

地磁坐标系下变姿态空间相机的外热流计算

杨化彬^{1,2}, 吴清文¹, 陈立恒¹, 何飞¹, 张旭升¹

(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: 为了提供准确的空间相机外热流数据, 提出一种在地磁坐标系下进行频繁姿态变换的空间相机瞬态外热流计算方法。首先, 确定了在 J2000 坐标系下太阳—地球的相对位置及太阳辐照强度; 其次, 计算相机不同位置的地磁纬度, 并采用二分法得到相机在轨运行时进出高磁纬地区 ($|L| \geq 60^\circ$) 的轨道时间; 然后, 依据其地磁纬度, 确定相机不同时刻下的在轨姿态。最后, 采用蒙特卡洛法(MCM)计算相机的各环境映射面的轨道视角系数, 进而得出整轨周期内各环境映射面接受的瞬时外热流。此方法与 IDEAS/TMG 软件的外热流结果能够较好的吻合。与姿态稳定的相机相比, 空间相机姿态频繁变化会导致外热流数值的明显波动。尤其是入光口所在的+Z 面, 其波动范围为 0~1 245.4 W/m²。

关键词: 外热流; 姿态变换; 地磁坐标系; 空间相机

中图分类号: TH117 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)06-1923-06

Calculation of external heat fluxes on space camera with changing attitudes frequently in Geomagnetic Coordinate system

Yang Huabin^{1,2}, Wu Qingwen¹, Chen Liheng¹, He Fei¹, Zhang Xusheng¹

(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 provide the external heat flux of space camera accurately, a method was proposed to calculate the instantaneous external heat fluxes of a space camera with changing attitudes frequently depending on its position in the Geomagnetic Coordinate system (MAG). First, in J2000 Coordinate the relative position of the sun, earth and radiation intensity of sun was calculated. Second, geomagnetic latitudes of a camera and orbital times when camera entered or exited from high geomagnetic latitudes ($|L| \geq 60^\circ$) were calculated. Then, the camera's attitudes were ensured with geomagnetic latitudes. Finally, orbital view factors of six mapping planes were achieved by the Monte Carlo Method(MCM) and the instantaneous external heat fluxes was obtained during the on-orbit time. The external heat fluxes of this paper were consentaneous with the software IDEAS/TMG. Compared with the stable attitude camera, the attitude varieties of the camera take a relatively strong influence on the external heat flux, especially

收稿日期: 2014-10-13; 修订日期: 2014-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(41204102)

作者简介: 杨化彬(1988-), 男, 博士生, 主要从事空间光学传感器热设计及热试验方面的研究。Email: kingw2010@163.com

导师简介: 吴清文(1968-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学精密仪器 CAD/CAE 及空间光学传感器热控技术的研究工作。

Email: wuqw@ciomp.ac.cn

for the +Z-direction where optical entrance is located. The fluctuation range of the +Z-direction external heat flux is about 0–1 245.4 W/m².

Key words: external heat fluxes; change attitude; Geomagnetic Coordinate system; space camera

0 引言

为了在高磁纬地区获得 130°×130° 的超大视场角,某空间相机采用沿轨道飞行方向进行扫描的特殊成像方式,以保证获得足够大视场角。为保障空间相机正常工作的热环境,必须明确相机外热流的变化规律。

关于外热流的影响及分析国内外已经有了一系列的研究。Junlan Li 等^[1]在做复杂构型的太阳能电池板的热分析中考虑到了飞行姿态对太阳能电池板外热流的影响。秦文波等^[2]根据辐射传热基本原理和计算对象的几何物理特点,基于节点热网络法提出了空间实验室尾部变轨发动机组和对接机构组合系统的热分析数学模型。翁建华等^[3]利用蒙特卡洛法(MCM)计算空间任意形状凸面的轨道空间外热流。宁献文等^[4]通过合理的分析和简化,推导出倾斜轨道六面体卫星空间外热流的解析模型。张涛等^[5]根据角系数的假设条件和兰贝特定律,采用能束均匀分布法(RUD)计算出近地轨道外热流。

