

## 太阳同步轨道二维变姿态空间相机的外热流计算

李世俊<sup>1,2</sup>, 陈立恒<sup>1</sup>, 冯文田<sup>3</sup>, 吴愉华<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 32142 部队 72 分队, 河北 保定 071000)

**摘要:** 为了得到准确的二维变姿态空间相机外热流数据, 提出了一种在 J2000 坐标系下进行二维变姿态空间相机的外热流算法。首先, 在 J2000 坐标系下确定了相机的位置、太阳的位置及其辐射强度; 其次, 根据空间相机的视轴始终指向太阳的工作特点及太阳的位置, 计算出其在极端情况下的二维姿态角; 然后, 根据得到的姿态角计算出姿态变换矩阵。最后, 利用 Matlab 编程计算出一个轨道周期内的不变姿态以及二维变姿态条件下的复杂外热流。该方法计算得到的不变姿态外热流与 I-deas/TMG 软件得到的结果能够很好地吻合。与姿态不变的相机相比, 相机二维姿态的变化会导致其外热流发生较大的变化, 尤其是入光口所在的  $-Y$  面, 其太阳直射热流的波动范围为  $0\sim 1394\text{ W/m}^2$ 。得到的姿态角为热仿真模型姿态的调整提供了重要参考。由变姿态外热流数据可以看出,  $-Z$  面的外热流最小, 其最大平均外热流小于  $4\text{ W/m}^2$ 。另外  $\pm X$  面和  $+Y$  面的外热流也较小,  $\pm X$  面最大平均外热流小于  $80\text{ W/m}^2$ ,  $+Y$  面最大平均外热流小于  $110\text{ W/m}^2$ 。在实际应用中, 由于卫星平台的遮挡,  $\pm X$  面和  $+Y$  面的外热流会更小, 因此可以将  $-Z$  面,  $\pm X$  面和  $+Y$  面作为散热面, 为热设计工作提供了很好的指导。

**关键词:** 热设计; 变姿态; 热仿真; 外热流; 空间相机

**中图分类号:** V416.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0917008

## Calculation of external heat fluxes on space camera with two-dimensional changing attitudes in sun-synchronous orbit

Li Shijun<sup>1,2</sup>, Chen Liheng<sup>1</sup>, Feng Wentian<sup>3</sup>, Wu Yuhua<sup>1,2</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Branch 72 of No.32142 Army, Baoding 071000, China)

**Abstract:** In order to get accurate data of external heat fluxes on space camera with two-dimensional changing attitudes, a method was proposed to calculate the external heat fluxes of space camera with two-dimensional changing attitudes in J2000 coordinate system. First, in J2000 coordinate system positions of space camera, position and radiation intensity of sun were calculated. Second, according to the working characteristics of the space camera whose visual axis always points to the sun and the position of the sun, its two-dimensional attitude angles were calculated under extreme conditions. Then, based on the obtained

收稿日期: 2018-04-10; 修订日期: 2018-05-12

基金项目: 国家重大航天项目; 中国科学院青年创新促进会(2015173)

作者简介: 李世俊(1992-), 男, 博士生, 主要从事空间光学遥感器热控技术方面的研究。Email: lishijun15@mails.ucas.ac.cn

导师简介(通讯作者): 陈立恒(1979-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事空间光学遥感器热控技术方面的研究。

Email: chenliheng3@163.com

attitude angles, the attitude transformation matrix was calculated. Finally, in one orbital period external heat fluxes of unchanging attitude and two-dimensional changing attitudes were calculated with Matlab programming. The external heat fluxes of this paper were in good agreement with I-deas/TMG software. Compared with the unchanging attitude camera, external heat fluxes of the two-dimensional changing attitudes camera will have a great change, especially for the  $-Y$  surface where optical entrance is located. The solar radiation heat fluxes fluctuation range of  $-Y$  surface is  $0-1\ 394\ \text{W/m}^2$ . The obtained attitude angles provide an important reference for the adjustment of the attitude for the thermal simulation model. According to the data of the external heat flux with changing attitudes, it can be seen that the external heat fluxes of the  $-Z$  surface is smallest, and the maximum average period external heat fluxes of  $-Z$  surface is less than  $4\ \text{W/m}^2$ . In addition, the external heat fluxes of the  $\pm X$  surfaces and  $+Y$  surface are smaller, and the maximum average period external heat fluxes of  $\pm X$  surfaces are less than  $80\ \text{W/m}^2$ , and the maximum average period external heat fluxes of  $+Y$  surface are less than  $110\ \text{W/m}^2$ . In practical application, the external heat fluxes of  $\pm X$  surfaces and  $+Y$  surface will be smaller due to the obstruction of the satellite platform. Therefore, the  $-Z$  surface,  $\pm X$  surfaces and  $+Y$  surface can be used as heat dissipation surfaces, which provides a good guide for thermal design work.

**Key words:** changing attitudes; external heat fluxes; thermal simulation; space camera; thermal design

## 0 引言

航天器热控工程中,外热流既是热分析工作之一,也是求解整个航天器温度场分布的重要外部边界条件,更是确定热分析工况的依据<sup>[1-2]</sup>。外热流分析工作贯穿于整个航天器热控系统的研制过程中,从系统方案设计阶段开始就需要进行轨道参数计算和外热流计算以提供热设计的环境参数<sup>[3]</sup>。热试验的外热流边界条件也需要根据外热流的分析结果来确定<sup>[4]</sup>。

目前,国内外对于姿态稳定相机的空间外热流进行了众多研究,已经有较成熟的理论和算法,而对于二维变姿态相机的空间外热流计算研究甚少。Junlan Li等<sup>[5]</sup>在复杂结构的太阳能电池板的外热流分析中考虑到了其在不同轨道高度的飞行姿态对外热流的影响。刘洋等<sup>[6]</sup>采用积分定义法、平行光线法、近似法、插值法,同时考虑行星椭圆轨道的影响以及面元遮挡计算出太阳系行星际轨道航天器的外热流。吴晓迪等<sup>[7]</sup>建立了基于蒙特卡洛法的卫星空间热流计算模型,并计算出一个轨道周期的外热流。王爽等<sup>[8]</sup>提出了一种基于反向蒙特卡洛法计算星敏感器光学系统表面空间外热流的方法。邓桂俊等<sup>[9]</sup>虽然对太阳同步轨道空间外热流的计算提出较为详细

