

# 阳光直射对外遮光罩辐射加热的分析与计算\*

赵立新

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

**摘要** 以概率论的基本原理为依据, 分析和计算了阳光直射对空间光学遥感器的外遮光罩的辐射加热, 其中包括不同轨道位置处飞船船体对阳光的遮挡和阳光从外遮光罩开口处斜入射到其内腔的情况, 避免了二次曲面投影的复杂运算。

**关键词:** 随机模拟; 外遮光罩; 宇宙飞船; 辐射换热

## 1 引言

外遮光罩的温度状态直接影响着空间光学遥感器的第一光学表面——光学窗口, 使之产生温度梯度, 进而影响成像质量和分辨率, 因此, 有必要对外遮光罩进行详细的热计算, 其中包括阳光直射对外遮光罩的辐射加热。

宇宙飞船外表面主要是由一系列的二次曲面组成的, 其中一些曲面相交的轮廓线十分复杂。这些二次曲面对阳光的遮挡随轨道位置的不同而改变。如果用通常的几何投影法来计算阳光直射对外遮光罩的辐射加热, 则各曲面和相交轮廓线的投影相互重叠, 边缘切线的确定和数学表达式极为繁琐<sup>[1]</sup>, 在实际工程计算中难于应用。本文采用了一种新的计算方法——随机模拟

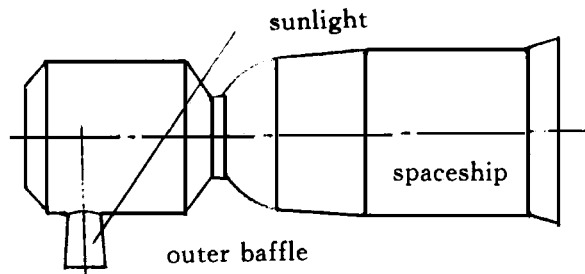


Fig. 1 The radiative calculation model of the sunlight to the outer baffle

\* 国家自然科学基金资助项目

收稿日期: 1995年12月8日

法,使计算过程大为简化,热计算模型如图1所示:

## 2 阳光直射对外遮光罩的辐射加热的分析

### 2.1 太阳辐射

太阳发出的辐射在整个光谱范围内,其强度是不均匀的。当与太阳的距离一定时,可以把照在行星或航天器上的太阳能量流视为一个常数。太阳黑子、耀斑的活动会引起谱线的较大的变化,例如宇宙射线、 $\gamma$ 射线、X射线及无线电波的变化,但对总能量影响很小<sup>[2]</sup>。

通常用太阳常数来描述地球大气层上界的太阳辐射强度。太阳常数的数值是指在日地平均距离处,地球大气层上界垂直于太阳光线的单位面积上、单位时间内接收到的太阳辐射能量。本文计算取太阳常数为 $1352 \text{ W/m}^2$ <sup>[3]</sup>。

### 2.2 外遮光罩受晒情况分析

外遮光罩位于飞船的第一象限,接受阳光直接照射的能量与下列因素有关:飞船船体的遮挡、进入地球阴影区、轨道位置、阳光与飞船轨道面的夹角、外遮光罩的结构和涂层等。

为了减少外遮光罩的向阳面和背阳面的温度差,进而减小光学窗口的非轴对称温度梯度,外遮光罩的外表面涂了对阳光吸收能力较低白色涂料,其吸收发射比为0.13/0.93。外遮光罩的内表面涂黑漆,并有多级挡光环。

飞船在轨7天,太阳光线与飞船轨道面的夹角为 $\pm 20^\circ$ ;其中相机照像区间的轨道夹角为 $-15.89^\circ \sim 11.21^\circ$ ;飞船每转一周,由于轨道摄动,太阳光与轨道面夹角增加约 $0.3^\circ$ 。阳光与轨道面的夹角对外遮光罩和窗口的热状态有直接关系,这就需要确定一个典型的太阳光与轨道面的夹角,进而计算出一个轨道周期内若干位置的空间外热流,然后可用插值法确定任意位置的外热流。

考虑到冗余设计和光学窗口的热惯性,在计算时一律取 $-15^\circ$ 作为典型的太阳光与轨道面的夹角。此角度比照像期间的平均阳光轨道面夹角要小(绝对值大),这就在计算中加大了外遮光罩的温度差,进而增加了设计的保险系数。

