

文章编号: 1672-8785(2011)01-0040-05

目标表面地球辐射和地球反照的均匀模拟法

王雨飞^{1,2} 李 强¹ 廖 胜¹

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 对地球面元的方位角和天顶角进行了均匀采样, 并将面元位置矢量由球坐标系转化到了地心赤道坐标系中。通过数值积分, 计算出了地球反照和地球红外辐射对目标的辐射角系数。计算结果表明, 该方法不仅在计算效率和计算精度方面都明显优于随机模拟方法, 而且与辐射换热角系数手册数据十分吻合, 非常适用于目标热流的计算。

关键词: 均匀采样; 地球反照; 地球红外辐射; 辐射角系数

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2011.01.008

Uniform Simulation of Earth Radiation and Reflective Earth Radiation on Target Surface

WANG Yu-fei^{1,2}, LI Qiang¹, LIAO Sheng¹

(1. The Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The zenith and azimuth angles of the surface cells of the earth are sampled uniformly. The position of a surface cell is transformed from the sphere reference frame into the earth equatorial reference frame. The geometric factors of earth radiation and earth's reflective radiation are calculated through numerical integration. The calculation result shows that this method is better than the random simulation method in calculation precision and efficiency and its data is in most agreement with that in the radiant exchange heat manual. It is very suitable for the calculation of the heat flux of a target.

Key words: uniform sampling; earth's reflective radiation; earth thermal radiation; geometric factor

1 引言

在目标热流计算中, 地球反照太阳辐射和地球红外辐射对目标的角系数的求解历来都是比较麻烦的。为了简化计算, 人们采用了不同的计算方法, 如矢量法、图解法和蒙特卡罗法等^[1-4]。这些方法在一定程度上简化了计算, 不过相对于赵立新提出的随机模拟法^[5]仍较为复杂。随机模拟法中面元天顶角分布函数的均匀分布近似和面元等大小都给计算结果带来了

误差, 且其模拟结果依赖于伪随机数产生的均匀性和模拟面元数目 N 的大小。

本文对面元的天顶角和方位角进行均匀采样。由于面元大小和天顶角的正弦值成正比关系, 利用位置矢量夹角求解公式再辅以程序就可以计算出任意位置关系的目标表面地球反照和红外辐射角系数。

2 面元的选取

如果用天顶角 θ 和方位角 ϕ 来描述面元 ds

收稿日期: 2010-06-08

作者简介: 王雨飞(1984-), 男, 河北永年人, 硕士研究生, 主要从事目标红外特性研究。E-mail: wyf_027@163.com

的位置, 首先需要建立以目标位置矢量为轴线的球坐标系, 目标位置矢量可通过目标轨道计算获得。面元的方位角 ϕ 在 $0 \sim 2\pi$ 内均匀分布, 天顶角的范围由目标可观测到的球冠面积决定。其中, 最大天顶角为

$$\theta_{max} = \cos^{-1}[R/(R+H)] \quad (1)$$

式中, H 为目标的高度。方位角和天顶角为独立均匀分布。我们将 θ 和 ϕ 的取值范围 N 等分, 如果每个 θ 和 ϕ 分别取每一小份的中值进行均匀采样, 则每个 θ 分别对应于 N 个 ϕ , 反之亦然。面元的位置如图 1 所示。从图中可以看出, 面元大小并不是恒定值, 而是与天顶角的正弦值成正比的, 即

$$dS = R^2 \sin \theta d\theta d\phi = R^2 \sin \theta \cdot 2\pi \cdot \theta_{max}/N^2 \quad (2)$$

