

星敏传感器杂散光抑制设计与验证

杜伟峰*, 王燕清, 郑循江, 高文杰, 谢延安

上海航天控制技术研究所, 上海 201109

摘要 以杂散光在探测器像面平均照度低至 6 等星为例, 首先从理论及工程应用角度对星敏传感器遮光罩进行论证、设计、仿真、测试, 并提出在遮光罩设计阶段应该充分结合光学镜头、星点提取算法、技术要求特点, 确定遮光罩有效通光口径、视场、外形包络尺寸、消光性能; 其次, 利用几何作图的方法确定遮光罩挡光环位置、刃口倒角角度、刃口倒角朝向, 并建立起散射关键面; 然后, 根据仿真过程中一次散射与多次散射对像面照度的影响确定刃口厚度; 最后, 通过仿真和实验室测试方式证明所设计的遮光罩结构合理, 可满足太阳光抑制低至 6 等星, 星敏传感器受杂散光影响测量精度偏差在 $2''$ 以内。

关键词 光学器件; 星敏传感器; 遮光罩设计; 杂散光抑制; 杂散光仿真

中图分类号 O435 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS221388

1 引言

星敏传感器是以恒星为参照系, 通过探测地球上不同位置的恒星进行姿态解算, 可为航天器提供准确的空间方位和基准。由于星敏传感器探测的是微弱恒星星光, 因此其对杂散光抑制技术的要求非常苛刻。星敏传感器在轨工作过程中, 会受到来自太阳光、地气光、月光、卫星星体的辐射, 当有杂散光干扰时, 参与运算的像元同时接收到星光和杂散光, 杂散光的能量及分布影响像元灰度值, 轻者导致星敏传感器测量精度下降^[1-6], 重者导致恒星捕获失效, 所以星敏传感器对于杂散光的抑制需求十分迫切。

遮光罩是星敏传感器抑制杂散光的最有效措施, 在遮光罩设计阶段常以太阳光作为杂散光源考核星敏传感器对杂散光的抑制性能。不同的型号任务对杂散光抑制需求存在差异, 需要结合实际在轨工况以及任务要求设计合适的遮光罩。文献[7-11]对遮光罩进行了详细设计, 其重点是对遮光罩自身的设计, 对后端与镜头匹配设计的研究相对较少。本文重点对遮光罩进行工程化设计, 以杂散光抑制低至 6 等星为设计输入条件, 开展遮光罩与镜头杂散光抑制指标论证、设计、仿真、测试。

2 遮光罩设计参数匹配基本原理

遮光罩光学设计应与光学镜头紧密联系在一起, 从应用的系统角度完成光路设计, 否则在实际工程中

就会出现光瞳、视场、装调等不匹配的问题, 从而降低星敏传感器的杂散光抑制性能。遮光罩的设计输入条件包括: 光学镜头视场、镜头第一片有效通光口径及该口径与遮光罩出光口距离、杂散光抑制角度、光机系统消光比。

2.1 有效通光口径匹配

部分有关遮光罩设计的研究是将光学镜头入瞳作为设计输入, 理论上叫作光瞳匹配。如图 1 所示, O_1 、 O_2 为光轴。图 1(a) 中孔径光阑设置在光路前段, A_1B_1 为孔径光阑; 图 1(b) 中孔径光阑设置在光路中央, A_2B_2 为孔径光阑。图 1(a)、(b) 中使用的孔径光阑尺寸相同, 视场相同。当光学系统采用图 1(a) 所示的形式时, 遮光罩出光口径可依据 A_1B_1 的尺寸进行设计; 当光学系统采用图 1(b) 所示的形式时, 遮光罩出光口径要依据 EF 的尺寸进行设计, 如果还是依照孔径光阑尺寸进行设计, 则会存在渐晕。在实际工程中, 为了校正像差, 光阑常放置在镜头光路中心^[12-13], 采用类似图 1(b) 的光路形式。

为了避免出现光瞳不匹配现象, 工程上将首片镜片作为设计基准, 并根据光路视场沿线设计遮光罩出光口径, 如图 2 所示。图 2(a) 所示为镜头在光学设计软件中的模型, 图 2(b) 中 AB 为遮光罩出光口径, $|O_1O_2|$ 是遮光罩出瞳与镜头镜片中心的距离, 考虑到实际装配等工艺要求, 遮光罩出瞳半口径保留 2 mm 余量。

收稿日期: 2022-06-28; 修回日期: 2022-07-24; 录用日期: 2022-08-25; 网络首发日期: 2022-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(62005158)

通信作者: *dwfhter@163.com

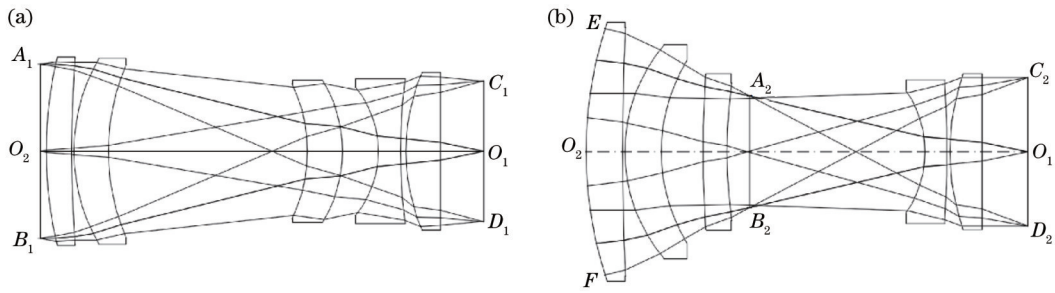


图 1 孔径光阑匹配示意图。(a)孔径光阑设置在光路前面;(b)孔径光阑设置在光路中间

Fig. 1 Schematic of aperture stop matching. (a) Aperture stop is set in front of the light path; (b) aperture stop is set in middle of the light path

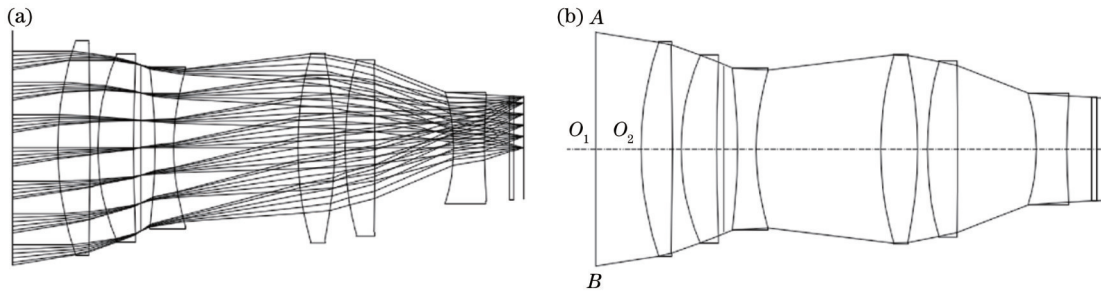


图 2 遮光罩出光口径设计依据。(a)镜头导出模型;(b)遮光罩出光口径确定

Fig. 2 Design basis of exit pupil aperture of baffle. (a) Derived model of lens; (b) exit pupil aperture of baffle

