

空间光学遥感器外遮光罩的地球反照辐射的随机模拟计算*

赵立新

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 根据概率论的基本原理,用随机模拟法对空间光学遥感器外遮光罩的地球反照辐射进行了计算,有效地模拟了任意空间位置的阳光反照的定向辐射强度分布。此方法尤其适用于空间飞行器外露腔体的精确热计算。

关键词: 地球反照; 随机模拟; 热流计算; 外遮光罩; 腔体

1 引言

通常,对于轨道空间的物体表面的地球反照辐射的计算,都是通过复杂的多重积分来进行的,计算过程涉及到24个多重积分算式,并且积分域的确定也十分复杂^[1]。此方法在实际工程中难于应用,尤其不适用于有遮挡效应的复杂腔体的地球反照辐射计算。

近来,有些文献提出了一些数值方法,如有限元法、有限差分法,用来解决复杂腔体内的辐射换热问题^[2-4],但这些方法都是基于灰体辐射换热理论,不能反映出地球反照所具有的不同于灰体辐射的特殊规律,因此,这些方法也不适用于本文所讨论的问题。

本文以空间光学遥感器的外遮光罩为例,采用随机模拟法,有效地模拟了任意空间位置的地球反照的定向辐射强度分布,并对图1所示的腔体内外的地球反照辐射进行了计算。

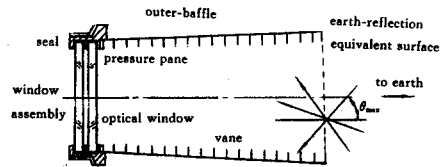


图1 空间光学遥感器的光学窗口和外遮光罩组成的腔体
Fig. 1 The cavity formed by optical window and outer baffle of the space optical remote sensor

* 国家自然科学基金项目

收稿日期:1995年12月8日

2 随机模拟法简介与应用

随机模拟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,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。

对于复杂腔体内的地球反照辐射的计算,随机模拟法的基本思路是:1)计算出任一轨道空间位置的地球反照等效面和外遮光罩外表面不同单元的地球反照外热流,具体计算方法已另文说明^[5],本文不再赘述;2)求出任一轨道空间位置的地球反照的定向辐射强度分布;3)假定地球反照等效面向腔体内发射的能量是由大量的能束组成的;每个能束出发的方位角和俯仰角,都符合一定的随机函数,其能量大小与求出的定向辐射分布函数有关;4)跟踪大量的能束,直到它们在腔体中被吸收或逸出腔体;采用最后的统计结果来表示能束的发射、反射和吸收,其计算精度随能束数的增加而提高。

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^[6]。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。将随机模拟法用于辐射传热计算有其特殊的优点,除可避免复杂的积分运算外,更重要的是它可以模拟非理想的、非均匀的复杂表面。

3 地球反照外热流的随机模拟

3.1 地球反照外热流

入射到地球的太阳光被云层、大气层和地球表面反射和散射的综合效应称为反照。反照流的强度一般随所选择的方向与太阳—地心连线之间的夹角的余弦而变化,也就是说太阳辐射的反射和散射遵循朗伯余弦定律。假定反照热流是发散的,则每一束太阳辐射全方位地被反射和散射。

地球反照的光谱分布非常类似于太阳光谱。晴天时大约有6%的入射光被反射回去,这时大气层引起的背景散射约为9%,两者共计15%左右。对完全由云层覆盖的阴天来说,反照约为55%,气象观测给出全世界全年中晴天平均占48%,阴天占52%,用反照的年平均值去代替一年中的任何时间的平均值引起的误差极小。因此,0.35可作为航天器整个轨道的平均值来用^[7]。

3.2 地球反照等效面的发射能束的随机函数

地球反照等效面不是一个真实的表面,其辐射规律也与一般的黑体或灰体表面有所不同。空间飞行器有一定的轨道高度,所以地球反照等效面对地面有一个张角 $2\theta_{\max}$,此张角以外则没有地球反照辐射,相应地也不对窗口和外遮光罩辐射能量。先假定地球上各处的反照能量相等,则地球反照等效面的辐射规律与理想黑体或灰体的比较如图2所示,图中 I 为定向辐射强度, Q 为定向辐射力。

