

Monte—Carlo 法在空间外热流计算中的应用 ——空间光学遥感器光学窗口的地球红外辐射分析计算

赵立新

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 用 Monte—Carlo 法对空间光学遥感器的大口径光学窗口的地球红外辐射进行了分析和模拟计算, 考虑了光线在外遮光罩挡光环内的多次漫反射和在光学窗口表面的镜反射, 讨论了目前普遍采用的挡光环等效面假设的局限性。

关键词: 光学窗口; 空间光学遥感器; 热流计算; 空间环境

1 引言

空间光学遥感器光学窗口安装在舱壁上, 外面是复杂多变的低温环境, 里面是温度变化较小的舱内环境, 这就使光学窗口内部产生了不均匀和不稳定的温度场, 从而严重影响了光学遥感器的分辨率和成像质量, 原因如下: 1) 使光学玻璃和机械结构产生热变形, 改变了光学窗口的面形精度和光学间隔。2) 使光学玻璃的折射率发生不均匀变化, 形成折射率梯度。

据美国 70 年代初期的文献介绍, 美国 Skylab 的光学窗口, 在 $591.8 \times 449.1 \text{mm}^2$ 的面积上中心和边缘的温差约为 $0.5^\circ\text{C}^{[1]}$ 。随着我国航天遥感事业的发展, 对光学窗口的要求已超出了上述水平, 在 $\varnothing 500 \sim 600 \text{mm}$ 范围内中心和边缘温差要控制在 $0.1 \sim 0.2^\circ\text{C}$ 以内, 这就必须详细计算光学窗口的外热流, 包括地面红外辐射热流, 为高精度的热控提供依据。

目前, 我国还缺乏这方面的系统性研究, 很多工程中的问题急待突破性解决, 本文用 Monte—Carlo 法计算了光学窗口的地球红外辐射热流。

为了比较工程中的各种方案, 本文计算了三种外遮光罩的结构形式, 如图 1 所示。

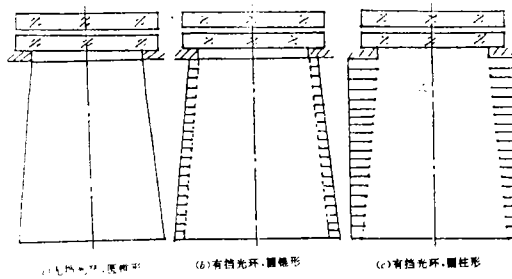


图 1 三种外遮光罩和光学窗口的结构方案

2 Monte-Carlo 法简介与应用

2.1 Monte-Carlo 法简介

* 国家自然科学基金资助项目(59486003)

收稿日期: 1995 年 9 月 27 日

Monte-Carlo 法是通过随机变量的统计试验来求解数学物理或工程技术问题的一种数值方法。其实质是一种随机模拟方法或统计实验方法。这种方法用于数值计算已有上百年的历史,但只是在高速计算机出现后,才广泛地应用于各种复杂计算。

对于辐射换热或辐射交换系数的计算, Monte-Carlo 法的基本思想是:首先,将一个表面发射的能束看作是由许多能束所组成,每个能束具有一定的能量,每一个能束出发的方向和位置,能束对另一表面的入射被吸收或被反射,能束反射的方向等等,都与一定的概率分布函数有关,也就是与一定的随机数有关。其次,在计算中跟踪大量的能束直到它们被吸收或逸出系统为止,辐射能量的发射、反射或吸收,均采用最后的统计结果表示,其计算精度随能束数的增加而提高^[2]。随机数用专门的程序产生,称为伪随机数。最终的计算结果的精度与各参数,伪随机数程序的正确性,伪随机数的均匀性都有很大关系^[3]。在本文的计算中,采用了三种不同的伪随机数的程序,分别进行了计算。为了提高伪随机数的质量,在伪随机数的程序中,一律采用双精度变量,以得到统计特性较好的伪随机数。

