

文章编号 1004-924X(2013)03-0637-07

静止轨道对地观测光学系统外遮光罩设计

钱 婧^{1,2*}, 董德平¹, 孙胜利^{1,2}

(1. 中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院 红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘要:研究了午夜前后阳光照射对静止轨道三轴稳定对地观测光学系统的系统成像和系统热稳定性的影响。根据光学系统在静止轨道运行时的受照特点,分析了直射入光学系统的太阳光能量,推导出由外遮光罩高度,形状及不同太阳倾斜角确定的无量纲数阳光抑制比 K ,用以描述外遮光罩对视场外直射阳光的抑制能力并指导各种形状外遮光罩的高度设计。用 Monte-Carlo 方法编制通用程序计算了各种轮廓形状在不同太阳倾斜角下的抑制比 K 。在实例设计中取春秋分 $K=0.5$ 作为设计依据,外遮光罩的高度为底部轮廓东西轴长的 1.8 倍,此时阳光由遮光罩底部轮廓进入光学系统的时间为 3 h,设计结果满足卫星载荷尺寸要求。

关键词:静止轨道;对地观测光学系统;外遮光罩;阳光抑制比;Monte-Carlo 法

中图分类号:V447.1;V243.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132103.0637

Design of outer baffle of earth observation optical system on geostationary orbit

QIAN Jing^{1,2*}, DOGN De-ping¹, SUN Sheng-li^{1,2}

(1. *Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;*

2. Key Laboratory of Infrared Detecting & Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

** Corresponding author, E-mail: hitqj@163.com*

Abstract: The affects of direct sunlights before and after midnights on the imaging quality and thermal stability of an earth observation optical system on geostationary satellite in space were investigated. According to the characteristics of solar heat flux on the geostationary orbit, the energy density of direct sunlight projecting to the optical system was analyzed and a dimensionless parameter named sunlight inhibitory ratio determined by outer baffle's height, shape dimension and sun inclination was deduced. It was used to describe the inhibitory ability of outer baffle in the optical system for the direct sunlight and also used as a design principle for the height of outer baffle. The program based on Monte-Carlo method was compiled to solve the sunlight inhibitory ratio of different shape outer baffles in different sun inclination scenarios. In a real design, the sunlight inhibitory ratio was selected to be 0.5 at equinox and the final outer baffle height is about 1.8 times of the east-west axis length of the

收稿日期:2012-10-17;修订日期:2012-12-27.

基金项目:武器装备预研基金资助项目(No. 9140A21041210ZK0702)

outer baffle's bottom side. This way, the incidence sunlight in the optical system from the baffle is three hours. The result satisfies the dimension requirements of satellite payloads.

Key words: geostationary orbit; earth observation optical system; outer baffle; sunlight inhibitory ratio; Monte-Carlo method

1 引言

光学系统设计均需考虑杂散光对系统的影响,近年来人们通常从两个方面提出抑制杂光的方法。一是在外遮光罩内表面采取技术措施,通过直接减少、多次反射或吸收视场外入射光等方法使杂散光能量衰减或吸收达到杂散光能量衰减的目的,如设计异型遮光罩以减少反射表面、在内部通光表面上设置档光环和设计多级型遮光罩等。另外就是通过加长遮光罩来达到杂光抑制的目的,近年来对空间光学系统可展开式遮光罩的研究日渐增多^[1-5]。

传统的对光学系统外遮光罩的设计与优化可分为两种:一是以几何尺寸、材料属性、机械特性等作为变量,根据实际情况选择约束条件,对外遮光罩进行结构优化;二是使用几何作图或数值计算的方法对外遮光罩内表面挡光环位置进行优化,再通过视场外不同离轴角的点源透过率来评价外遮光罩的消杂光能力^[6-11]。