依据上述条件,地球反照等效面的随机能束的发射规律为^[8]:

$$(\sin\beta_1)^2 = 1 - [R/(R+H)]^2 \cdot \eta_1 \quad (1)$$

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

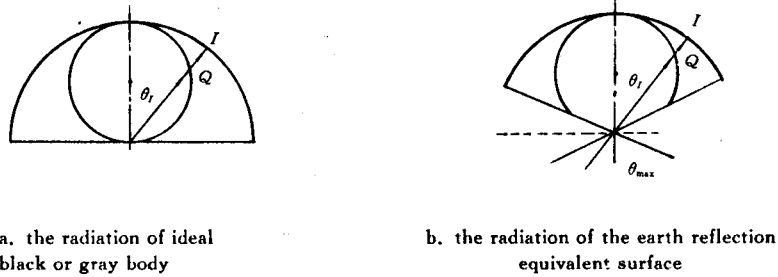


图 2 地球反照等效面的辐射规律与理想黑体或灰体的比较

Fig. 2 The comparison of the radiation rule between the earth reflection equivalent surface and ideal black or gray body

其中, β_1 和 φ_1 分别为反射能束相对于反射面的俯仰角和方位角, η_1 和 η_2 分别为相应的伪随机数, R 和 H 分别为地球的半径和飞行器的轨道高度。

3.3 地球反照的定向辐射强度分布

实际上,地球上各处的阳光反照能量是不等的,在按公式(1)、(2)确定随机能束的发射方向的同时,还要考虑不同方向的随机能束有不同的相对“权重”,这就是地球反照的定向辐射强度。由 3.1 节可知,地球上任一点处的太阳辐射,向空间的反射是全方位的,其定向辐射强度与所取方向无关,只与该点处的太阳高度角的余弦成正比。

如图 3 所示, O' 是地球反照等效面上任一点, S 为地球上的阳光直射点, B 为 O' 点可见的地球表面上的任意一点, I_s 和 I_b 分别为 S 点和 B 点在 SO' 和 BO' 方向上的定向辐射强度,在阳光反照率相同的情况下,太阳直射点 S 向空间反射的定向辐射强度最大,设其为 1,则 B 点向空间反射的定向辐射强度为 $\cos\eta$,依据朗伯定律,定向辐射强度与所取方向无关,则 $I_s = 1, I_b = \cos\eta$ 具有全方位性。

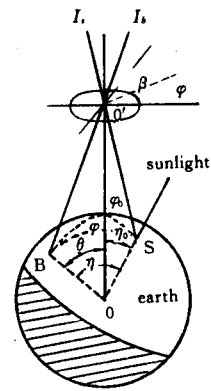


图 3 地球反照的定向辐射强度分布
Fig. 3 The directional emittance of the earth reflection

地球反照等效面是一个虚拟表面,地面对它的辐射就是它对腔体的辐射。假设地球反照等效面上 O' 点发出的一束能束的俯仰角和方位角分别为 β 和 φ ,则此能束的定向辐射强度为:

$$I(\beta, \varphi) = \cos\eta = \cos\eta_0 \cos\theta - \sin\eta_0 \sin\theta \cos(\varphi - \varphi_0) \tag{3}$$

式中: $\theta = \beta + \arcsin[(R + H)/R \times \cos\beta] - \pi/2$

φ_0, η_0 分别为阳光直射点的方位角和地心角, η 等于星下点的太阳高度角(简称太阳高角)。

3.4 典型空间位置的地球反照定向辐射强度分布

为了说明地球反照等效面处的定向辐射强度分布规律,本文选取阳光与轨道面夹角为 0 的典型情况,将其定向辐射强度分布图示如下:

3.5 地球反照能束的追迹

首先,随机确定地球反照等效面上能束的发射点,该发射点在地球反照等效面上按几何概型分布,其随机分布规律为^[9]:

$$R_a^2 = \eta_3 \quad (4)$$

$$\varphi_a = 2\pi \cdot \eta_4 \quad (5)$$

其中, R_a 和 φ_a 分别为反射点的中心距和方位角, η_3 和 η_4 分别为相应的伪随机数。

然后,按公式(1)、(2)确定能束发射的俯仰角、方位角并按公式(3)确定此能束的“权重”。开始按外遮光罩和光学窗口的真实的结构进行追迹计算。外遮光罩的内表面、挡光环表面、窗口组件的外压板表面、密封层外露表面都按漫反射灰表面计算,反射率为 ρ_1 ; 光学窗口表面镀了一层透明导电膜,按镜面反射计算,可见光反射率为 ρ_2 。

