

高海拔地区电子设备散热分析

黄延平^{1,2}, 曹国华¹, 王淑坤¹

(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: 电子设备机箱散热能力不仅会影响其稳定性, 也会影响各元器件的使用寿命, 特别是在空气稀薄、气压低的高海拔地区, 封闭机箱散热性能更差. 为研究高海拔地区电子设备的散热问题, 基于湍流理论, 建立了机箱冷却流场数学模型; 采用 ICEPAK 电子热设计专用软件, 对不同海拔高度的散热问题进行了仿真分析, 提出了两方程的湍流模型对空气稀薄地区散热计算更为准确的理论, 并通过仿真分析得到了验证, 为高海拔地区电子设备的散热设计提供参考.

关键词: 电子设备; 高海拔散热; ICEPAK; 湍流理论; 两方程模型

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.027

0 引言

我国 1 000 m 以上高海拔地区面积占全国总面积 65%, 水电、风电、石油、煤炭等资源的 3/4 都在新疆、内蒙等高原地区, 电器设备在高原地区的生产和生活中是必不可少的. 随着海拔高度的增加, 空气的压力、密度、温度逐渐下降, 电脑、手机等电子设备散热能力降低, 工作温度升高, 寿命就会降低, 研究高海拔地区电子设备散热问题, 对保证广大高原地区人们正常的生产和生活具有重要意义.

通常的情况下, 测算高海拔电子芯片封装体的温度是使用温升修正系数并采用对流换热方程推导计算, 这种办法误差约在 10 ℃ 以上, 精度远不如使用 Icepak 仿真或是在高海拔下实际测量所得到的结果^[1-2]. 笔者主要研究高海拔空气密度小、气压低的情况下, 采用风扇强制散热对电子器件温升的影响; 提出了在高海拔地区, 通过 Icepak 软件计算出各个电子元器件工作温度, 由于空气稀薄, 应该采用湍流模型的两方程模型, 而不是 Icepak 推荐的零方程模型.

1 仿真模型的建立与仿真方案

1.1 仿真模型的建立

该模型由 4 个零件组成, 如图 1 所示. 系统级

模型(电脑机箱、机柜等)是在 PCB 板上装有一系列工作的电子芯片. 通常冷却方案有两种, 一是风扇对发热电子元件进行强制对流冷却; 二是铝制散热器和 IC 芯片连接, 进行传导散热. 模型中铝制散热器散热翅片在 Z 方向和 X 方向都是 12 组, PCB 板的厚度是 10 mm, 材料为 FR-4, 导热系数是 0.35 W/(m·K). 铝制散热器的散热效果主要与其表面积大小有关, 不在这里讨论. 风扇选定的是转速恒定, 风扇的流量是非线性的, 流量的大小由自定义的曲线来确定. 在铝制散热器下面有一个 80 W 的热源, 该机箱为一个封闭的机箱.

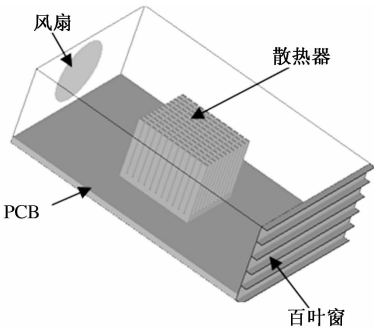


图 1 仿真模型示意图
Fig. 1 schematic model for the simulation

1.2 确定边界条件和仿真方案

不同海拔高度空气的密度、黏度、扩散系数等空气性能如表 1 所示. 将这些数据作为边界条件,

收稿日期:2014-07-25; 修订日期:2014-09-26
基金项目: 科技部创新基金资助项目(12C26212201331)
作者简介: 黄延平(1968-), 男, 河南周口人, 长春理工大学教授, 博士, 主要研究方向为电子封装及材料加工, E-mail: hpingan111@163.com.

对电器设备进行热分析.从表 1 可以看到,在海拔 6 000 m 的高度时,空气分子的密度仅仅是海平面的 48%;大气压力是海平面的 46%,这两项指标对热量传导有很大影响.

如图 1 的系统模型所示,在各元器件功率不变的情况下,4 个海拔高度分别为:标准海拔;

3 000 m;6 000 m;10 000 m.为了方便比较,室内工作温度均假定为 20 ℃.采用零方程模型和两方程模型,将分别对系统模型中的 PCB 板和百叶窗进行热计算,比较其热计算结果哪个更接近实际情况.