2.2 视场匹配

受工作平台空间布局限制,要求星敏感器结构重量轻、体积小。由遮光罩设计原理可知,视场是影响遮光罩尺寸的一个重要变量,因此遮光罩要与镜头视场尽可能接近。在工程上,遮光罩的视场大于镜头视场,原因如下:1)由于遮光罩与镜头存在偏心与倾斜,如果两者视场完全一致,当存在偏心与倾斜时,镜头视场和光瞳将会存在遮拦,导致探测器像面杂散光灰度上升,甚至成像,影响星图识别像;2)遮光罩挡光环存在刃

口,各个刃口连线如果与镜头最大视场平行(即遮光罩与镜头视场一致),各个挡光环的刃口散射会叠加在探测器像面;3)当遮光罩的视场与镜头视场接近,在工作像面边角处将会看到亮环,这个亮环是由靠近挡光环刃口区域被照亮引起的非成像光路进入到探测器像面叠加产生,如图 3 所示。因此,遮光罩的工作视场应该大于镜头视场,一般情况下大于半视场 2° ,具体值需要结合镜头通过不断的杂散光光路追迹判断挡光环在像面叠加的散射能量是否满足任务需求而定。

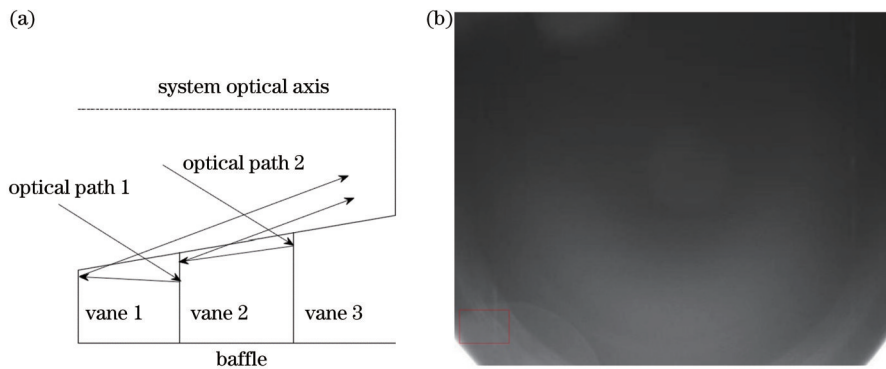


图 3 挡光环面向镜头部分区域散射。(a)挡光环面向镜头部分区域散射路径;(b)经镜头后在探测器像面处散射叠加成环形

Fig. 3 Scattering of the part of light blocking ring facing the lens. (a) Scattering path of the part of light blocking ring facing the lens; (b) circular superposition at the phase of detector passing through the lens

2.3 杂散光抑制角及消光性能匹配

杂散光抑制角度需要从星敏感器系统角度来定义,当太阳光与星敏感器光轴成某一夹角时,星敏感器姿态输出精度与未受杂散光干扰时的偏差可被接受,

此时这个角度为杂散光抑制角。影响杂散光抑制角的主要因素为信杂比和星点提取算法,信杂比的定义如下

$$\begin{cases} E_{\text{star}} = \frac{E_{\text{MV}} \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times E_c \times t \times \pi}{\left(\frac{3 \times a}{2}\right)^2 \times \pi} \\ E_{\text{straylight}} = E_{\text{solar}} \times \cos \theta_0 \times R_{\text{PST}} \times t \\ E_{\text{SSR}} = \frac{E_{\text{star}}}{E_{\text{straylight}}} \end{cases}, \quad (1)$$

式中： E_{star} 为星点在探测器像面的照度； E_{MV} 为目标星等，此处为6等星； D 为光学系统通光口径，此处为22 mm； a 为探测器像元尺寸，此处为5.5 μm ； E_c 为星点能量集中度，假设在3×3像元内能量集中度为85%； t 为光学系统透过率； $E_{\text{straylight}}$ 为太阳光经过遮光罩、光学系统后在探测器像面的平均照度； E_{solar} 为太阳常数，取可见光部分约为675 W/m²； θ_0 为杂散光抑制角，此处为30°； R_{PST} 为光机系统消光比； E_{SSR} 为信杂比，此处为5。图4所示为不同通光口径下 E_{SSR} 与 R_{PST} 的关系曲线，通光口径越大，入射到探测器上的星点能量越强（能量集中度保持一致），对 R_{PST} 的要求越低，经计算 R_{PST} 值为 6.5×10^{-8} 。

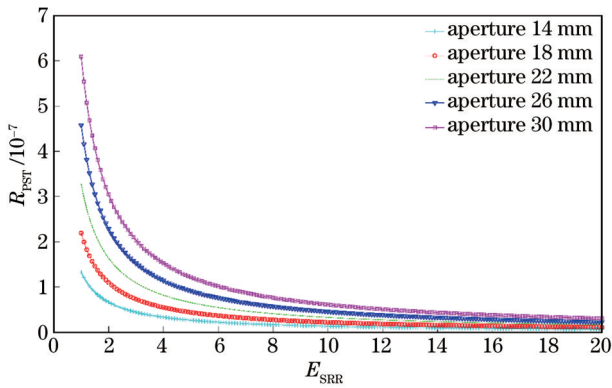


图4 不同通光口径下 E_{SSR} 与 R_{PST} 的关系曲线

Fig. 4 Relationship curves between E_{SSR} and R_{PST} at different entrance pupil apertures

基于星点图像处理算法以及统计学粗大误差理论，星点是否可被识别由式(2)决定。

$$\begin{cases} c_x = \frac{\sum_{(x,y \in s)} x \cdot [G(x,y) - \mu]}{\sum_{(x,y \in s)} [G(x,y) - \mu]} \\ c_y = \frac{\sum_{(x,y \in s)} y \cdot [G(x,y) - \mu]}{\sum_{(x,y \in s)} [G(x,y) - \mu]} \\ G(x,y) > \mu + \sigma \end{cases}, \quad (2)$$

式中： c_x 、 c_y 为星点质心值； x 、 y 为像素坐标； $G(x,y)$ 为像素灰度； s 为目标星点的像素集合，集合内每个像元互为四连通域； μ 为背景灰度均值； σ 为阈值偏移量。式(2)表明，当且仅当星点与杂散光背景灰度叠加不饱

