

地球静止轨道变姿态空间相机的外热流计算

吴愉华^{1,2}, 陈立恒¹, 李 行¹, 李世俊^{1,2}, 杨雨霆^{1,2}

(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)

摘 要: 为了获取中高轨道变姿态空间相机准确的外热流数据, 提出一种求解其变姿态外热流的方法。以地球静止轨道空间相机为例, 首先确定卫星-太阳-地球三者之间的相对位置关系; 然后, 根据相机对日成像的工作任务确定其不同时刻的姿态; 最后, 根据相机姿态变化后的环境映射面以及直接积分法获得的辐射角系数计算相机各表面的瞬时外热流。计算结果表明, 在相同轨道条件下, 相机由于在轨姿态变化导致其接受到的外热流总和比姿态恒定的相机有所减少, 其中春分日总热流减少 372.5 W/m^2 , 冬至日总热流减少 771.5 W/m^2 。入光口所在的+X 面外热流增大了 2 倍左右, 该面进出地球阴影区时外热流在 $0 \sim 1378 \text{ W/m}^2$ 之间剧烈波动。计算结果可指导相机热设计, 该方法同样适用于多维变姿态航天器的外热流计算。

关键词: 外热流; 多维姿态变换; 环境映射面; 地球静止轨道

中图分类号: TH117 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0604001

Computation of external heat fluxes on space camera with attitude change in geostationary orbit

Wu Yuhua^{1,2}, Chen Liheng¹, Li Hang¹, Li Shijun^{1,2}, Yang Yuting^{1,2}

(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)

Abstract: In order to obtain accurate external heat fluxes of space camera with attitude change that works in the medium and high earth orbit, a method to calculate its external heat fluxes was proposed. Taking a geostationary space camera as an example, the relative position among the satellite, the sun and the earth was confirmed firstly. And then the camera's attitude was calculated according to its sun imaging mission. Finally, the instantaneous external heat fluxes on space camera were calculated based on its environmental mapping planes after changing attitude and the radiation view factors given by direct integration method. The result shows that under the same orbit condition, the total external heat fluxes of space camera with attitude change decreases dramatically by 372.5 W/m^2 and 771.5 W/m^2 , in March equinox and December solstice respectively. The external heat fluxes on the +X direction plane where optical entrance is located increases by 2 times, and the external heat fluxes on this plane fluctuates

收稿日期: 2019-01-12; 修订日期: 2019-02-13

基金项目: 中国科学院青年创新促进会基金(2015173)

作者简介: 吴愉华(1994-), 男, 硕士生, 主要从事空间光学遥感器 CAD、CAE、CAM 方面的研究。Email: wuyh_2018@163.com

导师简介: 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

wildly from 0 W/m^2 to 1378 W/m^2 . What's more, these computational results provide a good guidance for camera's thermal design, and this method can as well be applied to calculate the external heat fluxes of spacecraft with multi-dimensional attitude change.

Key words: external heat fluxes; multi-dimensional attitude change; mapping plane for environment; geostationary orbit (GEO)

0 引言

空间外热流是空间相机热设计、热仿真以及热试验重要的环境输入条件,也是影响相机光学系统温度水平的重要因素。准确可靠的空间外热流是空间相机热设计、热分析计算和热试验的前提和保证^[1]。国内外学者已对外热流的计算和分析进行了众多研究,对辐射角系数的计算方法通常有直接积分法和蒙特卡洛法^[2-3]。参考文献[4]通过蒙特卡洛法结合图形加速法,提高了外热流的计算速度。参考文献[5]采用反向蒙特卡洛法计算了星敏感器的空间热流。参考文献[6]利用坐标变换法计算了六面体卫星的轨道外热流。参考文献[7]基于蒙特卡洛法结合环境映射面提出了复杂外结构飞行器的热流计算数学模型。参考文献[8]研究了外热流的变化对太阳帆板的热致振动问题的影响。参考文献[9]在地磁坐标系下基于蒙特卡洛法和环境映射面进行了相机一维变姿态的空间外热流计算。上述参考文献的研究对象大多是在低轨道姿态恒定或一维姿态变化的航天器,对于中高轨道的多维姿态变化的空间相机外热流研究较少。而 IDEAS/TMG 等软件在求解变姿态外热流时需要耗费大量的时间以至于无法计算^[9]。因此,有必要发展一种高效可靠、适合于工程应用的变姿态空间相机外热流计算方法。

为了在地球静止轨道获得实时的太阳观测数据,某相机安装在太阳帆板连接架上,工作时跟随帆板转动,并通过电机驱动镜筒俯仰运动,以保障连续、准确的对日成像要求。为了明确相机的外热流变化规律,必须进行变姿态的外热流计算。文中采用了环境映射面的概念^[7],基于卫星-太阳-地球在 J2000 坐标系中的相对位置关系,同时考虑了季节变化对太阳位置和太阳辐照强度的影响,通过直接积分法获得辐射角系数,计算了地球静止轨道相机姿态实时变化的空间外热流。计算结果为进一步的热分析、

