

文章编号: 0258-7025(2010)04-0987-04

星敏传感器遮光罩的优化设计

廖志波 伏瑞敏 宗肖颖

(北京空间机电研究所, 北京 100190)

摘要 星敏传感器主要针对空间弱小运动目标成像,背景杂散光严重影响星像点获取的准确性。因此,遮光罩设计是星敏传感器的关键技术之一。给出了星敏传感器遮光罩设计的基本原则,并推导了两节型遮光罩最优长度设计的公式,简要分析了遮光罩长度、张口直径和张角的关系,并结合某星敏传感器进行了仿真验证。结果表明,与桶形结构相比,新的设计结构紧凑,对视场外强光的抑制能力大大增强,能实现观测六等星的目标。

关键词 遥感器;遮光罩;优化设计;星敏传感器

中图分类号 V44 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103704.0987

Optimal Designing of Baffle of Star Sensor

Liao Zhibo Fu Ruimin Zong Xiaoying

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100190, China)

Abstract Star sensor is imaging the space weak star point. The background noise from stray light will badly affect the extracting accuracy of image. So baffle design is the key technology of the star sensor. In this paper, the principle of baffle design is listed, the formula of the optimum length for two-stage baffle is deduced and an example of baffle design of a star sensor is cited. It is indicated that the new design has shorter length and better performance in stray light attenuation than the traditional barrel baffle.

Key words remote sensor; baffle; optimal design; star sensor

1 引 言

目前采用星敏传感器测量卫星姿态具有很高的精度,是主要的卫星定位方法。由于星敏传感器属于微弱信号的检测,光学系统的杂散光对星敏传感器 CCD 相机星像点的影响非常明显,它使得像面的对比度大大降低,清晰度随之变坏,严重的情况下信号光完全被杂散辐射噪声所淹没。因此,杂散光抑制设计是星敏传感器的关键技术之一。

杂散光是光学系统中到达探测器的非目标光线,也就是经非正常光路到达 CCD 的目标光线。星敏传感器的杂散光主要是视场外强光,主要指太阳光、地气光等,它们与六等星相比,强度都在 10^{13} 以上,因此,要求星敏传感器具有极佳的杂散光抑制能力^[1,2]。目前,采用单节桶形结构所设计的星敏传感器遮光罩一般具有较长的长度,但是抑制效果并不

是非常理想。两节型遮光罩结构紧凑,避免了内壁一次散射的强光直接进入镜头,与单节型相比,有明显的优势^[3~5]。

本文给出了两节型遮光罩抑制设计的基本原则,推导了两节型遮光罩最优长度设计的基本公式,最后以某星敏传感器为例进行了仿真验证。

2 遮光罩设计的基本原则

普通的遮光罩设计主要保证目标光路的直接进入,因此一般采用桶形结构,遮光罩张角等于视场角或者略大于视场角。对于没有视场外强杂散辐射来说,这种设计可以获得很优的遮光罩体积。然而,这种设计的一个主要缺点是不能限制遮光罩或者挡光环边缘的散射直接进入镜头。如图 1 所示的遮光罩,太阳光在挡光环边缘均会发生散射,且挡光环棱

收稿日期: 2009-04-19; 收到修改稿日期: 2009-07-06

作者简介: 廖志波(1981—),男,硕士,工程师,主要从事光学检测及光学仿真等方面的研究。

E-mail: bitliaozb@126.com

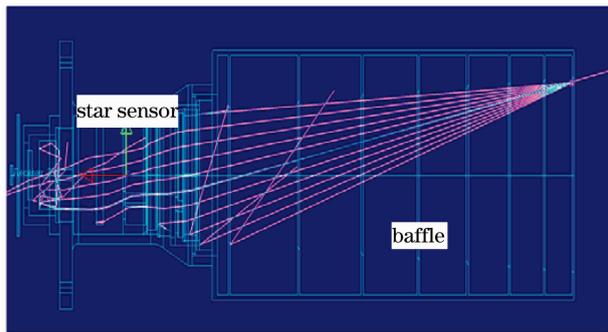


图1 桶形遮光罩挡光环的边缘散射

Fig.1 Edge scattering of vane of barrel baffle

边越多,进入镜头的光线也会越多^[6,7]。

两节型遮光罩(图2)的设计是基于抑制视场外强杂散辐射的原理。它通过I级遮光罩保证目标光路的直接进入,通过II级遮光罩抑制视场外强杂散辐射的直接进入。II级遮光罩通过桶壁间的多次反射使入射强光返回入射空间或者能量多次衰减,最后进入到I级遮光罩的光线一般处于目标视场外且能量很小。