由于太阳能电池板向外伸展,离飞船的中轴线较远,即使在极限的情况下,太阳能电池板里端与外遮光罩上任一点的连线与轨道面的夹角都大于 $15^\circ$ ;所以,在太阳光线与飞船轨道面的夹角为 $-15^\circ$ 的情况下,在任何轨道位置处,太阳能电池板都不会遮挡射向外遮光罩的太阳光线(忽略太阳能电池板的伸展连杆的遮挡效应)。

外遮光罩受阳直接照射与轨道位置的关系如下:1)在地球阴影区,外遮光罩不受阳光照射,这段时间约为整个轨道周期的61.2%;2)当外遮光罩刚离开阴影区时,飞船地心连线与阳光夹角小于 $-90^\circ$ ;阳光不受飞船的任何遮挡,直接照射到外遮光罩上,同时还有一部分阳光从外遮光罩的开口处斜入射到外遮光罩内腔;3)在飞船飞过地心连线与阳光夹角 $90^\circ$ 点,向会日点飞行的过程中,飞船船体对阳光的遮挡效果越来越显著。在会日点处,外遮光罩由于轨道舱的遮挡而不受日晒;4)当飞船由会日点向地心连线与阳光夹角 $90^\circ$ 点飞行的过程中,飞船船体对阳光的遮挡效果越来越小,直到到达地心连线与阳光夹角 $90^\circ$ 点,阳光再次直接照射到外遮光罩上,所不同的是由于外遮光罩在飞船的前部,在这一过程中飞船的遮挡的平均效果要比位置3)的要大;5)在飞船从地心连线与阳光夹角 $90^\circ$ 点到进入阴影区的过程中,外遮光罩受晒情

况与位置2)的相仿,只不过外遮光罩的受晒部位的角度转过约150°。

### 3 阳光直射对外遮光罩的辐射加热的计算思路

采用随机模拟法计算外遮光罩的阳光直射加热,计算思路如下:

1) 选取如图2所示的坐标系。 $x$ 轴与飞船的轴线重合并指向船尾, $z$ 轴与外遮光罩的轴线重合并指向天顶, $y$ 轴指向飞船的侧面并符合右手定则。

2) 在外遮光罩上按几何概型分布随机取点,其位置坐标、所属单元和法线方向数均随之确定,并可判断出此点是否在相关线以内。关于公式(1)的证明,可参阅文献[4]。

随机点的坐标( $x^0, y^0, z^0$ ):

$$\begin{aligned} x^0 &= h_1 \times \left( \frac{rs^0 + (1 - rs^0) \times rs^2}{rs^0 + (1 - rs^0) \times rs^2} \times \tan(\psi) \times \cos(2\pi \times rs^3) \right) \\ y^0 &= h_1 \times \left( \frac{rs^0 + (1 - rs^0) \times rs^2}{rs^0 + (1 - rs^0) \times rs^2} \times \tan(\psi) \times \sin(2\pi \times rs^3) \right) \\ z^0 &= h_0 - h_1 \times \left( \frac{rs^0 + (1 - rs^0) \times rs^1}{rs^0 + (1 - rs^0) \times rs^1} \times Z_1 \right) \end{aligned} \quad (1)$$

法线方向数( $l, m, n$ ):

$$\begin{aligned} l &= h_1 \times \left( \frac{rs^0 + (1 - rs^0) \times rs^2}{rs^0 + (1 - rs^0) \times rs^2} \times \tan(\psi) \times \cos(2\pi \times rs^3) \right) \\ m &= h_1 \times \left( \frac{rs^0 + (1 - rs^0) \times rs^2}{rs^0 + (1 - rs^0) \times rs^2} \times \tan(\psi) \times \sin(2\pi \times rs^3) \right) \\ n &= h_1 \times \left( \frac{rs^0 + (1 - rs^0) \times rs^2}{rs^0 + (1 - rs^0) \times rs^2} \times \tan^2(\psi) \right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $h_0$ 为外遮光罩上底的锥高, $h_1$ 为下底的锥高, $rs^0 = (h_0/h_1)^2$ , $\psi$ 为外遮光罩外圆锥面的半锥顶角, $z_1$ 为外遮光罩上底的 $z$ 坐标, $rs^2$ 和 $rs^3$ 为相应的伪随机数。