将 Monte-Carlo 法用于辐射传热计算有其特殊的优点,除可避免复杂的数学运算外,更重要的是它可以模拟非理想的、非均匀的复杂表面。

2.2 地球红外辐射等效面

从空间的角度,地面可以看作是一个 250K 的绝对黑体。由于“温室效应”的存在,地球昼夜温差不大,而且空间飞行器飞行速度很快(本文计算的轨道周期为 90 分钟),所以在进行热计算时,我们又可以把地球看成是恒温绝对黑体^{[4][5]},光学窗口接收的地球的红外辐射热流是一个常量。

由于空间飞行器的姿态控制,窗口始终面对地球表面。而遮光罩的遮挡,又使得窗口和遮光罩组成的辐射内腔只对着地面,而和宇宙空间的其它天体没有关系,因此,我们可以采用辐射换热计算的基本方法——空腔法^[6],设计一个假想的地球等效面,此等效面是黑体表面,完全吸收其它表面投来的辐射,同时,把地球的红外辐射热流经平方反比衰减后,以一种特定的规律向窗口和遮光罩内表面辐射,如图 2 所示,图中 P 为地球等效面上的任一点, θ_{max} 为 P 点对地球的最大半张角。

依据上述假定,地球为一均匀的热辐射平衡体,则地球吸收太阳给它的能量等于它向空间辐射的能量^[5]:

$$\pi R^2(1-\rho) = E \cdot 4\pi \cdot (R+H)^2$$

$$E = R^2(1-\rho)S / (4 \cdot (R+H)^2) \quad (1)$$

式中 E ——距地球表面为 H 处的红外辐射强度;

S ——太阳常数,取秋分点

时刻的数据, $S = 1345 \text{W}/\text{m}^2$;

ρ ——地球对阳光的平均反照率,取 0.35;

R ——地球半径,取 6371km;

H ——空间飞行器距地面的轨道高度;

这样,从地球等效面向光学窗口和外遮光罩内表面辐射的总能量 Q 为:

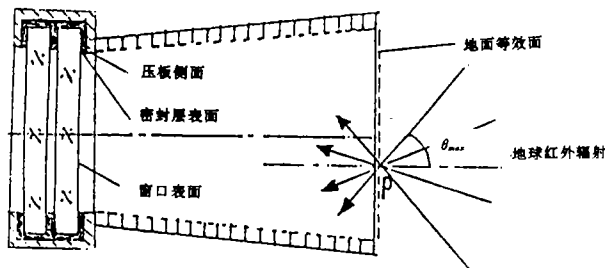


图 2 地球红外等效面与空腔法

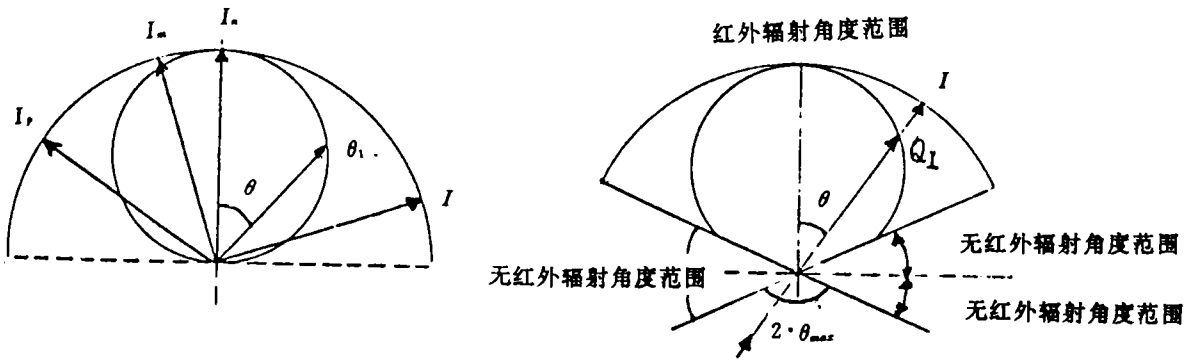
$$Q = E \cdot \pi r^2 \tag{2}$$

式中 r ——最外一级挡光环的内环半径;