的理论,但其研究也仅限于姿态稳定的相机,并未涉及变姿态空间相机的外热流计算。杨化彬等<sup>[10]</sup>也仅在地磁坐标系下对一维变姿态空间相机的外热流进行了计算,而且计算过程较为繁琐。与姿态稳定的空间相机相比,二维变姿态空间相机的外热流计算更为复杂和困难。而一般的热分析软件计算不变姿态空间相机的外热流时十分方便,一旦涉及到相机在轨姿态变化时就会耗费大量的时间,有时甚至无法计算。

为满足对太阳进行实时性、连续性的观测要求,某空间相机的主镜筒经过二维调整后始终指向太阳。文中根据相机的工作特点,针对工作在太阳同步轨道有相同任务需求的二维变姿态相机的外热流计算提出详细的理论和方法,同时考虑到季节变化对太阳矢量和太阳常数的影响,并利用 Matlab 编程计算出其姿态角和外热流,节省了大量时间成本,提高了计算效率。该方法计算出的外热流能够保障空间相机的热设计、热分析、热试验具备准确、可靠的热边界条件。

## 1 基本假设及计算流程

### 1.1 基本假设

相机各面外热流的大小不仅与地球、卫星、太阳

的相对位置密切相关,而且还与其姿态有关。为准确描述它们之间的相对位置关系,需要引入坐标系。文中以 J2000 坐标系  $O-XYZ$  为基本坐标系,坐标原点  $O$  为地心,  $+X$  轴指向春分点,  $+Z$  轴指向北天极,  $+Y$  轴由右手定则确定。相机本体坐标系  $O_b-X_bY_bZ_b$ ,  $O_b$  为相机中心,  $+X_b$  轴方向为相机飞行方向,  $+Z_b$  轴方向指向地心,  $+Y_b$  轴由右手定则确定,如图 1 所示。图中  $\theta$ 、 $\varphi$ 、 $\psi$  分别表示空间相机姿态变化的横滚角、俯仰角、偏航角。

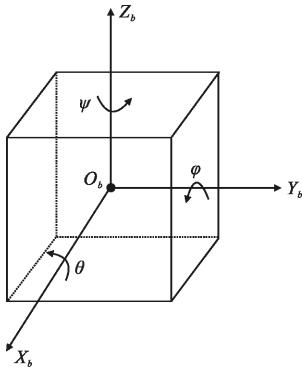


图 1 空间相机坐标系定义

Fig.1 Space camera coordinate system definition

为简化计算过程,可作如下假设:(1)把相机简化为六面体,不考虑相机的具体结构形态;(2)相机的中心和卫星的中心重合,即二者坐标系相同;(3)忽略一天内太阳位置的变化,即太阳辐射强度和阳光矢量在一天中保持恒定;(4)太阳光在地球表面附近为平行光。

### 1.2 计算流程

图 2 是 J2000 坐标系下二维变姿态空间相机的外热流计算流程图。由轨道六根参数及在轨  $t$  时刻的偏近点角  $E$  能够确定相机的位置矢量  $\vec{r}$  和速度矢量  $\vec{v}$ 。由当前时间  $T$  可以确定太阳的位置  $\vec{r}_s$  及其辐射强度  $S$ 。根据太阳的位置  $\vec{r}_s$ 、相机的位置矢量  $\vec{r}$ 、速度矢量  $\vec{v}$  以及空间相机的主镜筒经过二维调整后始终指向太阳等条件可以求出绕  $X$  轴的姿态角  $\theta$  和绕  $Z$  轴的姿态角  $\psi$ 。根据得出的姿态角就可以求出姿态变换矩阵  $P_0$ 。最终可以求出  $t$  时刻相机各面受到的太阳直射热流  $Q_s$ 、地球红外辐射热流  $Q_{IR}$  和地球反射热流  $Q_A$ 。

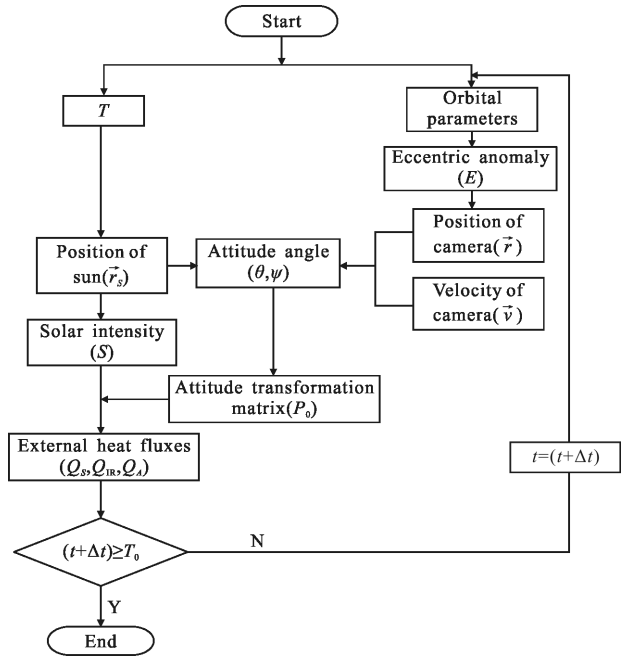


图 2 J2000 坐标系下二维变姿态的空间相机外热流计算流程图

Fig.2 External heat fluxes calculated flow chart of space camera with two-dimensional changing attitudes in J2000 coordinate system