能束投射到漫射灰体表面,取一伪随机数 η_5 ,若 $\eta_5 \geq \rho_1$,能束被表面吸收,否则,被表面反射,反射的方向由下式确定^{[6][8]}:

$$(\sin\beta_a)^2 = \eta_5 \quad (6)$$

$$\varphi_a = 2\pi \cdot \eta_6 \quad (7)$$

其中, β_a 和 φ_a 分别为反射能束相对于反射面的俯仰角和方位角, η_5 和 η_6 分别为相应的伪随机数。

能束投射到光学窗口表面,取一伪随机数 η_7 ,若 $\eta_7 \geq \rho_2$,能束被窗口表面吸收或透过,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。

能束在腔体内的追迹的方法和程序,本文作者已另文说明^[9],不再赘述。

最后,对大量的地球反照能束进行追迹,累计所研究表面吸收的能束的“权重”,除以全都反照能束的“权重”之和,就可得出地球反照等效面对该表面的辐射换热系数 F ,则该表面吸收的地球反照辐射 E 为:

$$E = E_0 \cdot F \quad (8)$$

式中, E_0 为地球反照等效面处的地球反照能量。

4 计算结果与分析

4.1 计算结果

根据上述公式,本文自编了程序对光学窗口和外遮光罩组成的腔体进行了计算,下表列出了若干典型位置的外遮光罩内外表面吸收的地球反照热流,其它位置的数据,只要把初始参数输入程序,就可以求出结果,本文不再罗列。

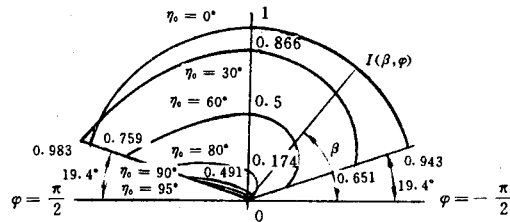


图4 典型空间位置的地球反照定向辐射强度分布
(阳光与轨道面夹角为0,即 $\varphi = \pm \pi/2.0$ 的截面图)

Fig. 4 The directional emittance distribution of the earth reflection in a typical orbit position

Table 1 The heat flux in the earth-reflection equivalent surface
at the typical orbit position ($H=384\text{ km}, \varphi_0=\pi/2, S=0.2667\text{ m}^2$)

solar elevation	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
heat flux (w)	111.88	110.18	105.13	96.88	85.70	71.90	55.93
solar elevation	70°	80°	85°	90°	95°	100°	105°
heat flux (w)	38.25	19.46	10.07	2.477	0.3323	0.0431	0.00216

Table 2 The earth-reflection heat flux of the elements of the outer baffle
(circular element, $\eta=60^\circ, H=384\text{ km}, \varphi_0=\pi/2, S=0.2667\text{ m}^2$)

calculation method	considering the directional emittance distribution			not considering the directional emittance distribution		
	inner surface	vane	outer surface	inner surface	vane	outer surface
1	0.0791	0.4385	0.7637	0.0788	0.4369	0.7637
2	0.1049	0.5253	0.7677	0.1046	0.5235	0.7677
3	0.1388	0.5835	0.7717	0.1384	0.5815	0.7717
4	0.1837	0.6512	0.7757	0.1831	0.6491	0.7757
5	0.2432	0.7290	0.7797	0.2425	0.7266	0.7797
6	0.3202	0.8167	0.7837	0.3194	0.8141	0.7837
7	0.4219	0.9205	0.7877	0.4208	0.9176	0.7877
8	0.5524	1.0386	0.7917	0.5511	1.0353	0.7917
9	0.7251	1.1758	0.7957	0.7235	1.1722	0.7957
10	0.9478	1.3289	0.7997	0.9460	1.3250	0.7997
11	1.2356	1.5032	0.8037	1.2336	1.4992	0.8037
12	1.6063	1.7020	0.8077	1.6049	1.6979	0.8077
13	2.0187	1.9190	0.8117	2.0817	1.9149	0.8117
14	2.6792	2.1596	0.8157	2.6843	2.1559	0.8157
15	3.2144	2.4147	0.8197	3.2279	2.4126	0.8197
16	3.4782	2.6145	0.8237	3.4953	2.6137	0.8237
17	3.6047	2.7691	0.8277	3.6236	2.7691	0.8277
18	3.6256	2.8735	0.8317	3.6437	2.8741	0.8317
19		7.3989			7.3989	

