

深空背景下空间目标红外特性建模方法研究*

孙成明[†] 袁 艳 张修宝

(北京航空航天大学精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

(2009 年 9 月 7 日收到; 2010 年 1 月 8 日收到修改稿)

针对空间目标红外特性提出了一种精确建模方法. 根据空间目标的背景辐射环境, 充分考虑到目标表面间的热传导及内热源的影响, 建立了空间目标的热平衡方程. 基于目标的结构特性和材料特性, 利用节点网络法求解了目标表面的温度分布. 根据光辐射定律、光散射定律建立了空间目标红外特性的数学模型. 结合具体的参数, 对深空目标资源一号卫星和风云三号卫星的温度场分布和辐照度分布进行了数值计算, 仿真结果验证了理论分析的正确性.

关键词: 空间目标, 红外特性, 瞬态温度场, 建模与仿真

PACC: 9870V, 7830, 1110W, 0250

1. 引 言

随着人类航天事业的发展, 发射进入太空的空间目标的数量不断增加. 目标体积的小型化、形状的多样化、表面的复杂化为人类探索空间目标提出了新的挑战^[1], 同时, 也为空间目标光学特性的研究提出了新的课题. 空间目标红外特性作为空间光电探测系统所感知的信息, 是目标探测识别的基础和依据. 而空间目标的特定飞行环境, 决定了其红外特性实测的困难. 以光辐射和热传导理论为基础的空间目标光学特性数值计算方法可有效模拟各种复杂条件下的空间目标光学特性, 而且周期短、成本低、可靠性高^[2-5]. 关于空间目标温度场的模拟工作已开展了一段时间, 既有稳态温度场的计算, 也有近期的卫星热平台分析建模及温度预示^[6-9]. 但大多是基于简化的模型进行求解, 没有充分考虑到目标表面间的热传导及内热源的影响. 此外, 在进行空间目标红外特性分析时, 主要是针对目标自身的红外辐射特性进行研究, 很少考虑到目标对背景的红外反射特性, 而且对目标特性主要是进行静态分析, 动态分析几乎没有涉及. 本文在空间目标温度场及红外辐射场理论建模通用框架研究成果的基础上, 综合辐射、导热两种传热方式, 建立了空

间目标温度分布计算模型和数值计算方法; 基于目标红外特性的几何模型, 考虑太阳直接辐射、地球反射太阳辐射、地球自身辐射等空间轨道外热流, 以及目标自身辐射的影响, 建立了较为完善的目标红外光谱特性的数学模型. 以深空目标资源一号卫星和风云三号卫星为例, 进行了瞬态温度场及红外辐照度的动态模拟, 为空间目标红外特性的实时分析提供了一种手段.

2. 空间目标热分析及温度分布

空间目标的红外特征主要取决于目标自身温度分布和背景辐射特性, 需要根据不同目标的几何结构及是否有内部热源等特点, 考虑其与周围背景的能量交换关系, 建立描述目标表面温度分布的数学模型, 求解目标的温度场, 并根据目标表面材料的红外辐射特征参数, 计算目标的红外辐射特征^[10]. 对于深空目标, 其红外背景辐射主要包括太阳直接红外辐射、地球及大气反射太阳红外辐射、地球自身红外辐射以及月亮和其他星体的红外辐射等, 如图 1 所示.

由于目标运行轨道的时间性、背景辐射的方向性, 目标在轨运行的过程中, 姿态、位置以及背景辐射环境不断改变, 其与环境的热交换过程也在不断

* 长江学者和创新团队发展计划(批准号:IRT0705)和中国航天科技集团公司航天科技创新基金资助的课题.

[†] E-mail: sunchengming2008@163.com

进行,其表面温度是不均匀的,因而目标的整体温度是一个时变的瞬态温度场^[11].为了准确地描述这种温度分布特征,本文基于目标结构特性和材料特性,采用热网络法进行目标温度场的计算,把目标在三维空间划分离散网格,以一个节点代替一个网格,分析节点间及节点与内外热源的热交换和热平衡,根据能量守恒定律建立各节点的能量平衡方程,利用控制容积与有限差分法建立离散差分方程,设定初始条件,递推求解能量平衡方程组,得到目标的三维瞬态温度场.