## 2 相机的在轨位置和速度计算

可用一组具有几何意义的轨道六根参数来描述相机在绕地球运行中某一时刻的位置和速度,详细的推导过程见参考文献[11-12]。

### 2.1 相机在轨位置矢量计算

相机在 J2000 坐标系中的坐标如下:

$$\vec{r} = a(\cos E - e) \cdot P + a\sqrt{1-e^2} \sin E \cdot Q \quad (1)$$

式中:  $a$  为轨道半长轴;  $E$  为偏近点角;  $e$  为轨道偏心率;  $P$  为近地点方向的单位矢量;  $Q$  为半通径方向的单位矢量。

$$P = \begin{bmatrix} \cos\omega\cos\Omega - \sin\omega\cos i \sin\Omega \\ \cos\omega\sin\Omega + \sin\omega\cos i \cos\Omega \\ \sin\omega\sin i \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$Q = \begin{bmatrix} -\sin\omega\cos\Omega - \cos\omega\cos i \sin\Omega \\ -\sin\omega\sin\Omega + \cos\omega\cos i \cos\Omega \\ \cos\omega\sin i \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $\Omega$  为升交点赤经;  $i$  为轨道倾角。

### 2.2 相机在轨位置矢量计算

由于速度矢量是位置矢量对时间的一阶导数,把公式(1)对时间求一阶导数,并根据上述关系就可

以得出相机的在轨速度矢量：

$$\vec{v} = -\frac{na}{1-ecosE} \sin E \cdot P + \frac{na}{1-ecosE} \sqrt{1-e^2} \cos E \cdot Q \quad (4)$$

利用 Matlab 编程计算出相机在 J2000 坐标系下的在轨位置矢量和速度矢量，并与常用的轨道专业软件 STK 的计算结果进行对比分析，如图 3 和图 4 所示。图 3 和图 4 中分别为一轨周期内，相机的在轨位置矢量和速度矢量在三个坐标轴上分量的对比，显然提供的相机位置矢量和速度矢量的算法与 STK 的计算结果吻合的非常好，其误差均小于 5%。因此可以认为提供的相机位置矢量和速度矢量的算法能够满足后续工作的需求。

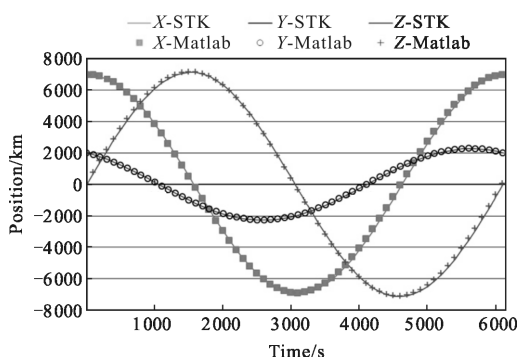


图 3 相机位置矢量在 Matlab 和 SKT 软件计算结果对比  
Fig.3 Comparison of camera position vector calculation results between Matlab and SKT software

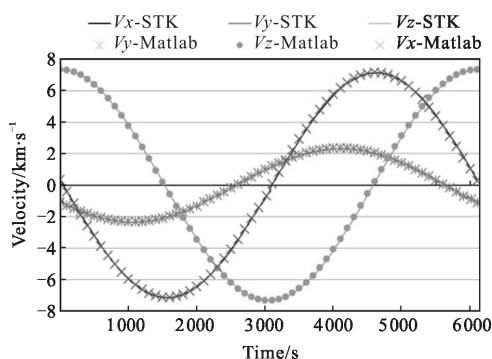


图 4 相机速度矢量在 Matlab 和 SKT 软件计算结果对比  
Fig.4 Comparison of camera velocity vector calculation results between Matlab and SKT software

### 3 太阳位置及辐射强度

天体在宇宙空间运行的规律基本上是恒定的，因此在某一时刻可以确定天体在天球坐标系中的位置。例如，已知当前时间  $T$  就可以推算出太阳在

J2000 坐标中的具体位置矢量。

#### 3.1 儒略日和协调世界时

儒略日 (Julian Day, JD) 是一种不要年、月，直接按日的顺序从一个基本历元(公元前 4713 年 1 月 1 日 12:00)起消逝的日期进行连续计数的简单方法，也是天文上应用的一种长期纪日法<sup>[13-14]</sup>。

协调世界时 (Coordinated Universal Time, UTC)，又称世界统一时间、世界标准时间或国际协调时间<sup>[3]</sup>。协调世界时和儒略日两者之间的转换公式为：

$$J = 367Y - \left[ \frac{Y + \frac{M+9}{12}}{4} \right] + \left[ \frac{275M}{9} \right] + D + 1\,721\,013.5 \quad (5)$$

式中： $J$  为儒略日期； $Y$  为年份； $M$  为月份； $D$  为日数，不满一日时间用小数表示； $[ ]$  为取整运算符。

#### 3.2 地球绕太阳的平近点角和真近点角

地球的平近点角  $M_E$  的计算公式为：

$$M_E = M_{2000} + n \times (J - J_{2000}) \quad (6)$$

式中： $M_{2000}$  为 2000 年 1 月 1 日 12:00 UTC 对应的地球平近点角，其值为  $357.5291^\circ$ ； $n$  为地球绕太阳公转的平近点角速度，其值为  $0.985\,626\,28^\circ/\text{天}$ ； $J$  为当前时间  $T$  对应的儒略日期； $J_{2000}$  为 2000 年 1 月 1 日 12:00 UTC 对应的儒略日期，其值为  $2\,451\,545.0$ 。

由开普勒方程可以得到地球绕太阳公转的真近点角  $f_E$ ：

$$f_E = M_E + 1.914\,8 \sin M_E + 0.02 \sin(2M_E) + 0.000\,3 \sin(3M_E) \quad (7)$$

