

空间目标轨道外热流计算及辐射特性研究

郑鸿儒 马岩 张帅 王建超 曲友阳

Calculation of orbit external heat flow and radiation characteristics of space target

ZHENG Hong-ru, MA Yan, ZHANG Shuai, WANG Jian-chao, QU You-yang

引用本文:

郑鸿儒, 马岩, 张帅, 王建超, 曲友阳. 空间目标轨道外热流计算及辐射特性研究[J]. *中国光学*, 2024, 17(1): 187-197. doi: 10.37188/CO.2023-0033

ZHENG Hong-ru, MA Yan, ZHANG Shuai, WANG Jian-chao, QU You-yang. Calculation of orbit external heat flow and radiation characteristics of space target[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(1): 187-197. doi: 10.37188/CO.2023-0033

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0033>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于红外辐射特性系统实现对面目标测量

Opposite target measurement based on infrared radiation characteristic system

中国光学 (中英文). 2018, 11(5): 804 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0804>

高灵敏度空间点目标探测系统设计

Design of highly sensitive space point target detection system

中国光学 (中英文). 2018, 11(1): 115 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0115>

人工触发闪电通道的辐射特性分析

Analysis of radiation evolution characteristics of the artificial triggered lightning channel

中国光学 (中英文). 2019, 12(3): 670 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0670>

光谱成像技术在海域目标探测中的应用

Application of spectral imaging technology in maritime target detection

中国光学 (中英文). 2017, 10(6): 708 <https://doi.org/10.3788/CO.20171006.0708>

国外地球同步轨道目标天基光学监视策略

Review of foreign space-based optical surveillance strategies for GEO objects

中国光学 (中英文). 2017, 10(3): 310 <https://doi.org/10.3788/CO.20171003.0310>

复杂动背景下的“低小慢”目标检测技术

LSS-target detection in complex sky backgrounds

中国光学 (中英文). 2019, 12(4): 853 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0853>

文章编号 2097-1842(2024)01-0187-11

空间目标轨道外热流计算及辐射特性研究

郑鸿儒^{1,2}, 马岩^{1*}, 张帅¹, 王建超², 曲友阳²

(1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;

2. 长光卫星技术股份有限公司, 吉林 长春 130000)

摘要: 本文针对空间目标受到的太阳辐射、地球辐射、地球反照辐射, 采用蒙特卡洛(Monte Carlo)法, 基于非结构四面体网格编写了仿真程序, 并对计算结果进行了对比验证。进一步地, 对太阳同步轨道卫星受到的轨道外热流, 采用带帆板的网格对有无遮挡情况下各表面受到的轨道外热流进行了分析。结果显示, 在对地模式下考虑遮挡后, $-Y$ 表面平均热流值降低了 53.79 W/m^2 , $+Y-Z$ 侧帆板表面平均热流值降低了 32.05 W/m^2 。结合表面材料属性, 分析了各表面的温度特性, 并结合帆板温度的在轨遥测数据, 验证了计算的准确性。最后, 计算了两种模式下各方向的红外辐射强度。结果表明, 不同观测模式下各表面受热流的影响不同, 对地模式下各表面温度随时间变化较大, 而对日模式下各表面热流较为稳定。两种模式下, 太阳能帆板的温度较高, 辐射强度较大, 具有明显的红外特征, 便于开展红外观测。

关键词: 轨道外热流; 空间目标探测; 红外辐射; 蒙特卡洛方法

中图分类号: V416.5

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2023-0033

Calculation of orbit external heat flow and radiation characteristics of space target

ZHENG Hong-ru^{1,2}, MA Yan^{1*}, ZHANG Shuai¹, WANG Jian-chao², QU You-yang²

(1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China;

2. Chang Guang Satellite Technology Co. Ltd., Changchun 130000, China)

* Corresponding author, E-mail: mayan888@sina.com

Abstract: In this paper, the solar radiation, the earth radiation and the earth albedo radiation received by the space target are simulated by Monte Carlo simulation method, and the simulation program is written based on the unstructured tetrahedral grid, and the calculation results are compared and verified. Furthermore, for the orbit external heat flow received by the sun-synchronous orbit satellite, the grid with solar panels is used to analyze the orbit external heat flow received by each surface with or without occlusion. The results show that the average heat flow value of $-Y$ surface decreases by 53.79 W/m^2 after considering occlusion in the earth-pointing mode. The average surface heat flow value of $+Y-Z$ side panel decreased by 32.05 W/m^2 . The temperature characteristics of each surface are given combined with the properties of surface materials, and the accuracy of the calculation is verified by combining with the on-orbit telemetry data of the solar panel temperature. Finally, the infrared radiation intensity in each direction of the two modes is calculated. The results

收稿日期: 2023-02-18; 修订日期: 2023-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61890965)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61890965)

show that the influence of heat flow on the surface is different under different observation modes. The temperature of each surface varies greatly over time in the earth-pointing mode, while the heat flow on each surface is relatively stable in the sun-pointing mode. Under both modes, the temperature of the solar panel is higher, the radiation intensity is larger, and it has obvious infrared characteristics, which facilitates infrared observation.

Key words: orbit external heat flow; space target detection; infrared radiation; Monte Carlo method

1 引言

目前各国对空间资源的争夺愈演愈烈,空间态势感知技术对国防的战略意义日益凸显,如何对空间目标进行有效监视成为亟需解决的问题之一。空间目标由于距离太远,往往在探测器上成像只有几个像素,可提取的目标信息十分有限^[1]。为了维持载荷正常工作,空间目标不可避免地会向外辐射多余热量,因此,通过目标红外信息获得目标的工作状态是空间态势感知系统的重要组成部分^[2]。

然而,空间目标红外探测试验成本较高,通过建立理论模型,开展仿真分析已成为研究目标红外特性的重要手段。其中,目标轨道外热流计算是重要一环,主要包括太阳辐射、地球红外辐射和地球反照辐射。太阳辐射及遮挡的影响相对容易计算,而地球红外辐射和反照辐射则需要关联目标姿态和受照射情况,计算过程十分复杂。国内外的相关学者开展了大量研究,主要分为针对简单结构的解析法或积分法,以及处理复杂结构的蒙特卡洛(Monte Carlo)法。前者在处理常见六面体结构时比较方便,如易桦^[3]等提出了一种针对圆轨道航天器外热流的计算方法,对偏航姿态瞬态外热流进行了分析。GARZÓN^[4]等人针对 3U 卫星建立了简化的热流和温度模型,分析了贝塔角和导热率的影响。李志松^[5]等人针对微纳卫星开展了轨道外热流计算及在轨温度分析。李世俊^[6]、吴愉华^[7]等人将相机简化为六面体结构,对太阳同步轨道和地球同步轨道外热流分别进行了分析,得到变姿态条件下的热流值。