和，同时星点灰度大于背景灰度均值与阈值偏移量的和时，星点可被提取出来。

2.4 包络尺寸匹配

遮光罩包络尺寸原理如图5^[14-15]所示， O_1O_2 为光轴， AB 为遮光罩出光口径，入射光束 CA 、 EG 平行，且与光轴成 θ_1 夹角， AF 、 BE 为遮光罩视场沿线，与光轴构成半视场角 ω_0 。 $|BJ|$ 计算公式为

$$|BJ| = \frac{|AB| \tan \omega_0}{\tan \theta_1 - \tan \omega_0}. \quad (3)$$

根据式(3)求出 $|BJ|$ 后，利用正切关系求出 $|CJ|$ 。工程上用作图法可更方便确定遮光罩内腔尺寸。对杂散光要求不高的光机系统，只需使沿着抑制角入射的平行光束 AC 照射在遮光罩出光口径左侧 AB 即可，如果在此包络尺寸范围内光机系统消光比不满足技术要求，则需要将入射光束沿着遮光罩视场沿线由 H 向 I 方向逐步平移，即可确定新的遮光罩包络尺寸，直至仿真 R_{PST} 满足技术要求为止。

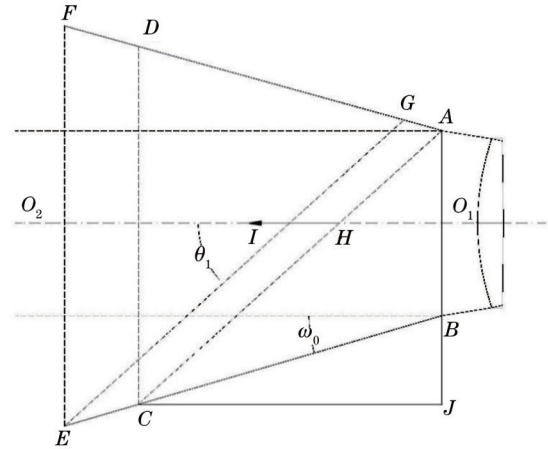


图5 遮光罩包络尺寸原理图

Fig. 5 Schematic of envelope size of baffle

3 遮光罩包络尺寸初始设计

设计输入及技术要求如表1所示。由第一镜片有效通光口径、遮光罩出光口径与第一镜片的距离、遮光罩半视场3个输入条件，确定 O_1O_2 、 AB 、 AC 、 BD 视场沿线(C 、 D 还没有确定)，如图6所示；以 A 为起点，与

表1 设计输入及技术要求

Table 1 Design input and technical requirements

Title	Technical requirement
Degree of angle to suppress sunlight	30°
R_{PST}	6.5×10^{-8}
Image illumination of stray light	6 Mv
Effective aperture of the first lens	24 mm
Distance between the exit of baffle and the first lens	5 mm
Half field of view of the baffle	12°

光轴成杂散光抑制角的视场沿线 AD 交视场沿线 BD 于 D 点;根据遮光罩允许的最大包络尺寸确定遮光罩外壁 I_1H_1 、 H_2H_3 、 H_4H_5 、 H_6H_6 ;连接 AI_1 ,交 BD 于 E 点,确定第二个挡光环 EH_2 位置,这种以作图的方法确定挡光环的物理意义是阻止内壁 I_1H_1 的光线以一次散射方式直接进入遮光罩出光口径;连接 CE 至内壁 H_2H_3 交于点 I_2 ,连接 AI_2 交视场沿线 BD 于 F ,确定第三个挡光环位置,其物理意义是阻止内壁 I_2H_3 的光线以一次散射的方式直接进入遮光罩出光口径。没有用 AH_2 与 BD 相连接确定 F 的主要原因包括两个:1)内壁 H_2I_2 处的散射光至少经过两次吸收,能量已经衰减很多,不足以造成强烈的杂散光干扰;2)连接 AH_2 与 BD 会增加挡光环数量,引起多余的刃口散射,同时还增加遮光罩质量。从图 6 可以看出,挡光环数量与挡光环内径(DI_1 、 EH_2 、 FH_4 、 GH_5 、 BH_6)有关,内径越宽,挡光环的数量越少,综合考虑各种因素,挡光环数量控制在 4~6 个比较合适。

3.1 挡光环结构形式设计

遮光罩挡光环通常有斜角、直角、二次曲面等结构形式,其中斜角与直角多用于吸收型遮光罩,二次曲面多用于反射型遮光罩,由于加工装配工艺限制,反射型遮光罩在星敏感器上的应用并不是很多。如图 7(a)、(b)所示,斜角和直角挡光环基准点 C_1D_1 、 C_2D_2 与出光口径 A_1B_1 、 A_2B_2 距离 L_0 相等,不同的是:首先,斜角遮光罩长度要比直角遮光罩分别多出 L_1 、 L_2 ;其次,当直角遮光罩和斜角遮光罩的长度相等时,直角遮光罩的杂散光抑制角会比斜角遮光罩小,意味着消光性能更强,如图 7(a)中 θ_2 和 θ_3 所示(θ_2 为斜角遮光罩抑制角, θ_3 为具有相同长度的直角遮光罩抑制角);再次,当光束

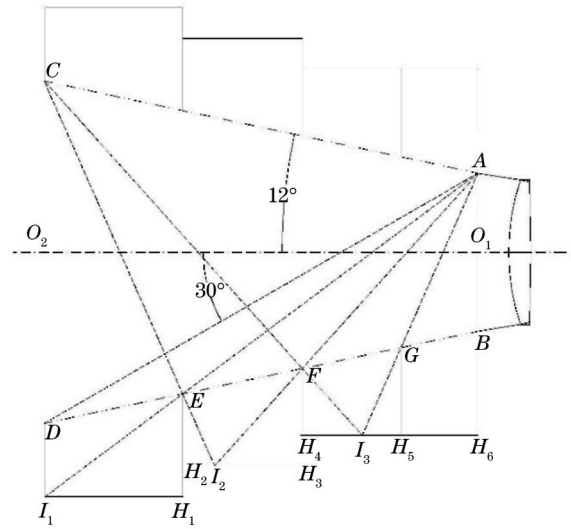


图 6 遮光罩初始结构

Fig. 6 Initial structure of baffle

G_1E_1 以某一角度入射到图 7(a) 中最后一块挡光环时,由于挡光环采用斜角形式,散射面基于斜角平面向 2π 空间传播,此时 K_1 点处没有接收到斜角挡光环传播的能量,无法向 A_1B_1 辐射来自斜角的散射能量;当采用直角挡光环,则散射方向如图 7(b) 所示的 2π 空间,此时 K_2 能接收到来自直角挡光环的能量,并将该能量传递至 A_2B_2 。从图 7 可以看出,通常情况下斜环数量少于直环。

在设计斜角挡光环时,需要注意边缘 C_1N_1 与 N_1M_1 构成的夹角要小于 180° ,否则斜环背面将成为被照面及关键面,光束通过背面散射直接入射到镜头处。本研究从加工工艺角度采用直角挡光环的设计方案。