#### 3.3 太阳位置矢量的计算

在地心黄道坐标系下，太阳黄经  $\lambda_S$  的计算公式为：

$$\lambda_S = f_E + \Pi + 180^\circ \quad (8)$$

式中： $\Pi$  为地球近日点黄经，在轨道面内地球近日点与春分点之间的夹角， $\Pi = 102.9372^\circ$ 。

已知当前时间为  $T$ ，则太阳在 J2000 坐标系中的球坐标为：

$$\begin{cases} \alpha_S = \arctan\left(\frac{\sin\lambda_S \cos\varepsilon}{\cos\lambda_S}\right) \\ \delta_S = \arcsin(\sin\lambda_S \sin\varepsilon) \end{cases} \quad (9)$$

式中： $\alpha_S$  为太阳赤经； $\delta_S$  为太阳赤纬； $\varepsilon$  为黄赤交角，其值为  $23^\circ 26'$ 。

通过上述公式可以得出太阳赤经和赤纬在两年内的变化曲线，如图 5 所示。可以看出在一年中，太阳赤经的变化范围为  $0^\circ \sim 360^\circ$ ，太阳赤纬的变化范围为  $-23.5^\circ \sim 23.5^\circ$ 。

加上日地距离，把球面坐标转换到直角坐标系，即可得到太阳在 J2000 坐标系下的直角坐标系中位

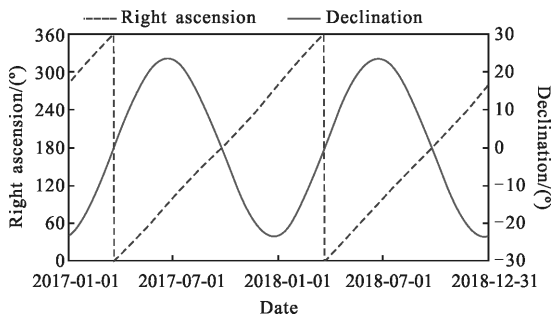


图 5 太阳赤经和赤纬在两年内的变化曲线

Fig.5 Curves of sun ascension and declination in two years

置矢量  $\vec{r}_S = (x_S, y_S, z_S)^T$ :

$$\vec{r}_S = \begin{bmatrix} x_S \\ y_S \\ z_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_S \cdot \cos\alpha_S \cdot \cos\delta_S \\ R_S \cdot \sin\alpha_S \cdot \cos\delta_S \\ R_S \cdot \sin\delta_S \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中:  $R_S$  为日地距离。其表达式为:

$$R_S = \frac{a_E(1-e_E^2)}{1+e_E \cos f_E} \quad (11)$$

式中:  $a_E$  为地球公转轨道半长轴, 其值为  $1.49598261 \times 10^8$  km;  $e_E$  为地球公转轨道偏心率, 其值为 0.0167。

由上述关系可以计算出太阳在 J2000 坐标系中的直角坐标。太阳在两年内的位置矢量随时间的变化曲线如图 6 所示。

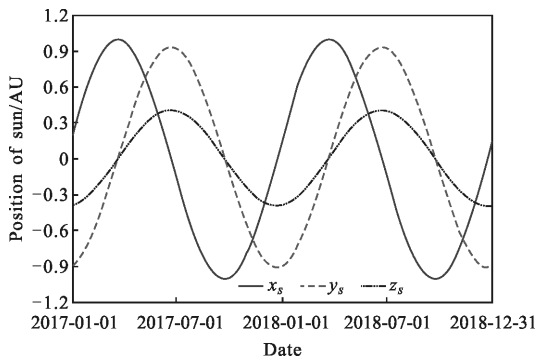


图 6 太阳在 J2000 坐标系中位置变化曲线

Fig.6 Curve of sun position in the J2000 coordinate system

辐射强度的大小与距离的平方成反比, 因此随

季节变化的太阳辐照强度  $S$  为:

$$\frac{S}{R_S^2} = \frac{\bar{S}}{(\bar{R})^2} \quad (12)$$

式中:  $\bar{R}$  为日地平均距离, 其值为  $1.495978707 \times 10^8$  km;  $\bar{S}$  为太阳辐射强度的平均值, 其值为  $1367 \text{ W/m}^2$ ;

由上式可以计算出太阳辐射强度随季节变化的具体数值, 如图 7 所示, 太阳辐射强度的年平均值为  $1367.2 \text{ W/m}^2$ , 其最大值为  $1413.8 \text{ W/m}^2$  (比平均值大 3.41%), 最小值为  $1322.5 \text{ W/m}^2$  (比平均值小 3.27%)。得到的数据与 NASA 采用的数据 (太阳辐射强度的最大值为  $1414 \text{ W/m}^2$ , 最小值为  $1322 \text{ W/m}^2$ ) 十分吻合。

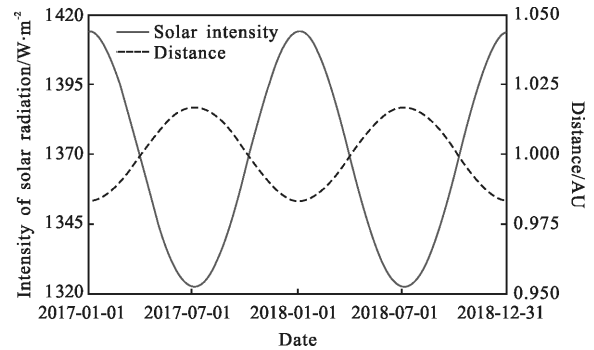


图 7 日地距离及太阳辐照强度

Fig.7 Distance between the sun and earth and radiation intensity of sun

#### 4 相机二维姿态角及姿态变换矩阵

根据相机本体坐标系的定义, 很容易写出各坐标轴的单位矢量, 如表 1 所示。

由于相机在轨工作过程中可以绕  $X_b$  轴和  $Z_b$  轴进行二维转动, 使  $-Y_b$  轴始终指向太阳。不妨设绕  $Z_b$  轴转角为  $\psi$ , 绕  $X_b$  轴转角为  $\theta$ , 则姿态变换矩阵为:

$$P_0 = R_{Z_b}(\psi) \cdot R_{X_b}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\cos\theta\sin\psi & \cos\theta\cos\psi & \sin\theta \\ \sin\theta\sin\psi & -\sin\theta\cos\psi & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (13)$$

