

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

许民益^{1,2} 石荣宝^{1,2} 靳阳明^{1,2} 王 伟^{1,2*} 沈为民^{1,2}

¹苏州大学物理与光电能源学部, 江苏 苏州 215006

²江苏省现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006

摘要 遮光罩尺寸和拉氏不变量是影响星敏传感器体积和镜头复杂性的 2 个关键因素。通过推导分析极限星等与这两者的关系,研究了星敏传感器光学系统的小型化设计。根据光学系统参数与星敏传感器技术要求的关系,推得和分析不同极限星等时关于遮光罩尺寸和拉氏不变量的公式。结果表明随着极限星等增大,拉氏不变量单调减小,但遮光罩尺寸存在着极小值。据此优化极限星等,使得遮光罩尺寸和拉氏不变量尽可能小,实现星敏传感器小型化。基于 STAR1000 互补金属氧化物半导体(CMOS)探测器,举例优化设计得到适于微小卫星星敏传感器使用的光学系统,其极限星等 5.0 MV、视场角 $20^\circ \times 20^\circ$ 、入瞳直径 28.2 mm、长度 124 mm、重量约 300 g。

关键词 光学设计; 星敏传感器; 杂散光; 小型化

中图分类号 V448.22 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0922001

Miniaturization Design of Star Sensors Optical System Based on Baffle Size and Lens Lagrange Invariant

Xu Minyi^{1,2} Shi Rongbao^{1,2} Jin Yangming^{1,2} Wang Wei^{1,2} Shen Weimin^{1,2}

¹College of Physics, Optoelectronics and Energy, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

²Key Laboratory of Modern Optical Technology of Jiangsu Province, Suzhou, Jiangsu, 215006, China

Abstract The baffle size and Lagrange invariant of star sensor are two key factors which affect its volume and lens complexity. Through derivation and analysis of the relationship between limiting star magnitude and these two factors, miniaturization of the optical system of star sensor is studied. According to the relations between its optical system parameters and technological requirements, formulae about baffle size and Lagrange invariant under various limiting magnitudes are derived and analyzed. It is shown that with the increase of limiting magnitude, the Lagrange invariant monotonically decreases, but the baffle size has minimum value. On these grounds, limiting magnitude is optimized to get as small baffle size and Lagrange invariant as possible and to facilitate its miniaturization. As an example, the optical system of a star sensor based on STAR1000 complementary metal-oxide-semiconductor transistor (CMOS) detector and suitable for microsatellite is optimally designed, with limiting magnitude, field of view, entrance pupil diameter, optical overall length, and weight of 5.0 MV, $20^\circ \times 20^\circ$, 28.2 mm, 124 mm, and about 300 g respectively.

Key words optical design; star sensor; stray light; miniaturization

OCIS codes 220.4830; 280.4788; 290.2648; 120.4640

收稿日期: 2016-03-18; **收到修改稿日期:** 2016-04-26

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程(PAPD)

作者简介: 许民益(1990—),男,硕士研究生,主要从事光学设计与仪器光学方面的研究。

E-mail: 20124239022@suda.edu.cn

导师简介: 沈为民(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光学设计和仪器光学以及航天遥感技术等方面的研究。

E-mail: swm@suda.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: ouyangweiyed@suda.edu.cn

1 引 言

星敏传感器通过探测和识别恒星测量航天器的姿态。由于星光信号微弱,为了提高星像的信噪比,通常要求光学镜头有大的入瞳直径。为了抑制强烈的太阳光和地球一大气太阳反射光引起的杂散光,需要采用体积庞大的遮光罩^[1-3],以致难以适用于微小卫星平台。随着低功耗、高帧频互补金属氧化物半导体(CMOS)焦平面探测器的成熟^[4],研制微型星敏传感器成为可能,相应地,需要小型化设计其光学镜头和遮光系统。

2002年,美国喷气推进实验室(JPL)采用2台视轴反向安装CMOS星敏传感器MAST(micro APS based star tracker)^[5],保证任意时刻至少有1台不受太阳光影响,可不使用遮光罩以减小体积,但易受地气光影响,难以适用于对地观测平台。2003年,日本三菱电机公司研制了SIS(satellite controller integrated with star sensors)小型星敏传感器^[6],利用半球透镜的全内反射抑制视场外大入射角光源(如太阳)引起的杂光,遮光罩长度可缩短约三分之一,然而需要校正半球透镜引入的大像差,致使光学系统复杂化。2006年,美国Microcosm研制了多视场共孔径星敏传感器Micromak^[7],不计遮光罩时,重量约100 g,缺点是需要使用3个焦平面阵列探测器,增加了成本和功耗。国内,董瑛等^[8]于2005年报道了基于CMOS焦平面探测器的星敏传感器,极限星等5 MV,重量约1 kg。尤政等^[9]于2013年报道了通过一体化设计星敏传感器与载荷,减少系统冗余而实现小型化的方法。