表 1 不同海拔高度空气性能
Tab.1 Air performance at different altitude

海拔高	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	传导系数/ ($\text{W} \cdot \text{M} \cdot \text{K}^{-1}$)	空气黏度/ ($\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	扩散系数/ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	分子量/ ($\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$)	大气压/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$)
标准海拔	1.161 4	1 005.0	0.026 1	1.84E-5	1.0	28.966	101 325
3 000 m	0.819 7	1 005.0	0.026 1	1.84E-5	1.0	28.966	70 093
6 000 m	0.564 3	1 005.0	0.026 1	1.84E-5	1.0	28.966	47 160
10 000 m	0.327 9	1 005.0	0.026 1	1.84E-5	1.0	28.966	26 416

2 散热湍流数学模型

系统模型流场的数学模型主要由两部份组成,一部分是在风扇附近的层流场;另一部分是风遇到电子元器件后,风向发生复杂的变化,形成的湍流场,并且在本模型中湍流流动是主要部分.通过计算,该模型的 Re 为 28 681,远远大于 2 300,所以选用湍流数学模型计算是合理的.湍流出现在速度变动的地方,这种波动使得流体介质之间相互交换动量、能量和浓度变化,而且引起了数量的波动.

2.1 湍流数学模型

2.1.1 零方程模型

Baldwin-Lomax 模式的具体数学描述如下.

$$\nu_T = \begin{cases} (\nu_T)_{inn}, y \leq y_c; \\ (\nu_T)_{ont}, y > y_c. \end{cases} \tag{1}$$

其中, y_c 是 $(\nu_T)_{inn} = (\nu_T)_{ont}$ 的离壁面最小距离.

对于内层,即 $y \leq y_c$,有

$$(\nu_T)_{inn} = l^2 \Omega. \tag{2}$$

式中: Ω 是涡量, $\Omega = |\epsilon_{ijk} U_{k,j}|$; l 是长度尺度:

$$l = ky(1 - \exp(-y/A)). \tag{3}$$

其中, $k = 0.4$ 是 Karman 常数; A 是模化常数, y 是无量纲法向距离:

$$y = U_\tau y / \nu_w.$$

而 u_τ 是摩擦速度,其含义为

$$u_\tau = \sqrt{\left| \nu \frac{\partial U}{\partial y} \right|_w},$$

此处下标 w 表示壁面.

零方程模型不能反映输运效应,计算量最小,一般适用于边界层型流动,对于来流的湍流流度

大,应该考虑历史效应(输运效应).物理量不均匀是发生输运过程的内在原因,当流体内部存在温度梯度,出现密度梯度时,输运过程一定会发生,这就决定了零方程计算精度差的主要原因^[3].计算实践表明,零方程模式对于流体受到的阻力和散热量的求解计算误差较大,当流动湍流较大、压力小、密度低时,计算的误差会逐步增加.这是因为零方程模型没有输运项,对湍流应力体现不出来.

2.1.2 标准两方程模型

两方程模型(标准 $k - \epsilon$ 模型)远比零方程模型复杂,却是最简单的“复杂湍流模型”.标准 $k - \epsilon$ 模型只需求解湍动能及其扩散率的两个相互独立的传输方程即可,由于其较高的鲁棒性、适应性和较好的经济性,在 Icepak 的流动设计中也应用最为广泛.

标准 $k - \epsilon$ 模型需要求解湍动能及其耗散率方程.湍动能输运方程是通过精确的方程推导得到,但耗散率方程是通过物理推理,在数学上类比相似各项的方程得出来的结论.通常都是设定模型的湍流流动是完全充分的,流体分子黏性所起的作用不计.在这样的假设前提下,两方程 $k - \epsilon$ 模型适用于湍流充分流动时的模拟.

k 方程:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M. \tag{4}$$

ϵ 方程:

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}. \tag{5}$$

式中: G_k 代表平均速度梯度产生的湍动能项; G_b 是用于浮力作用产生的湍动能项; Y_M 可压速湍流脉动膨胀使其对耗散项总的作用;湍流黏性系数 $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$.

在 ICEPAK 中,默认值常数 $C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09$,湍动能 k 与耗散率 ε 的湍流普朗特数分别为 $\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$.