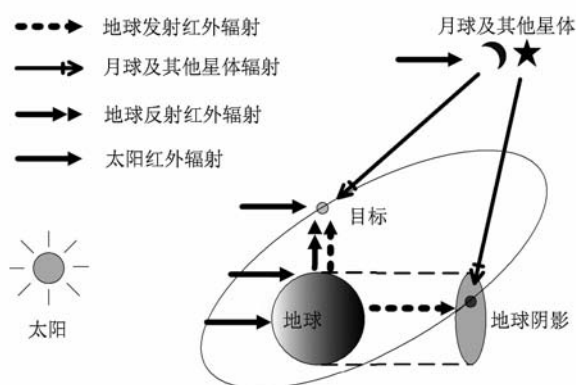


图1 空间目标的红外背景辐射示意图

目标在大气层外 3.5 K 的深空背景下运行,忽略目标与外界环境的对流换热.目标表面的辐射能量交换主要由以下因素决定.

1) 目标表面所接收的外热源的红外辐射.其主要来自于太阳直接辐射、地球及大气反射太阳辐射、地球自身辐射以及月亮和其他星体的辐射等,辐射状况比较复杂.根据目标背景参数、几何结构参数、材料物性参数、轨道参数来确定.

2) 目标各表面之间的红外辐射、反射辐射以及相邻表面之间的热传导.其中目标各表面之间的红外辐射、反射辐射根据各表面之间的辐射传递系数来确定,相邻表面之间的热传导由 Fourier 导热定律来确定.

3) 内热源对目标的辐射加热.目前的空间目标热设计普遍采用了等温化技术,使目标内部不同的仪器设备的温度趋于均匀化.因此,本文将目标内部所有仪器的加热作为一个总的内热源来考虑,相同面积的外表面受到的内热源的加热是相等的.

4) 目标的自身红外辐射.根据 Planck 定律、Kirchhoff 定律来确定.

由于太阳、地球和目标三者之间的空间位置对

目标表面温度场的影响较大,因此,对太阳能否直接照射到目标表面,即目标是否在阴影区,分别建立能量平衡方程.另外,由于太阳帆板的光电转换效率特性,对目标本体和太阳帆板分别建立能量平衡方程.

当目标处于日照区时,对于目标表面的任意一个网格单元体 i ,根据辐射边界条件及能量守恒定律,可得目标本体网格单元体的能量平衡方程为

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 - q_7 = A\delta\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (1)$$

太阳帆板网格单元体的能量平衡方程为

$$(q_1 + q_3)(1 - \eta) + q_2 + q_4 + q_5 + q_6 - q_7 = A\delta\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau}. \quad (2)$$

当目标进入阴影区时,太阳不能直接照射到目标外表面,此时背景辐射中不存在太阳的直接辐射和地球的反射辐射,对于本体与帆板,能量平衡方程是相同的.即

$$q_2 + q_4 + q_5 + q_6 - q_7 = A\delta\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (3)$$

其中 $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7$ 分别为网格单元 i 的能量交换; A, δ, ρ, c 分别为网格单元 i 的表面积、厚度、密度、比热, η 为太阳帆板的光电转换效率.

1) 网格单元 i 接收到的太阳直接辐射 q_1 为

$$q_1 = \alpha_s E_{\text{sun}} \varphi_1 A_i, \quad (4)$$

其中, α_s 为目标表面的太阳辐射吸收率, A_i 为面元 i 的面积, φ_1 为太阳辐射角系数.

2) 网格单元 i 接收到的地球自身辐射 q_2 为

$$q_2 = \frac{1 - \rho}{4} E_{\text{sun}} \frac{R_{\text{car}}^2}{(R_{\text{car}} + R_{i-e})^2} \alpha_e \varphi_2 A_i, \quad (5)$$

其中 α_e 为目标表面的地球辐射吸收率, ρ 为地球平均反射率, R_{car} 为地球半径, R_{i-e} 为目标轨道高度, φ_2 为地球辐射角系数.

3) 网格单元 i 接收到的地球反射辐射 q_3 为

$$q_3 = \alpha_s \rho E_{\text{sun}} \varphi_3 A_i, \quad (6)$$

其中 φ_3 为地球反照角系数.