热设计提供了重要的输入条件。

1 基本假设及计算流程

近地轨道的空间外热流主要有太阳直射热流、地球红外热流以及地球反照热流。影响到达空间相机外热流大小的因素主要包括:相机-太阳-地球三者的位置关系、地球公转与季节变化、相机的姿态。忽略空间相机的具体结构形态,将相机简化为六面体。假设太阳光为平行光,且太阳矢量与太阳辐照强度在一个轨道周期内不变。卫星姿态是三轴稳定,空间相机简化后的环境映射面结构和坐标系定义如图 1 所示,其中 $o-x_{\text{sat}}y_{\text{sat}}z_{\text{sat}}$ 为卫星瞬时坐标系, $o-xyz$ 为相机坐标系。 o 位于相机中心, $+x$ 轴方向为飞行方向, $+z$ 轴指向地心, $+y$ 轴由右手定则确定。相机在轨姿态恒定时,相机坐标系 $o-xyz$ 与卫星坐标系 $o-x_{\text{sat}}y_{\text{sat}}z_{\text{sat}}$ 各坐标轴方向一致。

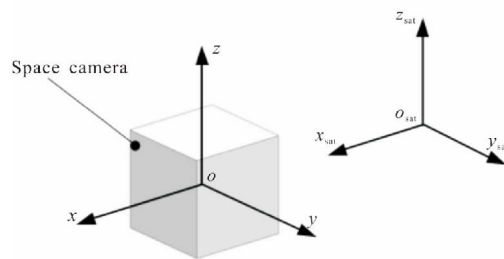


图 1 空间相机坐标系定义

Fig.1 Definition of space camera coordinate

空间相机的变姿态外热流计算流程如图 2 所示。首先由日期 T 可求出当时的太阳位置坐标与太阳辐照强度,接着通过轨道参数求出相机的位置和速度矢量,根据太阳位置坐标确定相机的旋转矩阵以及变姿态角,进而得到相机各表面的环境映射面法向矢量。最后结合太阳辐照强度求出周期 P 内到达相机各面的太阳直射热流 $q_s(t)$ 、地球红外热流 $q_R(t)$ 、地球反照热流 $q_A(t)$ 。

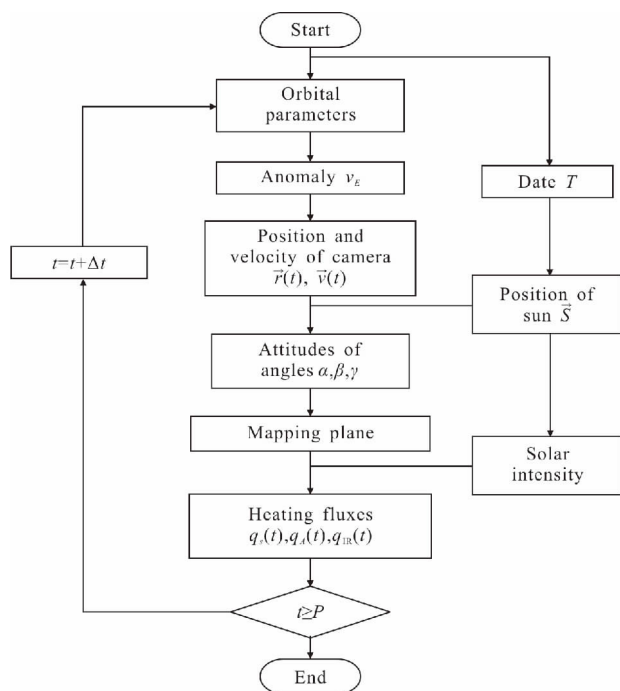


图 2 J2000 坐标系中空间相机变姿态外热流计算流程

Fig.2 Calculation of external heat fluxes of a space camera with attitude change in J2000 coordinate

2 卫星-太阳-地球相对位置关系

图 3 为一年中地球静止轨道上三轴稳定型卫

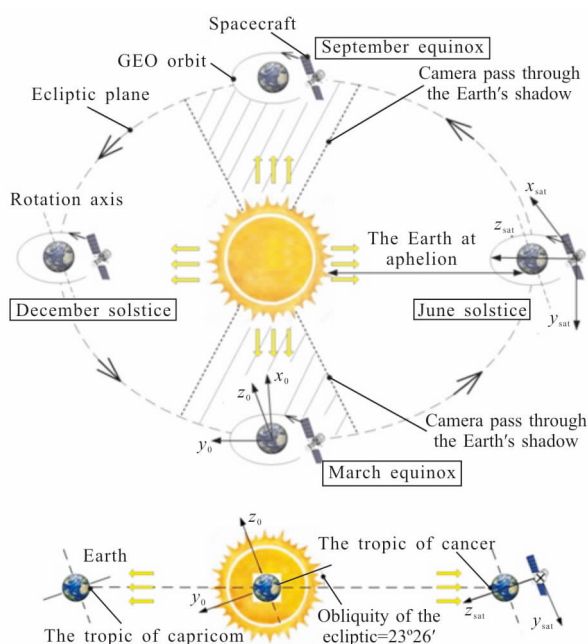


图 3 地球静止轨道三轴稳定型卫星、太阳、地球关系图

Fig.3 Relationship among the GEO three-axis stabilized satellite, sun and earth

星、太阳、地球三者之间的相对位置关系。 $x_0y_0z_0$ 为 J2000 坐标系, 其中 $+x_0$ 轴为地心与春分点的连线, $+z_0$ 轴指向地球北极。 $o-x_{sat}y_{sat}z_{sat}$ 为卫星的瞬时坐标系。由图 3 可知, 地球在夏至达到远日点, 太阳直射北回归线, 在冬至日达到近日点, 太阳直射南回归线。相机在春分日和秋分日前后的几十天里每天的午夜左右进入地球阴影区, 而一年的其余时间里全天受到太阳照射(全日照轨道)。相机穿过阴影区的时长在春分日和秋分日当天达到最长的 72 min^[10], 在地球阴影区时, 相机所有表面均不受到太阳热流作用。