积分方法虽然能够快速获得初步结果,但对于处理复杂结构及遮挡问题时则比较困难,且精度不够。蒙特卡洛方法是商业仿真软件常用的计算方法,在处理复杂结构航天器及多次反射等情

况具有明显优势。Atra 等人^[8]对卫星热环境的建模和分析进行了综述,并对对比分析了几款商业软件的计算效果。韩玉阁等人^[9]利用蒙特卡洛方法计算卫星红外辐射特征,结果表明卫星的散热面是判断卫星是否失效的依据。潘晴^[10]等使用反向蒙特卡洛方法对带天线结构的立方体卫星进行了轨道外热流的计算,并与商业软件进行了对比分析,以验证其精度。刘巨^[11]使用 STK 软件获得太阳矢量关系,使用 IDEAS/TMG 模块获得了轨道周期内的热流变化。到目前为止,国内采用自主编程对空间目标外热流的精细化计算研究的较少。

本文采用蒙特卡洛方法,基于非结构化四面体网格,编写空间目标轨道外热流仿真软件,采用 OpenMP 并行加速光线计算,获得目标在任意时间、任意轨道、任意姿态下的轨道外热流,并进行了对比验证。进一步地,对存在遮挡情况下的目标表面热流情况进行了仿真分析,并结合表面材料属性,对表面温度和辐射特性开展了研究。

2 计算方法

本文卫星目标轨道外热流的计算软件主要采用矢量坐标变换法,计算顺序如下:首先读取卫星轨道参数,根据卫星轨道信息,计算得到太阳和卫星在 J2000 坐标系下的位置坐标,获得转换矩阵。然后,读取网格文件,遍历每一个表面网格,计算每个表面受到的太阳辐射、地球辐射和地球反照辐射。判断卫星所在位置是否处于地影区,如果在地影区则将太阳辐射和地球反照太阳辐射值设置为 0,不在地影区则总辐射为 3 种辐射产生的热流之和。最后判断表面是否被遮挡,如果被遮挡,则热流值设置为 0。

软件运行时卫星轨道信息输入为 6 个(半长轴、偏心率、倾角、升交点赤经、近地点幅角、真

近点角),并在内部完成递推。在不进行姿态调整时,本体系与轨道系重合。轨道系定义为,+X指向飞行方向,+Z指向地心,+Y遵循右手定则。

卫星轨道外热流计算中,暂不考虑目标自身温度产生的辐射。下面将逐一介绍太阳直接辐射、地球红外辐射和地球反照辐射的计算方法。

2.1 太阳辐射计算

太阳辐射及其遮挡情况计算与地球辐射和反照辐射计算不同,不需要对大量光线进行随机计算。太阳在 J2000 系的位置计算过程参见文献 [7]。在获得太阳矢量 S_{sun} 后,目标表面接收到的太阳辐射的热流密度可表示为

$$q_s = S_c |\cos(\varphi)| (1 - \rho) \quad (1)$$

式中, S_c 为太阳辐射照度, φ 为表面网格法向与太阳光向量的夹角, ρ 为面元反射率。太阳辐射照度随季节变化,通常取平均太阳辐射照度 $\bar{S}_c = 1367 \text{ W/m}^2$ 进行计算:

$$S_c = \frac{\bar{S}_c}{(R_s/R_s)^2} \quad (2)$$

式中 R_s 为日地距离, \bar{R}_s 为平均日地距离。目标在光照区受到太阳辐射,在地影区则设置 S_c 为 0。地影区通过计算当前时刻卫星视角下的地球张角 β_e 判断,当卫星与地球连线和卫星与太阳连线的夹角大于 β_e 时,卫星受到光照。 β_e 的计算方法如下:

$$\beta_e = \arcsin\left(\frac{R_e}{R_{sat}}\right) \quad (3)$$

式中 R_e 为地球半径, R_{sat} 为卫星与地心的距离。

2.2 地球红外辐射计算

地球红外辐射及反照外热流示意图如图 1 所示。计算地球红外辐射时认为地球处于热平衡状态,任意表面的辐射强度均匀且相等,则地球辐射热流的表达式^[3,12]为:

$$q_e = \frac{1 - \rho_e}{4} S_c (1 - \varepsilon) \iint \frac{\cos \alpha_1 \cdot \max(\cos \alpha_2, 0)}{\pi L^2} ds \quad (4)$$

其中, ρ_e 为地球反射率,本文设定为 0.3, ε 为面元红外发射率; α_1 和 α_2 分别为地球表面微元 ds 与目标表面微元 dA 的连线与二者法向之间的夹角, L 为目标表面微元与地球表面之间的距离。令 $\phi_e = \iint \cos \alpha_1 \cdot \max(\cos \alpha_2, 0) / \pi L^2 ds$, 为地球红外辐射角系数,是主要求解对象。

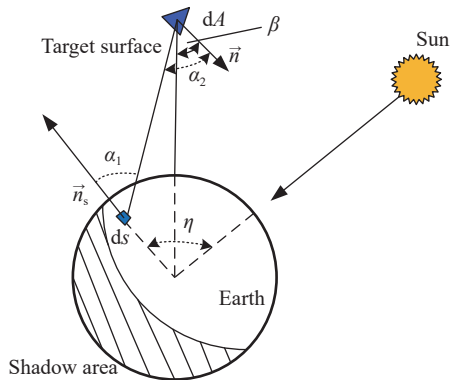


图 1 地球红外辐射及反照外热流示意图

Fig. 1 Schematic diagram of earth's infrared radiation and albedo external heat flow

通过积分方法计算时,主要判断面元法向与目标-地球连线的夹角 β 与 β_e 的余角之间的关系,令 $k = R_e/R_{sat}$, 则 ϕ_e 可由下式得到:

当 $0 \leq \beta \leq \arccos k$ 时, $\phi_e = k^2 \cos \beta$;

当 $\arccos k < \beta < (\pi - \arccos k)$ 时,

$$\phi_e = k^2 \cos \beta + 1/\pi (\pi/2 - (1 - k^2)^{1/2} (k^2 - \cos^2 \beta)^{1/2} - \arcsin((1 - k^2)^{1/2} / \sin \beta) - k^2 \cos \beta \arccos((1 - k^2)^{1/2} / k \tan \beta)) \quad ;$$