4) 网格单元 i 接收到的相邻网格单元的热传导 q_4 为

$$q_4 = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n k_{ji} (T_j - T_i), \quad (7)$$

其中 k_{ji} 为网格单元 i 与其他相邻网格单元 j 间的热导; T_i 为网格单元 i 的温度; T_j 为相邻网格单元 j 的温度.

5) 网格单元 i 接收到的其他网格单元的辐射

q_5 为

$$q_5 = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \varepsilon_j \sigma T_j^4 A_j R D_{ji}, \quad (8)$$

其中 σ 为 Stefan-Boltzmann 常数, ε_j 为其他网格单元 j 的红外发射率, A_j 为其他网格单元 j 的面积, T_j 为其他网格单元 j 的温度, $R D_{ji}$ 为其他网格单元 j 对网格单元 i 的辐射传递系数。

6) 网格单元 i 接收到的内热源的能量 q_6 为

$$q_6 = A_i Q / \sum_{i=1}^n A_i, \quad (9)$$

其中 Q 为目标内部所有设备发出热量的总和。

7) 网格单元 i 向周围环境的发射辐射 q_7 为

$$q_7 = A_i \varepsilon_i \sigma T_i^4, \quad (10)$$

其中, ε_i 为网格单元 i 的红外发射率。

由于宇宙空间背景辐射能量相当于温度 3.5 K 的绝对黑体辐射, 辐射能量大约为 $10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 辐射能量极小, 因此, 本文在分析目标表面网格单元吸收的能量时, 忽略宇宙空间背景辐射的影响。这样对于所划分的 n 个网格单元, 就能得到 n 个方程。由于各个面元之间是相互影响的, 所以这 n 个方程必须联立求解, 求出的解即为空间目标外表面的温度分布^[12,13]。

3. 空间目标红外特性理论建模

空间目标的红外特性可以通过目标在探测器入瞳面上产生的辐照度来描述, 目标表面面元与探测器入瞳面的几何位置关系如图 2 所示。其中, n_r 为目标表面面元的法线方向, n_i 为面元上光线入射方向, θ_i 为入射角, θ_r 为面元上光线的出射角, n_d 为探测器入瞳面的法线方向, oo' 为面元与探测器入瞳面的中心连线, 其长度 R , θ_d 为探测器入瞳面法线与其中心连线 oo' 的夹角。

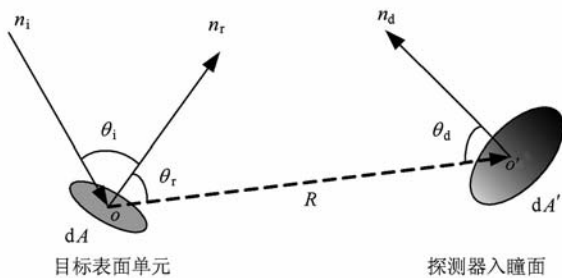


图 2 目标表面面元与探测器入瞳面的几何位置关系

3.1. 空间目标红外辐射特性

根据 Planck 辐射定律与 Kirchoff 定律, 网格单元 i 的光谱辐射出射度为

$$M_i(\lambda) = \varepsilon \frac{c_1}{\lambda^5 (\exp(-c_2/\lambda T_i) - 1)}, \quad (11)$$

其中, T_i 为网格单元 i 的表面温度。

通常情况下, 网格单元 i 相对于与目标探测器间的距离较小, 因而可以将其看作点光源, 根据余弦辐射定律, 网格单元 i 在探测方向 θ_r 的红外光谱辐射强度为

$$I_i(\lambda) = \frac{M_i(\lambda)}{2\pi} A_i \cos\theta_r, \quad (12)$$

其中 A_i 为网格单元 i 的表面面积。

探测器透镜孔径相对于透镜与目标间的距离较小, 探测立体角 Ω 近似为投影面积 $(\pi/4) D^2 \cos\theta_d$ 与距离平方 R^2 比, 即

$$\Omega = \frac{\pi D^2 \cos\theta_d}{4R^2}, \quad (13)$$

其中 D 为探测光学系统入瞳直径; R 为目标到光学系统入瞳的距离; θ_d 为网格单元 i 与入瞳中心的连线与光轴间的夹角。

则在波段 $\lambda_1 - \lambda_2$ 范围内, 探测器入瞳收集到网格单元 i 的辐射通量为

$$\Phi_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{A_i M_i(\lambda) D^2 \cos\theta_r \cos\theta_d}{8R^2} d\lambda. \quad (14)$$