根据黑体辐射的朗伯定律, 在半球空间的各个方向上的定向辐射强度相等, 即 $I_p = I_m = I_n = \dots = I$, 单位辐射面积发出的辐射能, 落到空间不同方向单位立体角内的能量 Q_l 的数值不等, 其值正比于该方向与法线方向夹角的余弦 $\cos\theta^{[6]}$, 如图 3a) 所示。

$$Q_l = I \cos\theta \tag{3}$$

地球等效面不是一个真实的黑体表面, 其辐射规律与一般的黑体表面有所不同, 空间飞行器轨道高度为 H , 所以地球等效面对地球有一个张角, 在此张角以外没有地球红外辐射, 相应地也不对窗口和外遮光罩辐射能量, 如图 3b) 所示。



(a)理想黑体的辐射(余弦定律) (b)地球等效面在 α_0 以下无辐射

图 3 地球等效面的辐射规律与理想黑体的比较

依据以上条件, 地球等效面的能束发射规律为:

$$(\sin\beta_1)^2 = 1 - (R/(R+H))^2 \cdot \eta_1 \tag{4}$$

$$\varphi_1 = 2\pi \cdot \eta_2 \tag{5}$$

其中, β_1 和 φ_1 分别为发射能束相对于地球等效面的俯仰角和方位角, η_1 和 η_2 分别为相应的伪随机数。

2.3 能束的人射、反射界面

2.3.1 表面反射规律

挡光环和外遮光罩的内表面为漫射灰体表面, 窗口组件的压板侧壁和密封胶壁也为漫射灰体表面, 光学窗口表面为镜反射表面; 漫射灰体表面的反射率为 ρ_1 , 光学窗口表面镀了一层透明导电膜, 红外反射率为 ρ_2 。

光线投射到漫射灰体表面, 取一伪随机数 η_3 , 若 $\eta_3 \geq \rho_1$, 为光线被表面吸收, 否则, 被壁面反射, 反射的方向由下式确定^[2]:

$$(\sin\beta_2)^2 = \eta_4 \tag{6}$$

$$\varphi_2 = 2\pi \cdot \eta_5 \tag{7}$$

其中, β_2 和 φ_2 分别为反射能束相对于反射面的俯仰角和方位角, η_4 和 η_5 分别为相应的伪随机数。

光线投射到光学窗口表面, 取一伪随机数 η_6 , 若 $\eta_6 \geq \rho_2$, 光线被窗口表面吸收, 否则, 被窗口表面镜反射, 反射的俯仰角和方位角按镜反射的几何关系直接求得。

2.3.2 外遮光罩的挡光环

在计算杂光时,通常的办法是沿挡光环的内环面设定一个等效面,文献^{[2][7][9]}给出了此等效面的双向反射分布函数 BRDF 的公式:

$$\text{BRDF} = \rho_2 \cdot F(\psi_1, \psi_2) / |\cot(\psi_2)| \quad (8)$$

$$F(\psi_1, \psi_2) = \frac{1/|\sin(\psi_2)| + 1/|\sin(\psi_1)| - 1 - \sqrt{1 + (|\cot(\psi_2)| - |\cot(\psi_1)|)^2}}{2|\cot(\psi_2)|} \quad (9)$$

式中 ρ ——挡光环的实际漫反射率;

ψ_1, ψ_2 ——光线的入射和反射俯仰角;

在热计算中,对挡光环尖端的反射和衍射予以忽略,不再考虑其 BRDF。

如果把杂光计算的方法套用于热计算中,则有如下问题:

a) 杂光计算中,只考虑了光线反射后向像面方向传播,而当光线向远离像面方向传播时,就结束了光线追迹,就是说,光线追迹是单向进行的^[9]。上述公式给出的仅仅是沿光轴方向的角度,而在垂直于光轴方向的平面内,是不进行杂光计算的。而热辐射计算要在 2π 立体角内进行,所以上述杂光计算的 BRDF 公式是不能用于热计算的。

b) 上述杂光计算的公式是基于如下假设的:遮光罩为圆柱形;挡光环的高大于挡光环的间距(挡光环根部的罩体的反射予以忽略);光线在挡光环之间进行两次反射后,离开等效面进入遮光罩的其它部分^{[1][7]}。实际上,上述假设是不符合我们研究的外遮光罩的实际情况的;光线有可能一次漫反射就离开等效面进入遮光罩,也可能在挡光环之间进行多次反射。