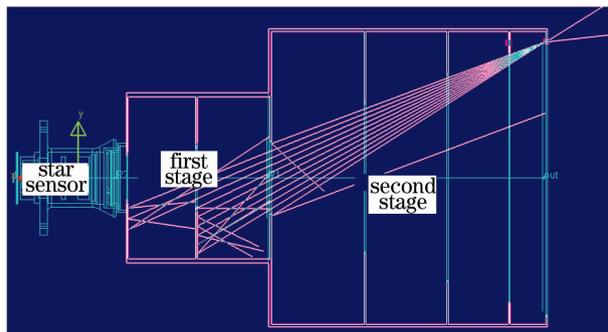


图2 两节型遮光罩挡光环的边缘散射

Fig.2 Edge scattering of vane of two-stage baffle

因此,可以确定星传感器遮光罩设计的一般原则为:1)I级遮光罩限制进入镜头的成像光束;2)视场外入射强光不能直接进入I级遮光罩;3)II级遮光罩内壁的散射(反射)光不能直接进入镜头。

为了获得更高的视场外强光的杂散光抑制效果,还可以设计多级型遮光罩,多级型遮光罩同样遵循上述原则。比如III级遮光罩的设计,其III级遮光罩内壁散射(反射)的光线不能直接进入II级遮光罩。

3 遮光罩优化设计

基于遮光罩设计的原则,最优的两节型遮光罩设计的示意图如图3所示。视场外强光从A以抑制角 β 角入射;交于II级遮光罩边缘B,并在此处发生漫反射;散射边缘光线沿II级遮光罩桶壁进入I

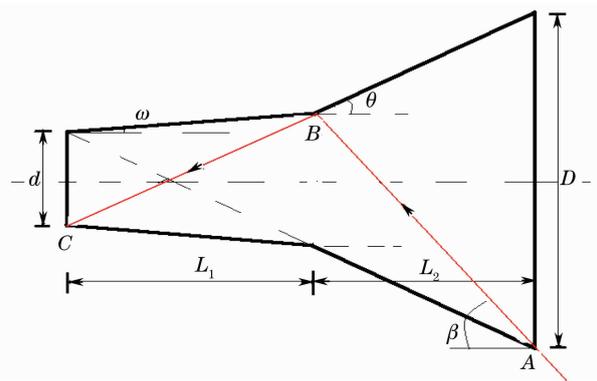


图3 最短遮光罩设计

Fig.3 Optimum length design of two-stage baffle 级遮光罩,交于I级遮光罩边缘C。

根据图3,参数间存在关系为

$$L_1 \tan \theta - L_1 \tan \omega = d, \quad (1)$$

$$L_2 \tan \beta - L_2 \tan \theta = d_1 = d + 2L_1 \tan \omega, \quad (2)$$

式中 ω 为星传感器镜头的半视场角, θ 为II级遮光罩的半张角, d 为通光口径, D 为II级遮光罩的内口径。可得I,II级遮光罩长度 L_1, L_2 分别为

$$L_1 = \frac{d}{\tan \theta - \tan \omega}, \quad (3a)$$

$$L_2 = \frac{d(\tan \omega + \tan \theta)}{(\tan \beta - \tan \theta)(\tan \theta - \tan \omega)}, \quad (3b)$$

遮光罩总的长度 L 为

$$L = L_1 + L_2 = \frac{d(\tan \omega + \tan \beta)}{(\tan \beta - \tan \theta)(\tan \theta - \tan \omega)}, \quad (4)$$

