

# 地物目标红外热像理论建模中的 蒙特卡罗法与并行计算\*

谈和平 崔国民<sup>1</sup> 阮立明 夏新林 余其锋

(哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 黑龙江省, 哈尔滨, 150001)

TN211

**摘要** 蒙特卡罗法结合区域分解算法, 求地物目标温度场和红外辐射出射度场. 将三维复杂几何形体分解为若干个规则的子区域, 不同的子域选用不同的坐标系, 用控制容积法分别处理; 整体结构用热网络法, 用蒙特卡罗法计算辐射传递系数, 可考虑界面的复杂辐射特性. 引入辐射传递系数, 分离了计算的难点, 并可对波段并行处理. 在空间域(计算区域)上将目标分解为若干个子域, 也可使用多个处理器并行计算.

**关键词** 地物目标, 红外热像, 蒙特卡罗法, 区域分解算法, 并行计算.

## 引言

建模

地物目标红外热像理论建模对目标探测、精确跟踪制导, 红外系统的研制、仿真设计, 红外隐身设计和评估等领域的应用具有重要意义<sup>[1]</sup>. 被探测到的红外热成像是经大气传输后的目标红外辐射出射度场. 地物目标任一面元的光谱辐射出射度由两部分组成: (1) 本身辐射; (2) 该面元的反射辐射. 因此, 红外热像理论建模必然涉及目标的温度场计算. 由于地物目标几何形状复杂, 内部有热源, 界面外侧为对流和辐射耦合换热, 所以这是一个非线性辐射、对流边界条件下存在内热源的三维复杂形体瞬态传导问题.

近年来, 蒙特卡罗法已被广泛用于计算物理的各个领域<sup>[2,3,4]</sup>. 文献[5]在解辐射传递方程时, 对各个波段进行了并行处理. 鉴于蒙特卡罗法对复杂形体和复杂问题的适应性, 区域分解算法(核心为: 缩小规模、并行计算)的优越性<sup>[6]</sup>, 本文将“区域分解算法”和“蒙特卡罗法”相结合. (1) 在时间域(计算步骤)上把问题分解为若干个子问题, 引入辐射传递系数(RTC), 将计算的难点分离; (2) 在空间域(计算区域)上将复杂形体分解为若干个子域, 缩小计算规模; (3) 主要的计算是在时间域的各计算步骤上(波段并行)、空间域的各子域内(分区并行)独立进行, 并可同时实现时间域和空间域的并行计算.

## 1 地物目标三维瞬态温度场计算

### 1.1 控制方程与辐射、对流换热边界离散方程

将计算区域  $\Omega$  分解为若干(NM)个子区域  $\omega_i$ :  $\Omega = \bigcup_{i=1}^{NM} \omega_i$ , 子域的形状尽可能规则. 通常, 地物目标主要由矩形、圆柱、球台等几何体组成, 因此各子域的温度场计算, 可选用三维直

\* 国家杰出青年科学基金(编号 59725617)、国家自然科学基金(编号 59606006)资助项目  
稿件收到日期 1997-11-12, 修改稿收到日期 1998-04-20

角、圆柱、球坐标系下的控制容积法分别处理. 整体结构(子域与子域间)用热网络法. 子域外表面的辐射换热,按太阳、红外辐射两种投射源,用波段模型计算. 三维直角 $(x, y, z)$ 、圆柱 $(r, \theta, z)$ 、球 $(r, \theta, \varphi)$ 坐标系下含内热源的瞬态热传导方程分别为

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial T}{\partial z}) + \frac{\Psi}{V} \quad (1)$$

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (kr \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} (k \frac{\partial T}{\partial \theta}) + \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial T}{\partial z}) + \frac{\Psi}{V} \quad (2)$$

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (kr^2 \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{1}{r^2 \sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \theta} (k \sin \varphi \frac{\partial T}{\partial \theta}) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} (k \frac{\partial T}{\partial \varphi}) + \frac{\Psi}{V} \quad (3)$$

式中:  $C$  为单位体积热容( $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$ );  $k$  为导热系数;  $\Psi/V$  为单位体积的内热源.