若 $\sqrt{y^2 + z^2} < r_2$ , $r_2$ 为留轨舱圆柱面的半径,则所取的随机点在相关线以内,被留轨舱包围,不受阳光照射。

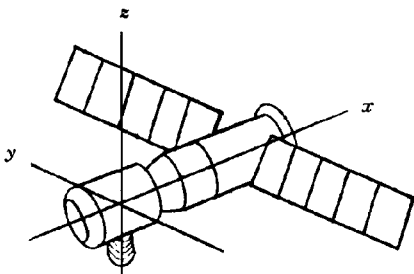


Fig. 2 The choice of the spacecraft coordinate

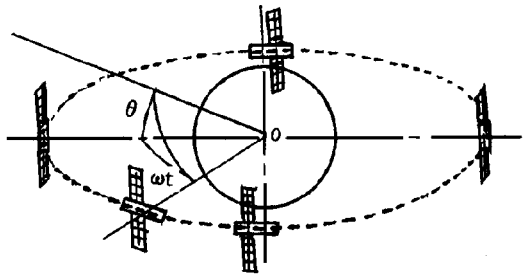


Fig. 3 The spacecraft position and the azimuth of the sunlight

3) 如图3所示,以会日点为起点,用球面三角公式求出任意轨道位置处的太阳光线方向余弦,从而确定从外遮光罩上的随机点出发的逆太阳光方向的射线(直线)方程,用对 $x$ 轴的射影式来表示:

逆太阳光方向的射线(直线)方向余弦( $\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma$ ):

$$\begin{aligned}\cos\alpha &= \cos(15^\circ) \times \sin(\omega) \\ \cos\beta &= \cos(75^\circ) \\ \cos\gamma &= \cos(15^\circ) \times \cos(\omega)\end{aligned}\quad (3)$$

逆太阳方向的射线(直线)方程:

$$\begin{aligned}y &= y^0 + a(x - x^0) \\ z &= z^0 + b(x - x^0)\end{aligned}\quad (4)$$

式中,  $(x^0, y^0, z^0)$  是外遮光罩上的随机点,  $a = \tan(15^\circ) / \sin(\omega)$ ,  $b = \cos(\omega) / \sin(\omega)$  当  $\omega = 0$  时, 外遮光罩不受日晒。

4) 飞船船体各部分都是旋转对称体, 其任一处的半径均是  $x$  的函数, 设其为  $r(x)$ 。上述射线与飞船相交的条件是:  $y^2 + z^2 = r(x)^2$  至少有一个解, 并且  $x$  在  $r(x)$  的自变量域内, 此自变量域即为旋转对称体的  $x$  轴上的区间。上面方程有解的判定条件用韦达定理来判断。对于不同区段, 韦达定理的判定式有所不同, 并随时间变化。

5) 由于有地心连线与阳光夹角大于  $90^\circ$  的情况, 射线的反向延长线有可能与飞船相交, 所以上述判定条件还要加上  $x$  与  $x^0$  的比较, 作为飞船船体遮挡的必要条件之一, 即在会日点前,  $x < x^0$ , 在会日点后,  $x > x^0$ 。

6) 按4)、5)判断从  $(x^0, y^0, z^0)$  出发的逆阳光射线是否与飞船船体相交, 只要有一段船体相交, 则此射线就被飞船遮挡, 需重新选取外遮光罩上的随机点。若此射线不被遮挡, 则对所取点处的单元进行能量累加:

$$\text{sun}(i, j) = \text{sun}(i, j) + S \cdot dA \cdot \cos(\theta) \cdot \alpha \quad (5)$$

式中,  $\text{sun}(i, j)$  为外遮光罩外表面上某单元吸收的能量;  $S$  为太阳常数;  $dA$  为随机点的面积, 它等于外遮光罩处表面面积除以随机点总数;  $\theta$  为随机点的法线与阳光的夹角, 可用数学公式求出<sup>[5]</sup>;  $\alpha$  为外遮光罩外表面的可见光吸收率。

7) 在外遮光罩外表面上大量地随机取点, 按上述过程对各个单元分别进行累加, 就相当于在外遮光罩外表面上进行了积分<sup>[6]</sup>, 从而得出具有统计意义的结果。随机取点的数量越多, 结果就越准确, 本文计算取 100 000 000 个随机点。