当 $(\pi - \arccos k) \leq \beta \leq \pi$ 时, $\phi_e = 0$ 。

地球红外角系数公式的推导详见文献 [13]。在使用蒙特卡洛方法时,则通过统计光线实现地球红外角系数的计算,此时地球辐射热流表达式变换为:

$$q_e = \frac{2\pi}{N} \left(\sum_{i=1}^{N_{abs}} \frac{(1 - \rho_e) S_c \cos \theta_i (1 - \varepsilon)}{4\pi} \right) \quad (5)$$

式中, N 是面元发出的总光线数量, N_{abs} 是被吸收的光线数量, θ_i 是光线发射位置的天顶角。

2.3 地球反照辐射计算

地球反照辐射计算中将地球设定为漫反射,依据兰贝特余弦定理,则目标表面接收到的地球反照辐射热流^[3,12]可表示为:

$$q_a = \rho_e S_c (1 - \rho) \cdot \iint \frac{\cos \alpha_1 \cdot \max(\cos \alpha_2, 0) \cdot \max(\cos \eta, 0)}{\pi L^2} ds \quad (6)$$

令 ϕ_{er} 为地球反照角系数, $\phi_{er} = \iint \cos \alpha_1 \cdot \max(\cos \alpha_2, 0) \cdot \max(\cos \eta, 0) / \pi L^2 ds$ 。由于涉及光线与地球表面交点,以及和太阳的位置关系,计算较为复杂。

在工程上,地球反照辐射热流可以由地球辐射热流得到:

$$q_a = q_e \frac{\rho_c}{(1-\rho_c)/4} \cdot \cos\phi \quad (7)$$

其中, ϕ 为卫星-地球连线与太阳光的夹角。在使用蒙特卡洛方法计算时,地球反照辐射热流变换为:

$$q_a = \frac{2\pi}{N} \left(\sum_{i=1}^{N_{\text{abs}}} \frac{\rho_c S_c \cos\theta_i (1-\rho) \cdot \max(\cos\eta, 0)}{\pi} \right) \quad (8)$$

2.4 温度场计算

详细计算空间目标温度场的分布十分复杂,本文对计算条件进行了一定简化。目标在大气层外时,忽略热对流;除帆板外,忽略星体各表面之间的导热和辐射;除太阳和地球外,忽略其他天体辐射的影响。在这种条件下,空间目标接收到的外热流即为太阳辐射、地球辐射和地球反照辐射。星体表面热平衡方程如下:

$$\sum_{i=1}^{N_s} (\alpha_s q_{s,i} + \alpha_a q_{a,i} + \alpha_e q_{e,i}) A_i / A + q_{\text{in}} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (9)$$

对于太阳能帆板电池片表面,平衡方程如下:

$$\sum_{i=1}^{N_s} ((\alpha_s q_{s,i} + \alpha_a q_{a,i})(1-\eta_s) + \alpha_e q_{e,i}) A_i / A - \zeta (T_1 - T_2) / h = \varepsilon \sigma T_1^4 \quad (10)$$

对于太阳能帆板背板表面,平衡方程如下:

$$\sum_{i=1}^{N_s} (\alpha_s q_{s,i} + \alpha_a q_{a,i} + \alpha_e q_{e,i}) A_i / A + \zeta (T_1 - T_2) / h = \varepsilon \sigma T_2^4 \quad (11)$$

其中, α_s 、 α_e 、 α_a 分别为目标表面对太阳辐射、地球辐射、地球反照的吸收率,太阳辐射和地球反照辐射吸收率取值为材料吸收率,地球辐射吸收系数为表面发射率 ε ; $q_{s,i}$ 、 $q_{a,i}$ 、 $q_{e,i}$ 分别为第 i 个面元接收到的太阳辐射、地球反照、地球辐射的热流; A_i 是第 i 个面元的面积, N_s 是该表面上面元的总数目, A 是该表面所有面元的总面积, σ 为斯忒芬-玻耳兹曼常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T 为目标表面温度; T_1 为帆板电池的表面温度; T_2 为帆板背板的表面温度; η_s 为太阳能帆板的光

电转换率,设为 0.2; q_{in} 为目标表面的内热源,此处等效为面热源,对于本体表面,其值为 $20 \text{ W}/\text{m}^2$ 。太阳能帆板蜂窝材料厚度 h 设为 20 mm ,导热率 ζ 设为 $1.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[14],表面材料属性如表 1 所示。

表 1 表面材料热参数^[15]

Tab. 1 Thermal parameters of surface material			
表面	材料	吸收率	发射率
本体	氟46	0.35	0.68
太阳帆板	电池片	0.82	0.81
	背板	0.88	0.86

2.5 计算结果验证

为了验证仿真软件计算结果的准确性,针对 800 km 太阳同步轨道和地球同步轨道开展轨道外热流计算,并与文献 [5] 中给出的结果进行对比分析。仿真中采用的光线数为 10000,轨道递推间隔为 90 s ,仿真日期选择为春分日,对比结果如图 2~图 3(彩图见期刊电子版)所示。其中大写字母(线条)代表文献中给出的各表面结果,小写字母(符号)代表本文仿真结果。其中 q 为包括太阳辐射、地球辐射和地球反照辐射的轨道总热流。由图 2~图 3 可以看出,两种轨道高度下轨道外热流的计算值与文献中的计算值误差小于 5%,具有较高的一致性。