上述文献的外热流计算进行研究,忽略了季节变化对太阳矢量和太阳常数的影响。随着微小卫星的广泛应用和任务特点需求,卫星或有效载荷的姿态变化日益增多。在热仿真计算时,卫星过于频繁的姿态变化,使得软件在轨道视角系数计算时耗费了大量的时间。例如就文中的大视场摆扫式空间相机而言,如果使用软件 IDEAS/TMG 计算其外热流,当相机在轨无姿态变化时,一次外热流计算只需要 20 min 左右;然而考虑相机在轨姿态变化时,计算外热流所需时间约为 80 h。

另外文中相机的姿态是根据其在轨磁纬而变化的,而几乎所有商业热分析软件都没有提供相应的计算方法。所以为了简化计算,节省计算时间和资源,文中基于相机在地心磁场坐标系中的位置坐标,计算大视场频繁摆扫式空间相机的外热流,采用环境映射面的概念^[6],忽略卫星和空间相机具体的结构形态。

1 基本假设和计算流程

各个面外热流大小不仅与太阳-地球-卫星的位置相关,还与航天器的姿态有关。卫星姿态是三轴稳定对地定向,卫星坐标系为 $O_{\text{sat}}-X_{\text{sat}} Y_{\text{sat}} Z_{\text{sat}}$,可定义空间相机瞬时坐标系 $O-XYZ$,原点 O 位于相机中心处,+Z 轴方向指向地心,+X 轴方向是相机飞行方向,+Y 轴根据右手螺旋定则确定,具体如图 1 所示。图 1 中 φ 、 θ 、 ψ 分别表示空间相机姿态变换的横滚角、俯仰角、偏航角。

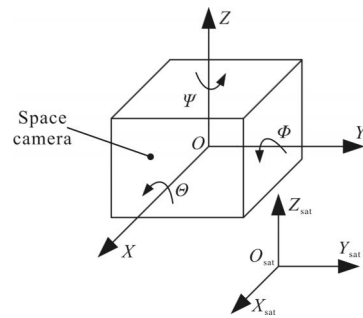


图 1 空间相机坐标系定义

Fig.1 Define coordinates definition of space camera

通常情况下,相机可通过反射镜摆动获取较大的视场。但是综合考虑光机结构的特殊需求,文中所提到的空间相机采取了镜头转动的方式,以满足在高磁纬地区获得 130°×130° 的超大视场角的任务需求。

为了简化计算,采用以下基本假设:

- (1) 忽略一天内太阳位置的变化,即太阳辐照强度和太阳矢量在一天中保持恒定;
- (2) 太阳光在地球表面附近为平行光;
- (3) 把相机简化为六面体,不考虑空间相机具体的结构形态。

图 2 是基于地磁纬度姿态变化的空间相机外热流计算流程图。太阳在 J2000 坐标系中的位置及其对地球的辐照强度可由当前时间 T 确定。根据 6 个轨道要素和相机在轨 t 时刻的真近点角 $\nu(t)$ 能够确定相机的空间位置矢量 $\vec{r}(t)$ 。太阳同步轨道通过升交

点或降交点地方时和太阳位置计算升交点赤经 α_Ω 。再经过相应的空间坐标系转换,可以得到相机当前位置的地磁纬度 $L(t)$ 。

根据进出高磁纬区的时间,可确定相机当前轨道时刻 t 的姿态,进而得到外热流投射系数矩阵 $TM(t)$ 。已知当前时间太阳位置、太阳辐照强度、轨道时刻 t 的相机位置和外热流投射系数矩阵,最终可以得到 t 时刻相机各面接受到的太阳直射热流 $q_s(t)$ 、地球反照热流 $q_{IR}(t)$ 和地球红外热流 $q_A(t)$ 。