于是, 网格单元 i 在探测器入瞳处辐射照度为

$$E_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{A_i M_i(\lambda) \cos\theta_r \cos\theta_d}{2\pi R^2} d\lambda. \quad (15)$$

3.2. 空间目标红外散射特性

3.2.1. 空间目标对太阳直接红外辐射的散射特性

由于目标表面面元 dA 面积很小, 因而可以将其看作点源。于是, 根据方向反射率的定义及余弦定律, 目标表面面元 dA 被太阳光照射在 oo' 方向产生的光谱辐亮度为^[14-16]

$$L_p(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) E_{\text{sun}}(\lambda) \cos\theta_i, \quad (16)$$

其中, $f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)$ 为面元 dA 的方向反射率。

面元 dA 在 oo' 方向产生的光谱辐射强度为:

$$\begin{aligned} dI_{\theta_r} &= L_p(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) dA \cdot \cos\theta_r \\ &= f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) E_{\text{sun}}(\lambda) \\ &\quad \times \cos\theta_i \cos\theta_r dA. \end{aligned} \quad (17)$$

由面元 dA 发出并落到探测器入瞳面 dA' 上的辐射通量为

$$d\Phi = dJ_{\theta_r} d\Omega = f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) \times E_{\text{sun}}(\lambda) \cos\theta_i \cos\theta_r dA d\Omega, \quad (18)$$

其中, $d\Omega$ 为探测器入瞳面 dA' 对面元 dA 所张的立体角.

$$d\Omega = dA' \frac{\cos\theta_d}{R^2}. \quad (19)$$

根据辐照度的定义, 面元 dA 在探测器入瞳面 dA' 上产生的光谱辐照度为

$$dE = d\Phi/dA' = f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) E_{\text{sun}}(\lambda) \times \cos\theta_i \cos\theta_r \cos\theta_d dA/R^2. \quad (20)$$

3.2.2. 空间目标对地球及大气反射太阳红外辐射的散射特性

地球本身不发光, 而是靠反射太阳光而发亮. 地球表面及其大气系统对整个太阳辐射的反射有明显的光谱选择性, 而且其反射特性与气象条件及地球表面的性质有关. 地球反射率的多变状况, 给目标的光度计算带来相当大的困难. 但是, 由于空间目标的飞行高度大、飞行速度快, 而且这部分能量比起太阳对目标的直接辐射所占比例又较小, 因此在计算时, 假设地球为一漫反射体, 对太阳辐射的反射遵守 Lambert-Beer 定律并且各处均匀, 反射光谱与太阳光谱相似. 地球及其大气系统对太阳光的反照率一般取地球的平均反射率为 $\rho = 0.35$. 根据上式, 则目标表面面元 dA 散射地球及大气反射太阳红外辐射在探测器入瞳处产生的光谱辐照度为

$$dE' = f_r(\theta'_i, \varphi'_i; \theta'_r, \varphi'_r, \lambda) \rho E_{\text{sun}}(\lambda) \times \cos\theta'_i \cos\theta'_r \cos\theta'_d dA/R^2, \quad (21)$$

其中, θ'_i, θ'_r 分别为目标表面面元 dA 的法线方向与地球及大气反射的太阳辐射方向、探测器观测方向的夹角.