因此,我们不采用外遮光罩的挡光环等效面假设,而是直接按真实的挡光环和罩体结构进行计算,我们把两个挡光环和它们之间的一段罩体内壁看成是一个环节,整个外遮光罩看成是由许多环节组成的,各个环节之间仅仅是几何尺寸有所改变。在计算程序中,将遮光罩的各个环节串联起来,把光学窗口所在的环节单独处理,就可以在外遮光罩和光学窗口组成的系统内进行大量的光线追迹,从而得出具有实际意义的统计结果。

3 热计算的数学模型和几何关系

本节以带有挡光环的圆锥形外遮光罩为例,取其中一个环节,建立热计算的数学模型和几何关系。其它的几何关系和公式与其类似,本节就不一一列出了。

3.1 光线从圆面(包括挡光环的表面和环中央的内孔圆面)出射

光线从圆面(包括从挡光环的表面和环中央的内孔圆面)射出后,其交点有三种情况:a) 投射到相对的挡光环的中央圆孔面,进入另一个环节;b) 投射到相对的挡光环上,吸收或反射;c) 投射到遮光罩的侧壁上,吸收或反射;

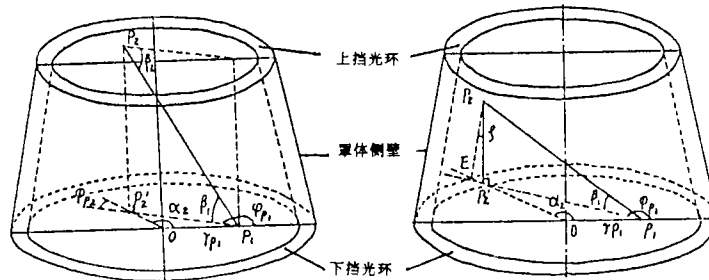


图4 光线从圆面辐射到另一圆面

图5 光线从圆面辐射到侧壁表面

对于 a), b) 这两种情况, 其几何关系如图 4 所示, P_1 为出射点, β_1 和 φ_{P_1} 为出射光线的俯仰角和方位角, P_2 点为光线与另一圆面的交点, P'_2 点为垂足点, 则

$$OP'_2 = \sqrt{(h/\tan(\beta_1))^2 + OP_1^2 + 2 \cdot h/\tan(\beta_1) \cdot OP_1 \cdot \cos(\varphi_{P_1})} \quad (10)$$

$$\alpha_2 = \arccos\left(\frac{OP'_2 + OP_1 - (h/\tan(\beta_1))^2}{2 \cdot OP'_2 \cdot OP_1}\right) \quad (11)$$

若 $\varphi_{P_1} \geq 180^\circ$, α_2 值取为 $360^\circ - \alpha_2$

式中, OP'_2 为 P_2 点的中心距; α_2 为 P_2 点的相对于 P_2 的方位角。

对于 a), 进入新的环节后的俯仰角不变, 方位角为:

$$\varphi_{P_2} = \arccos\left(\frac{OP'_2 + (h/\tan(\beta_1))^2 - OP_1^2}{2 \cdot OP'_2 \cdot h/\tan(\beta_1)}\right) \quad (12)$$