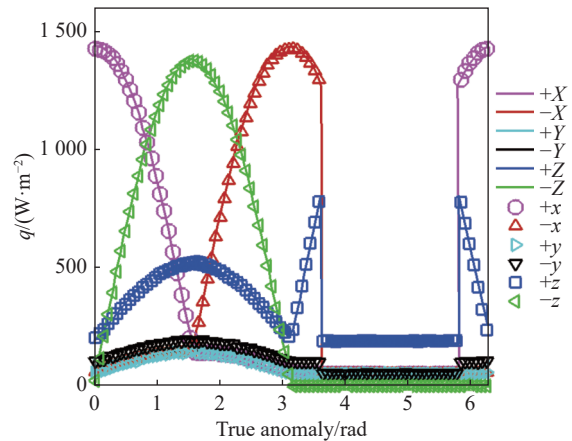


图 2 800 km 太阳同步轨道外热流对比

Fig. 2 Comparison of external heat flow of the 800 km sun-synchronous orbit

此外,对地球辐射角系数也进行了验证,如表 2 所示,给出了与文献 [16] 的对比结果。可以看出,两者一致性较好,可以认为本软件计算精度较高。

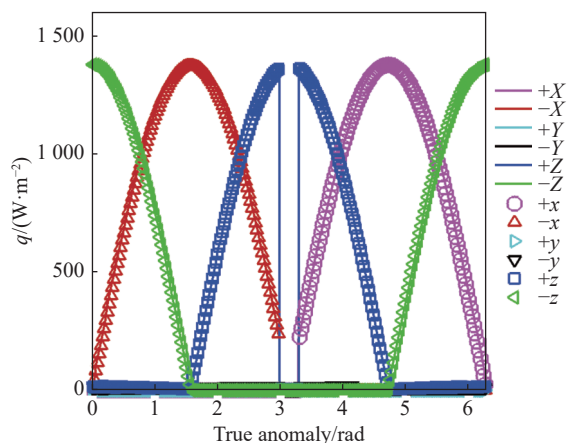


图 3 地球同步轨道外热流对比

Fig. 3 Comparison of external heat flow of the geosynchronous orbit

表 2 典型位置地球红外角系数随平板俯仰角变化对比
Tab. 2 Comparison of earth infrared angular coefficients varying with plate pitch angle at typical positions

$\beta/(^\circ)$	本文结果	Ref [16]结果
0	0.9129	0.9118
30	0.7961	0.7961
60	0.5673	0.5639
90	0.3139	0.3125
120	0.1107	0.1100
150	0.0081	0.0077
180	0.0000	0.0000

2.6 计算域

进一步地, 建立带帆板的模拟卫星模型网格, 计算域如图 4 所示。卫星本体系与轨道系重合(本体系原点为卫星质心)。帆板为固定式帆板, 分布在+Y和-Y侧, 卫星本体尺寸为 30 cm×20 cm×30 cm, 帆板尺寸为 30 cm×40 cm×2 cm, 帆板边缘与星体±Y侧平面 4 cm, 网格数量为 28 万。

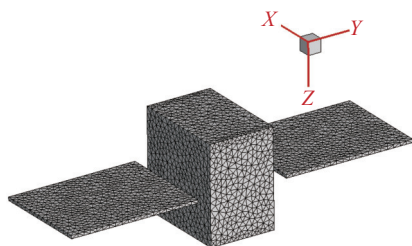


图 4 计算域

Fig. 4 Computational domain

2.7 遮挡计算

在计算目标本体结构对太阳辐射的遮挡时, 由网格中心点沿着卫星指向太阳的矢量方向发射一条光线。通过给定足够大的步长, 保证矢量终点在计算域外。然后遍历目标所有面元, 如果光线矢量穿插了其他本体表面, 则将该光线所在面元太阳辐射热流值设置为 0。

在计算对地球红外辐射和地球反射辐射的遮挡时, 由表面面元向 2π 空间内随机发射 N 条光线, 跟踪每条光线的运动。在计算光线运动路径时, 采用临近网格检索方法, 通过计算光线路径与四面体网格的 4 个三角面元相交情况, 当光线穿插本体其他表面时删除光线, 以此循环, 直到光线到达计算域边界。此时, 根据光线、目标-地球连线、地球-太阳连线等的关系, 统计地球红外辐射和地球反射辐射量。

3 分析与讨论

3.1 不同模式下轨道外热流计算

空间目标的辐射特性除与所处位置、结构形状、表面属性因素相关外, 还受姿态变化的影响。对于天基目标观测尤为明显。通常, 三轴稳定卫星在轨长期模式可分为三轴对地、三轴对日等。本节对固定帆板的卫星在两种模式下的春分日轨道外热流进行了计算。对日坐标系定义为, -Z 轴指向太阳, +Y 轴指向黄北极, X 轴遵循右手定则。轨道参数为 535 km 太阳同步轨道, 降交点地方时为 10:30, 计算起始时刻为春分日 UTC 时间 12:30:00, 迭代时间间隔为 120 s, 轨道周期为 5720 s, 其中 2838 s 至 4901 s 为地影区。

图 5~图 10(彩图见期刊电子版)给出了卫星本体各表面在一个轨道周期内的 3 种热流变化情况, 其中 mode 1 代表三轴对地模式, 图中以实线表示, mode 2 代表三轴对日模式, 图中以点划线表示。可以看出, 在对地模式下, 除+Y面以外, 本体其余各表面均受到太阳辐射, 由于太阳辐射在总辐射中占比较大, 因此在卫星设计上一般选择+Y面为散热面。在各面中, -Y面受到太阳帆板遮挡, 太阳辐射在 0~550 W/m² 范围内波动, 相较于其他受晒表面幅值较小。+Z面长期对地, 只

有进出地影区时短时间受晒,峰值在 510 W/m^2 左右。除 $-Z$ 面以外,其他表面均受到地球辐射及地球反照辐射影响。对地模式下,各表面受到的地球辐射恒定,反照辐射随时间变化。