3.2.3. 空间目标对地球自身红外辐射的散射特性

地球红外辐射主要来源于地球吸收太阳辐射的那部分能量, 受地球表面温度和所覆盖云量的影响. 根据气象卫星每年获得的大量数据, 地球辐射出射度的年平均为 $(237 \pm 7) \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 其光谱分布近似于 280 K 的黑体. 对于空间目标而言, 可以假设地球为一均匀的热辐射平衡体, 即地球吸收的太阳辐射等于它向空间辐射的能量, 则地球红外辐射在空间目标处的辐照度 $E_{\text{ear}}(\lambda)$ 为

$$E_{\text{ear}}(\lambda) = \frac{1 - \rho}{4} E_{\text{sun}}(\lambda) \frac{R_{\text{ear}}^2}{(R_{\text{ear}} + R_{t-e})^2}. \quad (22)$$

于是, 目标表面面元 dA 散射地球红外辐射在探测器入瞳处产生的光谱辐照度为

$$dE'' = f_r(\theta'_i, \varphi'_i; \theta'_i, \varphi'_i, \lambda) \frac{1 - \rho}{4} \times E_{\text{sun}}(\lambda) \frac{R_{\text{ear}}^2}{(R_{\text{ear}} + R_{t-e})^2} \times \cos\theta'_i \cos\theta'_i \cos\theta'_d dA/R^2. \quad (23)$$

如目标某一表面 n 对太阳直接辐射、地球及大气反射的太阳辐射为“可视表面”, 则在红外波段对 (20), (21) 和 (23) 式在目标的整个“可视表面”积分, 即得到目标该表面反射背景红外辐射在探测器入瞳处产生的辐照度 E_n 为

$$E_n = \iiint (dE + dE' + dE'') d\lambda dA. \quad (24)$$

进而可得, 整个目标反射背景辐射在探测器入瞳处产生的辐照度 E 为

$$E = \sum E_n. \quad (25)$$

综上所述, 在给定背景辐射源、目标及探测器的轨道参数后, 求出背景辐射源、探测器在目标本体坐标系下的矢量坐标, 计算目标表面的光线入射角、探测系统的观测角并分析目标表面间的相互遮挡情况, 结合建立的红外特征的数学模型, 即可求得目标自身红外辐射及反射背景红外辐射在探测器入瞳处的辐照度.

4. 空间目标红外特性仿真计算

以资源一号卫星和风云三号卫星为例, 进行空间目标红外特性仿真计算.

4.1. 参数列表

4.1.1. 物性参数

目标物性参数如表 1 所示.

4.1.2. 轨道参数

1) 太阳轨道参数

① 轨道半长轴: $a_s = 1.00000102A_u$ ($1A_u = 1.49597892 \times 10^8 \text{ km}$).

② 轨道偏心率: $e_s = 0.01670862 - 0.00004204T - 0.00000124T^2$.

③ 轨道倾角: $i_s = 23.439291^\circ - 0.01300417^\circ T - 0.00000016^\circ T^2$.

④ 升交点赤经: $\Omega_s = 0.0^\circ$.

⑤ 近地点幅角: $\omega_s = 282.937347^\circ + 0.32256206^\circ T$

$-0.00015757^{\circ}T^2$.

⑥ 过近地点时刻：1950-01-03 02:00:00.

其中, $T = (\text{某时的儒略日数} - J2000.0 \text{ 的儒略日数}) / 36525 = (t - 2451545.0) / 36525$.

2) 目标轨道参数

目标轨道参数如表 2 所示.

3) 探测器轨道参数

探测器轨道参数如表 3 所示.

表 1 目标物性参数

卫星名称	部件名称	几何尺寸/mm	材料特性			
			材料	发射率 ε	吸收率 α_s	
资源一号	卫星本体	2000 × 1800 × 2250		F46 聚酯薄膜	0.81	0.1
			背面	SR107 白漆	0.87	0.17
	太阳帆板	25 × 6500 × 3215	正面	太阳电池片 GaInP2/GaAs/Ge	0.86	0.9
			侧面	有机黑漆	0.88	0.93
风云三号	卫星本体	4460 × 2020 × 3790		F46 聚酯薄膜	0.81	0.1
			背面	SR107 白漆	0.87	0.17
	太阳帆板	40 × 7800 × 3790	正面	太阳电池片 GaInP2/GaAs/Ge	0.86	0.9
			侧面	有机黑漆	0.88	0.93