3 太阳矢量和太阳辐照强度

在地心黄道坐标系下, 由开普勒方程可知地球绕太阳公转的真近地角为:

$$v_E = M_E + 1.9148M_E + 0.02\sin(2M_E) + 0.0003\sin(3M_E) \quad (1)$$

式中: M_E 为地球平近点角, 由当前时间 T 确定, 具体计算方法参见参考文献[11]。

太阳黄经为:

$$\lambda_S = v_E + \Pi + 180^\circ \quad (2)$$

式中: Π 为近日点黄经。

球面坐标系下太阳的坐标为:

$$\begin{cases} \alpha_S = \arctan\left(\frac{\sin\lambda_S \cos\varepsilon}{\cos\lambda_S}\right) \\ \delta_S = \arcsin(\sin\lambda_S \sin\varepsilon) \\ R_S = \frac{a_E(1-e_E^2)}{1-e_E \cos v_E} \end{cases} \quad (3)$$

式中: α_S 、 δ_S 和 R_S 分别为太阳赤经、赤纬和日地距离; ε 为黄赤交角; a_E 为地球公转轨道长半轴; e_E 为地球公转轨道偏心率。

将球面坐标转换成直角坐标, 可得 J2000 坐标系下太阳位置矢量 $\vec{Sun} = (x_s, y_s, z_s)$ 。随季节变化的太阳辐照强度为:

$$S = \frac{\bar{S}}{(R_s/R)^2} \quad (4)$$

式中: $\bar{S}$ 为平均太阳辐照强度, 取值 1 367 W/m²; $\bar{R}$ 为平均日地距离。

图 4 为 2019 年 1 月 1 日 12:00 UTC~2020 年 12 月 31 日 12:00 UTC 间, 日地距离与太阳辐照强度随时间的变化曲线。日地距离在 0.98~1.02 AU (1 AU = 14 960 × 10⁴ km) 之间波动, 太阳辐照强度则在 1 322~1 414 W/m² 之间波动。

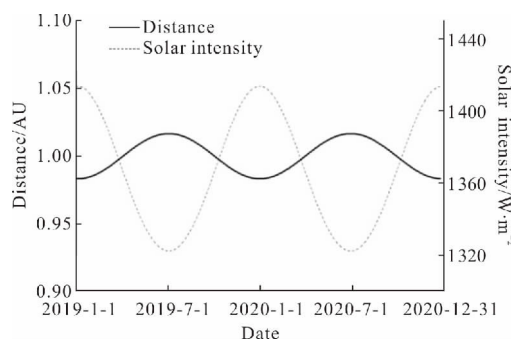


图 4 日地距离与太阳辐照强度随时间变化曲线

Fig.4 Chang curves of Earth-Sun distance and solar intensity over time

4 相机在轨位置、速度矢量

根据轨道根数可计算相机在轨 t 时刻的位置矢量^[12]:

$$\vec{r}(t) = r(t) \cos v(t) \cdot P + r(t) \sin v(t) \cdot Q \quad (5)$$

式中: $v(t)$ 为相机近点角; P 和 Q 是由轨道根数、升交点赤经 α_Ω 、轨道倾角 i 、升交点至近地点角距 ω 确定的矩阵。

$$P = \begin{bmatrix} \cos \alpha_\Omega \cos \omega - \sin \alpha_\Omega \sin \omega \cos i \\ \sin \alpha_\Omega \cos \omega - \cos \alpha_\Omega \sin \omega \cos i \\ \sin \omega \sin i \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$Q = \begin{bmatrix} -\cos \alpha_\Omega \sin \omega - \sin \alpha_\Omega \cos \omega \cos i \\ -\sin \alpha_\Omega \sin \omega - \cos \alpha_\Omega \cos \omega \cos i \\ \cos \omega \sin i \end{bmatrix} \quad (7)$$

将公式(5)对时间求一阶导数, 可得相机 t 时刻的速度矢量:

$$\vec{r}'(t) = -\frac{a^2 n}{r(t)} \sin E(r) \cdot P + \frac{a^2 n}{r(t)} \sqrt{1-e^2} \cos E(r) \cdot Q \quad (8)$$

式中: a 为轨道半长轴; n 为角速度; e 为轨道偏心率。

将以上计算方法在 Matlab 中的计算结果与轨道专业软件 STK 的计算结果进行对比, 如图 5 所示, 在一个轨道周期内, 两种方法得到的位置、速度各项分量均吻合较好, 相对误差小于 5%。