4.2 分析与结论

1)由表1可以看出,随着太阳高角的增加,地球反照等效面处的反照热流逐渐减少。由于空间飞行器对地球有一定的张角(本文中半张角为 70.6° ,即地心角为 19.4°),所以当太阳高角略大于 90° 时,仍有少量地球反照能量到达地球反照等效面。

2)表2列出了外遮光罩的各部分(圆周单元)吸收的地球反照热流的数据,其规律为:a)靠近窗口的内壁和挡光环吸收的热流比较少,而靠近地球反照等效面的内壁和挡光环吸收的热流则比较多,这是由于靠近窗口的内壁和挡光环受外遮光罩遮挡的影响更大的缘故。b)靠近窗口的内壁和挡光环,内壁吸收的热流要比挡光环少得多,而靠近地球反照等效面的内壁和挡光环,内壁吸收的热流要比挡光环多,这正反映了外遮光罩和光学窗口组成的空腔的遮挡效应

的实际情况。c)外遮光罩外表面的圆周单元,各单元受遮挡的情况相同,其吸收的地球反照热流只与其面积大小成正比,因外遮光罩的圆锥角很小,只有 1.71° ,近似于圆柱体,所以各单元的面积相差很小,吸收的热量也相近。

3)图 5 显示了外遮光罩吸收的地球反照热流沿圆周方向按正弦或余弦规律变化。

综上所述,采用随机模拟法计算外遮光罩吸收的地球反照辐射,关键是能对地球反照的定向辐射强度分布进行客观的模拟,从而把计算过程分成了有机连续的两个部分。本文的方法尤其适用于空间飞行器外露腔体的精确热计算,并且可以根据需要自行调整计算精度。

5 结 语

本文根据概率论的基本原理,用随机模拟法对空间光学传感器外遮光罩地球反照辐射进行了计算,有效地模拟了任意空间位置的地球反照的定向辐射强度分布,并编制了通用程序,得到了足够精确的计算结果。

参 考 文 献

- [1] 杨贤荣,马庆芳,原庚新,方荣生,杨耀华,辐射换热角系数手册. 北京:国防工业出版社,1982:355~378, 430
- [2] 李万林,付振宣,角系数计算机程序方法. 航天部航天科技报告,HT-880503
- [3] 闵桂荣,卫星热控制技术. 宇航出版社,1991,78-82
- [4] 赵立新,轨道空间外热流计算的一种新方法. 光学精密工程,1995.3(6):80-85
- [5] 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
- [6] 达道安,空间低温技术. 北京:宇航出版社,1991:18-19
- [7] 卞伯绘,辐射换热的分析与计算. 北京:清华大学出版社,1988:79-89
- [8] 曹 彬,概率论. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1986:74-89
- [9] 赵立新,空间光学传感器光学窗口的地球红外辐射分析计算. 光学精密工程,1995.3(6):71-79

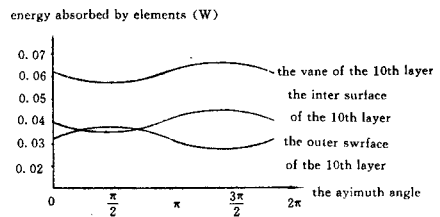


图 5 外遮光罩吸收的地球反照热流沿圆周方向变化(以第 10 环节为例)

Fig. 5 The earth-reflection heat flux absorbed by the outer baffle changing by circular direction (take the 10th layer as an example)

Random Simulant Calculation of the Earth-reflection for Outer Baffle of Space Optical Remote Sensor

Zhao Lixin

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

Abstract

According to the probability theory, the radiation of the earth-reflection in complex cavity has been calculated by random simulant method in this paper. The distribution of the directional radiant intensity of the earth-reflection in orbits has been effectively simulated. This method especially applies to the accurate thermal calculation for the outer cavities of spacecraft.

Key words: Earth-reflection, Random simulation, Heat flux calculation, Outer baffle, Cavity

赵立新 中国科学院长春光学精密机械研究所博士研究生。1984年考入清华大学精密仪器系,1989年在长春光机所攻读硕士学位,1992年从师于著名光学专家王大珩院士攻读博士学位。主要研究方向:空间热学环境对空间光学系统成像质量的影响,空间光学系统的热控制。现已发表学术论文十余篇。