表 1 J2000 坐标系中相机本体坐标系各坐标轴的单位矢量

Tab.1 Unit vector of each axis camera body coordinate system in J2000 coordinate system

Name	+ $X_b$	- $X_b$	+ $Y_b$	- $Y_b$	+ $Z_b$	- $Z_b$
Unit vector	$\vec{e}_{x_b} = \frac{\vec{v}}{ \vec{v} }$	$\vec{e}_{-x_b} = -\frac{\vec{v}}{ \vec{v} }$	$\vec{e}_{y_b} = \frac{\vec{v}}{ \vec{v} } \times \frac{\vec{r}}{ \vec{r} }$	$\vec{e}_{-y_b} = \frac{\vec{r}}{ \vec{r} } \times \frac{\vec{v}}{ \vec{v} }$	$\vec{e}_{z_b} = -\frac{\vec{r}}{ \vec{r} }$	$\vec{e}_{-z_b} = \frac{\vec{r}}{ \vec{r} }$

假设  $\vec{e}_{-Y_b}$  在 X、Y、Z 三坐标轴的分量分别为  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ ，则可以得到  $-Y_b$  轴转动后的单位矢量为：

$$\vec{e}_{-Y} = P_0 \cdot \vec{e}_{-Y_b} = \begin{bmatrix} d_1 \cdot \cos\psi + d_2 \cdot \sin\psi \\ -d_1 \cdot \cos\theta \cdot \sin\psi + d_2 \cdot \cos\theta \cdot \cos\psi + d_3 \cdot \sin\theta \\ d_1 \cdot \sin\theta \cdot \sin\psi - d_2 \cdot \sin\theta \cdot \cos\psi + d_3 \cdot \cos\theta \end{bmatrix} \quad (14)$$

一般都认为太阳光为平行光，太阳光矢量是指地心和日心连线并由日心指向地心。太阳光矢量的单位向量如下：

$$\vec{e}_s = -\frac{\vec{r}_s}{|\vec{r}_s|} = \frac{-1}{|\vec{r}_s|} \cdot \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} \quad (15)$$

太阳光矢量反方向的单位矢量为：

$$-\vec{e}_s = \frac{\vec{r}_s}{|\vec{r}_s|} = \frac{1}{|\vec{r}_s|} \cdot \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} \quad (16)$$

相机主镜筒经过二维调整后始终指向太阳，也就是说经过二维调整后的  $-Y_b$  向(公式(14))与太阳光

矢量反方向的单位矢量(公式(16))相同。

由公式(14)和(16)很容易得出如下方程组：

$$\begin{cases} d_1 \cdot \cos\psi + d_2 \cdot \sin\psi = c_1 \\ -d_1 \cdot \cos\theta \cdot \sin\psi + d_2 \cdot \cos\theta \cdot \cos\psi + d_3 \cdot \sin\theta = c_2 \\ d_1 \cdot \sin\theta \cdot \sin\psi - d_2 \cdot \sin\theta \cdot \cos\psi + d_3 \cdot \cos\theta = c_3 \end{cases} \quad (17)$$

解得

$$\begin{cases} \psi = \arcsin\left(\frac{c_1}{\sqrt{d_1^2 + d_2^2}}\right) - \arctan\frac{d_1}{d_2} \\ \theta = \arcsin\left(\frac{d_3}{\sqrt{c_2^2 + c_3^2}}\right) - \arctan\frac{c_3}{c_2} \end{cases} \quad (18)$$

### 5 外热流的计算

对于对地相机等飞行器，其外热流主要由太阳直射热流、地球反照热流和地球红外辐射热流等三部分组成。

#### 5.1 太阳直射热流

根据以上内容可求出各面的法向矢量，如表 2 所示。

表 2 不变姿态与变姿态各面的法向矢量

Tab.2 Normal vector of each surface in stable attitude and change attitude

Name	Normal vector of $+X_b$ surface	Normal vector of $-X_b$ surface	Normal vector of $+Y_b$ surface	Normal vector of $-Y_b$ surface	Normal vector of $+Z_b$ surface	Normal vector of $-Z_b$ surface
Stable attitude	$\vec{i}_1 = \vec{e}_{x_s}$	$\vec{i}_2 = -\vec{e}_{x_s}$	$\vec{i}_3 = \vec{e}_{y_s}$	$\vec{i}_4 = -\vec{e}_{y_s}$	$\vec{i}_5 = \vec{e}_{z_s}$	$\vec{i}_6 = -\vec{e}_{z_s}$
Change attitude	$\vec{i}_1 = P_0 \cdot \vec{i}_1$	$\vec{i}_2 = P_0 \cdot \vec{i}_2$	$\vec{i}_3 = P_0 \cdot \vec{i}_3$	$\vec{i}_4 = P_0 \cdot \vec{i}_4$	$\vec{i}_5 = P_0 \cdot \vec{i}_5$	$\vec{i}_6 = P_0 \cdot \vec{i}_6$

空间相机某个表面  $n$  所受到的太阳辐射外热流如图 8 所示。

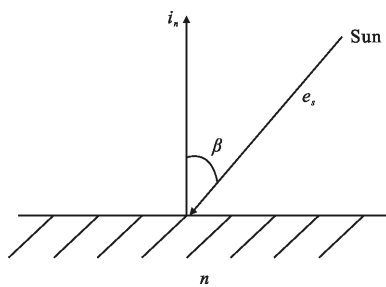


图 8 表面  $n$  受到的太阳辐射外热流示意图

Fig.8 Solar radiation external heat flux diagram of  $n$  surface

由图 8 很容易求出表面  $n$  受到的太阳直射热流：若  $\vec{e}_s \cdot \vec{i}_n < 0$ ，则  $Q_{sn} = S \cdot |\vec{e}_s \cdot \vec{i}_n|$ ，否则  $Q_{sn} = 0$ 。其中， $S$  为太阳辐照强度， $n=1, 2, 3, 4, 5, 6$ 。