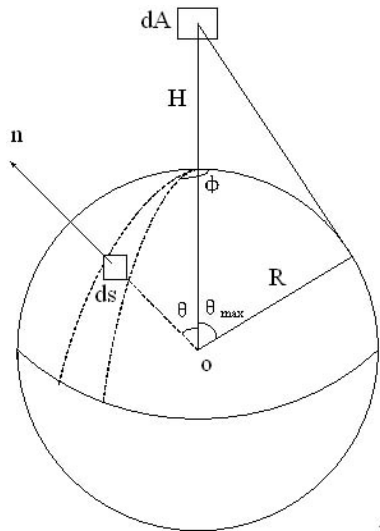


图 1 均匀选取的地球面元

由于目标的轨道位置矢量和太阳方向矢量均需要放在地心赤道坐标系中才能衡量, 所以计算地球红外辐射和地球反照角系数时应首先将面元位置矢量转换到地心赤道坐标系中来。以上分析给出了以目标位置矢量为轴向的球坐标系中面元的位置矢量。如果用直角坐标系表示的话, z 轴为目标位置 Y 轴在轨道平面内, x 轴和 y 轴、 z 轴满足右手正交关系。计算时, 须将其转换到地心赤道坐标系中, 即依次使其绕 x 轴旋转 $-(f+\omega)$, 绕 Z 轴旋转 $-i$, 绕 x 轴旋转

$-\Omega$, 绕 y 轴旋转 $-\pi/2$, 绕 x 轴旋转 $-\pi$, 此时面元位置在地心赤道坐标系中的位置矢量便为

$$\mathbf{r} = r \cos \theta \cos \phi \mathbf{X} + r \cos \theta \sin \phi \mathbf{Y} + r \sin \theta \mathbf{Z} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{Y}$ 、 $\mathbf{Z}$ 分别为坐标轴 x 、 y 、 z 在地心赤道坐标系中的单位向量。

$$\mathbf{X} = \mathbf{R} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos i \\ -\cos \Omega \sin i \\ -\sin \Omega \sin i \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{R} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \sin i \cos(f+\omega) \\ -\cos \Omega \cos i \cos(f+\omega) + \sin \Omega \sin(f+\omega) \\ -\sin \Omega \cos i \cos(f+\omega) - \cos \Omega \sin(f+\omega) \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{Z} = \mathbf{R} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$= \mathbf{R} \begin{pmatrix} -\sin i \sin(f+\omega) \\ \cos \Omega \cos i \sin(f+\Omega) + \sin \Omega \cos(f+\Omega) \\ \sin \Omega \cos i \sin(f+\Omega) - \cos \Omega \cos(f+\Omega) \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中, $\mathbf{R} = \mathbf{R}_1(-\pi)\mathbf{R}_2(-\pi/2)\mathbf{R}_1(-\Omega)\mathbf{R}_3(-i)\mathbf{R}_1(-f-\omega)$ 为转换矩阵, f 、 ω 、 Ω 和 i 分别为目标轨道真近点角、近地点角距、升交点赤经和轨道倾角。

3 地球红外辐射和地球反照

在计算地球辐射时, 地球辐射为地球及其大气的整体辐射。通过分析气象卫星所获得的数据可以得出, 地球的辐射出射度 M_e 约为 237W/m^2 , 平均反射率为 $0.30^{[6-8]}$ 。

地球面元反照太阳辐射辐出度可由下式给出:

$$M_{er} = \rho \cdot S_0 \cdot \cos \eta \quad (7)$$

式中, S_0 为太阳常数, ρ 为地球平均反射率, η 为太阳方向与面元法线的夹角。

假如目标、地球、太阳辐照关系如图 2 所示, 则面元 dA 可感受到的来自地球的红外辐射热流 dQ_3 和地球反照热流 dQ_2 分别为

$$dQ_3 = M_e dA \iint_{A_E} \frac{\cos \alpha_1 \cos \alpha_2}{\pi L^2} ds \quad (8)$$

$$dQ_2 = \rho S_0 dA \iint_{A_E} \frac{\cos \eta \cos \alpha_1 \cos \alpha_2}{\pi L^2} ds \quad (9)$$