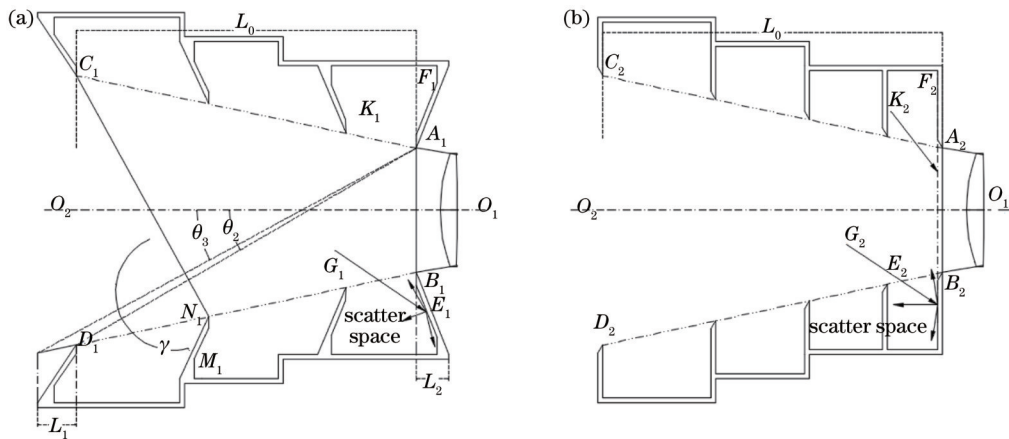


图 7 斜角形与直角形挡光环示意图。(a)斜角挡光环;(b)直角挡光环

Fig. 7 Diagram of light blocking rings at bevel angle and right angle. (a) Light blocking rings at bevel angle; (b) light blocking rings at right angle

3.2 散射关键面

遮光罩散射关键面包括刃口和刃口附近挡光环区域。挡光环的作用是分割太阳光进入到遮光罩腔体内的光线,刃口的作用是减少挡光环与视场边界处的

散射光束传播。刃口如图 8 所示,理想中的刃口为刀尖,厚度为 0,但是在实际机械加工过程中,工艺上不可能保证厚度为 0,甚至存在卷边、锯齿现象。刃口接收的太阳光辐照度为

$$d\Phi = E_{\text{solar}} \times \cos \theta \times dS, \quad (4)$$

式中: $d\Phi$ 为刃口接收的光通量; E_{solar} 为太阳常数; dS 为刃口被照射的微分面积; θ 为太阳光与星敏感器光轴的夹角。从式(4)可以看到, 横截面积越小, 接收到的能量越少。刃口成为星敏感器杂散光抑制过程中的关键面与被照面, 当刃口受到太阳光辐射后, 会成为杂散光散射源向四周辐射, 根据辐亮度计算公式, 辐射空间立体角越大, 传输的辐亮度越多。辐亮度的计算公式为

$$L = \frac{d\Phi}{dS \cdot \cos \alpha \sin \alpha \cdot d\alpha d\varphi}, \quad (5)$$

式中: L 为辐亮度; $d\Phi$ 为刃口处发光通量; dS 为刃口被照射微分面积; α 为刃口相对镜头入口处的张角; $d\varphi$ 为立体角在底面上展开的平面夹角范围。从图 8 可以看到, 刃口距离镜头入光口越近, 面向镜头的散射张角越大, 因此在设计时需要重点考虑镜头入光口附近的刃口厚度, 可以适当增大遮光罩入口处刃口厚度。

刃口对遮光罩性能的实验在专业杂散光实验室完成, 实验中的两个遮光罩结构、加工批次、涂层工艺均相同。测试遮光罩共有 5 个刃口, 其中实验 1 的罩体刃口厚度加工值均为 $150 \mu\text{m}$, 实验 2 的罩体刃口厚度加工值均为 $50 \mu\text{m}$ 。图 9(a)、(b) 为利用科学相机在相同条件下对遮光罩刃口的拍摄图片; 图 9(c)、(d) 为上述

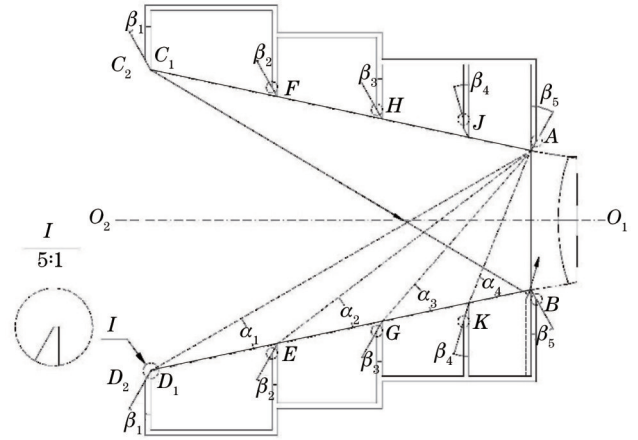


图 8 刃口一次散射示意图

Fig. 8 Diagram of single scattering at cutting edge

遮光罩安装在同一星敏感器上(软件、积分时间、增益均相同)在杂散光实验过程中对相同太阳光入射时拍摄的灰度图。从图 9 可以看到: 当刃口厚度由 $150 \mu\text{m}$ 变成 $50 \mu\text{m}$ 后, 科学相机拍摄图片的灰度峰值由 126 DN 减少到 69 DN, 灰度均值由 1.3 DN 减少到 0.3 DN, 标准差由 8 DN 减少到 1.3 DN; 星敏感器像面灰度峰值由 255 DN 下降到 192 DN, 灰度均值由 169 DN 减少到 78 DN, 标准差由 66 DN 减少到 30.3 DN。

