高可靠性航空电子设备热分析中的有限体积法

付桂翠 王香芬 姜同敏

(北京航空航天大学 工程系统工程系, 北京 100083)

摘 要: 阐述了热对系统可靠性的影响,对比了数值法求解温度场分布的优缺点. 针对航空电子设备热分析中同时要求满足高的分析精度和快的计算速度的问题,提出用有限体积法求解温度场分布的计算方法. 根据典型航空电子设备的结构特点,建立了温度场的数学模型,给出了边界条件. 在此基础上,用有限体积法对待求解方程离散化,给出了离散化过程中网格划分及边界的处理方法. 结合实例进行了温度场求解,计算结果与热测量结果进行了对比,得到了较高的分析精度,验证了方法的有效性. 最后对计算误差进行了分析,并提出了进一步热设计的合理化建议.

关 键 词: 可靠性; 航空电子设备; 热分析; 有限体积法; 温度场

中图分类号: V 214.1

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)06-0716-05

Finite volume method in thermal analysis of avionics

Fu Guicui Wang Xiangfen Jiang Tongmin

(Dept. of System Engineering of Engineering Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The influence of heat to the system reliability was introduced. The merits and drawback of numerical methods in solving temperature distribution were compared. In order to solve the problem of avionics of high reliability which requires highly precise result and rapidly computational velocity in thermal analysis, a computed approach of the finite volume method (FVM) to solve the temperature distribution was devoloped. The mathematical model of temperature distribution was built based on typical avionics and its boundary condition was given. Then the control equation was discretized by means of the FVM. The mesh division, the process of discretization and the disposal of boundary were included. The temperature distribution was calculated with an example. The comparison between the result of calculation and the result of measurement demonstrates a high precision of thermal analysis. The validity of this method was verified. The reason of calculated error was indicated and a reasonable proposal about further thermal design based on the result was offered in the end.

Key words: reliability; avionics; thermal analysis; finite volume method; temperature distribution

热是影响航空电子设备可靠性的关键因素之一. 为设计出高可靠性的产品,必须重视系统的热设计,并在热设计之后进行热分析,发现热设计中存在的缺陷并加以改进,这对产品可靠性的提高具有重要意义. 对产品进行热分析首先要建立系统的数学模型,求解联立的非线性方程组,方可得到系统热分布的解. 目前,控制方程的求解主要采用数值方法进行,比较有效的方法有有限元法(FEM)、有限差分法(FDM)和有限体积法(FVM). 有限元法与有限差分法的理论非常成熟,但工程实际中对精度和速度要求较高的高可靠性航空电子设备温度场求解时,有限差分法不能方便地对复杂几何区域求解,有限元法求解时间过长. 而有限体积法融合了两者的理论与算法

收稿日期: 2005-06-29

作者简介: 付桂翠(1968-),女,辽宁抚顺人,副教授, fuguicui@sina.com.cn.

的优点[1-2],它采用有限差分法的离散技术,同时继承了有限元法网格剖分的灵活性,能在减少计算时间的基础上,得出精确的计算结果[3],因此非常适合航空电子设备的温度场求解.

1 典型航空电子设备温度场数学模型

航空电子设备目前普遍采用 ATR 标准机箱,其典型结构如图 1 所示. 散热主要采用印制电路板(PCB)冷板热传导与机箱壁强迫风冷相结合的方式,器件耗散的热大部分通过 PCB 板传导到机箱两侧的边缘导轨上,再经边缘导轨传至机箱的散热壁上,壁上的热量通过强迫冷却空气带走,内部结构如图 2 所示.

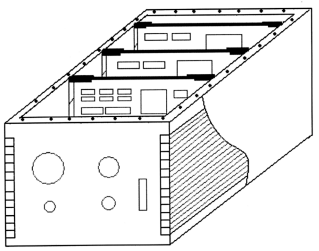

图 1　典型航空电子设备结构示意图

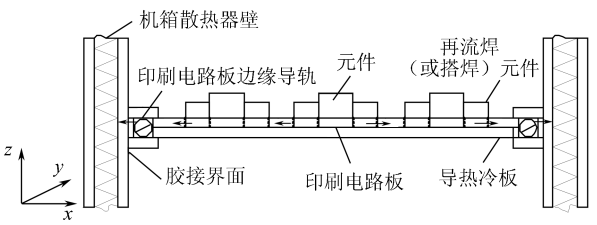

图 2　机箱内部传热示意图

1.1　数学模型

箱体由前框,左、右侧板,后框通过钎焊方式组焊成一体,由于是密封机箱,元器件不处在对流环境中,两板之间辐射较小,故机箱内部对流和辐射的影响可以忽略不计,热传递方式以热传导为主,可作为三维导热问题来处理,其控制方程为[4]

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) + Q_v \tag{1}$$

式中,ρ 为介质平均密度,kg/m^3;T 为温度,℃;$\lambda_x,\lambda_y,\lambda_z$ 分别为 x,y,z 方向上材料导热系数,W/(m · K);c_p 为定压比热容,J/(kg · K);Q_v 为单位体积内热源产生的热,W.