地物目标是由多个具有不同界面特性(如:漫发射-漫反射;漫发射-镜反射;各向异性发射-各向异性反射)的表面组成的复杂系统. 目标表面的辐射传递包括:(1)面元与面元间的辐射换热;(2)太阳对目标各面元的直射与散射;(3)天地背景与目标各面元的辐射换热. 令:  $F_i$  为面元  $i$  的几何面积;  $L_{i,j}$  为面元  $i$  与单元  $j$  间的有效导热距离;  $F_{\text{sun},i}$  为考虑遮挡后  $i$  在太阳入射方向上的投射面积;  $C_{\text{sun}}$  为太阳入射方向上的辐照度( $\text{Wm}^{-2}$ );  $P_{\text{irr}}, P_{\text{scn}}$  分别为辐照度中的直射和散射份额;  $\alpha$  为吸收率;  $\varepsilon$  为发射率;  $h_i$  为对流换热系数;  $T_f$  为  $i$  附近的流体温度;  $N_{\text{con}}$  为目标表面的总面元数;  $N_{\text{sky}}, N_{\text{gro}}$  分别为天、地背景的单元数. 将  $\alpha, \varepsilon$  随光谱的变化分为  $M_{\text{sun}}, M_{\text{in}}$  个波段, 则面元  $i$  的离散方程为

$$\begin{aligned} & \sum_j k_{i,j} \cdot F_i (T_i - T_j) / L_{i,j} + C_{\text{sun}} \sum_{m,p=1}^{M_{\text{sun}}} \alpha_i^{m,p} A_{T_{\text{sun}}}^{m,p} (F_{\text{sun},i} \cdot P_{\text{irr}} + F_i \cdot P_{\text{scn}}) \\ & + C_{\text{sun}} \sum_{m,p=1}^{M_{\text{sun}}} A_{T_{\text{sun}}}^{m,p} \sum_{j=1}^{N_{\text{con}}} RD_{i,j}^{m,p} (1 - \alpha_j^{m,p}) (F_{\text{sun},j} \cdot P_{\text{irr}} + F_j \cdot P_{\text{scn}}) \\ & = h_i \cdot F_i (T_i - T_f) + \sigma \cdot \sum_{m,p=1}^{M_{\text{in}}} \varepsilon_i^{m,p} F_i \left[ \sum_{j_{\text{sky}}=1}^{N_{\text{sky}}} RD_{i,j_{\text{sky}}}^{m,p} (A_{T_i}^{m,p} T_i^4 - A_{T_{j_{\text{sky}}}}^{m,p} T_{j_{\text{sky}}}^4) \right. \\ & \left. + \sum_{j_{\text{gro}}=1}^{N_{\text{gro}}} RD_{i,j_{\text{gro}}}^{m,p} (A_{T_i}^{m,p} T_i^4 - A_{T_{j_{\text{gro}}}}^{m,p} T_{j_{\text{gro}}}^4) + \sum_{j=1}^{N_{\text{con}}} RD_{i,j}^{m,p} (A_{T_i}^{m,p} T_i^4 - A_{T_j}^{m,p} T_j^4) \right] \quad (4) \end{aligned}$$

式(4)中左边第1项为面元  $i$  与相邻单元  $j$  的热传导; 第2项为太阳一次辐照(包括直射和散射)对面元  $i$  的贡献; 第3项为太阳辐照在目标其它各面元  $j$  上, 经一次或多次反射后最终对面元  $i$  的贡献. 右边第1项为面元  $i$  与相邻流体的对流换热; 第2项括号内分别为面元  $i$  与天空背景各单元  $j_{\text{sky}}$ 、地面背景各单元  $j_{\text{gro}}$ 、目标其它各面元  $j$  的红外辐射换热.