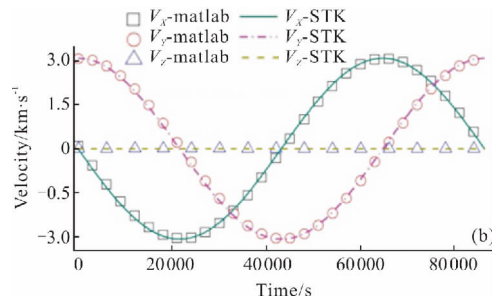
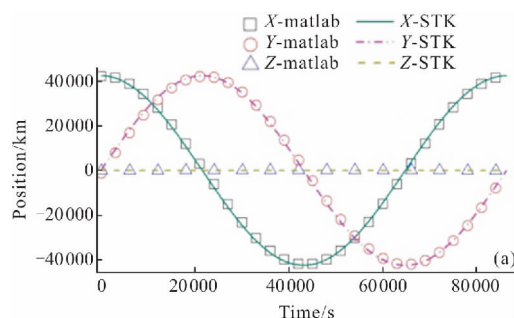


图 5 相机位置矢量和速度矢量的计算结果对比

Fig.5 Comparison of camera's position vector and velocity vector results

5 旋转矩阵及变姿态外热流计算

5.1 旋转矩阵

由公式(5)和(8)可知, 在轨 t 时刻相机在 J2000 坐标系下的位置矢量 $\vec{r}(t)$ 和速度矢量 $\vec{r}'(t)$, 相机姿态变化时, 将相机姿态恒定的环境映射面法向矢量通过旋转矩阵 T 转换到姿态变化的环境映射面法向矢量, 如表 1 所示。

表 1 J2000 坐标系下姿态恒定与姿态变化的各面法向矢量

Tab.1 Normal vector of planes under stable and change attitude in J2000 coordinate

Environmental mapping planes	Normal vector of planes under stable attitude	Normal vector of planes under change attitude
+X	$\vec{r}'(t)/ \vec{r}'(t) $	$T \cdot \vec{r}'(t)/ \vec{r}'(t) $
-X	$-\vec{r}'(t)/ \vec{r}'(t) $	$T \cdot -\vec{r}'(t)/ \vec{r}'(t) $
+Y	$\vec{r}(t)/ \vec{r}(t) \times \vec{r}'(t)/ \vec{r}'(t) $	$T \cdot \vec{r}(t)/ \vec{r}(t) \times \vec{r}'(t)/ \vec{r}'(t) $
-Y	$-\vec{r}(t)/ \vec{r}(t) \times \vec{r}'(t)/ \vec{r}'(t) $	$T \cdot -\vec{r}(t)/ \vec{r}(t) \times \vec{r}'(t)/ \vec{r}'(t) $
+Z	$\vec{r}(t)/ \vec{r}(t) $	$T \cdot \vec{r}(t)/ \vec{r}(t) $
-Z	$-\vec{r}(t)/ \vec{r}(t) $	$T \cdot -\vec{r}(t)/ \vec{r}(t) $

+X 面为相机的入光口所在, 为保持 +X 面对日成像, 经姿态调整后, +X 面法向矢量与太阳位置矢量方向一致:

$$T \cdot \vec{r}'(t)/|\vec{r}'(t)| = \vec{\text{Sun}} \quad (9)$$

J2000 坐标系下, 设相机绕 x_0, y_0, z_0 轴的姿态转动角分别对应为 α, β, γ 。则旋转矩阵表示为:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

联立公式(9)、(10)可求解对应的变姿态角 α 、 β 、 γ 。

5.2 外热流计算

将环境映射面各法向矢量表示为 $\vec{n}_i, i=1\sim6, 1\sim6$ 分别对应相机+X, -X, +Y, -Y, +Z, -Z 面。则在轨 t 时刻到达各个环境映射面的总热流为:

$$q_i(t) = q_{si}(t) + q_{ir}(t) + q_{ai}(t), i=1\sim6 \quad (11)$$

太阳直射热流^[13], 在物理意义上是环境映射面在太阳光方向 $\vec{\text{Sun}}$ 的投影与太阳辐照强度 S 的乘积, 即:

$$q_{si}(t) = \max(\cos\langle \vec{n}_i, \vec{\text{Sun}} \rangle, 0) \cdot S, i=1\sim6 \quad (12)$$

式中: $\vec{\text{Sun}}$ 为太阳位置矢量; S 为太阳辐照强度; $\max$ 为取两者之间的最大值。

地球红外辐射热流为:

$$q_{ir}(t) = E_{ir} \cdot \phi_i, i=1\sim6 \quad (13)$$

一般可认为地球是一个均匀辐射的热平衡体, 红外辐射热流密度 E_{ir} 取 230 W/m^2 。利用直接积分法可推导卫星表面地球红外角系数 ϕ_i , 推导过程参考文献[14]。根据环境映射面法线矢量 $\vec{n}_i$ 与卫-地连线方向 Z_{sat} 的夹角 θ 不同, ϕ_i 分为 3 种状态, 如图 6 所示。