若 $\varphi_{P_1} \geq 180^\circ$, φ_{P_2} 值取为 $360^\circ - \varphi_{P_2}$

对于 b), 按 2.3.1 的方法处理吸收或反射, 其几何关系同 3.1 类似。

对于 c), 其几何关系如图 5 所示, P_2 为光线与遮光罩侧壁的交点, P_2E 为 P_2 点在外遮光侧壁上与挡光环外圆的距离, P'_2 为垂足点, 只要求出了 P_2E 和 α_2 , 就可以确定 P_2 点的位置。这是一个直线与圆锥面相交的问题, 需求解二次方程, 经推导, 公式如下:

$$aa = (\sin(\xi))^2 - ((\cos(\xi))^2 / (\tan(\beta_1))^2)$$

$$bb = -2 \cdot r_1 \cdot \sin(\xi) - 2 \cdot OP_1 \cdot \cos(\xi) \cdot \cos(\varphi_{P_1}) / \tan(\beta_1)$$

$$cc = r_1^2 - OP_1^2$$

$$P_2E = (-bb - \sqrt{bb^2 - 4 \cdot aa \cdot cc}) / (2 \cdot aa) \quad (13)$$

$$\alpha_1 = \arccos\left(\frac{(r_1 - P_2E \cdot \sin(\xi))^2 + OP_1^2 - (OP_1 \cdot \cos(\xi) / \tan(\beta_1))^2}{2 \cdot (r_1 - P_2E \cdot \sin(\xi)) \cdot OP_1}\right) \quad (14)$$

若 $\varphi_{P_1} \geq 180^\circ$, α_2 值取为 $360^\circ - \alpha_2$

式中, aa, bb, cc 二次方程的二次项, 一次项和常数项, ξ 为遮光罩的半圆锥角, r_1 为下圆面的半径, α_2 为 P_2 点的相对于 P_1 点的方位角。

确定 P_2 点的位置后, 再按 2.3.1 的方法处理吸收或反射, 其几何关系同 3.2。

3.2 光线从侧壁上出射

光线从侧壁上出射, 其交点有三种情况: a) 光线投射到上面的圆面上(包括挡光环的表面和环中央的内孔圆面); b) 光线投射到下面的圆面上; c) 光线投射到侧壁的其他部分;

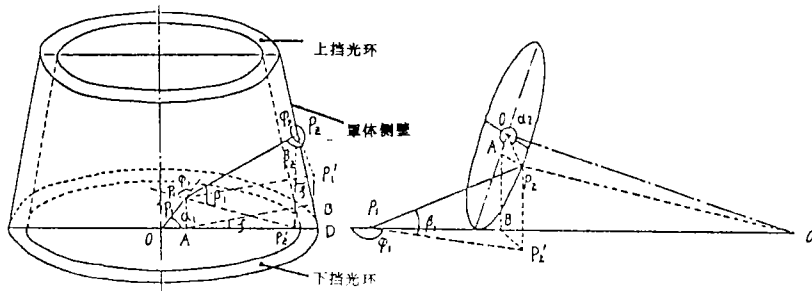


图 6 光线从侧壁面辐射到下圆面 图 7 光线从侧壁面辐射到侧壁表面

对于 a), b) 这两种情况, 在几何关系上是基本相同的, 本文只列出一种, 如图 6 所示, 光线从 P_2 点发出, P_1 点为光线与下圆面的交点, A, B, P'_1, P'_2 都是垂足点, 则

$$fm = \cos(\varphi_2) \cdot \cos(\xi) + \tan(\beta_2) \cdot \sin(\xi)$$

$$OA = r_1 - P_2D \cdot \tan(\beta_2) / fm$$

$$P_1A = -P_2D \cdot \sin(\varphi_2) \cdot \cos(\xi) / fm$$

$$OP = \sqrt{P_1A^2 + OA^2} \tag{15}$$

$$\alpha_1 = \arccos(OA / OP_1) \tag{16}$$

若 $\varphi_2 \leq 180^\circ$, α_1 值取为 $360^\circ - \alpha_1$

式中, β_2 和 φ_2 为 P_2 点相对于该处圆锥面切平面的俯仰角和方位角, ξ 为外遮光罩的半圆锥角, OP_1 为 P_1 点的中心距, α_1 为 P_1 点相对于 P_2 点的方位角, fm 为中间变量。