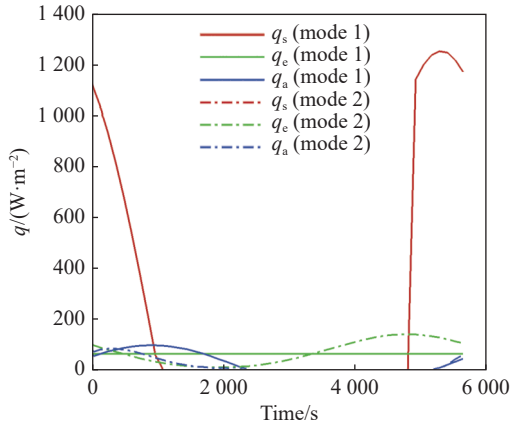


图 5 +X 面外热流曲线
Fig. 5 External heat flow of +X surface

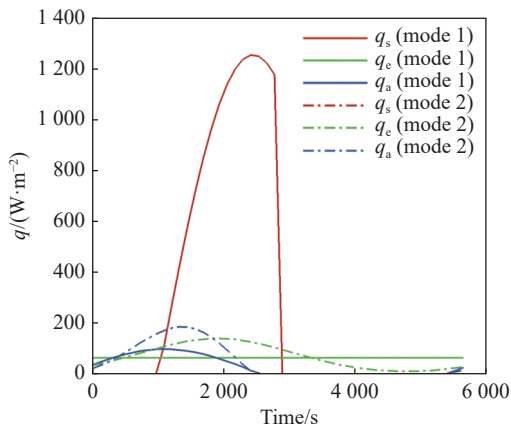


图 6 -X 面外热流曲线
Fig. 6 External heat flow of -X surface

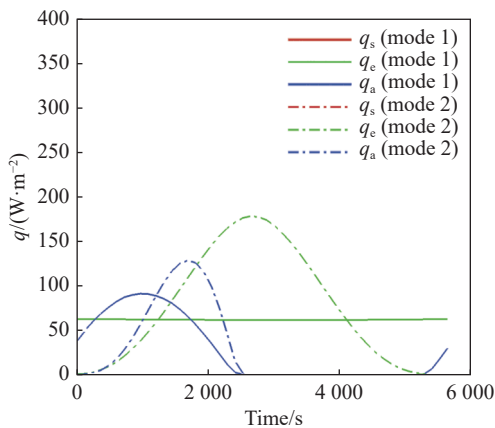


图 7 +Y 面外热流曲线
Fig. 7 External heat flow of +Y surface

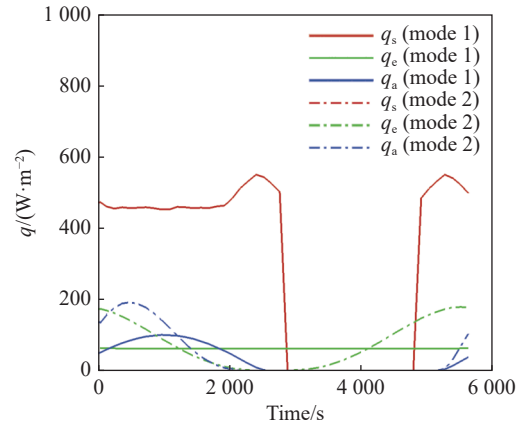


图 8 -Y 面外热流曲线
Fig. 8 External heat flow of -Y surface

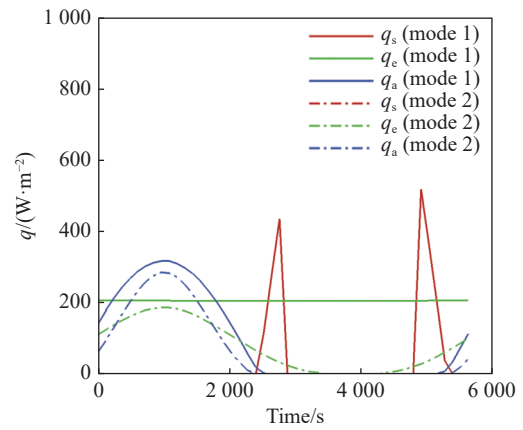


图 9 +Z 面外热流曲线
Fig. 9 External heat flow of +Z surface

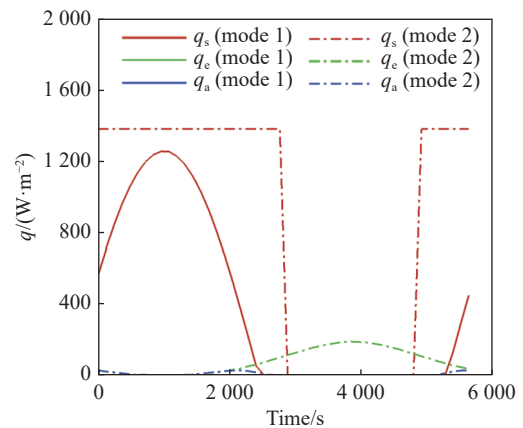


图 10 -Z 面外热流曲线
Fig. 10 External heat flow of -Z surface

在对日模式下,各表面热流情况与对地模式有显著不同。太阳辐射仅存在于 $-Z$ 面,在光照区恒定,约为 1378 W/m^2 ,其他表面只受地球辐射和

反照辐射,与太阳辐射相比量级较小,因此受热相对稳定,在卫星热设计上, $\pm X$ 、 $\pm Y$ 、 $+Z$ 面均可设计为散热面。对于地球辐射和反照辐射来说,对日模式和对地模式相比,主要不同是由于姿态变化产生的在时间和幅值上的差别。对于载荷在 $+Z$ 面的卫星来说,从图 9 可以看出,卫星在两种模式下受到的 3 种辐射值均变化不大,热环境比较温和。

3.2 遮挡影响分析

图 11(彩图见期刊电子版)给出了计算起始时刻对地模式下星体各表面受到的总外热流云图。从图中可以看出,由于卫星降交点地方时选择为 10:30 am,太阳从 $-Y$ 侧照射星体,星体和帆板的 $-Z$ 、 $+X$ 、 $-Y$ 侧受光照, $+X$ 面热流值在 1000 W/m^2 以上,其他面在 600 W/m^2 左右。受帆板遮挡影响, $-Y$ 侧部分位置不被太阳直接照射, $+Y$ 侧帆板靠近星体边缘被遮挡,说明本文编写的软件可以很好地处理复杂结构体遮挡情况。

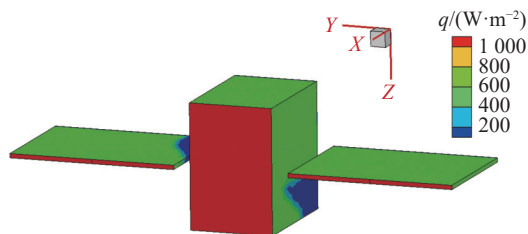


图 11 外热流分布及遮挡影响示意图

Fig. 11 Schematic diagram of external heat flow distribution and occluding effects

表 3 给出了一个轨道周期内各表面的平均热流情况。对于三轴对地模式(mode 1),除 $+Y$ 面平均热流在 90 W/m^2 左右外,各表面热流分布相对均匀,在 $340\sim 400 \text{ W/m}^2$ 左右变化。而对于对日模式, $-Z$ 侧的星体表面和帆板表面热流值在 972 W/m^2 左右,其他表面则小于 150 W/m^2 。针对结构遮挡的影响开展了仿真分析,无遮挡情况下不考虑光线被星体结构或帆板遮挡。计算结果表明,遮挡的影响主要表现在对地模式下,由于帆板的遮挡, $-Y$ 表面遮挡后热流值降低了 53.79 W/m^2 ,由于星本体的遮挡, $+Y-Z$ 侧帆板表面遮挡后热流值降低了 32.05 W/m^2 。对本体其他表面影响微弱,对于对日模式则无影响。