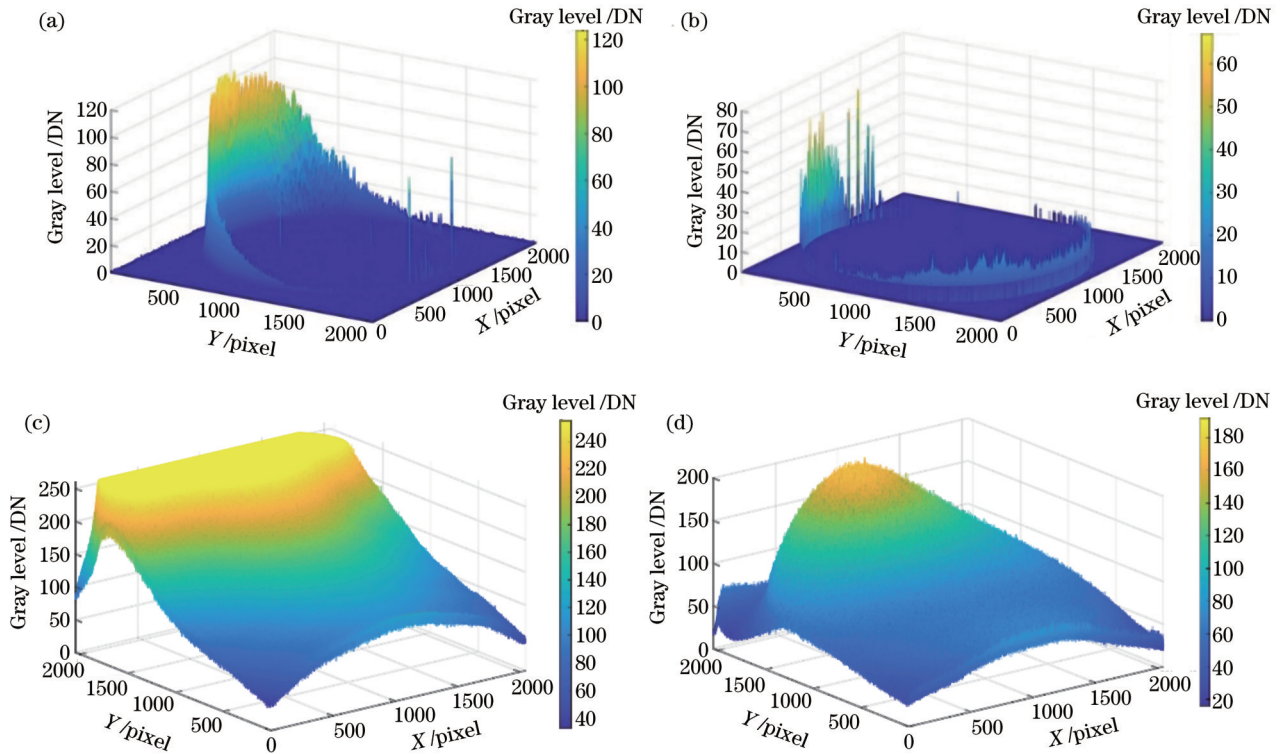


图 9 不同刃口厚度引起的像面散射能量差异。(a) 实验罩体 1 刃口散射; (b) 实验罩体 2 刃口散射; (c) 实验罩体 1 刃口散射引起的像面灰度; (d) 实验罩体 2 刃口散射引起的像面灰度

Fig. 9 Discrepancy of scattering energy of image plane caused by different edge thickness. (a) Edge scattering of test baffle 1; (b) edge scattering of test baffle 2; (c) image plane gray caused by edge scattering of test baffle 1; (d) image plane gray caused by edge scattering of test baffle 2

在设计紧凑型遮光罩时,需要将靠近镜头处的刃口倒角朝向镜头,如图 8 的 β_5 所示;远离镜头处的刃口朝向遮光罩进光口^[16],如图 8 的 $\beta_1 \sim \beta_4$ 所示。这是因为最后一个挡光环刃口倒角如果朝向遮光罩进光口(图 8 中第五挡光环虚线),则入射光束在倒角斜面处形成的散射光束可以覆盖镜头入光口 AB ;如果倒角斜面面向镜头,则倒角处不会直接受到太阳光照射,从而减少杂散光进入镜头;当遮光罩包络尺寸存在余量时,可以让太阳光沿着抑制角入射到最后一个挡光环中下部,此时对最后一个挡光环的刃口倒角朝向便可以不作要求。每个挡光环刃口倒角角度并不相同,在设计时需要满足式(6),确保倒角散射光束不会直接进入镜头内部。

$$\beta \leq 90^\circ - \omega - \alpha, \quad (6)$$

式中: β 为刃口倒角; ω 为半视场角; α 为刃口相对镜头入口处张角。

对于高灵敏度探测的星敏感器、星相机,例如探测到 8 Mv 以上,需要避免抑制角处的一次刃口散射的影响,通常的做法是设计两级或多级遮光罩^[17],具体方法如图 10 所示, $ABCD$ 是一级遮光罩, θ_1 是一级

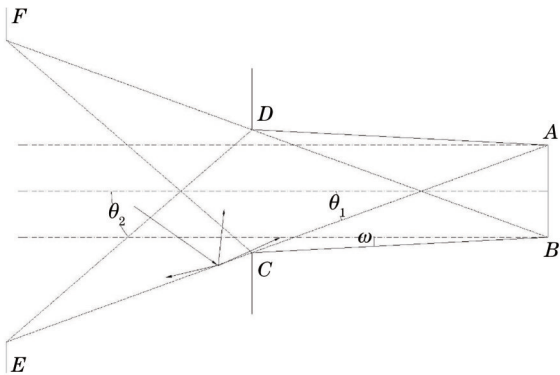


图 10 二级遮光罩设计示意图
Fig. 10 Design diagram of secondary baffle

遮光罩杂散光抑制角, θ_2 是二级遮光罩抑制角, ACE 共线, A 为遮光罩出光口径边界, E 为二级遮光罩进光口径边界。二级遮光罩以一级遮光罩为基础, CD 是一级遮光罩的进光口,同时又是二级遮光罩的出光口。将一级遮光罩中的抑制角 θ_1 作为二级中的半视场角,当太阳光入射到 EC 区域刃口时,刃口散射空间范围为 ACE ,不会有散射光束经过一次刃口散射进入到 AB 区域。根据式(3)或者作图的方法确定 $CDFE$ 内部区域。根据表 1,设计输入为杂散光均值照度低于 6 等星,依照设计经验,选用一级遮光罩作为初始设计方案。

4 仿真分析和实验讨论

4.1 杂散光链路仿真

当遮光罩初始模型设计完毕时,挡光环刃口厚度可为变量,理想值为 $0 \mu\text{m}$,设计值为 $10 \mu\text{m}$,工程让步接收值为 $30 \mu\text{m}$,仿真输入条件如表 2 所示,仿真数据如图 11 所示,像面照度由一次刃口散射和多次腔体散射构成。当刃口厚度为 $0 \mu\text{m}$ 时,散射光路中不存在一次散射,此时杂散光的主要来源为多次散射;当刃口厚度为 $10 \mu\text{m}$ 时,散射光路中同时存在两种散射,此时杂散光的主要来源为多次散射;随着刃口逐渐变厚,一次散射成为主要的杂散光来源,当刃口厚度为 $30 \mu\text{m}$ 时,一次散射能量是多次散射能量的 2 倍。刃口的厚度与杂散光 R_{PST} 、挡光环数量有关,当挡光环数量较多时,刃口需要变得很薄;当杂散光 R_{PST} 要求不高时,刃口可以适当放宽加工精度要求。刃口厚度需要配合光学镜头联合仿真,给出设计理想值和工程让步接收值,一般以一次刃口散射是多次散射到像面能量的 50% 为宜。当遮光罩刃口为 $30 \mu\text{m}$ 时,在 30° 太阳光入射条件下,光机系统像面上的最大杂散光照度为 $1.4 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$, R_{PST} 为 2.2×10^{-8} ,满足 6.5×10^{-8} 的技术要求(不考虑消光涂层均匀性)。