若 $\cos \alpha_2 < 0$, $\cos \eta < 0$, 则 $\cos \alpha_2 = 0$, $\cos \eta = 0$ 。

令 $\varphi_3 = \frac{dQ_3}{M_e dA}$, $\varphi_2 = \frac{dQ_2}{\rho S_0 dA}$, 则

$$\varphi_3 = \iint_{A_E} \frac{\cos \alpha_1 \cos \alpha_2}{\pi L^2} ds \quad (10)$$

$$\varphi_2 = \iint_{A_E} \frac{\cos \eta \cos \alpha_1 \cos \alpha_2}{\pi L^2} ds \quad (11)$$

式中, ds 为面元面积, A_E 为目标可观测到的球冠面积, φ_3 和 φ_2 分别为地球红外辐射和地球反照角系数^[5], α_1 和 α_2 分别为面元目标连线与面元法线的夹角和面元目标连线与目标法线的夹角, L 为面元到目标的距离。设在地心赤道坐标系 (IJK) 中, 目标的位置矢量为 $\mathbf{P}_{tar}$, 目标的法线矢量为 $\mathbf{P}_{ntar}$, 太阳的位置矢量为 $\mathbf{P}_{sun}$, 地球面元位置及其法线矢量分别为 $\mathbf{P}_{ds}$ 和 $\mathbf{P}_{nds}$, 地球面元-目标连线位置矢量为 $\mathbf{P}_{ds-tar}$, 其方向指向目标, 则

$$\cos \alpha_1 = \frac{\mathbf{P}_{nds} \cdot \mathbf{P}_{ds-tar}}{|\mathbf{P}_{nds}| |\mathbf{P}_{ds-tar}|} \quad (12)$$

$$\cos \alpha_2 = -\frac{\mathbf{P}_{ntar} \cdot \mathbf{P}_{ds-tar}}{|\mathbf{P}_{ntar}| |\mathbf{P}_{ds-tar}|} \quad (13)$$

$$\cos \eta = \frac{\mathbf{P}_{sun} \cdot \mathbf{P}_{nds}}{|\mathbf{P}_{sun}| |\mathbf{P}_{nds}|} \quad (14)$$

$$L = \text{mag}(\mathbf{P}_{ds-tar}) \quad (15)$$

面元是在球冠表面均匀采样的, 每一面元对应于不同的 α_1 、 α_2 、 η 、 L 。只要面元数 N 达到一定数目, 人们就可通过面元辐射的累积和模拟出整个球冠的辐射。因此

$$\varphi_3 = \iint_{A_E} \frac{\cos \alpha_1 \cos \alpha_2}{\pi L^2} ds$$

$$= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{2\pi R^2 \theta_{max}}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\sin \theta_i \cos \alpha_{1i} \cos \alpha_{2i}}{\pi L_i^2} \quad (16)$$

$$\varphi_2 = \iint_{A_E} \frac{\cos \eta \cos \alpha_1 \cos \alpha_2}{\pi L^2} ds$$

$$= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{2\pi R^2 \theta_{max}}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\sin \theta_i \cos \eta \cos \alpha_{1i} \cos \alpha_{2i}}{\pi L_i^2} \quad (17)$$