若 P_1 点在挡光环的中心圆孔面上, 则光线进入下一个环节, 在新的环节中, 光线的高度角和方位角用下式求出:

$$P_1P'_2 = \sqrt{OP_1^2 + (r_1 - P_2D \cdot \sin(\xi))^2 - 2 \cdot OP_1 \cdot (r_1 - P_2D \cdot \sin(\xi)) \cos(\alpha_1)} \tag{17}$$

$$\beta_1 = \arctan(P_2D \cdot \cos(\xi) / P_1P'_2) \tag{18}$$

$$\varphi_1 = \arccos\left(\frac{OP_1^2 + P_1P'_2^2 - (r_1 - P_2D \cdot \sin(\xi))^2}{2 \cdot OP_1 \cdot P_1P'_2}\right) \tag{19}$$

若 $\varphi_1 \leq 180^\circ$, φ_1 值取为 $360^\circ - \varphi_1$

若 P_1 点投射到挡光环上, 同 3.1 b) 的情况。

对于 c), 其几何关系如图 7 所示, 光线从 P_1 点发出, P_2 点为光线与侧壁面的交点, A, B, P'_2 都是垂足点, O_1 为外遮光罩圆锥面的锥顶, 只要求出了 O_1P_2 和 α_2 , 就可以确定 P_2 点的位置, 经推导, 公式如下:

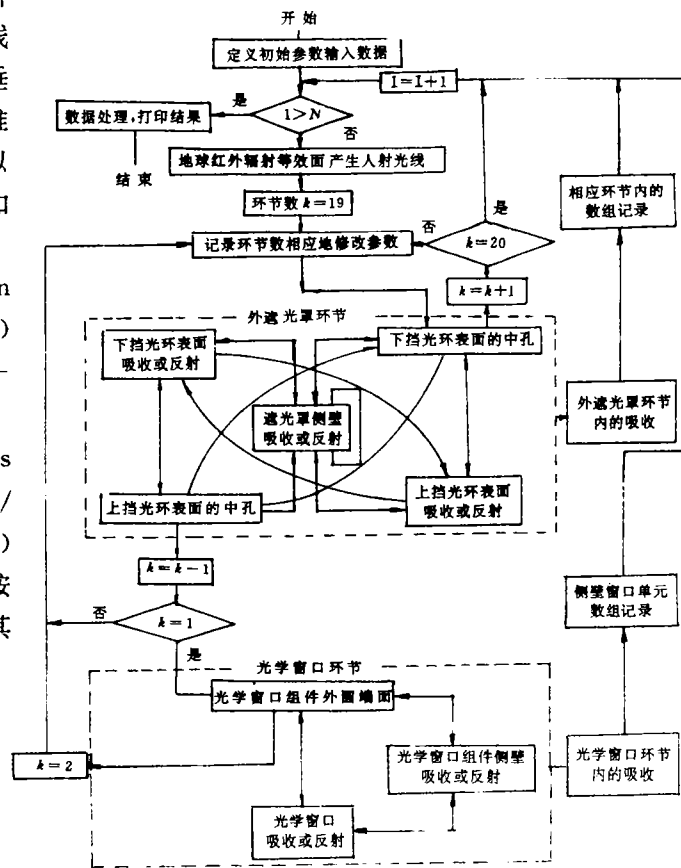
$$\alpha_2 = -2 \cdot \arctan(\tan(\beta_1) / (\sin(\varphi_1) \cdot \cos(\xi))) \tag{20}$$

若 $\varphi_1 \leq 180^\circ$, α_2 值取为 $360^\circ - \alpha_2$

$$O_1P_2^2 = O_1P_1^2 ((\cos(\xi))^2 + \cos(\alpha_2) \cdot (\sin(\xi))^2 + \sin(\alpha_2) \cdot \sin(\xi) / \tan(\varphi_1)) \tag{21}$$