2.2 $k-\varepsilon$ 模型中对流传热的模拟

2.2.1 对流传热的数学模型

在 ICEPAK 中,应用雷诺相似湍流输运的想法对热输运过程进行计算.得到的能量方程是:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i(\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(k + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_j (\tau_{ij})_{\text{eff}} \right] + S_h. \tag{6}$$

式中: E 是总能量; $(\tau_{ij})_{\text{eff}}$ 是偏应力张量.其中, $(\tau_{ij})_{\text{eff}}$ 表示黏性加热,耦合求解.

宏观上,各种输运现象的产生都是由于气体内部存在某种物理量的不均匀性,各种物理量的梯度表示了这种不均匀的程度.各种相应的物理量的输运方向都是倾向于消除物理量的不均匀性,直到这种不均匀性消除,即梯度为零,输运过程才停止,系统才由非平衡态到达平衡态.

湍流能量输运方程:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = \tau_{ij} S_{ij} - \rho \varepsilon + \varphi_k. \tag{7}$$

能量耗散输运方程:

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j \varepsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) = c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} S_{ij} - c_{\varepsilon 2} f_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \varphi_\varepsilon. \tag{8}$$

这里,右端项分别表示生成项 (production term)、耗散项 (dissipation term) 和壁面项 (wall term).

两方程模型和零方程模型比较,其最大特点就是有输运项,能够反映流体的压力、密度对传热的影响.这对高海拔地区电器的热设计极为重要.

2.2.2 稀薄气体中的热传导的微观解释

公式(9)是理想气体的热传导系数表达式,

它是把气体分子认为刚性的,导热率与数密度 n 无关,仅与 $T^{1/2}$ 有关,并且只适用于温度梯度较小的理想气体.

$$\kappa = \frac{1}{3} \overline{\rho v \lambda} \cdot \frac{C_{v,m}}{M_{\text{mol}}}. \tag{9}$$

实际上,只有低真空时的输运特性才与式(9)符合,通常把不满足输运规律的理想气体称为克努曾气体,即稀薄气体.稀薄气体中的热传导系数 κ' :

$$\kappa' = \frac{1}{6} \overline{nv} L \frac{C_{v,m}}{N_A} = \frac{1}{6} \overline{\rho v} L \frac{C_{v,m}}{M_m} = \frac{1}{6} \overline{\rho v \lambda} m - w \frac{C_{v,m}}{M_m}. \tag{10}$$

3 计算结果与分析

分别采用零方程模型、两方程模型,对海拔高度在海平面、3 000 m、6 000 m、10 000 m 4 种情况下计算温升.表 2 是系统模型中 2 个主要零件 (PCB 板和百叶窗) 的仿真结果.为了方便比较,特别选定了 PCB 板 X 最大端面的最高温度和百叶窗最高温度作为研究对象.从系统模型图上可以看到,PCB 板 X 最大端面和百叶窗是共面的,并有重叠部分.另外,空气的导热系数是 $0.0261 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,PCB 板的材质是 FR-4,它的导热系数是 $0.35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,因此,PCB 板的导热系数比空气大一个数量级,那么,这个共面重叠处应该是 2 个零件温度最高的地方,如图 2(a) 所示,并且它们的温度应该相等.用两方程模型计算,不论在哪一个海拔高度,都恰好满足了这样一个结果.从表 2 可以看出,使用零方程模型进行传热计算,两个零件共面重叠处的最高温度随海拔高度增加,它们的温度差值越来越大,而实际情况下共面重叠处温度应该是相等的.这就说明零方程模型缺少式(7)和式(9)的输运项,在高海拔地区气压低、空气稀薄,空气压力项 P 和空气密度项都不能起作用,空气压力和空气密度对传热影响很大,所以出现了计算温度不准确这种情况.同时也说明了高海拔地区进行热设计不能使用零方程模型.

表 2 典型零件温度计算结果

Tab.2 Temperature calculation results of typical parts								
零件名称	海平面		3 000 m		6 000 m		10 000 m	
	$T_{0\max}$	$T_{2\max}$	$T_{0\max}$	$T_{2\max}$	$T_{0\max}$	$T_{2\max}$	$T_{0\max}$	$T_{2\max}$
百叶窗	31.45	28.93	37.38	33.14	44.03	39.12	60.76	53.17
PCB 板	26.34	28.93	29.08	33.14	32.46	39.12	41.62	53.17

注: $T_{0\text{max}}, T_{2\text{max}}$ 分别为零方程模型、两方程模型的最高温度.