静止轨道工作的三轴稳定光学系统对地观测始终凝视地球,午夜阳光会直接进入光学系统,被结构件吸收产生各种热效应,进入光路的部分能量成为杂光,影响成像质量,严重时还会烧毁探测器。美国根据 GOES 系列卫星资料进行太阳入侵研究,GOES I-M 成像仪和探测仪每天直射入光学系统的时间约为 6.5 h,为减少阳光的影响,其新一代成像仪 ABI 采用了展开式 U 型遮光罩。国内游思梁、叶荣等人就 FY4 的辐射计和大气垂直探测仪的太阳入侵现象进行了研究,针对遮光罩的长度与阳光进入系统的时间进行了分析,并模拟了光学系统的第一块扫描镜受阳光照射的热影响。^[12-15]

外遮光罩是静止轨道光学遥感仪器与外太空直接热交换的窗口,热设计同杂光抑制设计一样,需将进入系统通光口径的非探测目标能量降至最小。

本文将杂光抑制与热设计的思路相结合,采用能量分析法,从抑制视场外阳光直接进入光学

系统的角度,对直接进入光学系统的阳光能量与外遮光罩形状关系进行了分析,并用这一思想指导外遮光罩的设计,其结果满足工程实际需要,并已投入生产。

2 静止轨道光学系统的受照特点分析

在地球上观察太阳的运动轨迹,太阳每天自东向西绕地球旋转,在南北方向上阳光入射方向与赤道面的夹角变化为 $-23.5^{\circ} \sim 23.5^{\circ}$,经历半年时间从北回归线到南回归线交替变化。阳光通过外遮光罩,能量衰减后进入光学系统,其影响可分为瞬时到达探测器的杂散光和全天累积的热效应。

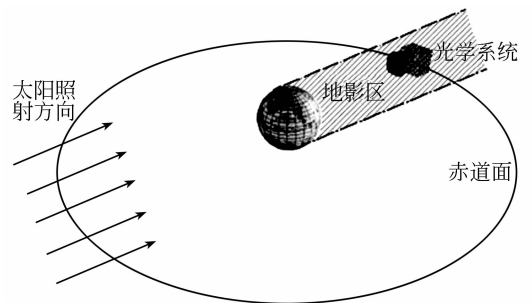


图 1 春秋分时地球、太阳、相机与地影区的位置关系
Fig. 1 Relative positions of earth, sun, optical system and earth shadow at equinox

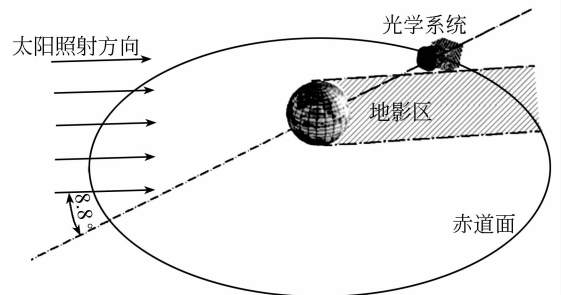


图 2 阳光与赤道面夹角为 8.8° 时,地球、太阳、相机与地影区的位置关系
Fig. 2 Relative positions of earth, sun, optical system and earth shadow for sun inclination in 8.8°

静止轨道的空间热环境特点为:(1)地球红外辐射和地球反照的影响对太阳辐射而言可忽略不计;(2)外遮光罩开口始终朝向地球,随着地球的自转,太阳光有午夜入侵光学系统内部的现象^[13-15];(3)春秋分时,阳光方向与赤道面平行,光学系统进入地影区的时间最长,为72 min;(4)当阳光与赤道夹角大于8.8°时,仪器在静止轨道运行时无地球遮挡。

3 进入光学系统的阳光能量分析

进入外遮光罩的阳光能量有一部分会照射到内壁面上,形成反射使壁面升温。对于可见光相机,外遮光罩设计时要求尽量避免阳光因外遮光罩内壁面的反射进入光学系统;而对于红外相机,外遮光罩的设计必须考虑降低因外遮光罩升温而进入光学系统的红外杂散辐射。可根据光学系统的不同类型采用设置光阑以及特殊光学涂层等方法进行衰减或抑制,本文不考虑阳光照射在遮光罩内壁面上通过反射而进入光学系统的能量,直接分析可见光相机及红外相机都必需降低的视场外阳光直射。