本文主要通过分析极限星等与拉氏不变量和遮光罩尺寸的关系,优选拉氏不变量、遮光罩尺寸、极限星等,实现星敏传感器光学系统的小型化设计。举例设计验证此小型化设计方法,得到光学镜头和遮光罩合计重量约300 g的星敏传感器光学系统。

2 小型化设计方法

极限星等是星敏传感器的一个重要指标,极限星等越高,星光越弱,为满足信噪比需求,要求光学镜头的入瞳直径越大,杂光抑制性能越高,导致镜头体积越大,遮光罩越长;极限星等越低,星光越强,可采用入瞳直径较小的镜头,但可用导航星的星数越少,为使视场内有足够数量的导航星,需更大的视场角,当视场角接近于杂光抑制角(允许杂光入射的最小角度),遮光罩体积将极速增大,不利于星敏传感器的小型化设计。因此为实现小型化设计,合理的方法是通过导出光机系统体积与极限星等的关系,优化选取极限星等和光学系统参数。光学系统主要包括2个部分,即遮光罩和光学镜头,可从这2个方面来进行分析。

遮光罩必须满足2个条件:一个是遮光罩不能遮挡正常成像光线,另一个是不能让视场外强光源直接入射到光学镜片上。满足条件的设计示意图如图1所示,当镜头视场角为 ω 、第1片镜片的通光口径为 d 和杂光抑制角为 θ 时,遮光罩长度为 L 和入光端通光口径 D_{baffle} 需分别满足^[10]:

$$L = \frac{d}{\tan \theta - \tan \omega}, \quad (1)$$

$$D_{\text{baffle}} = \frac{\tan \theta + \tan \omega}{\tan \theta - \tan \omega} d, \quad (2)$$

(1)~(2)式表明,遮光罩长度和入光端通光口径正比于第1片镜片的通光口径 d ,口径 d 由入瞳直径、镜头结构形式和视场角决定。为减小遮光罩尺寸,须让镜头入瞳尽可能接近第1块透镜^[11],在本节分析中,假设通光口径 d 等于入瞳直径 D 。为便于进一步分析,假设遮光罩外形为圆柱形,其体积 V 为:

$$V = \frac{\pi}{4} L D_{\text{baffle}}^2 = \frac{\pi D^3 (\tan \theta + \tan \omega)^2}{4 (\tan \theta - \tan \omega)^3}, \quad (3)$$

可见遮光罩体积与星敏传感器镜头的入瞳直径 D 、视场角 ω 以及杂光抑制角 θ 有关。其与入瞳直径 D 的3次方成正比,与视场角 ω 和抑制角 θ 有复杂的三角函数关系。当杂光抑制角 θ 一定时,视场角和入瞳直径越大,遮光罩体积越大。

光学镜头的复杂度可用拉氏不变量表征^[11],拉氏不变量值越大,镜头越复杂,设计难度越大,质量体积也将越大。假设用于卫星等空间平台,环境折射率为1,镜头的拉氏不变量 J 由入瞳直径 D 、视场角 ω 决定,即

$$J = \frac{D \tan \omega}{2}, \quad (4)$$

(3)~(4)式表明,入瞳直径 D 和视场角 ω 是影响星敏感器体积和镜头复杂性的 2 个关键性参数。根据文献[12]中(3)~(16)式,为了使得极限星等 m 时的探测信噪比不低于所规定的阈值,镜头入瞳直径 D 最小需要满足:

$$D = \frac{T}{\sqrt{10^{(11-0.4m)}}}, \quad (5)$$

式中参数 T 由信噪比阈值 V_{th} 、曝光积分时间 t_{int} 、镜头透射率 τ 、星点像在 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 个像元中的能量集中度 η 、焦平面探测器量子效率 Q 、像元光敏面填充因子 F 、暗电流噪声 I_{dark} 、除光子噪声和暗电流噪声之外的其他噪声 n_i 共同决定,即:

$$T = 3 \sqrt{\frac{V_{th}^2 + \sqrt{V_{th}^4 + 4V_{th}^2(I_{dark}t_{int} + \sum_i n_i^2)}}{t_{int}\eta\tau Q \cdot F}}, \quad (6)$$

根据参考文献[13]所述遍历全天统计星数的方法,得到视场内探测到 4 颗及以上导航星的视场角 ω 与极限星等 m 的关系如图 2 所示,随着极限星等升高,视场角单调近似线性地减小。