表 2 仿真条件

Table 2 Simulation conditions

Serial number	Simulation condition	Technical requirement
1	Simulation model	Baffle and lens
2	Coating absorptivity	Absorptivity of visible light is 99.4%
3	Simulation of sunlight illumination	675 W/m^2 (only the visible part is considered)
4	Accuracy of simulation	1.0×10^{-12}
5	Key sampling area	Cutting edge and vanes face to the lens
6	Scattering model	ABg
7	Number of light traced	5×10^6
8	Thickness of edge	$0 \mu\text{m}$
		$10 \mu\text{m}$
		$30 \mu\text{m}$
9	Incident angle of sunlight	$30^\circ \sim 86^\circ$

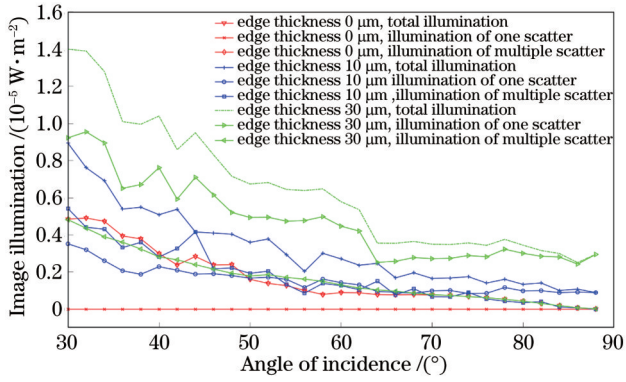


图 11 刃口厚度与像面杂散光照度的仿真结果

Fig. 11 Simulation results of edge thickness and stray illumination

4.2 实验室测试

杂散光测试对实验环境要求较高^[18], 实验条件如表 3 所示, 将待测试的星敏感器安装在五轴控制台, 利用经纬仪建立太阳模拟器与星敏感器安装基准。

图 12(a) 所示为太阳模拟器输出光束(以下简称“太阳光”)入射到星敏感器遮光罩的测试结果。图 12(b) 所示为星敏感器受太阳光干扰时的像面灰度, 由于测试距离为有限距, 当太阳光入射到遮光罩内部时, 一部分太阳光直接被遮光罩表面消光涂层吸收, 一部分太阳光经过在遮光罩内部多次散射吸收后进入探测器

像面, 还有一部分太阳光被挡光环散射至测试空间, 并且将测试空间照亮, 因此测试值会比真实值高, 星敏感器输出的灰度极大值为 130 DN, 背景灰度均值为 61 DN, 标准差为 21 DN。图 12(c) 所示为星敏感器在不同视场下拍摄出的 6 等星与太阳光干扰时灰度的叠加数据, 6 等星在探测器上的峰值灰度为 72 DN。从图 12(c) 可以看出, 当太阳光以 30° 入射到星敏感器时, 星点与杂散光背景叠加的灰度最大值为 182 DN, 此处背景灰度均值为 110 DN(灰度值大于 110 DN 的像元占比为 1%, 灰度值大于 120 DN 的像元占比为 0.1%, 因此没有把星点叠加到最强灰度值上), 当阈值偏移量为 20 时, 满足式(2)的星等可被提取的必要条件。

表 3 实验条件技术要求

Table 3 Requirements of experimental conditions and techniques

Serial number	Title	Technical requirement
1	Cleanliness	10000 level
2	Illumination of darkroom	Less than seventh-magnitude stars' level
3	Standard of Solar Simulator	AAA
4	Output of solar constant	675 W/m ² (only the visible part is considered)
5	Test angle	30°

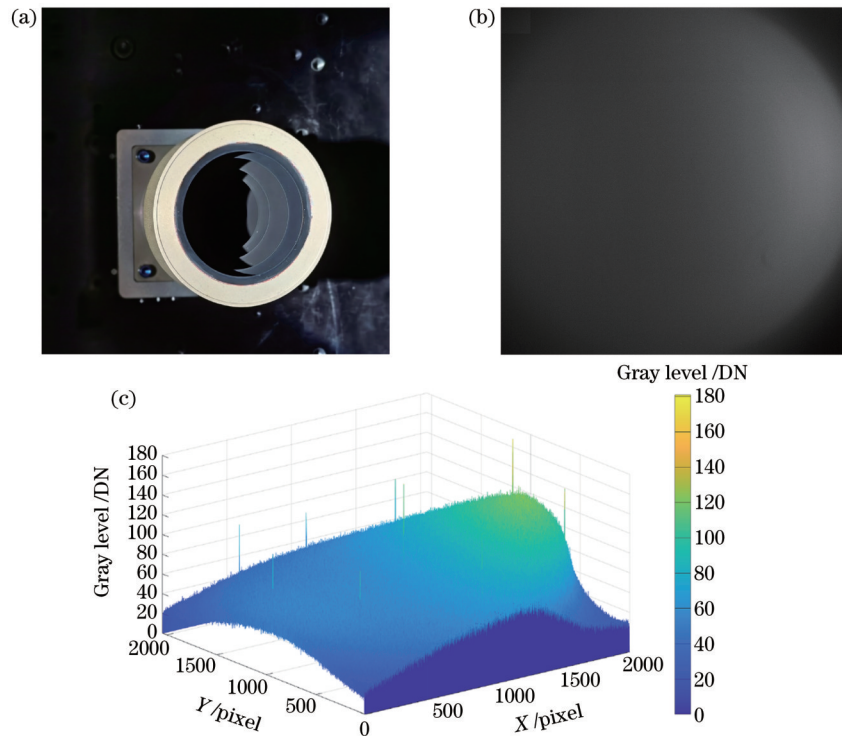


图 12 杂散光测试数据。(a) 杂散光测试现场图; (b) 杂散光在星敏感器像面上的灰度图像; (c) 杂散光灰度图像与不同视场内 6 等星灰度叠加

Fig. 12 Stray light test data. (a) Stray light test site diagram; (b) gray level image of stray light on image plane of star sensor; (c) superposition of stray light gray-scale image and sixth-magnitude stars gray level image in different fields of view

4.3 外场实验

外场实验中星传感器光机软件状态与 4.2 节保持一致,实验条件为一个太阳常数平行光与星传感器成 30° 夹角入射。对比实验条件分为无光入射和使用常规遮光罩在相同实验状态下的测试。实验数