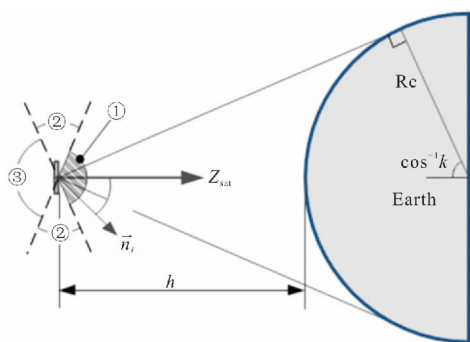


图 6 计算地球红外辐射角系数的三种状态

Fig.6 Three cases of calculating earth infrared radiation view factors

设

$$k = R_e / (R_e + h) \quad (14)$$

式中: R_e 为地球半径; h 为卫星运行轨道高度。

(1) $0 \leq \theta \leq \arccos k$, 环境映射面的延展面和地球不相交, 则

$$\phi_i = k^2 \cos\theta \quad (15)$$

(2) $\cos^{-1}k \leq \theta \leq (180^\circ - \arccos k)$, 环境映射面的延展面与地球相交, 则:

$$\begin{aligned} \phi_i &= k^2 \cos\theta + 1/\pi [\pi/2 - (1-k^2)^{1/2} (k^2 - \cos^2\theta)^{1/2} - \\ &\quad \arcsin((1-k^2)^{1/2}/\sin\theta) - k^2 \cdot \cos\theta \cdot \\ &\quad \arccos((1-k^2)^{1/2}/k \cdot \tan\theta)] \end{aligned} \quad (16)$$

(3) $(180^\circ - \cos^{-1}k) \leq \theta \leq 180^\circ$, 环境映射面正面看不到地球表面, 则:

$$\phi_i = 0 \quad (17)$$

地球反照热流在总热流中占比较小, 通常采用简化的计算方法:

$$q_{ai} = \rho \cdot S \cdot \phi'_i, i=1\sim6 \quad (18)$$

式中: ρ 为地球反照率, 取值约为 0.3。反照角系数利用地球红外角系数 ϕ_i 近似计算:

$$\phi'_i = \phi_i \cdot \cos\Phi \quad (19)$$

式中: Φ 为相角, 即阳光与卫-地连线的夹角。

$$\Phi = \max(Z_{sat} \cdot -\vec{\text{Sun}} / |Z_{sat}| \cdot |\vec{\text{Sun}}|, 0) \quad (20)$$

6 计算结果及分析

某对日成像空间相机工作在地球静止轨道, 轨道高度 35 786 km, 周期为 86 164 s。选取春分日和冬至日两个典型工况进行外热流计算。图 7 是 Matlab

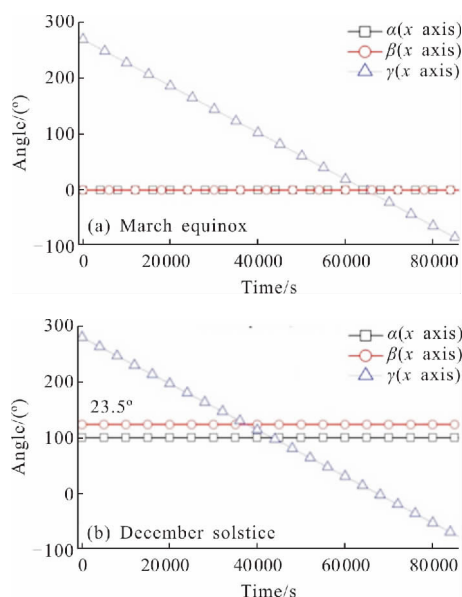


图 7 J2000 坐标系下相机春分日和冬至日的姿态角变化

Fig.7 Camera's attitude angle in March equinox and December solstice in J2000 coordinate change over time

计算的 J2000 坐标系下相机在春分日和冬至日一个轨道周期中姿态转角的变化。由图 7 可知,由于相机在地球静止轨道上做匀速圆周运动,所以相机跟随帆板绕 z 轴的转动角 γ 为线性变化,在一周期内变化幅度为 360° 。镜筒俯仰轴位于 xy 平面内,俯仰轴转角在 x 、 y 轴的分量 α 和 β 在春分日均为 0° ,在冬至日则分别为 0° 和 23.5° 。这与太阳在春分日直射赤道、在冬至日直射南回归线的理论结果相吻合,也说明相机绕俯仰轴的转动角度与当前的太阳 β 角,即太阳光矢量和卫星轨道面法向之间的夹角有关。

图 8~13 是分别利用 Matlab 程序(相机姿态不变和姿态变化)和 IDEAS/TMG 软件(在轨姿态不变)计算的空间相机在春分日和冬至日 $\pm X$ 、 $\pm Y$ 、 $\pm Z$ 面的外热流随时间变化曲线。