表 3 各平面一个轨道周期内的平均外热流

Tab. 3 Average external heat fluxes of each surface in one orbital period W/m^2

Surface	Mode 1	Mode2
$+X$	390.51	87.92
$-X$	373.86	116.75
$+Y$	89.96	100.83
$-Y$	408.43	120.34
$+Z$	346.37	148.28
$-Z$	399.60	972.33
$+Y+Z$ solar panel	342.52	148.17
$+Y-Z$ solar panel	367.55	972.22
$-Y+Z$ solar panel	346.43	148.29
$-Y-Z$ solar panel	399.60	972.23

3.3 表面温度

结合各表面热流变化及表 1 中给出的表面材料热参数,根据式(9)~式(11)计算得到各表面温度。图 12~图 13(彩图见期刊电子版)分别给出了对地对日模式下的各表面温度。由于各表面的质量和比热容未知,本节计算结果仅考虑稳态解,相较于实际情况波动较大。可以看出,对地模式下各表面温度在不同时刻变化较大,其中,星本体 $-Z$ 面温度变化最大,约为 180 K , $+Y$ 侧温度变化最小,约为 22 K 。帆板由于存在导热,电池片侧($-Z$)表面温度在光照区和地影区的差值相较于本体 $-Z$ 面较小,约为 120 K ;随着时间变化, $+X$ 和 $-X$ 侧表面受到阳光照射,温度变化较大,幅值约在 140 K 波动。 $-Y$ 面在光照区和地影区温度都比较恒定,分别为 283 K 和 200 K , $+Z$ 表面温度由于在进出地影区时受到太阳照射,存在两个峰值,其余时间波动较小。

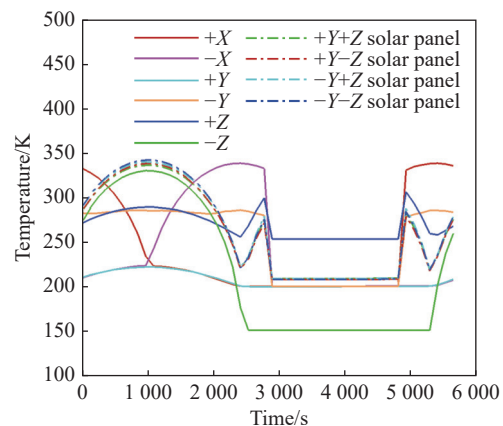


图 12 对地模式下的各表面温度

Fig. 12 Temperature of each surface in the earth-pointing mode

在对日模式下,除帆板和本体-Z面在光照区和地影区变化较大外,其余表面变化幅度较小,其中波动最大的是本体+Z面,波动区间约为 132 K。对于帆板和本体-Z面,光照区温度在 340 K 左右波动,地影区在 220 K 左右波动,整个区间相对恒定。

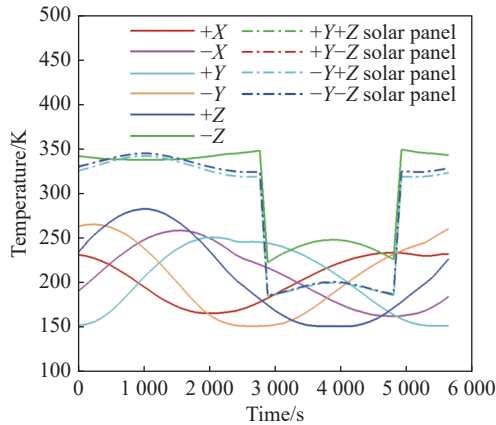


图 13 对日模式下的各表面温度

Fig. 13 Temperature of each surface in the sun-pointing mode

3.4 表面温度对比验证

为了验证轨道外热流计算的准确性,对“吉林一号”某卫星帆板温度进行仿真与在轨实测值验证分析。卫星运行在 535 km 太阳同步轨道,降交点地方时为 12:00,帆板位于 -Y 侧,帆板运行模式为对日模式。在实际应用中帆板处于非平衡状态,因此表面温度使用以下简化公式进行求解:

$$cm \frac{dT}{dt} = A_s \varepsilon \sigma T^4 + Q \quad (12)$$

式中, c 为比热容,取值为 $350 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, m 是帆板质量,取值为 1.5 kg , A_s 为帆板面积,此处取值为 0.3 , Q 为帆板表面总的吸收热流,表面吸收率设为 0.9 。采用蒙特卡洛方法获得表面外热流后,代入公式迭代求解帆板温度,并与卫星遥测数据做对比,结果如图 14 所示。

可以看出,计算结果在各个轨道周期内的变化幅度和规律与遥测数据符合较好。最高温度约为 $95 \text{ }^\circ\text{C}$,最低值约为 $-76 \text{ }^\circ\text{C}$,在光照区升高,在地影区下降,不断循环。本文计算结果可以为太阳帆板温度场分析提供可信参考。同时也可以看出,计算值和遥测值在部分区域存在一定偏

差,可能是参数设置与实际情况的差异影响了计算结果,需要开展进一步研究。

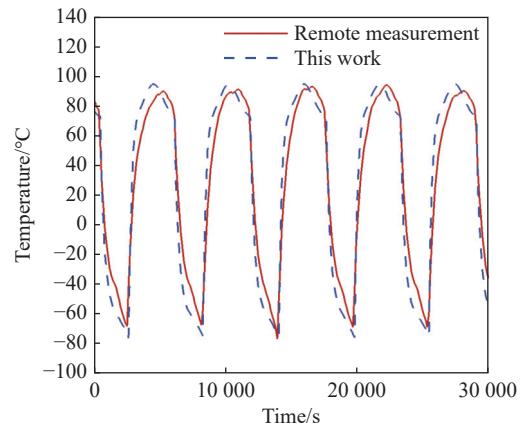


图 14 太阳帆板温度对比

Fig. 14 Temperature comparison of solar panel

3.5 红外辐射强度分布

目标自身红外辐射由表面温度和表面材料的发射率决定,在获得温度变化曲线后,目标自身红外光谱辐射出射度可由式(13)表示:

$$M_{\text{self},i} = \frac{\varepsilon_i(\lambda)c_1\lambda^{-5}}{e^{(c_2/(\lambda T_i))} - 1} \quad (13)$$

其中, c_1 为第一辐射常量,值为 $3.742 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$, c_2 为第二辐射常量,其值为 $1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$, λ 为波长,单位为 μm , T_i 是面元表面温度。 $\varepsilon_i(\lambda)$ 是面元光谱发射率。