#### 5.2 地球红外辐射热流

到达表面  $n$  的地球红外辐射热流为：

$$Q_{IR,n} = E_{IR} \cdot \phi_n \quad (19)$$

式中： $E_{IR}$  为辐射热流密度，通常取  $237 \text{ W/m}^2$ ； $\phi_n$  为表面  $n$  受到的地球红外角系数。

#### 5.3 地球反照热流

实际分析表明，地球反照热流在卫星吸收的空间外热流中所占的比例较小，因此，在大多数情况下可以利用地球红外角系数  $\phi_n$  来近似计算。

表面  $n$  的地球反照角系数为：

$$\phi_n' = \phi_n \cdot \cos\Phi \quad (20)$$

式中： $\Phi$  为相角，即地球-相机连线与太阳光之间的夹角。

表面  $n$  受到的地球反照热流为：

$$Q_{an} = \rho \cdot S \cdot \phi_n' \quad (21)$$

式中： $\rho$  为反照率，一般取  $0.3 \sim 0.35$ ，文中取  $0.3$ 。

### 6 计算结果及分析

某空间相机工作在近极地太阳同步轨道，轨道

高度 836 km, 轨道倾角约为 98.76°, 近地点角距为 0°, 降交点地方时 06:20。由 STK 软件得出 2018 年最小  $\beta$  角的日期为 6 月 21 日, 最大  $\beta$  角的日期为 2 月 26 日。利用 Matlab 编程分别对姿态不变和二维变姿态外热流(包括太阳直射热流、地球红外辐射热流和地球反

照热流)进行了计算, 并将最小  $\beta$  角和最大  $\beta$  角不变姿态的外热流与 I-deas 软件得到的结果进行了对比。由于 +Z 面为安装面, 该面的外热流不再考虑。最小  $\beta$  角( $\beta_{\min}$ )各面的外热流如图 9~11 所示。最大  $\beta$  角( $\beta_{\max}$ )各面的外热流如图 12~14 所示。

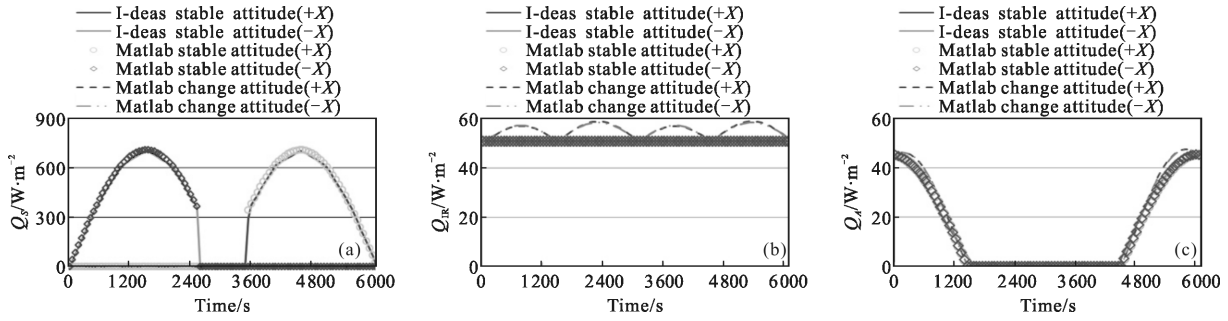


图 9  $\beta_{\min}$  相机  $\pm X$  面外热流曲线

Fig.9 External heat flux curves of camera's  $\pm X$  surfaces at  $\beta_{\min}$

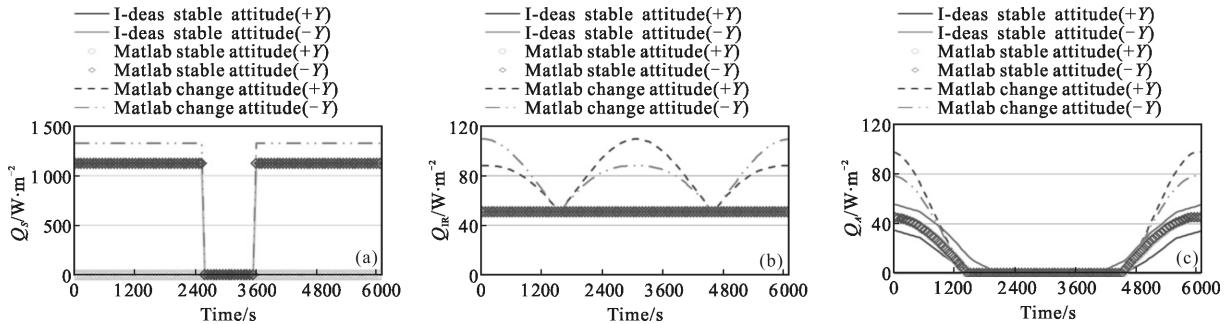


图 10  $\beta_{\min}$  相机  $\pm Y$  面外热流曲线

Fig.10 External heat flux curves of camera's  $\pm Y$  surfaces at  $\beta_{\min}$