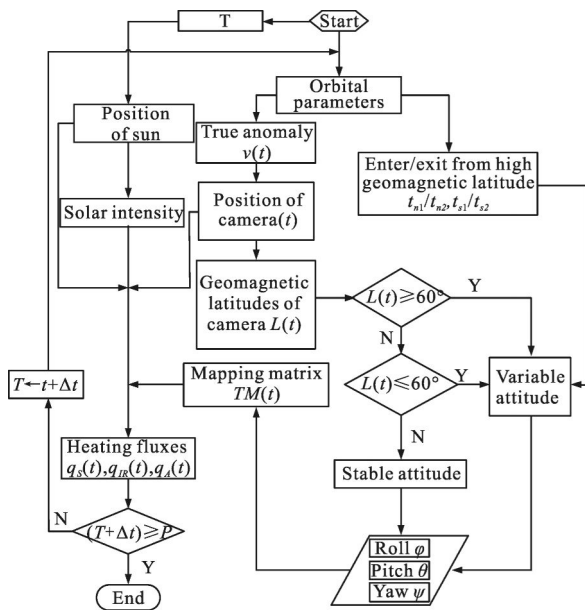


图 2 地磁坐标系下姿态变化的空间相机外热流计算
Fig.2 Calculation of external heat flux of a space camera with complicated attitudes in the Geomagnetic Coordinate

2 太阳位置及其辐照强度

在太阳黄道坐标系中,地球平近日角为:

$$M_E = M_0 + M_v \times (t - t_{200}) \quad (1)$$

式中: M_0 是 2000 年 1 月 1 日 12:00 UTC 的地球平近日角, 数值为 357.5291° ; M_v 是地球绕太阳公转的平近日角速度, $0.985\ 600\ 28$ ($^\circ$)/day; t 为当前时刻对应的儒略日, t_{200} 为 2000 年 1 月 1 日 12:00 UTC 对应的儒略日。

根据开普勒方程, 地球绕太阳公转的真近日角为:

$$v_E = M_E + 1.914\ 8\sin M_E + 0.02\sin(2M_E) + 0.000\ 3\sin(3M_E) \quad (2)$$

在地心黄道坐标系下, 太阳黄经计算公式是:

$$\lambda_S = v_E + \Pi + 180^\circ \quad (3)$$

式中: Π 为地球近日点黄经, 其值为 $102.937\ 2^\circ$ 。因此, 太阳的赤经、赤纬分别如下:

$$\begin{cases} \alpha_S = \arctan\left(\frac{\sin \lambda_S \cos \varepsilon}{\cos \lambda_S}\right) \\ \delta_S = \arcsin(\sin \lambda_S \sin \varepsilon) \\ R_S = \frac{a_E(1 - e_E^2)}{1 - e_E \cos v_E} \end{cases} \quad (4)$$

式中: α_S 为太阳赤经; δ_S 为太阳赤纬; R_S 为太阳与地球之间的距离; ε 为黄赤交角, 其值为 23.5° ; a_E 是地球公转轨道长半轴, 数值为 $1.495\ 982\ 61 \times 10^8$ km; e_E 为地球公转轨道偏心率, 数值为 0.016 7。

把上式球面坐标转换到直角坐标系, 即可得到在 J2000 坐标系下太阳位置矢量 $\vec{s} = (x_S, y_S, z_S)$ 。

故随季节变化的太阳辐照强度为:

$$S = \frac{\bar{S}}{(R_S / (1.495\ 978\ 707 \times 10^8))^2} \quad (5)$$

式中: $\bar{S} = 1367.5$ W/m²。图 3 为 2014 年 1 月 1 日 12:00 UTC 到 2015 年 12 月 31 日 12:00 UTC 期间, 日地距离和太阳辐照强度随时间的变化曲线。其中日地间距离的单位是天文单位 (AU), 一直在 1AU 附近波动, 太阳辐照强度的最大值是 $1\ 414.4$ W/m², 最小值取 $1\ 322.9$ W/m²。