箱壁采用风冷冷板冷却,冷却空气来自飞机的环控系统,以强迫对流为主. 忽略空气密度对流动的影响,粘性为常数,则其三维控制方程可写为[4]连续性方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{2}$$

式中,u,v,w 为气体 x,y,z 方向流速,m/s.

能量守恒方程:

$$u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} + w\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{\rho c_p}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + S \tag{3}$$

式中,S 为能量源项.

动量守恒方程:

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{dx} + \mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \tag{4a}$$

$$u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{dy} + \mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \tag{4b}$$

$$u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{dz} + \mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) \tag{4c}$$

式中,μ 为流体粘度,P$_a$ · s.

1.2　边界条件

1) PCB 冷板与侧壁交界处的边界条件.

$$-\left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}\cdot n_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}\cdot n_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}\cdot n_z\right) = \alpha(T - T_f) \tag{5}$$

式中,n_x,n_y,n_z 是垂直于边界向外的方向余弦;T_f 为机箱侧壁冷板边界温度,K;α 为冷板表面换热系数,W/(m^2 · K).

2) 侧壁边界. 假定速度为无滑移条件(即流体速度等于壁面的速度):

$$u = v = w = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0$$

3) 入口边界. 速度和温度满足:$w = w_w$(w_w 为入口风速),$u = v = 0$,$T = T_w$(T_w 为环境温度)

4) 出口边界. 出口截面没有回流,采用局部单向化假定,以边界控制元 P 为例,E 为 P 的相邻节点,取 $a_T = 0$ 来实现. 如图 3 所示.

2　有限体积法求解温度场

采用有限体积法对模型求解. 将计算区域划分为离散的控制体(control volume),在每个控制体建立上述控制方程的积分方程,对积分方程离散化,进行迭代求解,得到温度场的分布. 工程上

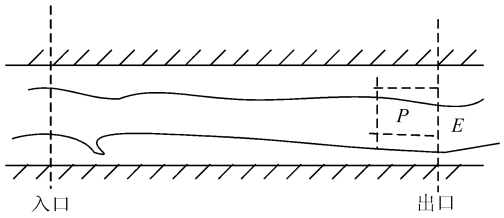

图 3 出口边界确定示意图

在获取箱体内边界条件基础上,可通过对箱体内热传导方程先进行粗网格划分以获取内部 PCB 边界条件,再对每块 PCB 进行细网格计算,这样可以减少计算时间.

式(1)~式(4)可统一写为

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \nabla \cdot (W\boldsymbol{u}) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla W) + S_{\mathrm{W}} \quad (6)$$

式中,W 为通用变量,可以是 $\rho,\rho u,\rho v,\rho w,\rho T$;$\Gamma$,$S_{\mathrm{W}}$ 为各自对应的系数与源项,其积分形式为

$$\int_V \left(\int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial W}{\partial t} \mathrm{d}t \right) \mathrm{d}V + \int_t^{t+\Delta t} \int_V (\nabla \cdot (W\boldsymbol{u})) \mathrm{d}V \mathrm{d}t = \int_t^{t+\Delta t} \int_V (\nabla \cdot (\Gamma \nabla W)) \mathrm{d}V \mathrm{d}t + \int_t^{t+\Delta t} \int_V S_{\mathrm{W}} \mathrm{d}V \mathrm{d}t \quad (7)$$

2.1 网格的划分

采用中心节点法,即每一个节点包围在一个控制体内,划分子区域的曲线簇就是边界面,以六面体作为控制元,如图 4 所示,E,W,S,N,T,B 为控制体的 6 个相邻节点. $\delta_{xWP},\delta_{xPE},\delta_{zBP},\delta_{zPT},\delta_{ySP},\delta_{yPN}$ 为间距.