据如图 13 所示:当星传感器未受杂散光干扰时,精度分别为 $2.13''$ 和 $2.34''$;当配备常规遮光罩并受到杂散光干扰时,精度为 $8.07''$ 和 $7.66''$;当配备所设计的遮光罩并在相同测试条件下时,精度为 $3.89''$ 和 $4.01''$ 。

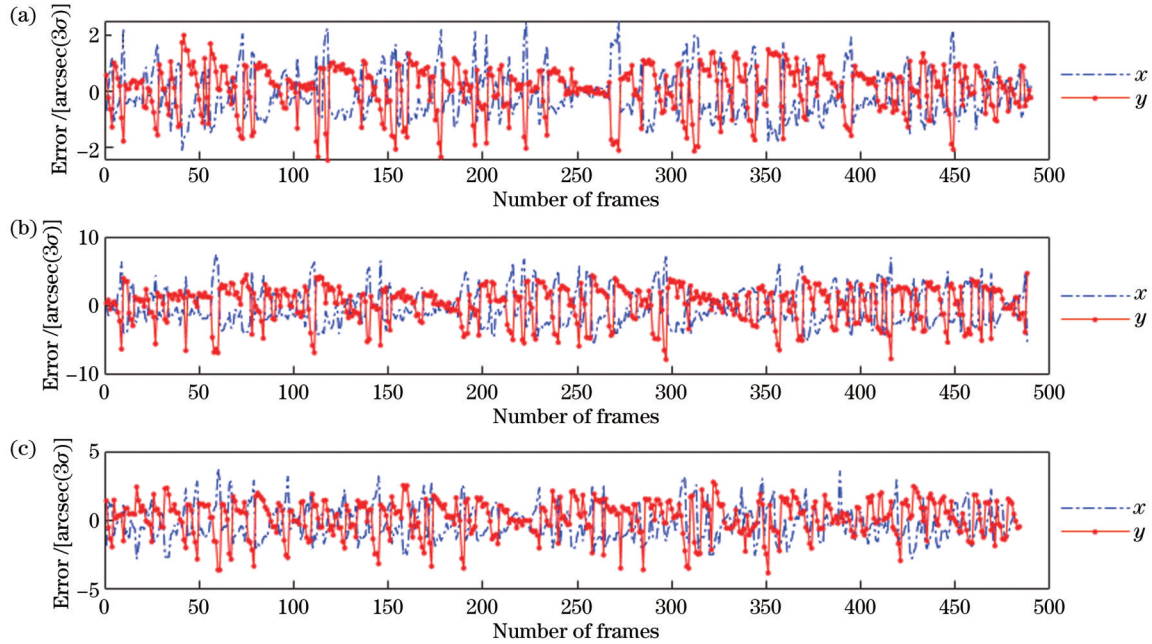


图 13 外场实验数据。(a)未受杂散光干扰时星传感器的精度;(b)使用常规遮光罩在受到杂散光干扰时星传感器的精度;(c)使用所设计的遮光罩在受到杂散光干扰时星传感器的精度

Fig. 13 Test data of outfield. (a) Accuracy of star sensor without stray light; (b) accuracy of star sensor interfered by stray light using regular baffle; (c) accuracy of star sensor interfered by stray light using the proposed baffle

5 结 论

首先,讨论了杂散光抑制能力的技术需求,指出遮光罩需要与光学镜头、星点提取算法的设计相匹配。其次,利用几何作图法确定遮光罩关键散射面,并对关键散射面建立重点采样,以仿真的方式给出最佳刃口厚度。最后,以实测方式证明设计方案合理可行:在实验室条件下,杂散光在探测器像面平均灰度为 61 DN,极大值为 130 DN,标准差为 21 DN,6 等星灰度峰值为 72 DN,因此满足星点被提取的必要条件;在外场条件下,使用所设计的遮光罩在杂散光测试中,星传感器的测量精度与未受杂散光干扰时的偏差在 $2''$ 以内。本文的设计方法具有通用性,可针对不同杂散光抑制需求设计不同消光比的遮光罩;同时,由于光机链路中充分考虑了各种适应性匹配,因此不存在渐晕、视场内杂散光等现象。本文的杂散光抑制设计方案可以为其他光电传感器提供一定参考。

参 考 文 献

[1] 余路伟,毛晓楠,金荷,等.星传感器抗杂光背景滤波图像处理方法研究[J].上海航天,2016,33(4):26-31.
Yu L W, Mao X N, Jin H, et al. Study on image process

method of star tracker for stray lights resistance filtering based on background[J]. Aerospace Shanghai, 2016, 33(4): 26-31.

- [2] 王海涌, 王伟, 徐皓, 等. 太阳杂光噪声下星传感器星像点质心定位方法[J]. 光学学报, 2021, 41(3): 0312005.
Wang H Y, Hua W, Xu H, et al. Centroiding method for star image spots under interference of Sun straylight noise in a star sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(3): 0312005.
- [3] 李洋, 廖志波, 穆生博, 等. 星传感器杂散光抑制方法及仿真分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(12): 2620-2624.
Li Y, Liao Z B, Mu S B, et al. Stray light suppressing technique and simulation for star sensor[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(12): 2620-2624.
- [4] 陈贇, 郑循江, 刘宗明, 等. 星传感器遮光罩出口杂光的辐照度测试[J]. 光学精密工程, 2017, 25(6): 1464-1471.
Chen Y, Zheng X J, Liu Z M, et al. Testing of stray light irradiance at exit of lens hood for star sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(6): 1464-1471.
- [5] 汪洪源, 郑循江, 颜志强. 星传感器遮光罩消光比定量测试及数据处理方法[J]. 飞控与探测, 2020, 3(5): 1-8.
Wang H Y, Zheng X J, Yan Z Q. Quantitative testing and data processing for the extinction ratio of the star sensor hood[J]. Flight Control & Detection, 2020, 3(5): 1-8.
- [6] 练达, 周琦, 余路伟, 等. 高动态条件下星点像斑建模与补偿[J]. 飞控与探测, 2020, 3(3): 86-94.
Lian D, Zhou Q, Yu L W, et al. Modeling and compensation of star spot in high dynamic condition[J]. Flight Control & Detection, 2020, 3(3): 86-94.
- [7] 赵超, 伏思华, 姜广文. 星传感器遮光罩的设计与杂散光分析