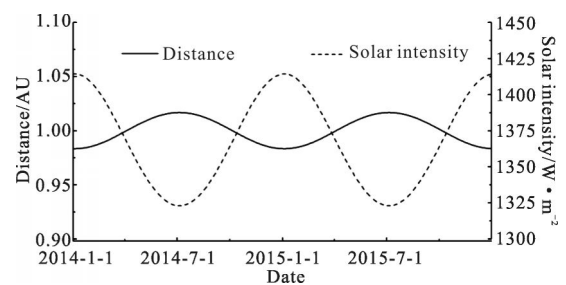


图 3 日地距离与太阳辐照强度

Fig.3 Distance between the Sun and Earth and solar flux

3 计算相机在轨的地磁纬度

假定相机在轨时刻 t 时真近日角为 $v(t)$, 在 J2000 坐标系下, 相机位置矢量 $\vec{r}(t) = (x(t), y(t), z(t))$ 的计算方法可参见文献[7]。为了得到相机在轨的地磁纬度 $L(t)$, 需要分别得到 J2000 下的坐标转换到地心惯性坐标系(GEI)的转换矩阵 P_1 , 地心惯性坐标系到地理坐标系(GEO)的转换矩阵 P_2 , 地理坐标系到

的法向矢量分别为 $\vec{n}_1, \vec{n}_2, \vec{n}_3, \vec{n}_4, \vec{n}_5, \vec{n}_6$ 。

在轨时刻 t 的相机姿态角分别为 $\varphi(t), \theta(t), \psi(t)$, 在 $O_{sat} X_{sat} Y_{sat} Z_{sat}$ 坐标系下, 相机转过一定的姿态角后, 其各环境映射面对应的法向矢量为:

$$\vec{n}'_i(t) = \langle -\varphi(t), X \rangle \langle -\theta(t), Y \rangle \langle -\psi(t), Z \rangle \times \vec{n}_i, \quad i=1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (12)$$

所以, t 时刻外热流投射系数矩阵为:

$$TM(t) = \begin{bmatrix} T_{11}(t) & T_{12}(t) & \cdots & T_{16}(t) \\ T_{12}(t) & T_{22}(t) & \cdots & T_{26}(t) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T_{16}(t) & T_{26}(t) & \cdots & T_{66}(t) \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: $T_{ij}(t) = \max(\cos \langle \vec{n}_i, \vec{n}'_j(t) \rangle, 0)$, 其中 $i, j=1, 2, 3, 4, 5, 6$ 。

5 外热流计算

设在轨时间为 t , 经过坐标转换将 J2000 坐标系下的太阳矢量 \vec{s} 转换到 t 时刻卫星瞬时坐标系 $O_{sat} X_{sat} Y_{sat} Z_{sat}$ 下, 记为 $\vec{s}_{sat}(t)$, 则在 t 时刻到达各环境映射面的太阳辐射热流为:

$$q_S(t) = [q_{S1}(t), q_{S2}(t), q_{S3}(t), q_{S4}(t), q_{S5}(t), q_{S6}(t)]_{1 \times 6} \times TM(t) \quad (14)$$

式中: $q_{Si}(t) = \max(\cos \langle \vec{n}_i, \vec{s}_{sat}(t) \rangle \cdot S, 0)$, 其中 $i=1, 2, 3, 4, 5, 6$ 。

文中将采用适应性强、计算精度高的蒙特卡罗法(MCM)^[9]计算各辐射面对地球表面的角系数, 再结合角系数的相对性, 便可高效准确地计算出地球表面对各辐射面的角系数, 依次为 $F_{IR,1}(t), F_{IR,2}(t), F_{IR,3}(t), F_{IR,4}(t), F_{IR,5}(t)$ 和 $F_{IR,6}(t)$, 故相机整轨姿态不变条件下, 地球红外辐射角系数矩阵 F_{IR} 计算公式如下:

$$F_{IR}(t) = [F_{IR,1}(t), F_{IR,2}(t), F_{IR,3}(t), F_{IR,4}(t), F_{IR,5}(t), F_{IR,6}(t)]_{1 \times 6} \quad (15)$$