表 2 目标轨道参数

卫星名称 \ 轨道参数	半长轴 a_o /km	偏心率 e_o	倾角 i_o ($^{\circ}$)	升交点赤经 Ω_o ($^{\circ}$)	近地点幅角 ω_o ($^{\circ}$)	降交点 地方时
资源一号	7149.3	0.0011	98.50	185.371	335.631	11:20
风云三号	7207.4	0.0019	98.75	30	60	10:00

表 3 探测器轨道参数

卫星名称 \ 轨道参数	半长轴 a_d /km	偏心率 e_d	倾角 i_d ($^{\circ}$)	升交点赤经 Ω_d ($^{\circ}$)	近地点幅角 ω_d ($^{\circ}$)	降交点 地方时
资源一号	7184.7	0.001	96.34	185.371	335.631	11:20
风云三号	7232.8	0.001	97.39	30	60	10:00

4.2. 计算流程

红外特性计算流程如图 3 所示.

4.3. 结果分析

4.3.1. 温度场

对资源一号卫星和风云三号卫星于 2009 年 06 月 05 日 14:30, 16:30, 18:30 三个时刻的表面温度分布进行了仿真计算, 计算结果如表 4 所示.

4.3.2. 辐照度

对资源一号卫星和风云三号卫星于 2009 年 06 月 05 日 12:00 到 20:00 期间, 在探测器入瞳处的辐照度进行了仿真计算, 仿真结果如图 4 所示.

1) 由资源一号卫星和风云三号卫星温度场的计算结果, 在同样的时间间隔内, 风云三号卫星表面比资源一号卫星表面的平衡温度变化大, 说明风云三号卫星比资源一号卫星的姿态变化幅度大, 相关文献中各目标的红外灰度图像也充分说明了这一点. 另外, 由于资源一号卫星和风云三号卫星均为单翼卫星且太阳帆板位于目标本体的不同侧, 故其温度场分别在 $y < 0$ 和 $y > 0$ 时无值.

2) 由资源一号卫星和风云三号卫星辐照度的计算结果, 各目标在探测器入瞳处的红外辐照度均在 10^{-6} 量级, 且出现了不同的峰值与零值, 即目标的光学特性具有较强的方向性. 这与目标表面包覆

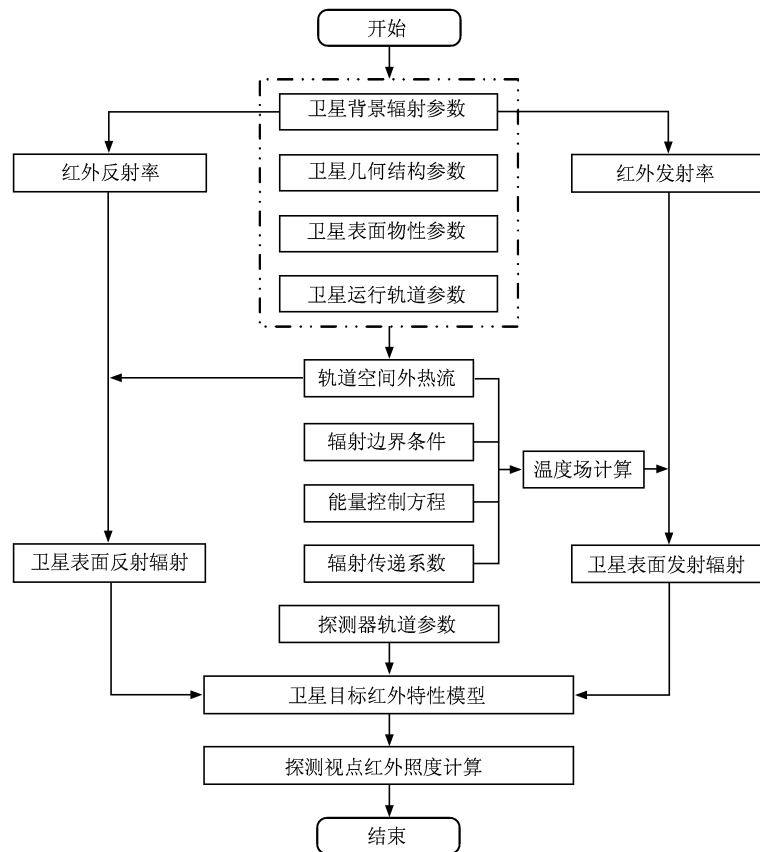


图3 红外特性计算流程

表4 目标表面温度场(单位:K)