外遮光罩内部透光部分轮廓是光学系统观测视场和扫描镜扫描方式确定的,尺寸则随光轴位置和高度而变化。不论东西和南北方向通过中心视场的截面可用图3表示,其中 α 角为半视场角、 β 角为关键遮挡角, $H, D_1, D_2, \alpha, \beta$ 之间的关系可以用式(1)和(2)表示:

$$\frac{H}{D_1} = \frac{\cos \beta \cdot \cos \alpha}{\sin(\beta - \alpha)}, \quad (1)$$

$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{\cos(\beta + \alpha)}{\sin(\beta - \alpha)}. \quad (2)$$

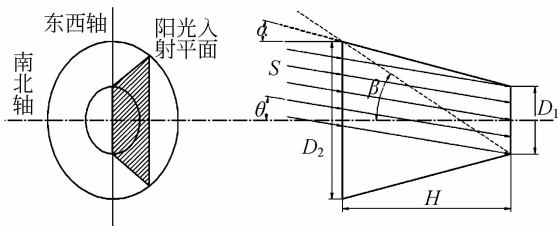


图3 太阳直射入外遮光罩的关键尺寸及角度

Fig. 3 Key dimensions and angles of direct sunlight project to inner side of outer baffle

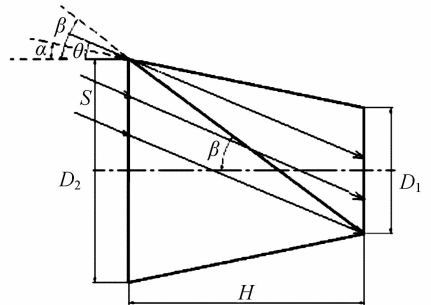
入射光的入射角 θ 与 α, β 之间的关系为:

(1)当 $\theta > \beta$ 时,非视场阳光入射光线全部落在外遮光罩上;

(2)当 $\beta > \theta > \alpha$ 时,非视场阳光入射光线部分落在外遮光罩上,部分落在光学系统内部;

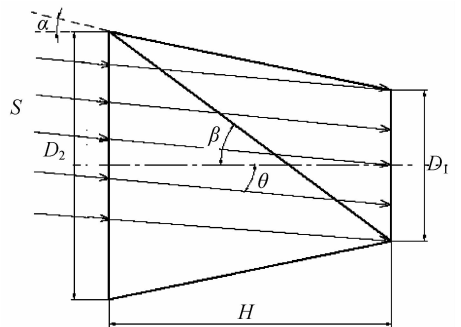
(3)当 $\theta < \alpha$ 时,直接落在光学系统内部的阳光入射光线均为视场内光线。

因此,当入射角 $\theta < \alpha$ 时,带来的这部分阳光杂光是不可避免的,而对入射角 $\beta > \theta > \alpha$ 的这部分进入光学系统的阳光能量进行抑制是减少杂光和控制进入光学系统外热流的重要手段。当关键遮挡角 β 趋近 α 时进入相机的这部分杂光量越小,即 β 越小, H 越长,进入光学系统的非目标光束和能量越小。



(a) 太阳入射角 $\beta > \theta > \alpha$

(a) Direct sunlight incident angle of $\beta > \theta > \alpha$



(b) 太阳入射角 $0 < \theta < \alpha$

(b) Direct sunlight incident angle of $0 < \theta < \alpha$

图4 太阳光入射角与遮挡角关系

Fig. 4 Relation between direct sunlight incident angle and key shielding angle

当同时考虑东西方向和南北方向的阳光照射时,取一个阳光入射平面。该平面与遮光罩东西轴面的夹角为 ω ,这个角度即阳光与赤道面的夹角,夹角的大小与季节相关,取值为 $-23.5 \sim 23.5^\circ$ 。