8) 当  $110.1258^\circ > |\omega| > 90^\circ$  时, 阳光可从外遮光罩开口处射入其内腔, 需单独计算。3) 中的太阳光方向余弦公式仍然成立。关于在外遮光罩的开口处随机点的选取和光线在外遮光罩内的追迹, 请参阅文献[7]。

## 4 计算结果与分析

### 4.1 计算结果

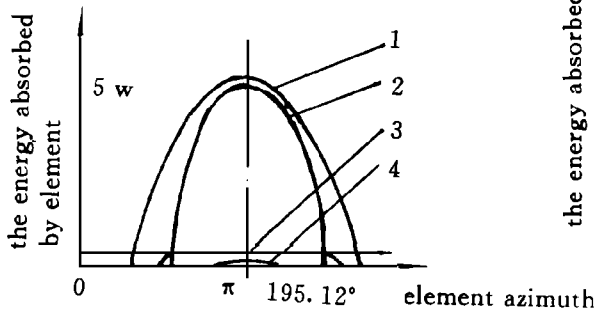
依据上述原理, 用随机模拟法, 编程计算了阳光直射对外遮光罩各个单元的辐射加热, 下列计算中一律取阳光与轨道面夹角为  $15^\circ$ ; 飞船轨道位置用过会日点的角度来表示。

**Table 1** The solar radiation to the outer baffle changing by the orbit position of spacecraft (not including the situation of the slant radiation to the inner cavity)

|                    |          |        |        |        |        |        |        |        |     |
|--------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|
| orbit position( °) | - 110.13 | - 105  | - 90   | - 75   | - 60   | - 45   | - 30   | - 15   | 0.0 |
| radiation absorbed | 77.519   | 79.930 | 83.329 | 73.351 | 61.373 | 43.081 | 14.30  | 0.0    | 0.0 |
| orbit position( °) | 15       | 30     | 45     | 60     | 75     | 90     | 105    | 110.13 |     |
| radiation absorbed | 0.0      | 0.0    | 0.0    | 4.423  | 35.493 | 83.246 | 79.922 | 77.511 |     |

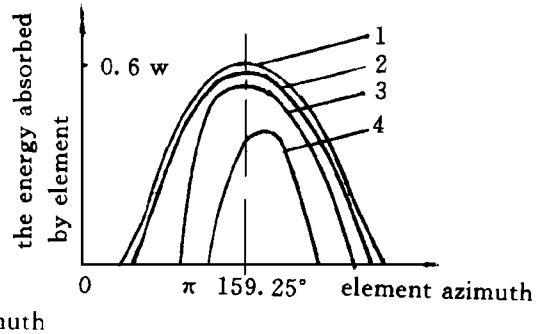
**Table 2** The solar slant radiation to the inner cavity of the outer baffle changing by the orbit position of the spacecraft

| orbit position( °)                     | ± 90 | ± 95   | ± 100  | ± 105  | ± 110.13 | the shadow area<br>or $ wt  < 90^\circ$ |
|----------------------------------------|------|--------|--------|--------|----------|-----------------------------------------|
| radiation absorbed                     | 0.0  | 29.376 | 58.645 | 87.492 | 116.379  | 0.0                                     |
| the outer surface<br>of the first vane | 0.0  | 3.9569 | 7.8830 | 11.749 | 15.620   | 0.0                                     |



1. the first layer elements
2. the 10th layer elements
3. the 8th layer elements
4. the 7th layer elements

Fig. 4 The solar radiation changing by the element position of the outer surface



1. the first layer baffle elements
2. the second layer baffle elements
3. the second layer vane elements
4. the third layer vane elements

Fig. 5 The solar slant radiation changing by the element position of the inner cavity

## 4.2 分析与结论

1) 由表1可以看出,飞船船体对太阳光的遮挡,随轨道位置的变化而变化。a) 当飞船离开阴影区或即将进入阴影区时,飞船船体不遮挡太阳光线,这时外遮光罩外表面吸收的阳光直射能量比较多,其最大值出现在  $\pm 90$  位置。b) 在  $-90 \sim 90$  之间,飞船船体对外遮光罩有不同程度的遮挡:在  $-90 \sim 0$  之间的平均遮挡比较少,而在  $0 \sim 90$  之间则比较多,这和外遮光罩与飞船的相对位置是一致的。c) 在  $-15 \sim 45$  区域内,整个外遮光罩处于飞船船体的“阴影”中,不受