令 $f = (\tan \beta - \tan \theta)(\tan \theta - \tan \omega)$,可知当 $\tan \theta \in (\tan \omega, \tan \beta)$, $f > 0, L > 0$,并在 $\tan \theta = (\tan \beta + \tan \omega)/2$ 时, f 存在最大值,遮光罩长度 L 最小。假设 $A = \tan \omega, B = \tan \beta$,此时有

$$L_{\min} = \frac{4d(\tan \omega + \tan \beta)}{(\tan \beta - \tan \omega)^2} = \frac{4d \cdot (A + B)}{(B - A)^2}, \quad (5)$$

$$D = 2 \times (L_{\min} \tan \theta - d/2) = 2L_{\min} \tan \theta - d. \quad (6)$$

由以上公式可以看出,星传感器遮光罩的体积与光学镜头的口径、视场角和抑制角相关,而与 $F^\#$ (F 数, $F^\# = \text{焦距}/\text{入瞳}$)无关,但是 $F^\#$ 影响进入像面的能量。因此,在条件允许的情况下,光学系统采用较小的口径会大大减小遮光罩的体积。

令 $x = \tan \theta$,进一步分析可得遮光罩直径、体积的关系为

$$D = d \cdot \frac{(A+x) \cdot (x+B)}{(B-x) \cdot (x-A)}, \quad (7)$$

$$V = \pi \cdot (D/2)^2 \cdot L = \pi \cdot (L \tan \theta - d/2)^2 \cdot L = [\pi \cdot d^3 \cdot (A+B)/4] \cdot \frac{(A+x)^2 \cdot (x+B)^2}{(x-A)^3 \cdot (B-x)^3}. \quad (8)$$

在光学系统的口径、抑制角一定的情形下,两节型遮光罩的长度 L 、张口直径 D 和体积 V 与遮光罩半张角的正切 $\tan \theta$ 的函数曲线一般如图 4 所示。

不难看出,只有设计合理的遮光罩张角才能满足相机空间尺寸的要求。

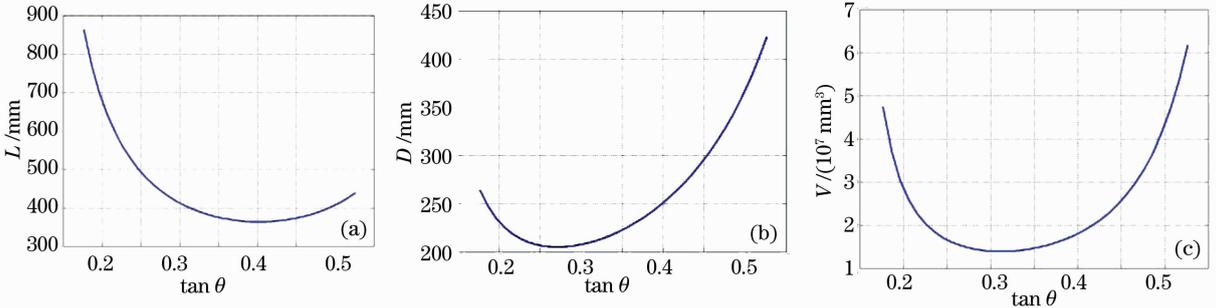


图 4 遮光罩长度(a)遮光罩张口直径(b)遮光罩体积(c)和半张角正切之间的函数曲线

Fig. 4 Baffle length (a) baffle diameter (b) and baffle volume (c) curves for different $\tan \theta$

4 星敏感器仿真分析

星敏感器主要是探测深黑空间中的恒星。表 1 给出了相机的技术参数。

表 1 星敏感器的技术参数

Table 1 Specification of star sensor

Characteristic	Value
Field of view (diagonal) /($^{\circ}$)	$8 \times 8 (\pm 6)$
Entrance pupil diameter /mm	30
Sensitivity, M_v	+6
Sun rejection angle /($^{\circ}$)	35