图5中, γ 角为光线与遮光罩中心轴的夹角。 φ 为光线在入射平面内与中心轴投影线的夹角,

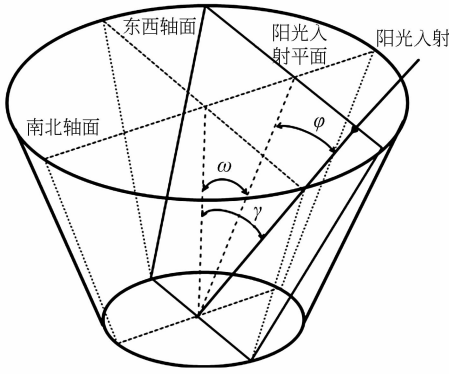


图 5 太阳入射平面与入射角

Fig. 5 Sunlight incident plane and incident angle

也就是一天中光线的变化角。

入射阳光从外遮光罩开口 D_2 处照进遥感仪器,相对于遮光罩中心轴的阳光入射角为 γ ,入射能量为一个太阳常数 S ,则通过外遮光罩截面直接照入射光学系统的单位时间能量为:

$$E = S \cos \gamma A_{\text{effective}}, \quad (3)$$

其中: $A_{\text{effective}}$ 为光学系统直接被阳光所照射的在外遮光罩中心轴垂直面上的当量面积。

(1)当入射阳光完全进入光学系统时。阳光的单位时间入射能量为:

$$E_1 = S \cdot \cos \gamma \cdot A_1, \quad (4)$$

其中: A_1 为遮光罩底部轮廓线包络的面积,也是光学系统直接为阳光所照射的当量面积。

(2)当入射阳光部分进入光学系统。阳光的单位时间入射能量为:

$$E_2 = S \cdot \cos \gamma \cdot A_2, \quad (5)$$

其中: A_2 为遮光罩底部轮廓线包络的面积中被阳光所照射的那部分面积。

单位时间 dt 与光线在阳光入射平面上的角度变化 $d\varphi$ 的关系式为:

$$dt = \frac{24 \times 3600 \cdot d\varphi}{2\pi}. \quad (6)$$

而在一天内积累在光学系统中的直接入射阳光能量为:

$$Q_1 = \int E_1 dt = \frac{24 \times 3600}{2\pi} \cdot \int_{-\varphi_1}^{\varphi_1} S \cdot \cos \gamma \cdot A_1 d\varphi, \quad (7)$$

$$Q_2 = \int E_2 dt = \frac{24 \times 3600}{2\pi} \cdot \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} S \cdot \cos \gamma \iint_{A_2} d\sigma d\varphi, \quad (8)$$

其中:当入射光线在光学入射平面上的角度为 $[-$

$\varphi_1, \varphi_1]$ 时,光学系统完全为阳光所照射。当入射光线在光学入射平面上的角度为 $[-\varphi_2, -\varphi_1]$ 或 $[\varphi_1, \varphi_2]$ 时,光学系统部分为阳光所照射。而当入射光线在光学入射平面上的角度小于 $-\varphi_2$ 或大于 φ_2 时,阳光不进入光学系统。

进入遥感仪器内部需要限制的入射角在 (α, β) 入射阳光量占进入遥感仪器内部总阳光量的份额,以下简称阳光抑制比 K 。

则所需要计算的阳光抑制比为:

$$K = \frac{Q_2}{Q_2 + Q_1} = \frac{\int_0^{\varphi_1} \iint_{A_2} d\sigma d\varphi}{\int_0^{\varphi_1} \iint_{A_2} d\sigma d\varphi + \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} A_1 d\varphi}. \quad (9)$$

K 越接近于1,表示外遮光罩对视场外的阳光抑制能力越差, K 越接近于0,表示外遮光罩对视场外的阳光抑制能力越强。

式(9)积分可以通过 Monte-Carlo 方法进行求解,首先让 φ 在 $[0, \pi]$ 范围内随机取值 N 次。通过所取得的 φ_x 确定遮光罩底部轮廓面逆着太阳光方向在遮光罩外口平面上的投影轮廓。再次运用 Monte-Carlo 方法,求解该投影轮廓与遮光罩外口轮廓的相交面积 A 。

如 $A=A_1$,则此时阳光完全照射到遮光罩底部轮廓面,统计出该类情况下 φ 的取值数 N_1 。如 $0 < A < A_1$,则此时 A 为遮光罩底部轮廓线包络的面积中为阳光所照射的那部分面积 A_2 。统计出该类情况下 φ 的取值数 N_2 :