至此, 各环境辐射面接受到的地球红外辐射热流为:

$$q_{IR}(t) = [F_{IR}(t) \cdot E_{Earth}]_{1 \times 6} \times TM(t) \quad (16)$$

地球反照热流在航天器总外热流中所占比例很小, 因此热设计中一般采用简化的计算方法。所以各环境映射面接受的地球反照热流为:

$$q_A(t) = [F_A(t) \cdot \rho \cdot S]_{1 \times 6} \times TM(t) \quad (17)$$

式中: $F_A(t)$ 为地球反照视角系数; ρ 为地球反照率, 取值约为 0.35。

6 计算分析

某空间相机的轨道类型为近极地太阳同步轨道, 轨道倾角为 98.753° , 轨道偏心率为 0.0025, 轨道高度 825 km, 近地点角距为 0° , 升交点地方时 13:40, 过近地点时间是 2015 年 1 月 4 日 12:00 UTC, 此时地球位于冬至点附近。

图 5 和图 6 分别是利用 IDEAS/TMG 软件(相机在轨姿态不变)和 Matlab 程序(相机在高磁纬区姿态变化)计算的相机 $\pm Z$ 面、 $\pm X$ 面外热流随时间变化曲线。当相机经过低磁纬地区时, 由于其姿态无变化, IDEAS/TMG 软件和 Matlab 编程计算的外热流结果非常吻合。当相机进入高磁纬地区时, 相机开始绕 $+Y$ 轴在 $-60^\circ \sim +60^\circ$ 范围内俯仰运动, 相应的 $\pm Z$ 面、 $\pm X$ 面外热流也发生剧烈的波动。