## 1.2 辐射传递系数

式(4)中,  $RD_{i,j}$  为面元  $i$  对面元  $j$  的辐射传递系数, 该系数的计算用蒙特卡罗法. 其含义为: 面元  $i$  的本身辐射经一次投射, 及经系统中其它各面元一次或多次反射后, 最终被面元  $j$  吸收的份额. 它已包含了面元  $j$  的面积和表面吸收率. 以球面红外辐射传递系数为例, 建立两个坐标系: (1)系统坐标系; (2)各面元的当地坐标系(发射面称发射系, 接收面称接收系).

### 1.2.1 随机发射点概率模型及发射坐标系

球面上随机发射点在球坐标系下的天顶角  $\theta_0$  和周向角  $\varphi_0$  分别为

$$\theta_0 = \cos^{-1}[Ra_{\theta_0}(\cos\theta_{\min} - \cos\theta_{\max}) + \cos\theta_{\max}], \quad \varphi_0 = Ra_{\varphi_0}(\varphi_{\max} - \varphi_{\min}) + \varphi_{\min} \quad (5)$$

式(5)中:  $[\theta_{\max}, \theta_{\min}]$ ,  $[\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$  为该球面元天顶角和周向角的取值范围,  $Ra_{\theta_0}$ ,  $Ra_{\varphi_0}$  为随机数, 以发射点为坐标原点, 过该点的球切面的法线  $z$  轴, 建立当地坐标系.

### 1.2.2 发射方向的概率模型

若表面发射为各向异性, 发射率是天顶角  $\theta$  的函数  $f(\theta)$ , 沿圆周角仍是均匀的, 则随机数  $Ra_{\theta}$ ,  $Ra_{\varphi}$  与天顶角和周向角的关系分别为

$$Ra_{\theta} = \int_0^{\theta} f(\theta) \sin\theta \cos\theta d\theta / \int_0^{\pi/2} f(\theta) \sin\theta \cos\theta d\theta, \quad Ra_{\varphi} = \varphi / 2\pi. \quad (6)$$

### 1.2.3 射线与某面交点的确定

当发射点距离发射线与某面的交点(如存在)间的长度  $S$  已知时, 则交点的发射系坐标  $(X, Y, Z)$  可由下式求出

$$(X, Y, Z)^T = S(\sin\theta \cos\varphi, \sin\theta \sin\varphi, \cos\theta)^T + (X_0, Y_0, 0)^T \quad (7)$$

式(7)中  $(X_0, Y_0, 0)$  为发射点的发射系坐标, 系统坐标  $(x, y, z)$  与发射系坐标  $(X, Y, Z)$  的转换关系为

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} tx(1) & ty(1) & tz(1) \\ tx(2) & ty(2) & tz(2) \\ tx(3) & ty(3) & tz(3) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

式(8)中:  $[tx(1), tx(2), tx(3)]$ ,  $[ty(1), ty(2), ty(3)]$ ,  $[tz(1), tz(2), tz(3)]$  分别为发射系  $X, Y$  及  $Z$  轴在系统坐标系中的方向余弦;  $(x_0, y_0, z_0)$  为发射系原点的系统坐标. 交点  $(x, y, z)$  应满足接收面方程(如接收面为球面则:  $x^2 + y^2 + z^2 = R^2$ ). 将各量代入, 则  $S$  可求, 进而可求出交点的系统坐标  $(x, y, z)$ .

### 1.2.4 存在交点与吸收的判断

接收面为球面时, 该交点所处球面位置由其天顶角  $\theta'$  和周向角  $\varphi'$  判断:

$$\theta' = \cos^{-1}(z/R), \quad \varphi' = \cos^{-1}(x/\sqrt{x^2 + y^2}); \quad (9)$$

如果  $(\theta', \varphi')$  在所给的范围内, 则该射线与球面存在交点. 若射线与某面相交, 则进一步判断是否被该面吸收. 判据为  $Ra_{\alpha} \leq \alpha$  ( $\alpha$  为接收面的吸收率, 投射源为太阳时,  $\alpha = a$ ; 红外辐射时,  $\alpha = \epsilon$ ). 该式成立能束被吸收, 停止跟踪; 否则被反射, 继续跟踪.