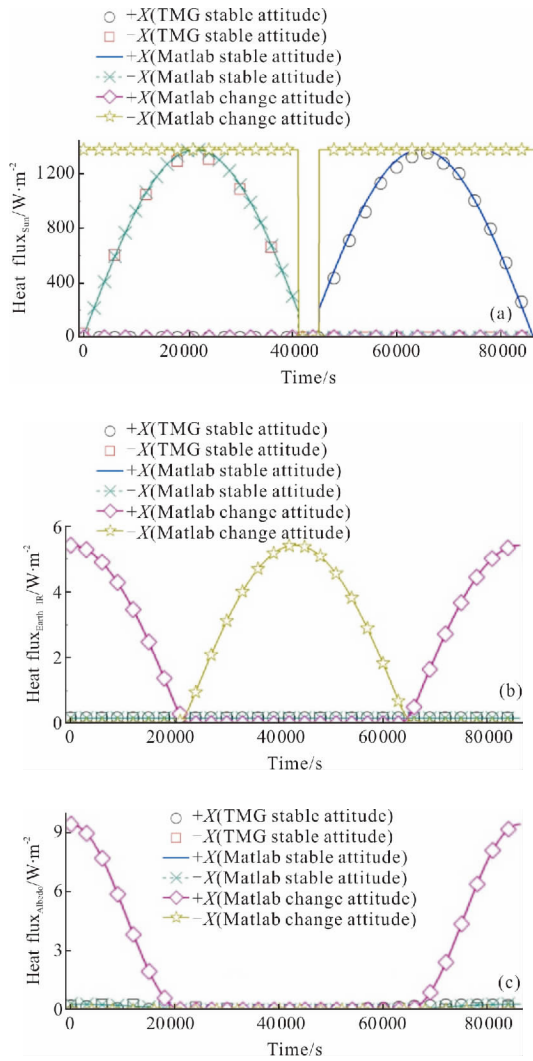


图 8 春分日相机 $\pm X$ 面春分外热流曲线

Fig.8 External heat flux of camera's $\pm X$ surfaces in March equinox

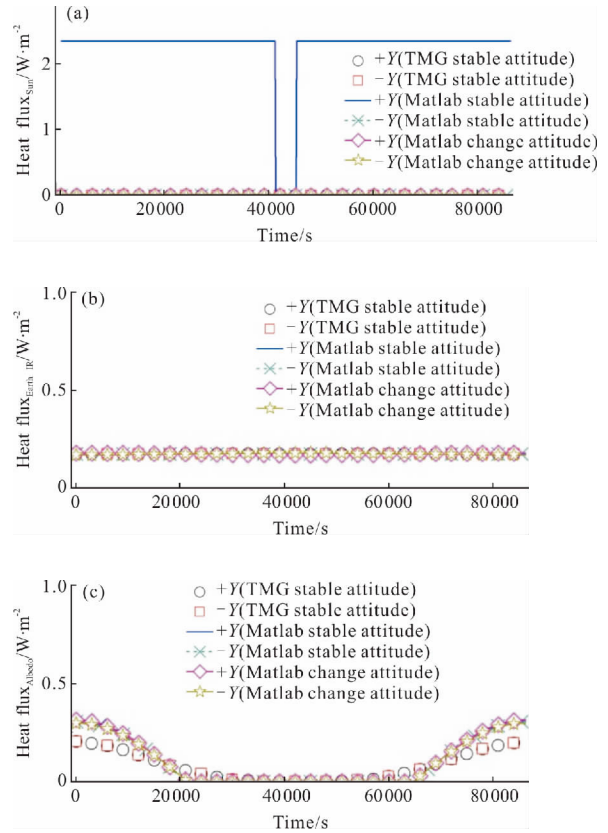
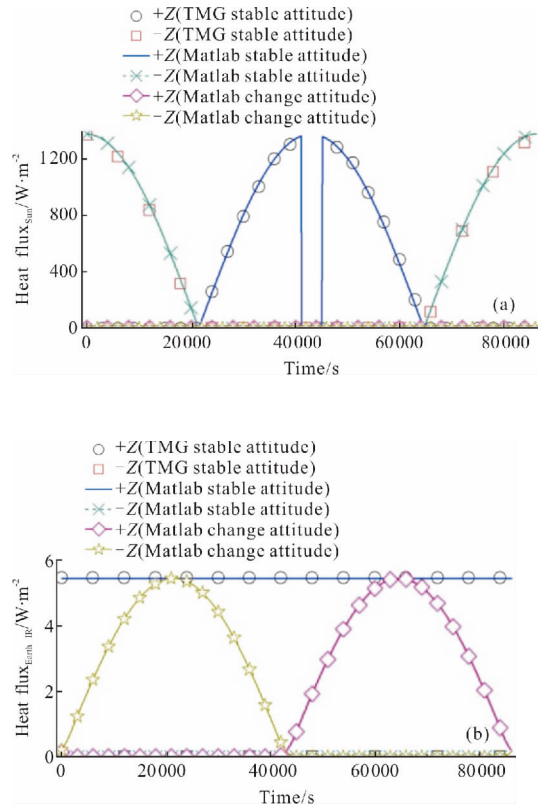