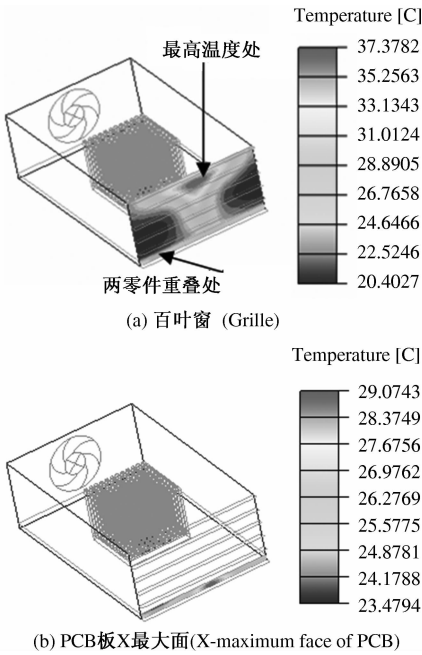


图2 海拔3 000 m 零方程温度云图
Fig.2 Temperature contour based on zero-equation model at 3 000 m

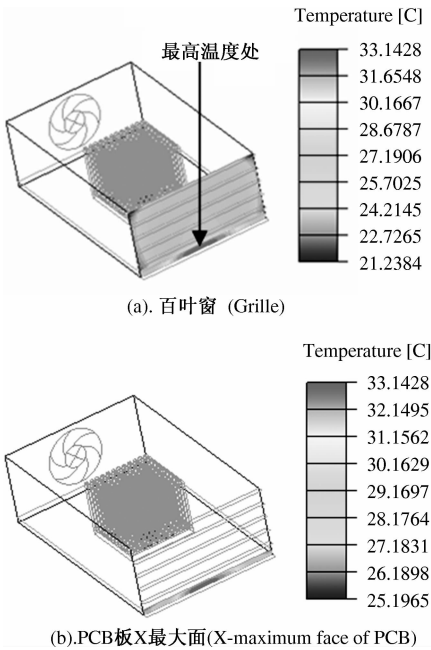


图3 海拔3 000 m 两方程温度云图
Fig.3 Temperature contour based on two-equation model at 3000 m

采用 Icepak 和 Fluent 软件,分别基于零方程模型和两方程模型^[4-5],对百叶窗和 PCB 板 X 最大面进行了仿真,得到了温度云图如图 2 和图 3 所示.从图中可以看出,虽然都是在海拔 3 000 m 下的温度计算结果,图 2 中百叶窗最高温度出现在上部分,显然这是错误的.因为 PCB 板的导热系数是 $0.35 \text{ W} \cdot \text{m} \cdot \text{K}^{-1}$,而空气的导热系数是

$0.0261 \text{ W} \cdot \text{m} \cdot \text{K}^{-1}$,它们的导热能力有 10 倍之差,百叶窗最高温度一定会出现在两个零件共面重叠处,也就是 PCB 板 X 项最大值处.

该仿真模型属于低压电器类,以模型组件 PCB 板为例,温升递增率为海拔每升高 100 m,温升是 0.17%,该数据在 0.1% ~ 0.5% °C 之间,所以仿真计算结果与国际电工委员标准相符合.这就验证了笔者得出的数据是符合实际的.

图 4 和图 5 分别是海拔 3 000 m 下零方程和两方程模型流场分布图.由于所建的系统模型是一个封闭的机箱,并且采用风扇强迫对流,机箱内的流体(空气)分布应该是均布的^[6-8].不会出现图 4 那种情况:机箱局部出现流体过密,另一部分出现流体过疏.

综上所述,温度和流场分布的仿真结果也证明了采用零方程用来计算传热的误差大,和真实的情况不符.