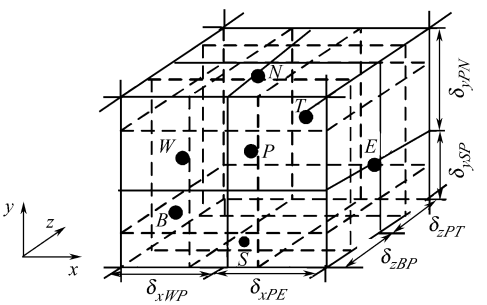

图 4 三维网格

2.2 方程的离散

2.2.1 时间项的离散

假定节点温度代表整个控制体的温度,则时间项可写为

$$\int_V \int_t^{t+\Delta t} \left(\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \mathrm{d}t \right) \mathrm{d}V = \rho c_p (T_P^{n+1} - T_P^n) \Delta V \quad (8)$$

式中,T^n 为时间 t 的温度;T^{n+1} 为时间 $t+\Delta t$ 的温度;ΔV 为控制体的体积.

2.2.2 箱体内方程的离散

箱体内建立的是热传导方程,没有对流项,令式(7)中第 2 项为零,通量 W 取为 T,则方程离散为

$$\rho c_p (T_P^{n+1} - T_P^n) \Delta V = \int_t^{t+\Delta t} \left\{ \left[\left(\lambda A \frac{\partial T}{\partial x} \right)_e - \left(\lambda A \frac{\partial T}{\partial x} \right)_w \right] + \left[\left(\lambda A \frac{\partial T}{\partial y} \right)_n - \left(\lambda A \frac{\partial T}{\partial y} \right)_s \right] + \left[\left(\lambda A \frac{\partial T}{\partial z} \right)_t - \left(\lambda A \frac{\partial T}{\partial z} \right)_b \right] \right\} \mathrm{d}t + \int_t^{t+\Delta t} (\overline{Q} \Delta V) \quad (9)$$

式中,A 为各边界面面积;$\overline{Q}$ 为 Q 在控制体上平均值. 下标 e,w,n,s,t,b 分别为表面控制体的 6 个单元面.

各项空间积分采用中心差分格式,时间离散采用全隐式格式[5],$\overline{Q}$ 作线性近似:

$$\overline{Q} = Q_P + S_P T_P \quad (10)$$

式中,Q_P 是常数;S_P 是随 t 和 T_P 变化的项.

则可得式(9)的离散化方程为

$$a_P T_P^{n+1} = a_E T_E^{n+1} + a_W T_W^{n+1} + a_N T_N^{n+1} + a_S T_S^{n+1} + a_T T_T^{n+1} + a_B T_B^{n+1} + b \quad (11)$$

式中,$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_P^0 - S_P \Delta V$;$a_E = \dfrac{\lambda_e A_e}{\delta_{xPE}}$;$a_W = \dfrac{\lambda_w A_w}{\delta_{xWP}}$;$a_N = \dfrac{\lambda_n A_n}{\delta_{yPN}}$;$a_S = \dfrac{\lambda_s A_s}{\delta_{ySP}}$;$a_T = \dfrac{\lambda_t A_t}{\delta_{zPT}}$;$a_B = \dfrac{\lambda_b A_b}{\delta_{zBP}}$;$a_P^0 = \dfrac{\delta_{ySP} \Delta V}{\Delta t}$;$b = Q_P \Delta V + a_P^0 T_P^n$;$A_e, A_w, A_n, A_s, A_t, A_b$ 为 6 边界面面积.

2.2.3 箱壁方程的离散

箱壁模型包括连续方程、动量方程及能量方程.

为保证方程稳定迭代,采用迎风格式[5]对能量方程中的对流项进行离散,扩散项仍用中心差分格式离散,时间离散采用全隐格式,可得其离散方程为

$$\widetilde{a}_P T_P^{n+1} = \widetilde{a}_E T_E^{n+1} + \widetilde{a}_W T_W^{n+1} + \widetilde{a}_N T_N^{n+1} + \widetilde{a}_S T_S^{n+1} + \widetilde{a}_T T_T^{n+1} + \widetilde{a}_B T_B^{n+1} + \widetilde{b} \quad (12)$$

其中

$$\widetilde{a}_P = \widetilde{a}_E + \widetilde{a}_w + \widetilde{a}_N + \widetilde{a}_S + \widetilde{a}_T + \widetilde{a}_B$$

$$\widetilde{b} = S \Delta V$$

$$\widetilde{a}_E = \frac{\lambda_e A_e}{\delta_{yPE}} + \max(-(\rho c_p v)_e A_e, 0)$$

$$\widetilde{a}_w = \frac{\lambda_w A_w}{\delta_{yWP}} + \max((\rho c_p v)_w A_w, 0)$$

$$\tilde{a}_S = \frac{\lambda_s A_{ns}}{\delta_{yPS}} + \max((\rho c_p v)_s A_s, 0)$$

$$\tilde{a}_N = \frac{\lambda_n A_n}{\delta_{yPN}} + \max(-(\rho c_p v)_n A_n, 0)$$

$$\tilde{a}_B = \frac{\lambda_b A_b}{\delta_{yBP}} + \max((\rho c_p v)_b A_b, 0)$$

$$\tilde{a}_T = \frac{\lambda_t A_t}{\delta_{yPT}} + \max(-(\rho c_p v)_t A_t, 0)$$