### 1.2.5 辐射传递系数具有相对性

由能量守恒定律可推出:

$$\epsilon_i \cdot F_i \cdot RD_{i,j} = \epsilon_j \cdot F_j \cdot RD_{j,i} \quad (10)$$

## 1.3 界面辐射换热的线性化及控制方程的离散化

面元  $i$  与其它面元、天地背景间的辐射换热量  $Q_{i,K}^d$  可表示为(下标  $K = j, J_{sky}, J_{gro}$ )

$$Q_{i,K}^d = \sum_{m\beta=1}^{M_{\text{inf}}} \sigma \cdot \left[ \sum_{K=1}^{NK} RD_{i,K}^{m\beta} \cdot \epsilon_K^{m\beta} \cdot F_i \cdot (A_{T_K}^{m\beta} \cdot T_K^4 - A_{T_i}^{m\beta} \cdot T_i^4) \right] \\ (NK = N_{\text{con}}, N_{\text{sky}}, N_{\text{gro}}) \quad (11)$$

式(4)和式(11)中  $A_{T_m}^{m\beta}$  为单元温度  $T_m$  下,  $m\beta$  波段范围内黑体辐射能的份额

$$A_{T_m}^{m\beta} = \int_{\lambda_{m\beta}} I_b(T_m) d\lambda / \left[ \int_0^{\infty} I_b(T_m) d\lambda \right] \quad (12)$$

将式(11)线性化,令上角标  $n, n+1$  分别为数值计算中前后两次迭代值,则

$$Q_{i,K}^d = \sum_{m\beta=1}^{M_{\text{inf}}} \sigma \cdot \left\{ \sum_{K=1}^{NK} F_K \cdot \epsilon_K^{m\beta} \cdot RD_{i,K}^{m\beta} \cdot [A_{T_K}^{m\beta}(T_K^n)^4 + 3A_{T_K}^{m\beta}(T_K^n)^3] \right\} \\ - 4 \sum_{m\beta=1}^{M_{\text{inf}}} \sigma \cdot \left\{ \sum_{K=1}^{NK} F_K \cdot \epsilon_K^{m\beta} \cdot RD_{i,K}^{m\beta} \cdot A_{T_i}^{m\beta}(T_i^n)^3 \right\} \cdot T_i^{n+1} \quad (13)$$

将控制方程离散,则任一单元(体元或面元) $i$  的能量平衡方程为

$$C_i dT_i/dt = \sum_j G_{ij}^d(T_j - T_i) + \sum_f G_{if}^c(T_f - T_i) + Q_{i,K}^d + Q_{\text{sun},i}^{\text{sr}} + Q_{\text{sun},i}^{\text{ef}} + \Psi_i/V_i, \quad (14)$$

式(14)中; $G_{ij}^d$  为单元  $i$  与  $j$  间的热传导系数; $G_{if}^c$  为面元  $i$  与相邻流体的对流传导系数; $Q_{\text{sun},i}^{\text{sr}}$  为太阳对目标表面面元的一次辐射; $Q_{\text{sun},i}^{\text{ef}}$  为太阳辐照在目标表面各面元  $j$  上经一次或多次反射后最终对面元  $i$  的贡献<sup>[7]</sup>.

## 2 地物目标表面红外辐射特性的计算

地物目标任一面元  $i$  的全波段辐射出射度  $M_i$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^2$ ) (有效辐射)为