结合图 12 和图 13 给出的两种模式下的各表面温度,认为各表面为漫反射,根据朗伯余弦定律计算得到两种模式下一个轨道周期内的各方向上的辐射强度,如图 15~图 18(彩图见期刊电子版)所示。

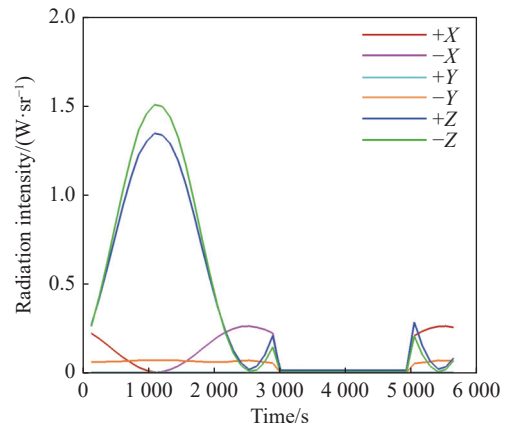


图 15 对地模式下的各方向辐射强度(3~5 μm)

Fig. 15 Radiation intensity in each direction in the earth-pointing mode (3~5 μm)

可以看出,在常用的 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 两个探测波段中,两种模式下+Z和-Z方向的辐射强度较高, $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段最大值在 $1.5\ \text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$ 左右。 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段最大值在 $22\ \text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$ 左右。主要原因是帆板温度较高且面积较大,是红外信号的主要来源。 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段辐射强度明显强于 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段。同一谱段内,对地模式下,不同时间内,+X、-X和-Y方向也存在红外信号较强时刻。但对日模式下,除+Z和-Z方向的辐射强度较高外,其他方向红外辐射值较小,目标探测存在困难。

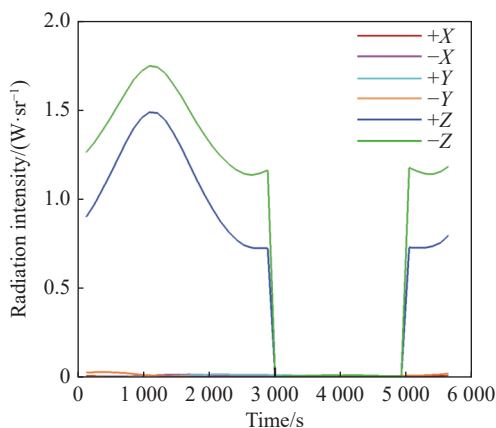


图 16 对日模式下的各方向辐射强度($3\sim 5\ \mu\text{m}$)

Fig. 16 Radiation intensity in each direction in the sun-pointing mode ($3\sim 5\ \mu\text{m}$)

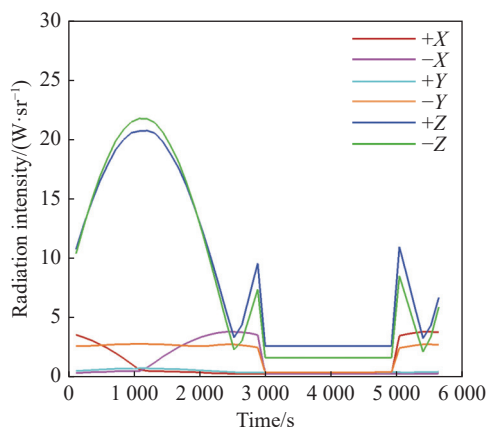


图 17 对地模式下的各方向辐射强度($8\sim 14\ \mu\text{m}$)

Fig. 17 Radiation intensity in each direction in the earth-pointing mode ($8\sim 14\ \mu\text{m}$)

参考文献:

[1] 谷牧,任栖峰,周金梅,等.基于地基观测的时序卫星红外光谱建模与分析[J].物理学报,2019,68(5):059501.

GU M, REN Q F, ZHOU J M, *et al.*. Modeling and analyzing of time-resolved satellite infrared spectrum based on

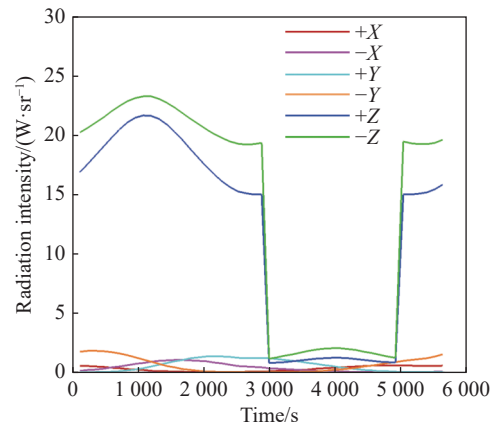


图 18 对日模式下的各方向辐射强度($8\sim 14\ \mu\text{m}$)

Fig. 18 Radiation intensity in each direction in the sun-pointing mode ($8\sim 14\ \mu\text{m}$)

4 结 论

本文针对绕地卫星轨道外热流,采用蒙特卡洛法、基于非结构四面体网格和 OpenMP 并行算法编写了仿真软件。针对文献中的典型工况进行了对比分析,验证了软件计算结果的准确性。进一步,针对 $535\ \text{km}$ 太阳同步轨道,考虑卫星结构遮挡的影响,对不同姿态控制策略下的卫星轨道外热流进行了仿真分析,并将太阳帆板表面温度与在轨遥测数据进行了对比分析。得出如下结论:

(1)不同姿态模式下目标的轨道外热流区别较大。对于 $535\ \text{km}$ 太阳同步,10:30 地方时轨道来说,对地模式下除+Y面外,各表面热流值随时间变化波动较大,而对日模式下除-Z面本体及帆板表面波动较大外,其他表面变化较小。

(2)蒙特卡洛算法对空间目标复杂结构及结构遮挡具有很好的适应性,对地模式下,考虑遮挡后,-Y表面热流值降低了 $53.79\ \text{W}/\text{m}^2$,+Y-Z侧帆板表面热流值降低了 $32.05\ \text{W}/\text{m}^2$ 。

(3)不同模式下目标各表面温度特性不同。对地模式下各表面温度随时间波动较大,使红外观测窗口规划提高了难度。在两种模式下,帆板在光照区温度较高,具有明显的红外特征,便于开展空间目标红外观测。