确定了 P_2 点的位置后, 按 2.3.1 的方法处理吸收或反射, 其几何关系与 3.2 类似。

4 热计算流程图



5 计算结果与分析

5.1 计算结果

根据上述分析和公式,本文用 Monte-Carlo 法对光学窗口组件的各个细分单元吸收的地球红外辐射热流进行了计算,结果如下。

(1)外遮光罩入口处的地球红外辐射等效面的入射能量:

表 1 轨道高度 384km,地面平均阳光反照率为 0.35

红外辐射强度 (W/m ²)	等效面面积 (m ²)	红外辐射能量 (W)
194.42	0.2676	52.03

(2)光学窗口组件接收的地球红外辐射热流随外遮光罩结构形式变化:

表 2 能束总数取为 5 千万束,外遮光罩表面反射率取为 $\rho=0.02$

外遮光罩结构形式	窗口表面热流	密封层表面热流	压板侧面热流
圆锥型,无挡光环	0.422309	0.0879267	0.177125
圆锥型,有挡光环	0.422439	0.0867809	0.173789
圆柱型,有挡光环	0.422450	0.0867258	0.173574

(3)计算结果随能束数 N 的增加而逐渐稳定的规律:

表 3 以圆锥形,有挡光环的外遮光罩为例, $\rho=0.02$

能束总数 N	窗口表面热流	密封层表面热流	压板侧面热流
10 万束	0.418852	0.0796079	0.195117
100 万束	0.422598	0.0856435	0.179248
1000 万束	0.421329	0.0868246	0.179248
5000 万束	0.422439	0.0867809	0.173789
10000 万束	0.422103	0.0868788	0.173484
20000 万束	0.422587	0.0867809	0.173401

4)计算结果随外遮光罩和挡光环的反射的变化:

表 4 以圆锥形,有挡光环的外遮光罩为例, $N=5$ 千万

表面反射率 ρ	窗口表面热流	密封层表面热流	压板侧面热流
$\rho=0$ (黑体)	0.420976	0.0879152	0.176443
$\rho=0.01$	0.422321	0.0873897	0.175282
$\rho=0.02$	0.422439	0.0867809	0.172789
$\rho=0.04$	0.424593	0.0854687	0.171207

(5)计算结果随地面等效面的光线辐射规律的变化:

表 5 以圆锥形,有挡光环的外遮光罩为例, $\rho=0.02, N=5$ 千万

光线辐射规律	窗口表面热流	密封层表面热流	压板侧面热流
真实情况 (俯仰角 $\geq 19.4^\circ$)	0.422439	0.0867809	0.173789
按朗伯表面发射	0.362740	0.0769168	0.154565

(6) 光学窗口组件接收的地球红外辐射热流与伪随机数之间的关系:

表 6 以圆锥形,有挡光环的外遮光罩为例, $N=5$ 千万, $\rho=0.02$

伪随机数的程序	窗口表面热流	密封层表面热流	压板侧面热流
RAND 1	0.422833	0.0862200	0.173059
RAND 2	0.422272	0.0869245	0.173188
RAND 3	0.422439	0.0867809	0.173789

5.2 分析与结论

1) 由表 2 可以看出,对于外遮光罩的三种结构形式,窗口吸收的地球辐射能量基本上不变,而密封层和外压板侧面的热流在有挡光环时有所减小。经进一步计算,发现这是由于外遮光罩实体与镜象^[2]的一次漫反射的综合效果而引起的。光线经光学窗口镜面反射后,打到挡光环上再漫反射,由于窗口的红外反射率高达 90%,所以这样的光线散射实质上还是第一次漫反射。外遮光罩加上挡光环后,从实体漫反射到窗口表面、密封层和压板侧面的光线都大为减少(约小一个数量级),从镜像漫反射到窗口表面的光线大为增加,因为挡光环反射面正对着窗口表面,而从镜像反射到密封层和压板侧面的光线则减小,两者综合,形成了表 2 所列的能量分布规律,这和通常的可见光消杂光的概念有所不同。