模拟结果表明, N 只需取 10000 就可以达到很高的精度。

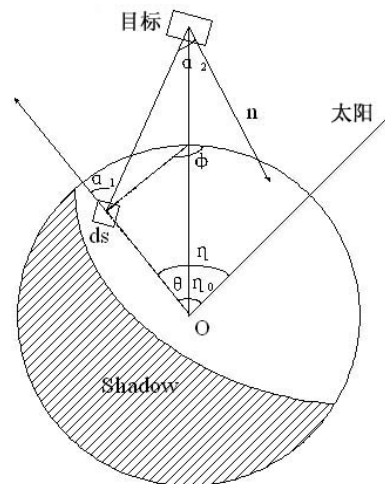


图 2 地球辐射和反照的位置关系

4 模拟结果

本文是对随机模拟方法作出改进的。为对比计算精度, 取文献 [5] 和 [9] 中的同姿态目标进行了辐射角系数的计算。计算结果如表 1 和表 2 所示。

其中, 模拟时的采样值为 100,000 (θ 和 φ 分别取样为 200 和 500)。两种模拟方法的结果与辐射换热手册数据的差值随角度的变化曲线如图 3 和图 4 所示。从图中可以看出, 均匀模拟法的计算结果与辐射换热角系数数据非常接近, 其误差基本在万分之一左右。与随机模拟法相比, 在面元数 (随机模拟法取 1,000,000 个面元) 大大缩小的情况下, 其精度误差由原来的千分之一提高到了万分之一。本文在地球反照角系数小于地球红外辐射角系数方面与随机模拟方法相吻合, 这也符合理论分析结果。

表 1 典型位置的地球红外角系数和地球反照角系数随平板俯仰角的变化

(H=300km, $\eta_0 = 0^\circ$)。均匀模拟法的计算数据与随机模拟法、

《辐射换热角系数手册》中数据的比较

β	地球红外辐射角系数			地球反照角系数		
单位 ($^\circ$)	均匀模拟法	随机模拟法	辐射换热角系数手册	均匀模拟法	随机模拟法	辐射换热角系数手册
0	0.9123	0.9118	0.9121	0.9099	0.9094	0.9169
10	0.8984	0.8975	0.8982	0.8961	0.8952	0.9030
20	0.8574	0.8561	0.8572	0.8552	0.8539	0.8550
30	0.7978	0.7961	0.7976	0.7957	0.7939	0.7955
40	0.7274	0.7253	0.7272	0.7252	0.7232	0.7251
50	0.6493	0.6471	0.6491	0.6472	0.6450	0.6470
60	0.5663	0.5639	0.5661	0.5643	0.5619	0.5641
70	0.4810	0.4786	0.4808	0.4791	0.4769	0.4789
80	0.3961	0.3937	0.3960	0.3943	0.3919	0.3942
90	0.3141	0.3125	0.3140	0.3126	0.3109	0.3124
100	0.2377	0.2373	0.2376	0.2363	0.2359	0.2362
110	0.1690	0.1686	0.1689	0.1679	0.1675	0.1678
120	0.1102	0.1100	0.1101	0.1093	0.1092	0.1093
130	0.0629	0.0628	0.0629	0.0623	0.0623	0.0623
140	0.0285	0.0285	0.0285	0.0282	0.0282	0.0282
150	0.0078	0.0077	0.0077	0.0076	0.0076	0.0076
160	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
170	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
180	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

表 2 典型位置的地球反照角系数随平板水平角的变化 (H=300km, $\beta=90^\circ$, $\eta_0=20$ 和 $\eta_0=50$ 两种情况)。均匀模拟法的计算数据与

随机模拟法、《辐射换热角系数手册》中数据的比较

α	$\eta_0 = 20$			$\eta_0 = 50$		
单位 ($^\circ$)	均匀模拟法	随机模拟法	辐射换热角系数手册	均匀模拟法	随机模拟法	辐射换热角系数手册
0	0.3008	0.2997	0.3007	0.2169	0.2158	0.2168
30	0.2999	0.2993	0.2998	0.2147	0.2144	0.2147
60	0.2973	0.2978	0.2972	0.2089	0.2093	0.2088
90	0.2937	0.2950	0.2936	0.2009	0.2018	0.2008
120	0.2901	0.2915	0.2900	0.1929	0.1939	0.1929
150	0.2875	0.2887	0.2874	0.1871	0.1879	0.1870
180	0.2866	0.2874	0.2865	0.1850	0.1855	0.1849