表面位置	资源一号卫星探测时间			风云三号卫星探测时间			
	14:30	16:30	18:30	14:30	16:30	18:30	
目标本体	+X面	313.8151	313.8139	313.8150	225.3331	211.0870	203.7613
	-X面	210.2330	211.6345	213.9242	218.6849	229.5337	218.6907
	+Y面	112.0853	112.0852	112.2267	112.0848	112.0848	106.5082
	-Y面	163.2453	163.2484	163.2515	194.2982	221.1973	194.2959
	+Z面	239.6114	241.5216	242.1889	236.7314	227.2804	207.0940
	-Z面	112.0852	112.0852	112.0852	112.0824	124.7065	112.0824
太阳帆板	+X面, y > 0	302.4202	302.4020	302.4202	-	-	-
	+X面, y < 0	-	-	-	297.0347	319.0987	297.0334
	-X面, y < 0	-	-	-	209.7690	209.7690	209.7690
	-X面, y > 0	196.6569	196.1278	196.1288	-	-	-

材料及太阳帆板具有较强的镜反射特征相一致.同时,还与目标的几何外形结构、在轨飞行姿态以及目标、太阳、地球三者之间的相互位置关系有关.也

即只有当目标同时满足“被背景光源照射”及“对探测器可见”两个条件时,其对探测器入瞳处的照度才有贡献.

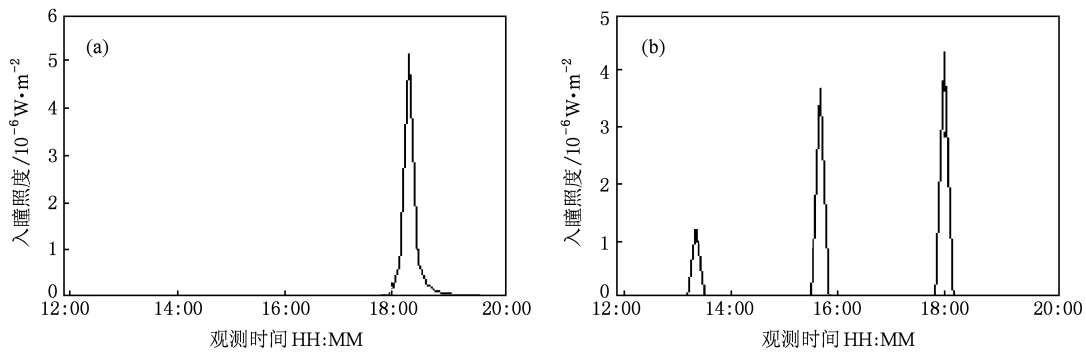


图4 目标在探测器入瞳处的红外辐照度 (a) 资源一号卫星, (b) 风云三号卫星

5. 结 论

本文对空间目标的红外特性进行了理论建模与仿真研究,分析了目标在空间背景环境下的热平衡方程,并通过热网络法和有限元对目标与环境间的热交换进行了计算,考虑外热流、内热源以及网格单元间热传导的影响,完善了目标红外温度场计算的数学模型,最终得出了空间目标在不同太阳角系数下的瞬态温度场分布.通过对结果的讨论,分

析了空间目标温度分布的一般性规律和特征.从目标自身辐射及散射背景辐射两个方面,建立了空间目标红外特性的数学模型.以资源一号卫星和风云三号卫星为例,根据目标的几何结构尺寸、表面物性参数、相对位置关系等确定输入条件,利用建立的空间目标温度分布及红外特性模型进行了空间目标特性的动态分析,详细计算了目标表面温度场及探测器入瞳处的辐照度值,给出了仿真结果.仿真结果验证了建模方法的正确性,初步实现了空间目标在轨光学特性的实时计算.