阳光直接照射。

2) 由表2可以看出, a) 当飞船的轨道位置为  $\pm 90^\circ \sim \pm 110.1258^\circ$  之间时, 阳光从外遮光罩的开口斜入射到其内腔, 由于外遮光罩内腔表面接近于黑体, 所以其热量吸收也比较多, 并且随轨道角度的绝对值的增大而增大。b) 当飞船进入阴影或飞船在  $-90^\circ \sim 90^\circ$  之间时, 阳光不能照进外遮光罩内腔。

3) 图4是飞船轨道位置为  $-45^\circ$  时, 外遮光罩外表面单元吸收的阳光直射能量。a) 靠近外遮光罩根部的单元(第1~6环节), 由于飞船的遮挡而不受照射; 第7~9环节部分受飞船遮挡, 使之极值位置发生漂移; 第10~18环节不受飞船遮挡, 每一个环节上的单元吸收热量的差异是由于角度和面积的变化而造成的。b) 在每一个环节上, 单元吸收的能量沿周向大致是按半波余弦规律变化, 其峰值点的位置与轨道位置、阳光轨道面夹角有关, 并满足下列公式:  $\varphi = \pi + \tan^{-1}(\tan 15^\circ \sin(\omega))$  (第7~9环节部分受飞船遮挡, 其峰值点位置与被遮挡的情况有关, 不适用此公式)。

4) 图5为当飞船轨道位置为  $100^\circ$  时, 太阳光斜入射加热随内腔单元位置变化的情况。a) 由于外遮光罩内腔表面接近于黑体, 所以反射能量很少。能受到阳光直接照射的环节只有最外边的两个, 这与阳光斜入射角度较小是一致的。b) 在这两个环节中, 外遮光罩内表面吸收的能量远大于挡光环吸收的能量, 这主要是因为外遮光罩内表面法线与阳光的夹角要比挡光环的小得多。c) 最外一圈挡光环上的各个单元吸收的热量相等, 并与次外层挡光环中部分被阳光完全照射的单元吸收的热量大致相等, 因为这些单元面积基本上相等, 与阳光夹角也相等, 并且具有相同的黑度。d) 外遮光罩内表面吸收的能量沿周向按半波余弦规律变化, 不直接受晒的单元, 能吸收部分反射光, 但其能量要比直接照射的小3个数量级。

## 5 结 语

本文以概率论的基本原理为依据, 用随机模拟法计算了阳光直射对空间光学遥感器的外遮光罩的辐射加热, 从而使计算过程大为简化, 得到了足够精确的结果。本文采用的方法适用于实际工程计算并具有通用性, 并且可自行调节计算精度。

## 参 考 文 献

- [1] 闵桂荣, 郭 舜. 航天器热控制. 北京: 科学出版社, 1985. 259~262
- [2] 达道安. 空间低温技术. 北京: 宇航出版社, 1991. 11~19
- [3] 闵桂荣. 卫星热控制技术. 北京: 宇航出版社, 1991. 33
- [4] 曹 彬. 概率论. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1986. 74~78, 107~118
- [5] 中国矿业学院数学教研室. 数学手册. 北京: 科学出版社, 1980. 63
- [6] 徐钟济. 蒙特卡罗方法. 上海: 上海科学技术出版社, 1985. 5~11, 171~175
- [7] 赵立新. 空间光学传感器光学窗口的地球红外辐射分析与计算. 光学精密工程, 1995, 3(6): 80~85

## Solar Radiation Analysis and Calculation to Outer Baffle of Optical Remote Sensor

Zhao Lix in

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

### Abstract

According to the probability theory, the solar radiation to the outer baffle of optical remote sensor has been analyzed and calculated, including the different shadow conditions of the spacecraft and the solar oblique radiation from the opening of the outer baffle to the inner cavity. The projective geometry calculation of the complex surfaces of second order is avoided.

**Key words:** Random simulation, Solar radiation, Outer baffle, Spacecraft, Radiation heat transfer

**赵立新** 男, 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: 空间热力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。