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{N_2} A_{2,i} \cdot \cos \gamma_i}{\sum_{i=1}^{N_2} A_{2,i} \cdot \cos \gamma_i + \sum_{j=1}^{N_1} A_1 \cdot \cos \gamma_j}, \quad (10)$$

其中: $A_{2,i}$ 为对 φ 的在 $[0, \pi]$ 内的第 i 次取得值 φ_i 下用 Monte-Carlo 方法计算得出的遮光罩底部轮廓线包络的面积中被阳光所照射的面积, γ_i 为此时光线相对于遮光罩中心轴的夹角。

根据以上分析,本文采用 Monte-Carlo 方法编制了通用程序,该程序可计算阳光抑制比 K 和关键遮挡角 β ,适用于不同角度入射阳光、不同底部轮廓的外遮光罩。

本文推导的 K 值可同时用于评估外遮光罩轮廓尺寸对于光学系统尤其是可见光光学系统的成像质量的影响。当不考虑光学系统内部的杂光抑制设计且认为外遮光罩内壁面无阳光反射时,

本文采用的 Monte-Carlo 方法分析的视场外阳光在不同入射角与总进入阳光能量的比值 K 正比于该离轴角下的可见光光源透射比 PST。

3 实例分析

通常静止轨道上的空间相机同时具有红外与可见光的观测能力,观测目标为地球,对地球全盘或者局部区域进行观测成像,视场角在 $20^\circ \times 20^\circ$ 左右或以内。本文分析的为遮光罩底部轮廓,为一椭圆,东西方向长半轴为 300 mm,南北方向短半轴为 200 mm,东西方向半视场角 α_1 为 11.686° ,南北方向半视场角 α_2 为 10.865° 。当东西方向轴面上 β 角变化时,外遮光罩的形状尺寸以及阳光抑制比与东西方向上遮挡角 β 的关系如图 6 所示。

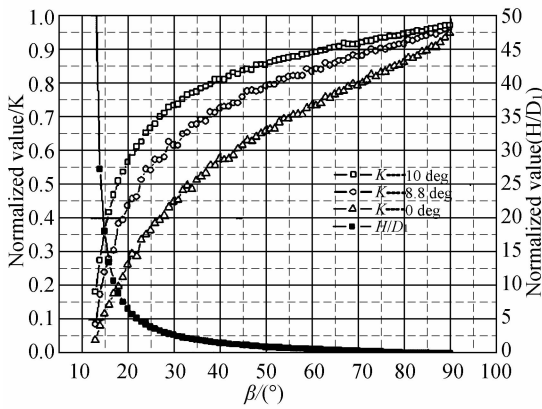


图 6 不同阳光与赤道夹角 ω 时,东西方向上外遮光罩的形状尺寸、阳光抑制比 K 与东西方向上遮挡角 β 的关系

Fig. 6 Dimension, sunlight prohibitory ratio K vs. east-west shielding angle β in different sun inclinations

从外遮光罩东西截面上分析,此时外遮光罩内部的通光部分轮廓尺寸与外遮光罩的关键遮挡角 β 的变化用曲线表示,见图 6。

每天阳光入射角与外遮光罩开口面法向夹角 φ 变化为 $(0^\circ, 360^\circ)$ 。入射方向角不在 $(-\beta, \beta)$ 内的阳光全部落在外遮光罩上。

ω 角随季节变化,当 $\omega \in (-8.8^\circ, 8.8^\circ)$ 时,光学系统受地球遮挡影响。当 $|\omega| \in (0, \alpha_2)$ 时,随着 ω 角的增加,在同一 β 角下,阳光抑制比 K 增加。当 $|\omega| \in (\alpha_2, 23.5^\circ)$ 时,阳光抑制比为 1,即

在该日期,直射入光学系统的阳光均为视场外能量。

当 ω 角为 0 时(春秋分),由同种形状外遮光罩进入光学系统的太阳峰值能量最大,由图 6 可以看出,当 K 值小于 0.5 时, H/D_1 开始急剧增大,即需要的外遮光罩长度迅速增加,在尺寸及重量方面的代价太大。因此在确定外遮光罩东西向的关键遮挡角 β 时,本文根据图 6 取当春秋分 $\omega = 0$ 时的 $K = 0.5$,此时外遮光罩东西向的关键遮挡角 β 为 34.2° ,外遮光罩高度为遮光罩底部轮廓东西轴长的 1.8 倍,即 1 080 mm。