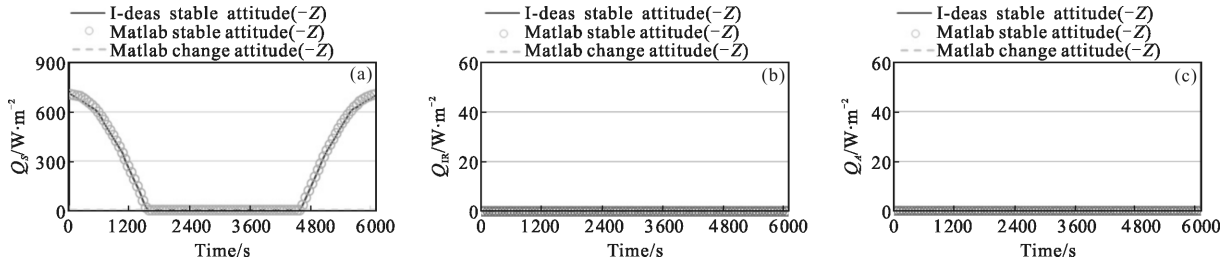


图 11  $\beta_{\min}$  相机 -Z 面外热流曲线

Fig.11 External heat flux curves of camera's -Z surface at  $\beta_{\min}$

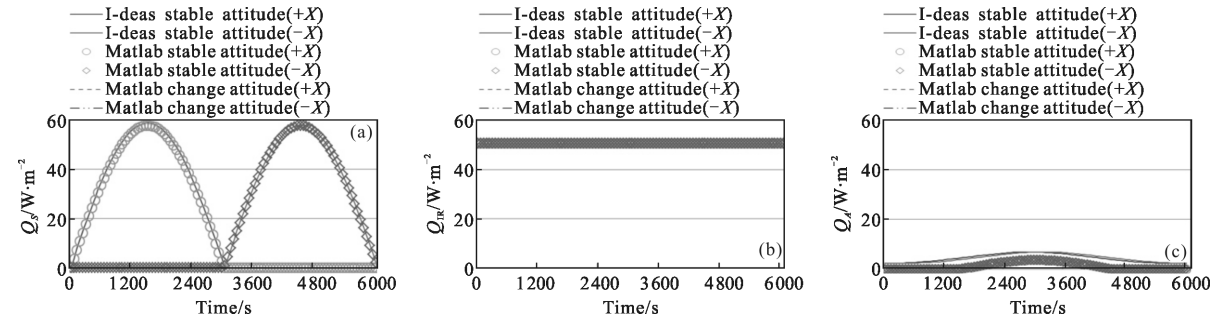


图 12  $\beta_{\max}$  相机  $\pm X$  面外热流曲线

Fig.12 External heat flux curves of camera's  $\pm X$  surfaces at  $\beta_{\max}$

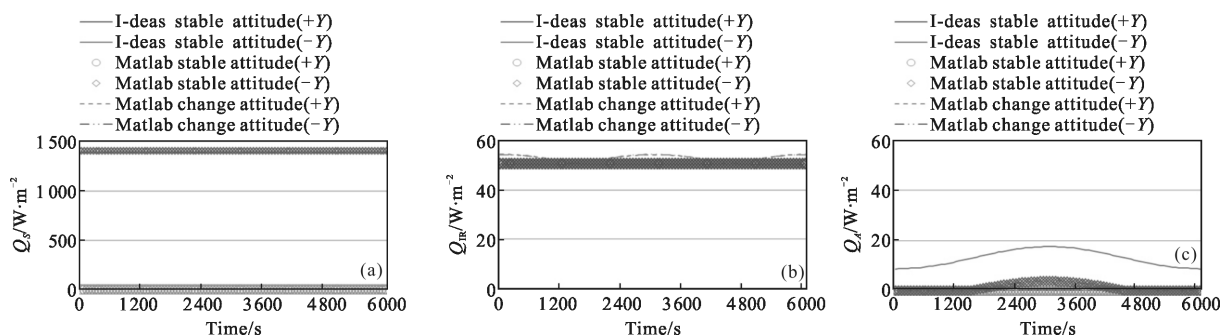


图 13  $\beta_{max}$  相机  $\pm Y$  面外热流曲线

Fig.13 External heat flux curves of camera's  $\pm Y$  surfaces at  $\beta_{max}$

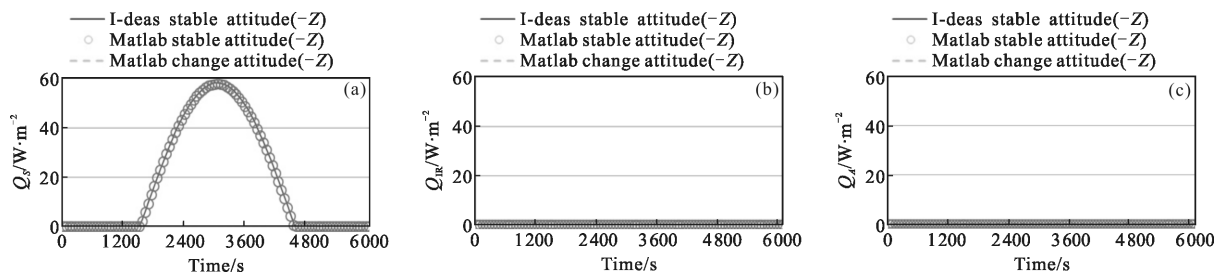


图 14  $\beta_{max}$  相机  $-Z$  面外热流曲线

Fig.14 External heat flux curves of camera's  $-Z$  surface at  $\beta_{max}$

根据上述结果对各面的外热流数据进行了整理,得出各面的周期平均外热流如表 3 所示。

表 3 各面周期平均外热流(单位:  $W/m^2$ )

Tab.3 Average period external heat fluxes of each surface(Unit:  $W/m^2$ )