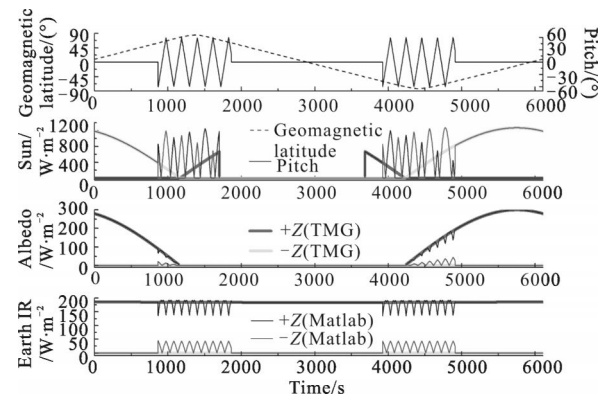


图 5 相机 $\pm Z$ 面外热流曲线

Fig.5 External heat flux from $\pm Z$ direction in camera

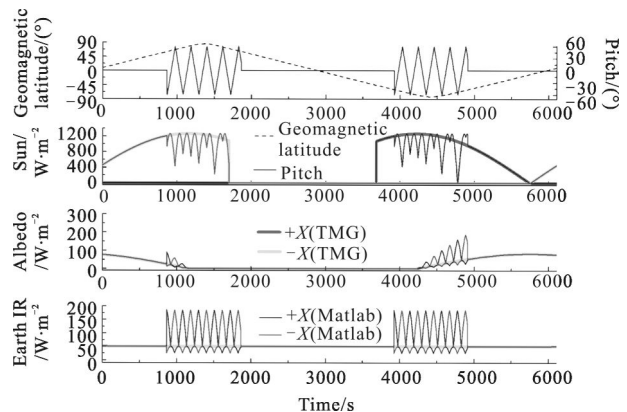


图 6 相机 $\pm X$ 面外热流曲线

Fig.6 External heat flux from $\pm X$ direction in camera

+Z 面是相机入光口的位置所在。+Z 面外热流的变化直接影响到光学系统中反射镜的温度水平和温度分布,进而可能会对相机的成像质量产生一定的影响。从图 5 中可以看出:相机在通过高磁纬地区时,相机±Z 面地球反照热流和地球红外热流都存在波动,但是它们的波动范围都比较小;而±Z 面太阳直射热流波动范围为 0~1 245.4 W/m²,波动非常剧烈。因此在后续的热设计和热分析中必须充分考虑这种剧烈波动的外热流对相机光学系统带来的直接影响。由图 6 可以看出:到达+X 面太阳直射热流、地球反照热流、地球红外热流的最大值分别为 1 266.6、186.7、184.8 W/m²,-X 面与+X 面的外热流变化规律近似,只是热流到达的时间点不同。

7 结 论

空间相机中光学元件对温度变化十分敏感,而作为热控系统设计基础数据的外热流数值成为影响光学元件温度的重要外部因素。文中以大视场摆扫式空间相机为例,根据相机经过的磁纬度和在轨时间判定其姿态,最终总结出地磁坐标系中变姿态空间相机的外热流计算方法,得出某空间相机复杂姿态变换下的瞬时外热流。综合上述研究工作,得出以下结论:

(1) 首次在地磁坐标系下,依据相机的地磁纬度,计算出空间相机姿态。

(2) 在无姿态变化情况下,该计算方法的外热流数值与 IDEAS/TMG 软件计算的结果误差很小,曲线非常吻合,说明此方法计算所得的数据是可以信赖的,具有较好的工程参考意义。

(3) 通过引入外热流投射系数矩阵可以极大地提高复杂姿态变换下的外热流计算效率。

参考文献:

- [1] Li Junlan, Yan Shaoze, Cai Renyu. Thermal analysis of composite solar array subjected to space heat flux [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2013, 27: 84-94.
- [2] Qin Wenbo, Cheng Huier. Thermal analysis of docking mechanism at the tail of space laboratory during orbit changing [J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(3): 1276-1281. (in Chinese)
- [3] 秦文波,程惠尔. 空间实验室尾部对接机构变轨期间热分析研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(3): 1276-1281.
- [3] Weng Jianhua, Pan Zengfu, Min Guirong. A method of calculating external heat fluxes on arbitrary shaped convex surface of spacecraft [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 1994, 2: 11-18. (in Chinese)
- 翁建华,潘增富,闵桂荣. 空间任意形状凸面的轨道空间外热流计算方法[J]. 中国空间科学技术, 1994, 2: 11-18.
- [4] Ning Xianwen, Zhang Jiayun, Jiang Hai, et al. Extreme external heat flux analytical model for inclined orbit hexahedral [J]. *Journal of Astronautics*, 2008, 29 (3): 754-759. (in Chinese)
- 宁献文,张加迅,江海,等. 倾斜轨道六面体卫星极端外热流解析模型[J]. 宇航学报, 2008, 29(3): 754-759.
- [5] Zhang Tao, Sun Bing. Numerical computation of external heat flux of low earth orbit spacecraft by RUD [J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(1): 338-343. (in Chinese)
- 张涛,孙冰. 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.
- [6] 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)
- 孙创,夏新林,戴贵龙. 飞行器复杂外结构的环境热流计算方法[J]. 宇航学报, 2011, 32(3): 683-687.
- [7] 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.
- [8] Finlay C C, Maus S, Beggan C D, et al. International geomagnetic reference field: the eleventh generation [J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 183: 1216-1230.
- [9] Tan Heping, Xia Xinlin, Liu Linhua, et al. Numerical Calculation of Infrared Radiation Properties and Transfer [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. (in Chinese)
- 谈和平,夏新林,刘林华,等. 红外辐射特性与传输的数值计算 [M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2006.