把东西方向上的关键遮挡角 β 与太阳照射到通光口径的时间(基本上是第一光学表面暴露在太阳光中的时间)之间的关系转化为时间:太阳 24 h 完成 360° ,太阳由通光口径进入相机内部的角度为 $(-\beta, \beta)$,即 2β ,故进入相机的时间为:

$$T_{\text{sun}} = 24 \cdot \frac{2\beta}{360} - T_{\text{shadow}}, \quad (11)$$

其中: T_{shadow} 为相机在轨道上运行一圈中在地球阴影区经历的时间。

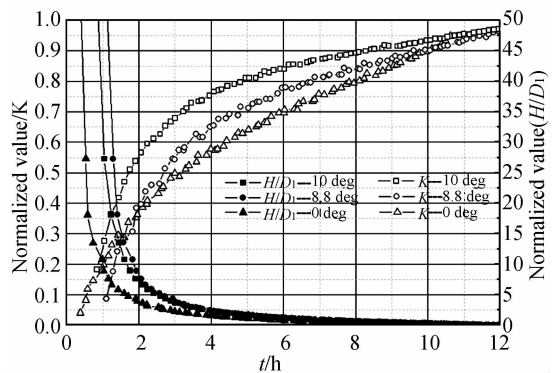


图 7 春秋分时东西方向遮光罩形状尺寸、阳光抑制比 K 随入射时间长度的变化

Fig. 7 Dimension, sunlight prohibitory ratio K vs. sunlight incident duration in at equinox

春秋分时,太阳光与赤道夹角为 0,也就是 ω 为 0,地球东西阴影区夹角为 20° 。地影时间 T_{shadow} 约 1.33 h,此时阳光直射到光学系统的时间最短。扣除地影时间后,阳光照到外遮光罩下端面的时间如图 7 所示。 $\omega = 8.8 \sim 10^\circ$ 时光学系统不进入地影区,当 $K = 0.5$ 时,春秋分时,阳光直射入光学系统的时间可减小至 3 h。

综合东西南北方向的情况,外遮光罩形状尺寸以东西方向遮挡角为基础,这里,初步确定 $\beta = 34.2^\circ$,同时,在给定的东西和南北视场角的前提下,

南北方向的遮挡角也可以由东西方向的遮挡角计算得出。这样也就确定了外遮光罩内部通光轮廓形状。

4 结 论

以减少进入光学系统的视场外阳光为目标, 本文从能量分析的角度对静止轨道三轴稳定对地观测光学系统直接进入光学系统的太阳能进行

分析, 推导出与外遮光罩形状、高度以及太阳与静止轨道面夹角相关的无量纲阳光抑制比 K , 当阳光入射角 ω 大于南北方向的视场角 α_2 时, $K=1$, 外遮光罩对进入光学系统的视场外阳光能量不能抑制。以 K 值指导外遮光罩的高度设计, 以春秋分 $K=0.5$ 为目标, 外遮光罩的高度为遮光罩底部轮廓东西轴长的 1.8 倍, 此时阳光由遮光罩底部轮廓进入光学系统的时间为 3 h, 满足卫星载荷的尺寸设计要求。

参考文献:

- [1] KARSTEN S, SUMITA C, KURT G, *et al.*. Design and manufacture of a lightweight reflective baffle for the BepiColombo laser altimeter [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(4): 043003-1-11.
- [2] PIERFRANCESCO B, FABIO P. Baffling system for the Wide Angle Camera (WAC) of ROSETTA mission [J]. *SPIE*, 2000, 4093, 79-88.
- [3] FEINBERG L, COHEN L, DEAN B, *et al.*. Space telescope design considerations [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(1): 011006-2-9.
- [4] 杨林, 李达, 崔天刚, 等. 空间太阳望远镜在紫外波段成像检测中的杂散光测量和消除 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(7): 1456-1463.
YANG L, LI D, CUI T G, *et al.*. Measurement and elimination of stray light from space solar telescopes for imaging test at UV band [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7): 1456-1463. (in Chinese)
- [5] 蒋范明, 陈凡胜. 地球同步轨道随动可展开遮光罩技术研究 [J]. *红外技术*, 2012, 34(2): 73-77.
JIANG F M, CHEN F SH. Deployable and rotatable baffle servo system for remote sensor in space [J]. *Infrared Technology*, 2012, 34(2): 73-77. (in Chinese)
- [6] 邹刚毅, 樊学武. 离轴三反射望远镜遮光罩设计与杂光分析 [J]. *光子学报*, 2009, 38(3): 605-609.
ZOU G Y, FAN X W. Baffle design and stray light analysis of the off-axis three-mirror telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(3): 605-609. (in Chinese)
- [7] 廖志波, 伏锐敏, 宗肖颖. 星敏传感器反射式遮光罩的设计 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(1): 66-69.
LIAO ZH B, FU R M, ZONG X Y. Design of specular baffle of star sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 66-69. (in Chinese)
- [8] 颜昌翔, 许杰, 彭岩. 离轴三反空间光学望远系统的杂散光抑制 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(2): 289-293.
YAN C X, XU J, PENG Y. Stray light suppression of three-mirror off-axis space optical telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 289-293. (in Chinese)
- [9] 贾学智, 金光, 张雷. 空间相机外遮光罩结构与优化 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(8): 1560-1565.
JIA X ZH, JIN G, ZHANG L. Design and optimization of lightweight outer baffle for space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(8): 1456-1463. (in Chinese)
- [10] DU B L, LI L, HUANG Y F. Stray light analysis of an on-axis three-reflection space optical system [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(6): 569-572.
- [11] EDWARD S. Thermal design of retro-reflective stray light fore-baffles for space-borne optical systems [J]. *SPIE*, 2001, 4198, 82-95.
- [12] GOES I-M DataBook. *National Aeronautics and Space Administration Goddard Space Flight Center* [M]. Goddard Space Flight Center, 1996.
- [13] 游思梁, 王淦泉, 陈桂林. 基于 Matlab 的 FY-4 星载扫描辐射计午夜太阳入侵模拟 [J]. *上海航天*, 2006, 23(5): 1-2.
YOU S L, WANG G Q, CHEN G L. Midnight solar intrusion simulation of imager in FY-4 Satellite based on matlab [J]. *Aerospace Shanghai*, 2006, 23(5): 1-2. (in Chinese)
- [14] 游思梁. 太阳辐射对地球同步卫星扫描成像辐射计性能的影响 [J]. *红外*, 2006, 27(9): 39-43.
YOU S L. Effect of solar radiation on performance of scanning imaging radiometer on board geostationary satellite [J]. *Infrared*, 2006, 27(9): 39-43. (in Chinese)

- [15] 叶荣,尹球,匡定波,等. FY-4 大气垂直探测仪扫描镜的太阳入侵研究[J]. 红外与毫米波学报, 2011,30(5):433-437.

YE R, YIN Q, KUANG D B, *et al.*. Effect of so-

lar intrusion on scanning mirror of atmosphere vertical sounder onboard the FY-4 geostationary satellite [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2011,30(5):433-437. (in Chinese)

作者简介:



钱 婧(1982—),女,福建建瓯人,博士研究生,助理研究员,主要从事空间遥感仪器热控技术方面的研究。E-mail: hitqj@163.com



董德平(1967—),男,江苏如东人,博士研究生,研究员、博士生导师,1989年于西安交通大学获学士学位,2000年于中科院上海技术物理研究所获博士学位,主要从事空间仪器热控、低温光学污染、热开关、冷光学等相关课题的研究。



孙胜利(1970—),男,博士,研究员,博士生导师,内蒙古通辽人,1996年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,1999年于中科院上海技术物理研究所获得博士学位,主要从事大型光电仪器的空间应用方面研究。

(版权所有 未经许可 不得转载)