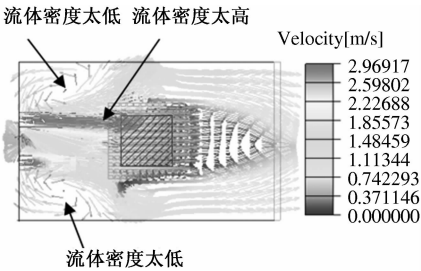


图4 3 000 m 零方程流场分布图
Fig.4 Flow field distribution of zero-equation model at 3 000 m

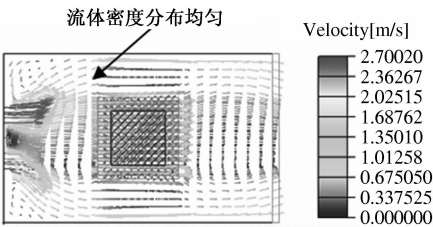


图5 3 000 m 两方程流场分布图
Fig.5 Flow field distribution of two-equation model at 3 000 m

4 结论

(1)通过对零方程数学模型和两方程数学模型的比较,得出零方程模型不能反映输运效应.对于高海拔地区空气压力小、密度低对输运效果影响显著,应该考虑历史效应(输运效应).

(2)使用 Icepak 和 Fluent 等仿真软件对高海拔地区的芯片、电机等电器进行了仿真分析,分析结果表明:高海拔地区的电子设备热设计,采用两

方程模型更加符合实际工况. 因为两方程模型和零方程模型比较,其最大特点就是两方程模型有输运项,输运项能够反映流体的压力、密度对传热的影响,这也是两种数学模型计算结果出现差异的理论依据. 高海拔地区空气流体的密度、压力变化都很大,所以,使用两方程模型计算高海拔地区电器的温升更准确. ICEPAK 软件所推荐的“大多数电子散热问题使用零方程模型是足够精确的”^[9-11],这个推荐意见只对海拔不高的地区有意义,而对高海拔地区来说,不论从数学模型上还是仿真结果上看,使用零方程模型显然是不适合的.

参考文献:

- [1] 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(1):14-16.
- [2] 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.
- [3] 张洪才,孙长青. ANSYS 14.0/FLOTRAN 理论解析与工程应用实例[M]. 北京:机械工业出版社,2013:24-34.
- [4] 谢龙汉,赵新宇,张炯明. ANSYS CFX 流体分析及仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2012:11-22.
- [5] HAMZA D, PAHLEVANINEZHAD M, JAIN P K. Implementation of a novel digital active EMI technique in a DSP-based DC-DC digital controller used in electric vehicle (EV)[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2013,28(7):3126-3137.
- [6] MATOLAK D W, KODI A, KAYA S. Wireless networks-on-chips: architecture, wireless channel, and devices[J]. IEEE Wireless Communications, 2012, 19(5):58-65.
- [7] FIROUZFAR E, ATTARAN M. A review of heat pipe heat exchanger activity in Asia[C]//Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology. Hong Kong, 2008,30:1307-6884.
- [8] PARK O, VELOO P S, LIU N, et al. Combustion characteristics of alternative gaseous fuels[J]. Proc Combust Inst, 2011, 33:887-894.
- [9] ORGAN J, FINKELSTEIN T. Thermodynamics and Gas Dynamics of the Stirling Cycle Machine[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010:25-28.
- [10] YIN Yong-gao, LI Shu-hong, ZHANG Xiao-song, et al. Feasibility and performance analysis of a desiccant solution regenerator using hot air[J]. Energy and Buildings,2011, 43(5):1097-1104.
- [11] LASKOWSKI R M, WAWRZYK K. Comparison of two simple mathematical models for feed water heaters[J]. Journal of Power Technologies, 2011, 91(1):14-22.

Heat Dissipation Analysis of Electronic Equipment in High Altitude Area

HUANG Yan-ping^{1,2}, CAO Guo-hua¹, WANG Shu-kun¹

(1. School of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. Department of Mechanical Engineering, Wuxi Institute of Arts & Technology, Wuxi 214206, China)

Abstract: Heat dissipation capacity of electronic equipment influences not only its stability, but the service life of the components. Especially in the high-altitude area with thin air and low air pressure, heat dissipation performance is more likely to deteriorate in closed chassis. In order to study heat dissipation problem of electronic equipment at the high altitude, based on the turbulence theory, cooling flow mathematical model of chassis was established. By means of ICEPAK, an electronic thermal design specialized software, the heat dissipation of different altitudes were simulated. The theory that two-equation turbulence model for cooling calculation in thin air area should be more accurate, was put forward and verified through the simulation. This will provide a reference for the thermal design of electronic equipment in high altitude areas.

Key words: electronic equipment; high altitude cooling; ICEPAK; turbulence theory; two equation model