动量方程中含有压强项,必须修正压强源项使其满足连续性方程,采用基于同位网格的 SIMPLE 算法,在同位网格上离散的动量方程为

$$\left.\begin{aligned} a_P u_P &= \sum a_{nb} u_{nb} + (p_w - p_e) A_p + b \\ a_P v_P &= \sum a_{nb} v_{nb} + (p_s - p_n) A_n + b \\ a_P w_P &= \sum a_{nb} w_{nb} + (p_b - p_t) A_t + b \end{aligned}\right\} \quad (13)$$

采用动量插值,可得出压强修正方程为

$$\hat{a}_P p'_P = \hat{a}_E p'_E + \hat{a}_W p'_W + \hat{a}_N p'_N + \hat{a}_S p'_S + \hat{a}_T p'_T + \hat{a}_B p'_B + \hat{b}_P \quad (14)$$

式中, $\hat{a}_E = (\rho A d)_e$, $\hat{a}_N = (\rho A d)_n$, $\hat{a}_T = (\rho A d)_t$, $d_e = \frac{A_e}{\hat{a}_e}$, $d_n = \frac{A_n}{\hat{a}_n}$, $d_t = \frac{A_t}{\hat{a}_t}$, $\hat{b}_p = (u^* A_e - u^* A_w) + (v^* A_n - v^* A_s) + (w^* A_t - w^* A_b)$, u^*, v^*, w^* 由式(13)求出,详细求解见文献[6].

下标 nb 表示控制体表面序号,则第 i 个控制体离散化方程表示为

$$a_i \varphi_i^{n+1} = \sum_{nb} b_{inb} \varphi_{nb}^{n+1} + c \quad (15)$$

2.3　边界的处理

采用附加源项的方法对方程进行修正,即在离散方程中,将相应的系数置为零,通过修改源项,引入边界一侧通量的精确值或线性近似值. 对不同的边界条件,附加的源项各不相同,限于篇幅,仅以机箱内部边界条件下方程为例加以说明,假定 B 为控制体边界,控制体体积为 ΔV_B, λ_B 为边界节点,则:

$$Q_p + \frac{A}{\Delta V_B} \frac{1}{1/\alpha + \delta_{xPB}/\lambda_B} \Rightarrow Q_P$$

$$S_p + \frac{A}{\Delta V_B} \frac{T_f}{1/\alpha + \delta_{xPB}/\lambda_B} \Rightarrow S_P$$

2.4　离散方程的求解

由箱壁速度场求出温度场,得到箱体冷板的壁温,进而求出机箱内部的温度场分布. 采用隐式高斯-赛德尔(Gauss-Seidel)迭代法及多重网格法[7]获得方程近似解,为克服迭代过程的发散,引入松弛因子. 2 层次间的迭代关系为

$$\varphi_i^{n+1} = \varphi_i^n + \alpha\left(\frac{\sum_{nb} b_{nb}\varphi_{nb}^{n+1} + c_i}{a_i} - \varphi\right) \quad (16)$$

式中,φ_i^n 表示上一层次计算得到的解;$\alpha(0<\alpha<1)$ 为松弛因子,设共有 nc 个控制体,收敛判据为 $R = \sum_{nc} R_i = \sum_{nc}(a_i\varphi_i - \sum_{inb} b_{inb}\varphi_{inb} - c_i) \leqslant \varepsilon$. ε 一般取 $10^{-3} \sim 10^{-8}$.

3　实例应用

对某采用标准机箱冷板冷却的航空某任务计算机进行稳态热分析. 该系统包括 3 块发热印制电路板:MBI 板、CPU 板和电源板,功耗分别为 12 W,13 W,6 W,电路板的尺寸为 243.3 mm×150 mm×2 mm. 机箱尺寸为 330 mm×124 mm×187 mm, 系统整机功耗为 31 W,冷板肋片尺寸为 $L\times B\times H$ = 290 mm×170 mm×6.5 mm,材料选为防绣铝,热传导率为 λ = 164 W/(m·K),边缘导轨热阻为0.051 (m·K)/W;接触长度为 145 mm. 冷却剂为空气,环境温度为 70℃,冷却风量为 14 kg/h,冷却空气温度为 29℃.