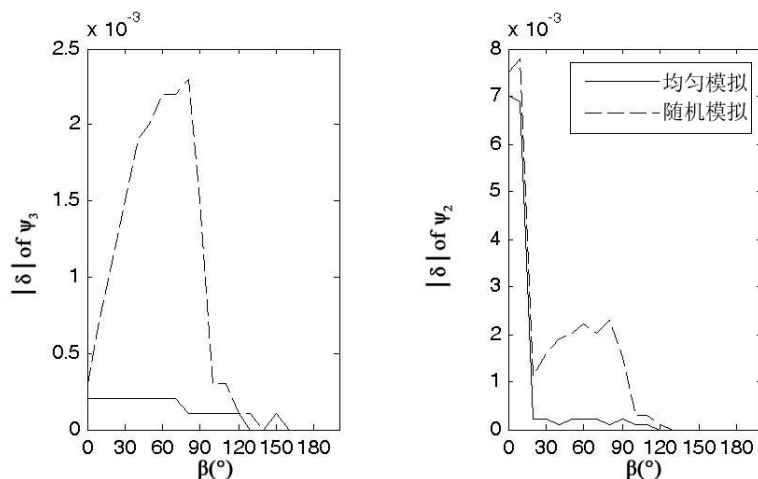


图 3 表 1 中两种方法的结果与手册数据的差值随角度的变化曲线

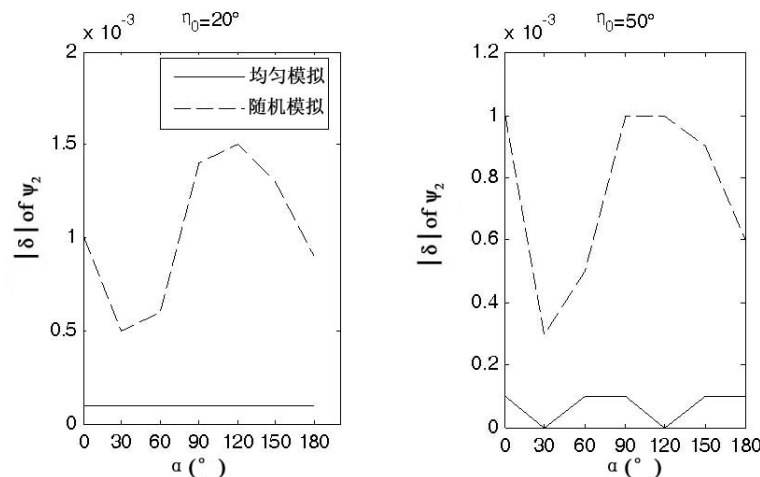


图 4 表 2 中两种方法的结果与手册数据的差值随角度的变化曲线

5 结论

通过对典型位置目标辐射角系数的模拟计算及其与随机模拟法、辐射换热手册数据的对比可以发现,均匀模拟方法不仅可以简化计算量,而且还具有非常高的计算精度。本文同时给出了将其用于计算任意轨道位置辐射角系数的方法,该方法特别适合目标随轨道位置变化时的热流计算。

参考文献

- [1] 闵桂荣. 卫星热控制技术 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 1991.
- [2] 闵桂荣, 郭舜. 航天器热控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [3] 翁建华, 潘增富, 闵桂荣. 空间任意凸面的轨道空间外热流计算方法 [J]. 中国空间科学技术, 1994 14(2): 11-18.
- [4] 张涛, 张冰. 计算近地轨道航天器空间外热流的 RUD 方法 [J]. 宇航学报, 2009, 30(1): 338-343.
- [5] 赵立新. 轨道空间外热流计算的一种新方法 [J]. 光学精密工程, 1995, 3(6): 80-85.
- [6] Robert Lyle. Earth albedo and emitted radiation [R]. NASA SP-8067. 1971.
- [7] Wark D Q, Yamamoto G, Lienesch J H. Methods of estimating infrared flux and surface temperature from meteorological satellites [J]. Atmospheric Sci., 1962, 19: 369-384.
- [8] 杨华, 凌永顺, 马东辉, 等. 空间飞行器对背景辐射的反向特性 [J]. 红外与激光工程, 2002, 31(4): 326-328.
- [9] 杨贤荣, 马庆芳, 原庚新, 等. 辐射换热角系数手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.