Name		+X surface	-X surface	+Y surface	-Y surface	-Z surface	
$\beta_{min}$	External heat fluxes of solar radiation	I-deas stable attitude	205.94	204.43	0	933.48	
		Matlab stable attitude	206.34	205.49	0	933.33	
		Matlab change attitude	3.41	3.44	0	1 103.08	
	External heat fluxes of earth infrared radiation	I-deas stable attitude	50.63	50.63	50.63	50.63	0
		Matlab stable attitude	50.64	50.64	50.64	50.64	0
		Matlab change attitude	55.21	55.16	81.69	81.77	0
	External heat fluxes of earthshine	I-deas stable attitude	14.64	14.65	9.8	20.31	0
		Matlab stable attitude	14.46	14.46	14.46	14.46	0
		Matlab change attitude	15.82	15.81	27.36	23.44	0
$\beta_{max}$	External heat fluxes of solar radiation	I-deas stable attitude	18.76	18.28	0	1 392.15	
		Matlab stable attitude	18.28	18.28	0	1 392.80	
		Matlab change attitude	0	0	0	1 394.00	
	External heat fluxes of earth infrared radiation	I-deas stable attitude	50.63	50.63	50.62	50.63	0
		Matlab stable attitude	50.64	50.64	50.64	50.64	0
		Matlab change attitude	52.05	52.06	53.08	53.08	0
	External heat fluxes of earthshine	I-deas stable attitude	4.45	4.45	0.07	13.10	0
		Matlab stable attitude	1.17	1.17	0	1.17	0
		Matlab change attitude	1.20	1.20	0	1.24	0



从外热流曲线以及表3中可以看出,相机姿态不变时,利用Matlab编程计算出的太阳直射热流和地球红外辐射热流与I-deas的结果非常吻合;而地球反照热流由于采用了近似计算,与I-deas的结果有细微的差异,但是地球反照热流本身就非常小,所以并不影响计算结果。与姿态不变的外热流相比,变姿态的外热流发生了较大变化,尤其是 $-Y$ 面的太阳直射热流,最小 $\beta$ 角时比之前大 $170\text{ W/m}^2$ 左右,最大 $\beta$ 角时,比之前大 $1.2\text{ W/m}^2$ ,其余各面的太阳直射热流几乎为0;地球红外辐射热流和地球反照热流与之前相比也均有变化,但是变化不大。由变姿态周期平均外热流数据可以看出, $-Z$ 面的最大平均外热流小于 $4\text{ W/m}^2$ , $\pm X$ 面的最大平均外热流小于 $80\text{ W/m}^2$ , $+Y$ 面的最大平均外热流小于 $110\text{ W/m}^2$ ,在实际应用中,在卫星平台的遮挡下, $\pm X$ 面和 $+Y$ 面的外热流会更小。因此,可以将 $-Z$ 面, $\pm X$ 面和 $+Y$ 面作为良好的散热面。

## 7 结论

空间相机中光学元件对温度变化十分敏感,而外热流是影响光学元件温度变化的重要因素。文中详细论述了太阳同步轨道二维变姿态相机外热流的计算方法,利用文中的公式可以计算出相机任意一天的姿态角和外热流。综合以上研究工作,可以得出如下结论:

(1) 在J2000坐标系下,依据太阳的位置,计算出空间相机的二维姿态角和二维变姿态外热流,同时得出的姿态角为热仿真计算提供了重要的参考依据,节约了大量的时间成本,提高了计算效率。

(2) 在姿态不变的情况下,该方法计算出的外热流数值与I-deas/TMG软件得出的结果误差非常小,且曲线比较吻合,表明该方法得到的数据是可靠的,具有很好的工程参考意义。

(3) 通过对比变姿态与姿态不变外热流的大小及其变化规律确定了散热面的位置,为热设计工作提供了很好的指导。

## 参考文献:

- [1] Li Qiang, Chen Liheng. Thermal design for infrared detectors in complex heat flux [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 0904002. (in Chinese)
- [2] Li Yi, Wu Qingwen, Chen Liheng, et al. Thermal control system of carbon dioxide detection instrument [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(4): 1053-1061. (in Chinese)
- [3] Lu Wei, Huang Jiarong, Zhong Qi. External heat flux on manned transport spacecraft with multiple modes and attitudes [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2011, 31(1): 25-32. (in Chinese)
- [4] Wang Yan, Xu Tao, Hu Bingting, et al. Thermal design of SADA and its detailed temperature distribution in HT condition for geostationary orbit satellite [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2017(5): 490-494. (in Chinese)
- [5] Li J, Yan S, Cai R. Thermal analysis of composite solar array subjected to space heat flux [J]. *Aerospace Science & Technology*, 2013, 27(1): 84-94.
- [6] Liu Yang, Peng Xiaodong, Zhang Hanxun, et al. Study of external heat flux calculation method for interplanetary spacecraft in solar system [J]. *Electronic Design Engineering*, 2017, 25(9): 1-5. (in Chinese)
- [7] Wu Xiaodi, Sun Yunhui, Li Zhi. Spatial heat flux analysis of a satellite in the sun-synchronous orbit [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(7): 805-808. (in Chinese)
- [8] Wang Shuang, Geng Yunhai, Song Daozhe, et al. Computational method for external heat flux of trajectory space on optical system of star sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(10): 468-476. (in Chinese)
- [9] Deng Guijun, Wu Keyong. Calculation on space external thermal flow of sun for space camera in synchronous round orbit [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997, 5(6): 107-112. (in Chinese)

- 邓桂俊, 武克用. 太阳同步圆形轨道空间相机太阳辐射外热流的计算[J]. 光学精密工程, 1997, 5(6): 107-112.
- [10] Yang Huabin, Wu Qingwen, Chen Liheng, et al. Calculation of external heat fluxes on space camera with changing attitudes frequently in Geomagnetic Coordinate system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1923-1928. (in Chinese)
- 杨化彬, 吴清文, 陈立恒, 等. 地磁坐标系下变姿态空间相机的外热流计算 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1923-1928.
- [11] Zhang Renwei. Satellite Orbit Attitude Dynamics and Control [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1998. (in Chinese)
- 章仁为. 卫星轨道姿态动力学与控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998.
- [12] Liu Lin. Spacecraft Orbit Theory [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)
- 刘林. 航天器轨道理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [13] Xi Xiaoning, Wang Wei. Fundamentals of Near-earth Spacecraft Orbit [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2003. (in Chinese)
- 郗晓宁, 王威. 近地航天器轨道基础 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2003.
- [14] Su Yi. New Introduction to Astronomy [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- 苏宜. 天文学新概论[M]. 北京: 科学出版社, 2009.