$$F_i M_i = \sigma \cdot \sum_{m\beta=1}^{M_{\text{inf}}} F_i \cdot \epsilon_i^{m\beta} \cdot A_{T_i}^{m\beta} \cdot T_i^4 + \sigma \cdot \left[ \sum_{m\beta=1}^{M_{\text{sky}}} \sum_{j_{\text{sky}}=1}^{N_{\text{sky}}} F_{j_{\text{sky}}} TR_{j_{\text{sky}},i,env}^{m\beta} \cdot A_{T_{j_{\text{sky}}}}^{m\beta} \cdot T_{j_{\text{sky}}}^4 \right. \\ \left. + \sum_{m\beta=1}^{M_{\text{gro}}} \sum_{j_{\text{gro}}=1}^{N_{\text{gro}}} F_{j_{\text{gro}}} \cdot TR_{j_{\text{gro}},i,env}^{m\beta} \cdot A_{T_{j_{\text{gro}}}}^{m\beta} \cdot T_{j_{\text{gro}}}^4 + \sum_{m\beta=1}^{M_{\text{con}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{con}}} F_j \cdot \epsilon_j^{m\beta} \cdot TR_{j,i,env}^{m\beta} \cdot A_{T_j}^{m\beta} \cdot T_j^4 \right] \\ + C_{\text{sun}} \sum_{m\beta=1}^{M_{\text{sun}}} A_{T_{\text{sun}}}^{m\beta} \{ (1 - a_i^{m\beta}) \cdot TR_{\text{sun},i,env}^{m\beta} [F_{\text{sun},i} P_{\text{irr}} + F_i P_{\text{scn}}] \} \\ + C_{\text{sun}} \sum_{m\beta=1}^{M_{\text{sun}}} A_{T_{\text{sun}}}^{m\beta} \left\{ \sum_{j=1}^{N_{\text{con}}} (1 - a_j^{m\beta}) \cdot [TR_{j,i,env}^{\text{tr},m\beta} F_{\text{sun},j} \cdot P_{\text{irr}} + TR_{j,i,env}^{\text{scn},m\beta} F_j P_{\text{scn}}] \right\} \quad (15)$$

式(15)中,下标“ $K, i, env$ ”表示面元  $K = (j, j_{\text{sky}}, j_{\text{gro}})$  的辐射能投射到面元  $i$ ,再从  $i$  反射到环境; $TR_{j_{\text{sky}},i,env}^{m\beta}, TR_{j_{\text{gro}},i,env}^{m\beta}, TR_{j,i,env}^{m\beta}, TR_{j,i,env}^{\text{tr},m\beta}, TR_{j,i,env}^{\text{scn},m\beta}$  的具体表达式参见文献<sup>[7]</sup>. 右边第1项为面元  $i$  的本身辐射;第2项括号内分别为天、地各单元  $j_{\text{sky}}, j_{\text{gro}}$  及目标其它各面元  $j$  的红外辐射投射到面元  $i$ ,再从  $i$  反射到环境去的红外辐射;第3项为面元  $i$  对太阳辐射的一次反射;第4项为太阳辐照在目标其它各面元上,经一次或多次反射后最终从面元  $i$  反射到环境去的太阳辐射.

计算目标表面任一面元在  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  和  $8 \sim 12 \mu\text{m}$  波段内的辐射出射度,只需对式(15)积分.

### 3 缩小计算规模与并行计算

在计算步骤(时间域)上把整个问题分解为若干个子问题,可并行处理;(1)目标面元与面元间、面元与天地背景间的红外辐射传递系数;(2)目标面元的太阳入射投影面积及太阳入射辐射传递系数。

在空间域(计算区域)上将复杂形体分解为若干个子域,因此在对红外和太阳入射辐射传递系数并行处理的同时,还可对各子域并行计算。

在对各子域完成了上述二部分的计算后,将辐射传递系数以数据文件形式输入主程序,然后计算传导系数、温度场和辐射出射度。

选坦克为例,将坦克划分成39个子域和1123个单元(其中545个体元,578个面元)。坦克炮塔选用球坐标,分为4个子域;炮塔顶盖、炮筒选用圆柱坐标,各1个子域;炮塔与车体接合部分为不规则面,选用直角坐标,4个子域;坦克车体(前、后甲板),左、右两侧翼子板,侧裙板等共29个子域(规则面)均选用直角坐标系。在奔腾166兼容机上,采用蒙特卡罗法时模拟的能束数为10万,所需的计算时间如表1所示。

表1 计算坦克温度场和红外辐射出射度场所需的时间  
Table 1 Required time in calculating temperature profile and infrared exitance of a tank