- [J]. 半导体光电, 2017, 38(2): 251-256.
Zhao C, Fu S H, Jiang G W. Design and optimization of baffle of star sensor[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(2): 251-256.
- [8] 廖志波, 伏瑞敏, 宗肖颖. 星敏传感器遮光罩的优化设计[J]. 中国激光, 2010, 37(4): 987-990.
Liao Z B, Fu R M, Zong X Y. Optimal designing of baffle of star sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(4): 987-990.
- [9] 梁士通, 钟红军, 刘婧. 一种高精度星敏传感器用遮光罩[J]. 空间控制技术与应用, 2016, 42(2): 53-56.
Liang S T, Zhong H J, Liu J. Improved baffle used for star sensor[J]. Aerospace Control and Application, 2016, 42(2): 53-56.
- [10] 杜伟峰, 吴永康, 孙少勇, 等. 一种星敏传感器遮光罩: CN105629627A[P]. 2018-06-12.
Du W F, Wu Y K, Sun S Y, et al. A star sensor shade: CN105629627A[P]. 2018-06-12.
- [11] 吴俐权. 大视场自由曲面光学系统设计及杂散光抑制技术研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2020: 62-76.
Wu L Q. Research on optical design with large field of view based on free-form surface and stray light suppression[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2020: 62-76.
- [12] 许民益, 石荣宝, 靳阳明, 等. 基于遮光罩尺寸和镜头拉氏不变量星敏传感器光学系统小型化设计[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0922001.
Xu M Y, Shi R B, Jin Y M, et al. Miniaturization design of star sensors optical system based on baffle size and lens Lagrange invariant[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0922001.
- [13] 李璟, 杨宝喜, 胡中华, 等. 星敏传感器光学系统的研制与性能测试[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0522005.
Li J, Yang B X, Hu Z H, et al. Development and performance testing of optical system for star sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0522005.
- [14] 徐泽明. 天基空间目标探测系统杂散光抑制与处理技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2021.
Xu Z M. Research on stray light suppression and processing technology of space-based space target detection system[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [15] 史屹君, 徐子奇. 星敏传感器光学系统设计及杂散光抑制技术研究[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(9): 256-261.
Shi Y J, Xu Z Q. Optical system design of star sensor and stray light suppression technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(9): 256-261.
- [16] Breault R P. Problems and techniques in stray radiation suppression[J]. Proceedings of SPIE, 1977, 0107: 1-23.
- [17] 李晖, 李英才. 星载光学系统遮光罩消杂光结构优化设计方法[J]. 光子学报, 1996, 25(10): 914-919.
Li H, Li Y C. An optimum design method for the light shade of spaceborne optical system[J]. Acta Photonica Sinica, 1996, 25(10): 914-919.
- [18] 徐亮. 大口径光学系统杂散光测试关键技术研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2019.
Xu L. Research on key technologies of stray light measurement for large aperture optical system[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2019.

Design and Verification of Stray Light Suppression for Star Sensor

Du Weifeng*, Wang Yanqing, Zheng Xunjiang, Gao Wenjie, Xie Tingan

Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 201109, China

Abstract

Objective Taking fixed stars as a reference frame, star sensors solve the attitude algorithm by exploring fixed stars at different positions of the celestial sphere, through which accurate spatial orientation and datum can be provided for spacecraft. An on-orbit star sensor is usually interfered with by stray light, primarily by sunlight. The illumination of sunlight in a low earth orbit is approximately 1350 W/m^2 , while that of a sixth-magnitude star is approximately $1.26 \times 10^{-10} \text{ W/m}^2$ in the same condition. The ratio of the above two is approximately 10^{13} . Thus, star sensors are extremely demanding for the technology of stray light suppression. In the presence of stray light, the pixel in calculation receives starlight and stray light simultaneously. The energy of stray light affects the gray scale of the pixel, which degrades the accuracy of star sensors or even causes the failure of stellar target acquisition in severe cases. Therefore, the function of stray light suppression is necessary for star sensors.

Methods During the stray light suppression by a star sensor, a baffle is employed to effectively eliminate stray light pollution in the working field of view. With suppressing stray light down to the sixth-magnitude stars' level as an example, this paper focuses on the specification demonstration, scheme design, simulation of light beam tracing, and stray light test of the star sensor baffle from perspectives of both theory and engineering application. As a start, depending on the design parameters of the optical lens, the paper specifies the extinction ratio and further clarifies the technical requirement applicable to the extinction ratio of the optical system (Equation 1). Moreover, the paper demonstrates the initial design of a baffle with such information as the effective entrance pupil aperture of the first lens (Fig. 1), the exit pupil aperture of the baffle (Fig. 2), the field of view of the baffle, and the angle of stray light suppression. Finally, the paper explains the detailed design of the baffle structure (Fig. 6), the position of vanes (Fig. 7), the critical scattering surface, and the thickness, the chamfer angle, and the direction of the edge. In the meantime, the design of a secondary or multi-level

baffle is suggested for detecting highly sensitive stars so that the impact of stray light from single scattering can be avoided.

Results and Discussions Firstly, the simulation in the paper shows the influence of edge thickness on stray light suppression (Fig. 11). The finding is only applicable to the baffle mentioned in this paper. For other baffles, edge thickness should be analyzed according to the simulation method herein. Regarding edge thickness, the following situations are discussed: 1) when the edge thickness is zero, single scattering does not occur, and multiple scattering is the main source of stray light; 2) when the edge thickness is $10\ \mu\text{m}$, the energy of single scattering is less than that of multiple scattering, and thus multiple scattering is still the main source of stray light; 3) when the edge thickness is $30\ \mu\text{m}$, the energy of single scattering is stronger than that of multiple scattering, and single scattering becomes the main source of stray light. Secondly, the performance of the star sensor in stray light suppression is verified through experimental testing (Fig. 12). Under the conditions of a sunlight suppression angle of 30° and one solar constant, such necessary conditions to distinguish a sixth-magnitude star can be fulfilled as the mean value, maximum value, and standard deviation of gray scale (61, 130, and 21, respectively). When the sixth-magnitude star is in the field interfered with by stray light enormously, the maximum gray scale of the star point is 72. When the threshold offset is 20, the centroid of the star point can be detected according to Equation 2. Finally, the performance of the baffle in stray light suppression is verified through an outfield test. The accuracy of the star sensor without stray light is $2.13''$ and $2.34''$; that of the star sensor equipped with a regular baffle in the presence of stray light is $8.07''$ and $7.66''$; that of the star sensor equipped with the proposed baffle under the interference of stray light is $3.89''$ and $4.01''$. In short, the performance of the designed baffle is better in stray light suppression, which can control the deviation of accuracy within $2''$.

Conclusions Mechanism research, simulation analysis, and experimental testing verify that the above-mentioned design method for stray light suppression of star sensors is rational and feasible. On the basis of this method, the suppression function of baffles is improved further within limited overall dimensions. This approach enables the design of baffles applicable to different star sensors and extreme magnitudes. This design could be commonly used to obtain baffles with desired extinction ratios for meeting different needs of stray light suppression. Meanwhile, the matching of different adaptability in the optomechanical link is sufficiently considered. As a result, the phenomena of vignetting and stray light in the field of view do not occur. The design method in this paper regarding stray light suppression can provide reference for other designs of photoelectric sensors.

Key words optical devices; star sensor; baffle design; stray light suppression; stray light simulation