采用桶形遮光罩,尺寸为 $\phi 110 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$,如图 1。在遮光罩入口处 P_1 , I 级遮光罩位置处 P_2 ,镜头入口处 P_3 以及像面 P_4 设置四处接收器。假设遮光罩内表面镜面反射率为 4%,散射率为 2%,表 2 给出了不同角度太阳光入射的杂散光抑制能力。

表 2 对不同入射角度下太阳光的杂散抑制能力

Table 2 Stray light attenuation capacity of different sun incident angles

Sun incident angle /($^{\circ}$)	$P_1/10^{13}$	$P_3/10^5$	$P_4/10^3$	$P_1/P_4/10^{10}$
35	1.24	3.5	5.7	22
60	1.24	1.5	81	1.6

星敏感器对 35° 入射太阳光的消杂散光比在 10^{10} 以下,远不能满足指标要求。

设计了两级型遮光罩,遮光罩形状如图 5 所示,有 5 个圆形挡光环,并对内壁采用了发黑处理^[8~10]。

遮光罩最短长度 L_{\min}

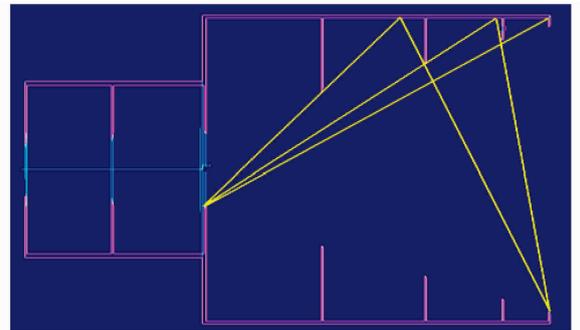


图 5 遮光罩及挡光环设计

Fig. 5 Two-stage baffle and vane design

$$L_{\min} = \frac{4d(\tan \omega + \tan \beta)}{(\tan \beta - \tan \omega)^2} = \frac{4 \times 30 \times (\tan 6^{\circ} + \tan 35^{\circ})}{(\tan 35^{\circ} - \tan 6^{\circ})^2} \approx 273, \quad (9)$$

此时,II 级遮光罩半张角 θ

$$\theta = \arctan\left(\frac{\tan \omega + \tan \beta}{2}\right) = \arctan\left(\frac{\tan 6^{\circ} + \tan 35^{\circ}}{2}\right) \approx 22^{\circ}, \quad (10)$$

I 级遮光罩长度 L_1

$$L_1 = \frac{d}{\tan \theta - \tan \omega} = \frac{30}{\tan 22^{\circ} - \tan 6^{\circ}} \approx 100. \quad (11)$$

考虑到设计及加工余量,实际加工长度为 280 mm。在遮光罩入口处 P_1 , I 级遮光罩位置处 P_2 ,镜头入口处 P_3 以及像面 P_4 设置 4 处接收器。首先考虑了遮光罩表面光学特征对杂散光抑制能力的影响。以 35° 平行强光入射,当遮光罩表面散射系数不同时(镜面反射率均为 4%),遮光罩的抑制能力如表 3 所示。

表3 不同散射率表面对35°入射太阳光的杂散抑制能力

Table 3 Stray light attenuation capacity of different painting surfaces for sun incident angle 35°

	Specular ref 4% lambertian 4%	Specular ref 4% lambertian 2%	Specular ref 4% lambertian 1%	Specular ref 4% lambertian 0.5%
P_1	1.24×10^{13}	1.24×10^{13}	1.24×10^{13}	1.24×10^{13}
P_2	1.25×10^8	3.8×10^7	1.42×10^7	8.4×10^6
P_3	420	57	13	5.6
P_4	5.5	0.47	0.22	0.07
P_1/P_4	$>10^{12}$	$>10^{13}$	$>10^{13}$	$>10^{14}$

可以看出,表面的漫反射系数越小,越能有效抑制杂散光。考虑到材料的要求^[11]以及实际加工的难度,假定遮光罩的表面镜面反射率为4%,散射率为2%,图6给出了太阳光以不同角度入射时的杂散光抑制情况,横坐标表示太阳光入射角,纵坐标表示归一化处理后的能量。