计算步骤 (分解为3个子问题)	空间域 不分解 /min	分成39个子域用3个 处理器并行处理/min			
		子域1-10	子域11-18	子域19-39	Max
(1)面元间、面元与背景间的RTC	49	16	18	18	18
(2)太阳入射投影面积及RTC	69	18	29	23	29
(3)计算传导系数、温度场和辐射出射度	4	4			
时间域不并行,计算时间=(1)+(2)+(3)	122	18+29+4=51			
时间域并行,计算时间=Max[(1),(2)]+(3)	73	29+4=33			

(1)时间域上不分解,空间域上也不分解,使用1个处理器,122min。

(2)时间域上分解(波段并行处理),空间域上不分解,使用2个处理器73min。

(3)时间域上不分解,空间域上分解(并行计算),使用3个处理器51min

(4)时间域上分解(波段并行计算),空间域上分解(分区并行计算),使用6个处理器33min。

坦克表面8~12 $\mu\text{m}$ 波段红外辐射出射度的计算结果见图1(静态)和图2(动态)。

### 4 讨论

用区域分解算法,将三维复杂几何形体分解为若干个规则的子域,不同的子域选用不同的坐标系,用控制容积法分别处理;子域与子域间用热网络法,在空间域上将目标分解为若干个子域,可使用多个处理器分区并行计算。

用蒙特卡罗法计算辐射传递系数,可以考虑界面的复杂辐射特性,如:镜反射、各向异性发射、各向异性反射等;可直接考虑界面的复杂几何特性,如:相互遮挡、太阳入射方向上的

投影面积等. 辐射传递系数只与界面的辐射热物性、几何尺度有关, 因此在用蒙特卡罗法计算该系数时, 可以取很大的模拟量(十万至几百万束光线), 提高了计算精度. 引入辐射传递系数, 与能量方程的求解分离, 可对波段实现并行处理.

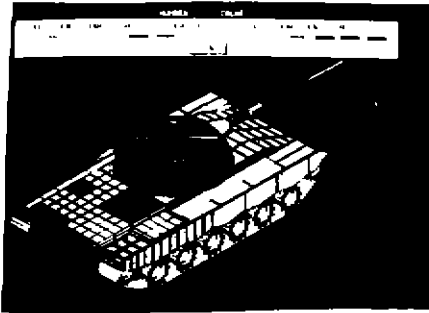


图1 静态坦克表面红外辐射出射度  
Fig. 1 Infrared exitance of a static tank

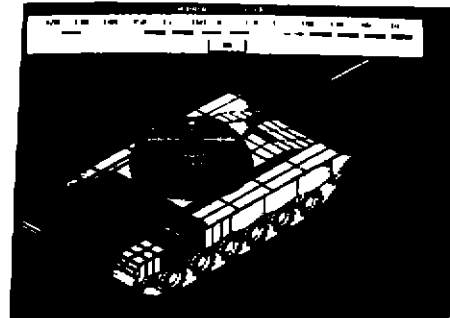


图2 动态坦克表面红外辐射出射度  
Fig. 2 Infrared exitance of a moving tank

当界面的辐射热物性随温度变化时, 可用迭代法求辐射传递系数. 一般来讲, 界面的辐射热物性随温度变化不敏感<sup>[8]</sup>, 特别是限于现有的实验数据和所讨论的问题. 例如: 300K 与 1000K 的辐射热物性有较大的差异, 但 300K 与 350K 的差异就很难确定(缺少完整的实验数据<sup>[8]</sup>). 在目标红外热像理论建模中, 给定季节、经纬度、气象条件, 目标面元的温度变化一般小于 100K. 因此可以认为辐射热物性不变化, 辐射传递系数与温度无关. 即使温度的变化对辐射热物性影响较大, 则由于能量方程求解时, 前几次迭代温度场变化剧烈, 一次迭代相差几十度, 此时辐射传递系数可迭代求解. 当温度场收敛到一定程度, 一次迭代相差几度, 此时辐射热物性不变化.