利用基于有限体积法的热分析软件对其进行热分析,该软件采用了有限体积法求解器,对上述离散的控制方程进行求解,系统中的 CPU 板的温度场分布如图 5 所示.

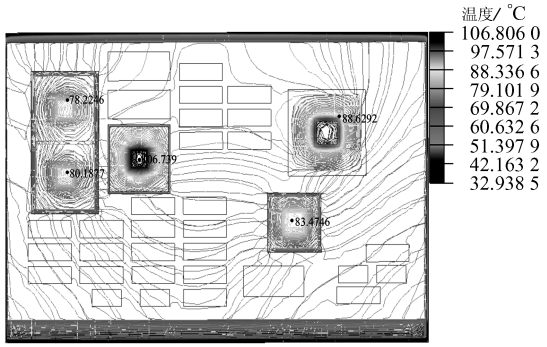

图 5　CPU 板温度场分布

为使算法收敛,首先在网格划分时,观测相邻网格面偏差(face alignment)、形状比(aspect ratio)以及网格体积(volume)是否满足要求;其次,设定各方程松施因子,本例设定压力方程为 0.3,动量方程为 0.7,保证了算法收敛.

为了验证有限体积法求解温度场的有效性,在热分析之后选取了 10 个点进行了热测量. 热分析与热测量的结果对比见表 1.

由表 1 可知,大部分点的误差在 10% 以内,平均误差为 6.15%,对分析精度要求较高的航空电子设备,能满足要求. 引起热分析误差较大的原因主要有:对电子设备热模型的简化,例如机箱内

部没有考虑热辐射和对流换热对其散热的影响,实际上这2种因素是存在的;由于建模时各器件热功耗输入有误差,对于PCB板,给的是整板功耗,热分析时将功耗进行了分配;另外边界条件的选取不够准确.

由热分析结果可知,在高温70℃时,节点7(CPU板上器件)的温度高达106.74℃,故在环境温度太高的情况下该冷板散热结构不能达到良好的散热效果.

表1 热分析与热测量结果比较

节点	热分析值/℃	热测量值/℃	误差/%
1	61.21	67.56	9.40
2	68.20	74.36	8.28
3	58.60	63.56	7.80
4	106.74	112.78	5.35
5	83.47	80.38	3.84
6	78.22	81.69	4.25
7	80.19	82.63	2.95
8	82.59	78.13	5.71
9	78.30	79.25	1.20
10	88.63	78.63	12.72

由冷却剂温升的计算公式[8]:

$$t_2 = \frac{Q}{q_m c_p} + t_1 \tag{17}$$

式中,t_2 为冷却剂出口温度,℃;t_1 为入口温度,℃;q_m 为冷却剂质量流量,kg·s^{-1}.

可知,在散热量一定的情况下,可通过增加冷却空气流量和降低入口空气温度的方法,改善散热效果.

4 结 论

本文建立了典型航空电子设备温度场的数学模型,采用有限体积法进行了方程离散,通过实例验证了方法的有效性.

有限体积法离散格式灵活,本文仅用结构化网格对方程进行了推导,非结构化网格在边界处理上将更加理想,其应用也在飞速发展.有限体积法在处理复杂结构的航空电子设备温度场分布中将显示出其特有的优势.

参考文献(References)

[1] Qing Fang, Tsuchiya T. Finite difference, finite element and finite volume methods applied to two-point boundary value problems[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2002,139:9-19

[2] Feistauer M. Felcman J, Lukacova-Medvidova M. On the convergence of a combined finite volume-finite element method for nonlinear convection-diffusion problems[J]. Numerical Methods for PDEs, 1997,13(2):163-190

[3] Cordero E, De Biase L, Pennati V. A new finite volume method for the solution of convection-diffusion equations:analysis for stability and convergence[J]. Comm Numer Methods Engng, 1997, 13(12):923-940

[4] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社, 2002:134-143
Yang Shiming, Tao Wenshuan. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002:134-143(in Chinese)

[5] 李万平. 计算液体力学[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2004:101-149
Li Wanpin, Computational fluid dynamics [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2004:101-149(in Chinese)

[6] Nie J H, Li Z Y, Wang Q W, et al. A method for viscous incompressible flows with a simplified collocated grid system[C]// Chen P, Chen K F. Proceeding of the Energy Engineering in 21th Century, New York: Begell House, 2000:177-183

[7] Douglas Craig C. Multigrid methods in science and engineering [J]. IEEE Computational Science & Engineering,1996,3(4): 55-68

[8] 余建祖. 电子设备热设计及分析技术[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2000: 46-55
Yu Jianzu. Technique of thermal design and analysis on electronic equipments[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2000:46-55(in Chinese)

(责任编辑:张 嵘)