- [1] Yao L X, Qiu W L, Wang F H 1995 *Optical Characteristics of Target and Environment* (Beijing: Aerospace Press) p1 (in Chinese) [姚连兴、仇维礼、王福恒 1995 目标和环境的光学特性(北京:宇航出版社)第1页]
- [2] Chang Y, Xue F T 2008 *Infrared* **29** 25 (in Chinese) [常勇、薛丰廷 2008 红外 **29** 25]
- [3] Xia W J 2007 *Electron. Meas. Technol.* **30** 37 (in Chinese) [夏文佳 2007 电子测量技术 **30** 37]
- [4] Zhang S Q, Shi Y L, Huang C G, Lian C C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5508 (in Chinese) [张控勤、石云龙、黄长庚、连长春 2007 物理学报 **56** 5508]
- [5] Shen G T, Yang B C, Cai J G, Jiang J, Gao J 2005 *Chin. Space Sci. Technol.* **2** 6 (in Chinese) [沈国土、杨宝成、蔡继光、姜瑾、高景 2005 中国空间科学技术 **2** 6]
- [6] Zhang F Q, Fan X, Ma D H 2007 *Infrared Laser Engng.* **36** 419 (in Chinese) [张发强、樊祥、马东辉 2007 红外与激光工程 **36** 419]
- [7] Pan Z F 1987 *Chin. Space Sci. Technol.* **7** 37 (in Chinese) [潘增富 1987 中国空间科学技术 **7** 37]
- [8] Zhang C G, Zhang Y W 1981 *Acta Phys. Sin.* **30** 953 (in Chinese) [张才根、张幼文 1981 物理学报 **30** 953]
- [9] Ma H T, Hua C S 2002 *Chin. Space Sci. Technol.* **22** 54 (in Chinese) [麻慧涛、华诚生 2002 中国空间科学技术 **22** 54]
- [10] Mao H X, Li X, Wang Z Y, Su Y M, Wu K F, Ma J, Zhao K 2007 *Infrared Laser Engng.* **36** 607 (in Chinese) [毛宏霞、李霞、王章野、苏月明、吴开锋、马静、赵康 2007 红外与激光工程 **36** 607]
- [11] Wei X Z, Li X, Zhuang Z W, Fu Y W 2000 *J. Infrared Millim. Waves* **19** 139 (in Chinese) [魏玺章、黎湘、庄钊文、付耀文 2000 红外与毫米波学报 **19** 139]
- [12] Xia X L, Ai Q, Ren D P 2007 *J. Infrared Millim. Waves* **26** 174 (in Chinese) [夏新林、艾青、任德鹏 2007 红外与毫米波学报 **26** 174]
- [13] Liu M Q, Li B C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3402 (in Chinese) [刘明强、李斌成 2008 物理学报 **57** 3402]
- [14] Ye H X, Jin Y Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 839 (in Chinese) [叶红霞、金亚秋 2008 物理学报 **57** 839]
- [15] Xu L Q, Li H, Xiao Z Y 2007 *Acta Phys. Sin.* **58** 6030 (in Chinese) [徐兰青、李晖、肖郑颖 2007 物理学报 **58** 6030]
- [16] Sun C M, Yuan Y, Zhang X B 2009 *Proc. SPIE* **7383** 381

Modeling of infrared characteristics of deep space target*

Sun Cheng-Ming[†] Yuan Yan Zhang Xiu-Bao

(*Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology, Ministry of Education, Beijing University
of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China*)

(Received 7 September 2009; revised manuscript received 8 January 2010)

Abstract

An accurate modeling method is proposed for the infrared characteristics of space target. Fully considering the heat conduction among the surfaces and the effect of inner heat source, the heat balance equation is presented for space target in the background radiation environment, and on the basis of structural and material properties of the target, the temperature distribution of target surface is calculated by node network method. According to the optical radiation and scattering theory, the mathematical model on infrared characteristics of space target is established and the general calculation method for infrared characteristics of space target is derived. Finally, the temperature field and irradiation distribution of ZY-1 and FY-3 satellite are computed using the given parameters. The computation results illustrate the validity of the theoretical analysis.

Keywords: space target, infrared characteristics, transient temperature field, modeling and simulation

PACC: 9870V, 7830, 1110W, 0250

* Project supported by the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University of Ministry of Education of China (Grant No. IRT0705) and the Aerospace Science and Technology Innovation Foundation of China Aerospace Science and Technology Corporation.

[†] E-mail: sunchengming2008@163.com