辐射传递系数与角系数相比的优点是: (1) 角系数只反映两个表面间的一次辐射交换, 必须用有效辐射的概念来考虑表面间的多次反射. 辐射传递系数则考虑了多次反射. (2) 应用角系数的前提是表面为漫射面, 用蒙特卡罗法求辐射传递系数则可考虑各向异性的影响.

区域分解算法与蒙特卡罗法相结合的优点是: (1) 利用辐射传递系数的概念, 并将该系数的计算与能量方程的求解分离后, 可同时实现波段和分区并行处理. (2) 用蒙特卡罗法求辐射传递系数时, 随着目标面元数的增加导致程序编制的困难主要体现在: 射线与面元交点的判断量急剧上升. 将区域分解算法与蒙特卡罗法相结合, 可以很好地解决此难题. 在将空间区域分解后, 射线与面元的交点可转化为射线与子域的交点. 在确定了与射线相交的子域后, 再进一步判断射线与该子域相交的面元. 即: 对几千个面元的判断, 转化为对几十个子域的判断加上对几十个面元的判断. 从而减轻了程序编制的难度.

## REFERENCES

- 1 YAO Lian-Xing, QIU Wei-Li, WANG Fu-Heng. *Optical Properties of Object and Environment*. Series of Missile and Spaceflight, Ed. XU Ge-Xing, Beijing: Space Aeronautics Publishing House (姚连兴, 仇维礼, 王福恒. *目标和环境的光学特性*, 徐根兴主编, 导弹与航天丛书, 北京: 宇航出版社, 1995: 1~12
- 2 Farmer J T, Howell J R. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1994, 8(1): 133~139

- 3 Boyd I D. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1996, 10(4):579~585
- 4 WANG Zhong-Qi. *Chinese Journal of Computational Physics*. (王仲奇. 计算物理), 1997, 14(4~5):465~466
- 5 Benmalek A, Tong T W, Li W M. *Distributed-memory parallel algorithm for the solution of the spectral radiative transfer equation AIAA*, 96-0606, 1996
- 6 LU Tao, SHI Ji-Min, LIN Zhen-Bao. *Domain Decomposition Method*, Beijing, Science Press (吕涛, 石济民, 林振宝. 区域分解算法, 北京: 科学出版社), 1992, 199~268
- 7 CUI Guo-Min. *The Monte Carlo Method and Parallel Algorithm in Infrared Mapping Model of Military Object*, A dissertation for the Degree of Doctor of Engineering, Harbin Institute of Technology (崔国民. 军用目标红外热像理论建模中的蒙特卡罗法与并行计算, 哈尔滨工业大学, 工学博士学位论文), 1998, 25~59
- 8 GE Shao-Yan, NA Hong-Yue. *Thermal Radiative Properties and Measurement*, Beijing, Science Press (葛绍岩, 那鸿悦. 热辐射性质及其测量, 北京: 科学出版社), 1989, 96~498

## THE MONTE CARLO METHOD AND PARALLEL ALGORITHM IN INFRARED MAPPING MODEL OF TERRAIN OBJECT\*

TAN He-Ping CUI Guo-Min RUAN Li-Ming XIA Xin-Lin YU Qi-Zheng

(School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** The temperature profile and infrared exitance of a terrain object were calculated by combining domain decomposition method with monte carlo method. The object with 3-D complex shape can be divided into several regular sub-zones, which are described by corresponding coordinate systems. The heat transfer within every sub-zone was calculated by control volume method and the heat transfer among sub-zones calculated by thermal mesh method. When the radiative transfer coefficient (RTC) was calculated by means of monte carlo method, the complication of surface radiative characteristic could be taken into account. By application of the RTC, a complicated calculation can be divided into several relatively easy sub-calculations, and the calculation in several different wavelength bands can be solved parallelly. In space-zone (computing zone), the object was divided into a number of domains, then several processors were used simultaneously.

**Key words** terrain object, infrared mapping, Monte Carlo method, domain decomposition method, parallel algorithm.

\* The project supported by the National Science Fund for Distinguished Young Scholars and National Natural Science Foundation of China

Received 1997-11-12, revised 1998-04-20