- ground-based detector[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(5): 059501. (in Chinese)
- [2] 郑鸿儒, 马岩, 范林东, 等. 高空离轨发动机流场红外辐射特性研究[J]. 中国光学, 2022, 15(2): 260-267.
ZHENG H R, MA Y, FAN L D, *et al.*. Infrared radiation characteristics of high-altitude off-orbit engine plume[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(2): 260-267. (in Chinese)
- [3] 易桦, 黄兴, 江海. 一种圆轨道航天器外热流通用计算方法[J]. 航天器工程, 2021, 30(5): 53-58.
YI H, HUANG X, JIANG H. Common calculation method for orbital heat flux of spacecraft on circular orbit[J]. *Spacecraft Engineering*, 2021, 30(5): 53-58. (in Chinese)
- [4] GARZÓN A, TAMI J A, CAMPOS-JULCA C D, *et al.*. Effect of beta angle and contact conductances on the temperature distribution of a 3U CubeSat[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2022, 29: 101183.
- [5] 李志松, 马昌健, 毛云杰, 等. 微纳卫星在轨温度场快速分析[J]. 航天器环境工程, 2021, 38(2): 122-129.
LI ZH S, MA CH J, MAO Y J, *et al.*. Rapid analysis of temperature field for orbiting nanosatellites[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2021, 38(2): 122-129. (in Chinese)
- [6] 李世俊, 陈立恒, 冯文田, 等. 太阳同步轨道二维变姿态空间相机的外热流计算[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(9): 0917008.
LI SH J, CHEN L H, FENG W T, *et al.*. Calculation of external heat fluxes on space camera with two-dimensional changing attitudes in sun-synchronous orbit[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(9): 0917008. (in Chinese)
- [7] 吴愉华, 陈立恒, 李行, 等. 地球静止轨道变姿态空间相机的外热流计算[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(6): 0604001.
WU Y H, CHEN L H, LI H, *et al.*. Computation of external heat fluxes on space camera with attitude change in geostationary orbit[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(6): 0604001. (in Chinese)
- [8] ATAR C, AKTAŞ M. Advances in thermal modeling and analysis of satellites[J]. *Gazi University Journal of Science*, 2022, 35(1): 42-58.
- [9] 韩玉阁, 宣益民. 卫星的红外辐射特征研究[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(1): 34-37.
HAN Y G, XUAN Y M. Infrared feature of the satellite[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(1): 34-37. (in Chinese)
- [10] 潘晴, 王平阳, 包轶颖, 等. 基于反向蒙特卡罗法的飞行器在轨外热流计算[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(5): 750-755,761.
PAN Q, WANG P Y, BAO Y Y, *et al.*. On-orbit external heat flux calculation of spacecraft based on reverse Monte Carlo method[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2012, 46(5): 750-755,761. (in Chinese)
- [11] 刘巨. 太阳同步圆轨道空间相机瞬态外热流计算[J]. 中国光学, 2012, 5(2): 148-153.
LIU J. Calculation of transient space heat fluxes for space cameras working in sun-synchronous circle orbit[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(2): 148-153. (in Chinese)
- [12] 闵桂荣. 卫星热控制技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1991: 61-65.
MIN G R. *Satellite Thermal Control Technology*[M]. Beijing: China Aerospace Press, 1991: 61-65. (in Chinese)
- [13] 侯增祺, 胡金刚. 航天器热控制技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007: 340-347.
HOU Z Q, HU J G. *Spacecraft Thermal Control Technology*[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2007: 340-347. (in Chinese)
- [14] 丁少华, 刘书峰, 陈小文, 等. 空间目标温度特性分析及仿真[J]. 红外, 2011, 32(5): 19-22.
DING SH H, LIU SH F, CHEN X W, *et al.*. Analysis and simulation of temperature characteristics of space target[J]. *Infrared*, 2011, 32(5): 19-22. (in Chinese)
- [15] 王盈, 黄建明, 魏祥泉. 空间目标在轨红外成像仿真[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2593-2597.
WANG Y, HUANG J M, WEI X Q. Infrared imaging simulation of space target in orbit[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(9): 2593-2597. (in Chinese)
- [16] 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.
ZHAO L X. A new method to calculate the heat flux in spacecraft orbits[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1995, 3(6): 80-85. (in Chinese)

作者简介:



郑鸿儒(1992—), 男, 吉林长春人, 博士, 助理研究员, 主要从事卫星姿态与轨道控制、电推进羽流效应等方面的研究。E-mail: zhenghongru@buaa.edu.cn



马岩(1977—), 男, 山东单县人, 硕士, 研究员, 主要从事光电信息处理与分析等方面的研究。E-mail: mayan888@sina.com

《中国光学(中英文)》征稿启事

《中国光学(中英文)》为双月刊, A4 开本; 刊号: ISSN 2097-1842/CN 22-1431/04; 国内外公开发行, 邮发代号: 国内 12-140, 国外 BM6782。

- | | |
|-----------------|----------------|
| ★ 荷兰 Scopus 数据库 | ★ 中国精品科技期刊 |
| ★ 美国《乌利希国际期刊指南》 | ★ 中国科技核心期刊 |
| ★ 美国《化学文献》 | ★ 中国光学学会会刊 |
| ★ 波兰《哥白尼索引》 | ★ 中国科技论文与引文数据库 |
| ★ 俄罗斯《文摘杂志》 | ★ 中国期刊全文数据库 |
| ★ 美国工程索引(EI)数据库 | ★ 万方数字化期刊全文数据库 |
| ★ 美国 ESCI 数据库 | ★ 中国科技期刊数据库 |
| | ★ 中国光学期刊网数据库 |

主要栏目: 微纳光学、信息光学、集成光电子、光谱学和光谱仪器、激光技术与应用、光学功能材料、光学设计与工艺、大气与空间光学、光学仪器与测试、综述、前沿动态、产业资讯、科普教学、实验室介绍、自然科学基金项目进展、前沿热点访谈、热点论文等。

发稿类型: 学术价值显著、实验数据完整的原创性论文; 研究前景广阔, 具有实用、推广价值的技术报告; 有创新意识, 能够反映当前先进水平的阶段性研究简报; 对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告; 以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿。

主管单位: 中国科学院

主办单位: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

协办单位: 激光与物质相互作用国家重点实验室

编辑出版: 《中国光学(中英文)》编辑部

投稿网址: <http://chineseoptics.net.cn>

邮件地址: chineseoptics@ciomp.ac.cn

联系电话: 0431-84627061

传 真: 0431-84627061

编辑部地址: 长春市东南湖大路 3888 号(130033)