图 9 春分日相机 $\pm Y$ 面春分外热流曲线

Fig.9 External heat flux of camera's $\pm Y$ surfaces in March equinox



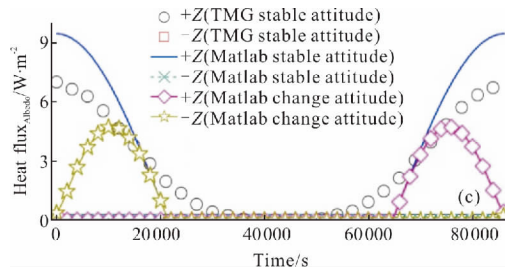


图 10 春分日相机±Z 面外热流曲线

Fig.10 External heat flux of camera's ±Z surfaces in March equinox

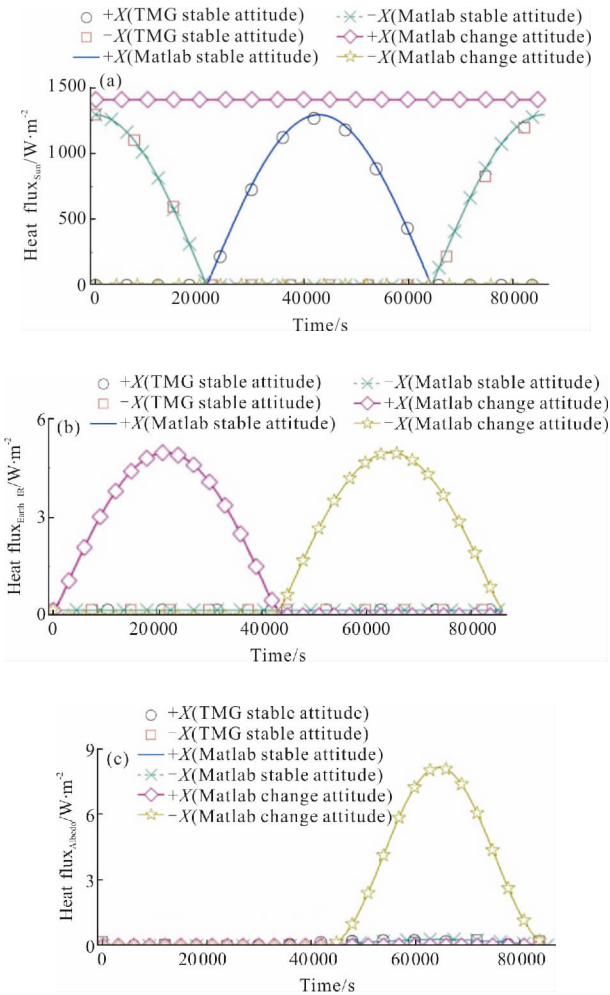


图 11 冬至日相机±X 面外热流曲线

Fig.11 External heat flux of camera's ±X surfaces in December solstice

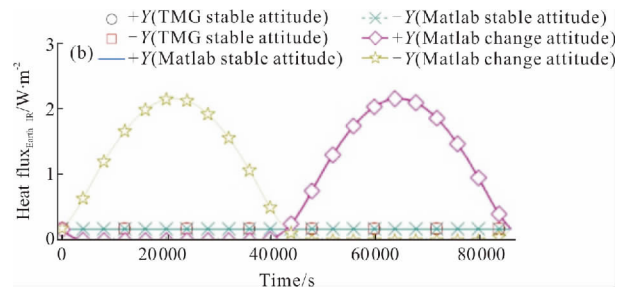
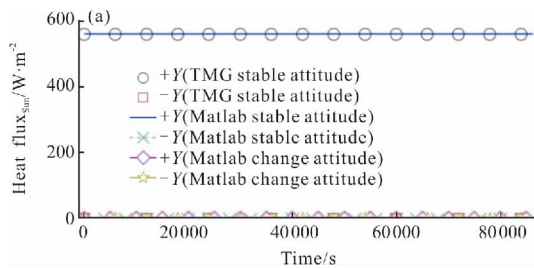


图 13 冬至日相机±Z 面外热流曲线

Fig.13 External heat flux of camera's ±Z surfaces in December solstice

根据计算结果,整理春分日和冬至日各表面的周期平均外热流,分别如表 2、3 所示。

从外热流曲线图 8~13 可看出:IDEAS/TMG 软件和 Matlab 程序在计算相机姿态不变时的外热流规律非常吻合,同时可直观看到相机姿态变化对各表面外热流的影响。当相机发生姿态变化时, $-X$ 、 $\pm Y$ 、 $\pm Z$ 面的太阳直射外热流均降至 0 W/m^2 , $+X$ 面的太阳直射热流等于太阳辐照强度。各表面的地球红外热流和地球反照热流在 $0\sim 10 \text{ W/m}^2$ 之间,变化范围较小。

从表 2 和表 3 可知:IDEAS/TMG 软件和 Matlab 两者计算相机姿态恒定时各个表面的周期平均外热流误差均在 5% 以内。说明了在此基础上计算变姿态外热流是准确可信的。在相同轨道条件下,相机

由于在轨姿态变化导致其接受到的外热流总和比姿态恒定的相机有所减少,其中春分日总热流减少 372.5 W/m^2 ,冬至日总热流减少 771.5 W/m^2 。

相机 $+X$ 面是相机的入光口的位置, $+X$ 面外热流的变化直接影响相机内光学系统的温度环境。由表 2 和 3 可知: $+X$ 面在变姿态时的外热流是姿态恒定外热流的 3 倍左右,这说明相机实际工作时 $+X$ 面长期受到太阳直射,热环境恶劣。图 8 反映出 $+X$ 面在进出地球阴影区时,太阳直射热流在 $0\sim 1378 \text{ W/m}^2$ 之间跳变。因此在后续的热设计和热分析中需要对 $+X$ 面进行针对性的隔热和热控涂层设计。相应的,相机的 $-X$ 、 $\pm Y$ 、 $\pm Z$ 面长期没有太阳照射,只有微弱的地球红外热流和地球反照热流,可设计为相机的散热面。

表 2 春分日各表面周期平均外热流(单位: W/m^2)

Tab.2 External heat fluxes of surfaces in March equinox on period average (Unit: W/m^2)