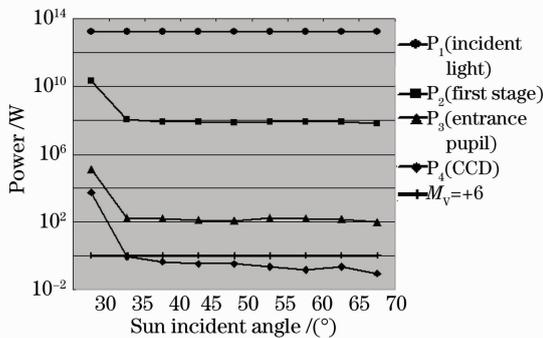


图6 遮光罩对不同角度入射的太阳光的抑制能力

Fig. 6 Stray light attenuation capacity of different sun incident angles

可以看出,采用该结构,对于与光轴夹角大于35°的入射太阳光都能有效抑制,消光比大于 10^{13} ,因此至少能够看到六等星。

5 结 论

详细讨论了星敏感器两节型遮光罩的设计方法,并根据推导出来的公式给出了实例设计。结果表明,遮光罩长为280 mm,结构紧凑,对大于35°的入射太阳光消光比在 10^{13} 以上,能够满足观测六等星的要求;同时表明,与桶形遮光罩相比,两节型遮光罩能显著提高轴外强光的杂散光抑制能力。

参 考 文 献

1 H. Kawano, H. Shimoji, S. Yoshikawa *et al.*. Suppression of sun interference in the star sensor baffling stray light by total internal reflection[C]. *SPIE*, 2005, **5962**: 59621R

2 Zhang Jihua, Yao Dongsheng, Tan Bin. Analysis on effect factors of ground-based electro-optic system detection ability on space object[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1178~1182
张己化,姚东升,谈斌.地基光电系统空间目标探测影响因素分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1178~1182

3 Tang Yong, Lu Xin, Hao Yuncai. Suppression and analysis of stray light in a star sensor[J]. *Aerospace Control*, 2004, **22**(3): 58~61
唐勇,卢欣,郝云彩.星敏感器杂光抑制分析[J]. *航天控制*, 2004, **22**(3): 58~61

4 Lu Wei, Li Zhan, Zhang Jianrong *et al.*. Design of lens hood for star sensor and result simulation [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2001, **28**(3): 12~20
卢卫,李展,张建荣等.星敏感器中遮光罩设计及结果模拟[J]. *光电工程*, 2001, **28**(3): 12~20

5 Tian Yongming. Study on the suppression of stray light in star sensors[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005. 38~47
田永明.星敏感器消杂光技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2005. 38~47

6 Robert P. Breault. Control of Stray Light [A]. *HandBook of Optics*[M]. USA: McGraw-Hill Inc, 1995. 38.1~38.35

7 Li Dexiong, Yan Dayuan. Equivalent reflectance of baffle with vanes[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(7): 777~780
李德熊,阎达远.具有挡光环的遮光筒的等效反射率[J]. *光学学报*, 1994, **14**(7): 777~780

8 K. Seiferlin, S. Chakraborty, K. Gunderson *et al.*. Design and manufacture of a lightweight reflective baffle for the BepiColombo laser altimeter[J]. *Opt. Eng.*, 2007, **46**(4): 043003

9 Du Baolin, Li Lin, Huang Yifan *et al.*. Optimum design and analysis of vane in satellite remote sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 233~236
杜保林,李林,黄一帆等.星载遥感器的挡光环优化设计与分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s2): 233~236

10 Huang Zhiqiang, Xing Tingwen. Principle and realization of baffle and vane's programmable design [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(4): 119~123
黄智强,邢廷文.遮光罩和挡光环程序化设计的原理及实现[J]. *光电工程*, 2006, **33**(4): 119~123

11 Tan Wei, Luo Jianfeng, Liu Jun *et al.*. The study of temperature distribution of optic system in the star sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 231~234
谭威,罗剑峰,刘军等.太空中星敏感器光学系统温度分布研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s1): 231~234