2) 由表 3 可以看出,随着能束总数的增加,计算结果趋于稳定。据文献^[1]介绍,为了达到统计模拟的作用,要求单元面积上的能束在 1 万束以上。在本文计算中,当 $N=5$ 千万时,落在窗口表面的能束数可达 40 多万束,落在密封层上的能束数为 8 万多束,落在压板侧面的能束数为 16 万多束。在实际工程计算中, N 取值为 2 亿束,远远超过了统计模拟计算的要求。

3) 由表 4 可以看出,计算结果随着外遮光罩和挡光环(包括密封层表面和压板侧面)的表面反射率的变化而变化。随着表面反射率的增大,就有更多的光线从外遮光罩上反射到窗口表面上,使窗口表面接收的热流增多;同时,随着密封层表面和压板侧面的反射率增大,落在密封层表面和压板侧面的光线被反射的部分就增多,使得密封层表面和压板侧面吸收的热流减少。

4) 由表 5 可以看出,地球等效面处的红外辐射规律对计算结果有较大的影响,若把地球等效面按朗伯发射计算,结果误差高达 14%,这正是本文采用 Monte-Carlo 法进行模拟的优越性所在。

5) 由表 6 可以看出,采用不同的伪随机数,计算结果略有不同,如窗口表面热流,仅在自第 4 位有效数字上有所不同,这既体现了 Monte-Carlo 法的随机特性,又体现了其统计特性。可以推断,随着 N_{\max} 的增大,采用不同伪随机数而带来的差异会越来越小,但同时增加了计算机工作时。

综上所述,我们取 $N=20000$ 万,圆锥形带挡光环的外遮光罩,伪随机数按程序 rand3 计算,外遮光罩及挡光环的反射率为 0.02 的情况作为工程中的标准情况,这时,窗口表面热流为

0.4225W, 密封层表面热流为 0.0868W, 压板侧面热流为 0.1734W。

6 结 语

本文应用辐射传热学的基本理论, 结合高分辨率空间光学遥感器的光学窗口的各种工况, 分析了大口径光学窗口的地球红外辐射热环境, 并在不同的条件下, 计算了光学窗口的地球红外辐射热流, 为大口径光学窗口的热控设计提供了必要的依据。本文采用的方法, 对于空间地球红外辐射热计算, 具有一定的通用性。

参 考 文 献

- [1] James L. Gimlett and Donald H. Garbaccio, Multiple Docking Adapter Window for S-190 Experiment Applied Optics, 1974, 13(11): 2620~2637.
- [2] 卡伯绘, 辐射换热的分析计算. 清华大学出版社, 1988, (10): 79-89 和 217-241
- [3] 余其铮, 唐明, 谈和平, 姜民奇, 星载扫描仪遮光罩的杂光计算. 运载火箭与返回技术, 1991, (2): 56-62
- [4] 闵桂荣主编, 卫星热控制技术. 宇航出版社, 1991, (9): 61-62
- [5] 达道安主编, 空间低温技术. 宇航出版社, 1991, (8): 14-19
- [6] 杨世铭主编, 传热学(第二版). 高等教育出版社, 1978, (10): 292 和 272-282
- [7] A. W. Creynolds, Formulas for Estimating Stray-radiation Levels in Well Baffled Optical System. SPIE, 1980, 257: 39-49
- [8] 杨贤荣, 马庆芳, 原庚新, 方荣生, 杨耀华编, 辐射换热角系数手册. 国防工业出版社, 1982, 355-357
- [9] 吕咏, 航天光学系统的杂散计算. 哈工大学位论文, 航天工程与力学系, 1993, (3): 23-25, 35-41 和 58-61

Earth Infrared Radiation Analysis and Calculation for the Optical Window of High Resolution Space Optical Remote Senser

Zhao Lixin

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

The earth infrared radiation is analysed and calculated for the large aperture optical window of high resolution space optical remote senser by Monte-Carlo method. The multi-scatter in baffles and direct reflection in the surface of the optical window are considered, and the limitation of vane structural assumption is also discussed.

Key words: Optical window, Space optical remote senser, Heat flux calculation, Space environment