流体处于明显的湍流状态, 说明本文使用湍流分析是符合实际情况的.

图 6 是该实验模型仿真计算得到的排风扇特性曲线. 从图 6 中可以看到, 海平面和 4km 仿真得到的风扇工作点分别是 A 和 B 点, 其所对应的纵坐标是排风扇的压差 (in_{water}/每立方英寸水柱高, 英制单位); 横坐标所对应的是该风扇的体积流量 (cfm/每分钟立方英尺). 从图中可以看到海拔高度的改变, 风扇的压差变化很大, 这些改变对准确确定风扇工作点影响很大. 准确确定风扇工作点对优化计算机散热是极其重要的, 便于实现在保障良好的散热效果前提下, 使用较小的风扇功率. 从表 1 中可以看出使用本文的理论计算方法

和软件仿真结果十分接近, 也证明本文的理论是正确合理的, 在计算机热设计优化时, 使用本文理论, 通过对散热片尺寸、形状、排列方式进行优化, 显的更直观、更方便, 对热设计本理论更具有实际应用价值.

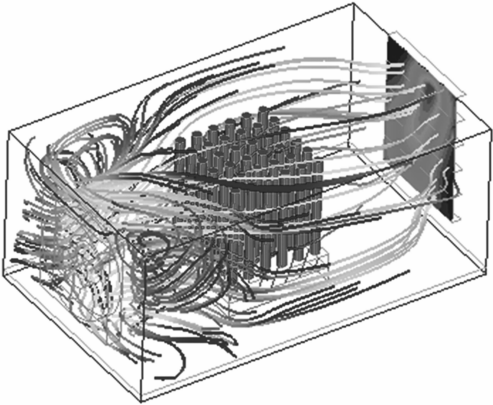


图5 海平面热对流仿真示意图

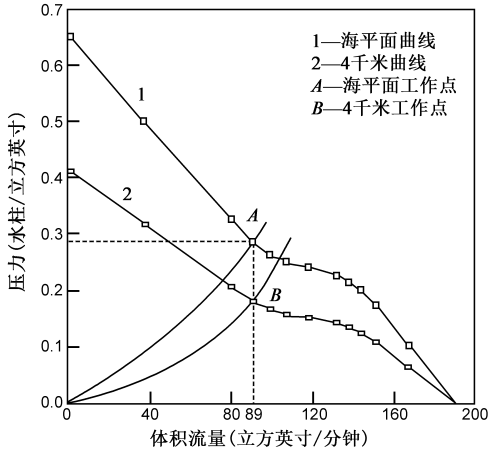


图6 风机工作特性曲线

5 结论

本文通过以一台在不同海拔地区运行的计算机机箱为研究对象, 用了本文提出的热分析理论对该实验模型进行热分析, 通过引入海拔高度参数对主要传热参数和较为典型的传热数学模型进行修正, 提出了一套不同海拔环境下计算机等电器设备热设计的理论计算方法, 并将计算的结果和仿真得到的结果进行对比研究, 得到如下的结论:

(1) 本文所确定的用于不同海拔地区计算机等电器热分析理论计算方法是正确的和可靠的.

(2) 在不同海拔高度地区进行电器热设计时, 一定要考虑空气温度、压力、密度、运动粘度等因素的改变, 这些参数对对流传热有很大的影响. 跟据空气性质的变化, 要对相关传热的数学模型进行合适的修正, 热分

析的结果才更接近实际.这对保障计算机等电器设备在不同海拔地区正常运行和寿命评估十分必要.

(3)海拔高度的改变,影响散热风扇的性能,达到和海平面相同的流体的体积流量,所用风扇功率下降了很多.

(4)该理论计算方法都是根据模型的尺寸、散热翅片的排列方式和一些设计要求参数求解的,这对实现参数修改提供了方便,更便于进行优化设计,提高电器类的热设计水平.

(5)引入海拔高度参数,完善了传热计算常用的数学模型,扩大了这些数学模型的应用范围.提高了不同海拔地区电器热分析的精度,较为准确的设计和评估不同海拔地区电器的使用寿命,使用该方法进行设计能够产生较好的经济效益.

参考文献

- [1] Incropera F P, DeWitt D P, Bergman T L. 传热和传质基本原理[M]. 葛新石, 叶宏, 译. 北京: 化学工业出版社, 2011. 219 – 222.
- [2] 李燕, 贾力. 脉动热管传热性能实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(11): 75 – 80.
Li Yan, Jia Li. Experimental research on heat transfer performance of pulsating heat pipe[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(11): 75 – 80. (in Chinese)

- [3] Nelson Fumo, Pedro J. Mago, Kenneth Jacobs. Design considerations for combined cooling, heating, and power systems at altitude[J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(2): 1459 – 1469.
- [4] 范平, 郑壮豪, 张东平, 梁广兴, 等. 热电薄膜与薄膜温差电池研究进展[J]. 真空科学与技术学报, 2012, 32(8): 700 – 704.
- [5] 陈洁茹, 朱敏波, 齐颖. Icepak 在电子设备热设计中的应用[J]. 电子机械工程, 2005, 21(1): 14 – 16.
- [6] 张洪才 孙长青. ANSYS 14.0/FLOTTRAN 理论解析与工程应用实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013. 24 – 34.
- [7] 范平, 郑壮豪, 张东平, 梁广兴, 等. 热电薄膜与薄膜温差电池研究进展[J]. 真空科学与技术学报, 2012, 32(8): 700 – 704.
- [8] 李金旺, 邹勇, 程林. 环路热管毛细芯热物性实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(17): 57 – 61.
Li Jinwang, Zou Yong, Cheng Lin. Experimental study on thermo physical properties of capillary wicks for loop heat pipe[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(17): 57 – 61. (in Chinese)

作者简介



黄延平 男, 1963 年生于河南太康. 长春理工大学博士. 研究方向为电子封装、传热和材料加工.

E-mail: hpingan111@163.com