Mapping planes for environment		+X	-X	+Y	-Y	+Z	-Z	Total heat fluxes
Camera under stable attitude (TMG)	Heat flux _{Sun}	425.6	425.6	0.0	0.0	374.3	412.8	1 647.5
	Heat flux _{Earth IR}	0.2	0.2	0.2	0.2	5.4	0.0	
	Heat flux _{Albedo}	0.1	0.1	0.1	0.1	2.6	0.0	
Camera under stable attitude (Matlab)	Heat flux _{Sun}	436.1	436.6	2.2	0.0	375.1	438.7	1 698.3
	Heat flux _{Earth IR}	0.2	0.2	0.2	0.2	5.4	0.0	
	Heat flux _{Albedo}	0.1	0.1	0.1	0.1	3.0	0.0	
Camera under changing attitude (Matlab)	Heat flux _{Sun}	1314.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1 325.8
	Heat flux _{Earth IR}	1.7	1.7	0.2	0.2	1.7	1.7	
	Heat flux _{Albedo}	0.0	2.4	0.1	0.1	0.8	0.8	

表 3 冬至日各表面周期平均外热流(单位: W/m^2)

Tab.3 External heat fluxes of surfaces in December solstice on period average (Unit: W/m^2)

Mapping planes for environment		+X	-X	+Y	-Y	+Z	-Z	Total heat fluxes
Camera under stable attitude (TMG)	Heat flux _{Sun}	401.4	401.4	561.4	0.0	401.4	405.9	2 180.6
	Heat flux _{Earth IR}	0.2	0.2	0.2	0.2	5.4	0.0	
	Heat flux _{Albedo}	0.1	0.1	0.1	0.0	2.6	0.0	
Camera under stable attitude (Matlab)	Heat flux _{Sun}	412.5	412.5	562.1	0.0	412.5	412.5	2 221.5
	Heat flux _{Earth IR}	0.2	0.2	0.2	0.2	5.4	0.0	
	Heat flux _{Albedo}	0.1	0.1	0.1	0.1	2.8	0.0	
Camera under changing attitude (Matlab)	Heat flux _{Sun}	1 412.4	0.0	0.0	0.0	0.0	25.3	1 450.0
	Heat flux _{Earth IR}	1.6	1.6	0.7	0.7	1.7	1.7	
	Heat flux _{Albedo}	0.0	2.0	0.9	0.0	0.7	0.7	

7 结 论

文中以地球静止轨道空间相机为研究对象,根据相机在轨时对日成像的工作任务和在轨时间判定其姿态,结合当前时刻的太阳位置及太阳辐照强度计算相机姿态变化的空间外热流。该计算方法为求解中高轨道空间相机变姿态外热流提供了一种有效的手段,计算结果可为后续针对性的热控设计提供参考。综合文中的工作,可得到以下结论:

(1) 利用环境映射面的概念,结合直接积分法求解辐射角系数的方法有效解决了空间相机变姿态外热流的计算问题。该方法和 IDEAS/TMG 软件在计算不变姿态的外热流时误差在 5% 以内,有较好的工程意义。

(2) 对于中高轨道的航天器,太阳直射是主要的外热流影响因素。对于对日成像空间相机,其变姿态角取决于当前的太阳 β 角。相机姿态变化后,热流总和有所减少,其中春分日总热流减少 372.5 W/m^2 ,冬至日总热流减少 771.5 W/m^2 。入光口(+X 面)的外热流增大了 2 倍左右,且该面在进出阴影区时外热流发生跳变。

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] Taylor R P, Luck R. Comparison of reciprocity and closure enforcement methods for radiation view factors [J]. *Journal of Thermophysics & Heat Transfer*, 2015, 9(4): 660–666.
- [3] Howell J R. The Monte Carlo method in radiative heat transfer [J]. *Transactions of the Asme Serie C Journal of Heat Transfer*, 1998, 120(3): 547–560.
- [4] Chen Jie, Wu Xiaodi, Yang Xing, et al. Calculation of spatial heat flux based on improved monte carlo algorithm [J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(1): 91–94. (in Chinese)
- [5] 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(10s): 468–476. (in Chinese)
- [6] Yang Li, Lv Xiangyin, Jin Wei, et al. Satellite orbit radiant heat flux calculation using method of coordinate transformation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2159–2163. (in Chinese)
- [7] Sun Chuang, Xia Xinlin, Dai Guilong. A calculational method for environment heat flux on spacecraft with complicated structure [J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(3): 683–687. (in Chinese)
- [8] Li Junlan, Yan Shaoze. Thermally induced vibration of composite solar array with honeycomb panels in low earth orbit [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 71(1): 419–432.
- [9] 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)
- [10] Zhao Zhenming, Wang Bing, Gao Juan. Preliminary research on the thermal design methods of the geosynchronous orbit staring camera [J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2010, 31(3): 34–40. (in Chinese)
- [11] Yang Huabin. Study on the key technique of thermal control for wide angle aurora image [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
- [12] Xi Xiaoning, Wang Wei. Fundamentals of Near-earth Spacecraft Orbit [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2003. (in Chinese)
- [13] Min Guirong. Thermal Control Technologies of Satellite [M]. Beijing: Astronautic Press, 1991. (in Chinese)
- [14] Hou Zengqi, Hu Jing'ang. Spacecraft Thermal Control Technology [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2007. (in Chinese)