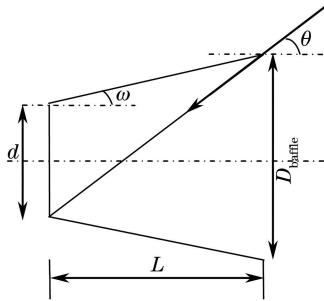


图 1 遮光罩示意图
Fig. 1 Layout of baffle

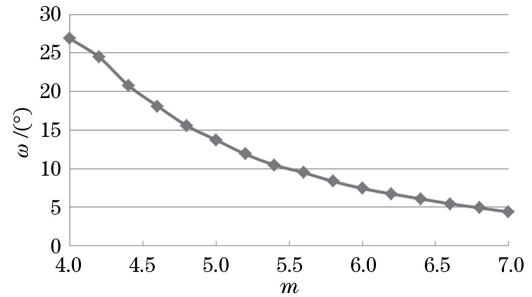


图 2 星敏感器视场角随所选极限星等变化曲线
Fig. 2 Change curve of view field angle of star sensor as chosen limiting magnitude

对图 2 中的曲线进行多项式拟合,可得到拟合精确度为 0.9991 的视场角与极限星等的函数关系式为:

$$\omega = -0.6542 m^3 + 13.43 m^2 - 94.522 m + 232.38, \quad (7)$$

用 $\omega(m)$ 来表示视场角与极限星等的函数关系,并和(5)式一起代入到(3)~(4)式中,分别可得遮光罩体积、镜头拉氏不变量与极限星等、杂光抑制角的关系如下:

$$V = \frac{\pi [\tan \theta + \tan \omega(m)]^2 T^3}{4 [\tan \theta - \tan \omega(m)]^3 10^{\frac{3(11-0.4m)}{2}}}, \quad (8)$$

$$J = \frac{T \tan \omega(m)}{2 \sqrt{10^{(11-0.4m)}}}, \quad (9)$$

(8)~(9)式表明,遮光罩体积 V 和镜头拉氏不变量 J ,由极限星等 m 、杂光抑制角 θ 和参量 T 决定。为了说明如何运用上述导出的关系式小型化设计镜头与遮光罩,以采用 STAR1000 CMOS 探测器为例,并取典型的镜头透射率 τ 、曝光积分时间 t_{int} 、信噪比阈值 V_{th} 和能量集中度 η 值分别等于 0.75、0.1 s、5.0 和 0.9,根据文献[14]对该探测器的研究可计算得到(6)式的 T 值为 891。

由(8)式可得到当取杂光抑制角 θ 分别等于 35° 、 37.5° 、 40° 时遮光罩体积 V 与极限星等 m 的关系曲线如图 3 所示。可见,杂光抑制角越大,遮光罩尺寸越小;随着极限星等增大,遮光罩体积由递减转换成递增,极小值分别在极限星等 5.1、4.9、4.8 MV 处。表明采用 STAR1000 CMOS 探测器时,极限星等选择 5.0 MV 附近有利于小型化。

同样地,根据(9)式可得到拉氏不变量 J 随极限星等 m 变化的关系曲线,如图 4 所示。可见,随着极限星等升高,拉氏不变量单调减小,光学系统的设计难度与复杂程度下降。在小型化设计过程中,考虑到遮光罩占星敏感器体积的大部分^[6,15],可首先根据遮光罩尺寸与极限星等的关系,确定极限星等选取范围,再选择尽可能高的极限星等。

例如,当杂光抑制角为 37.5° 时,根据图 3 所示的曲线可知极限星等取 4.5~5.5 MV 时,遮光罩尺寸接近

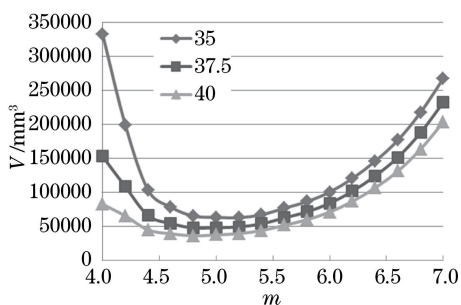


图3 遮光罩体积与极限星等的关系曲线

Fig. 3 Relation curves of baffle size with limiting magnitude

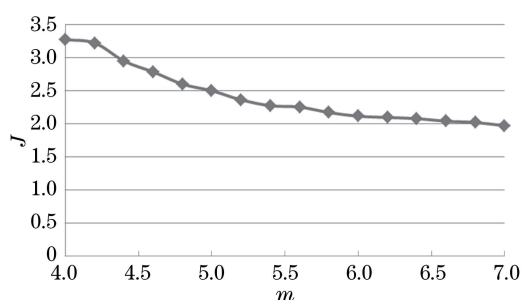


图4 不同极限星等对应的拉氏不变量

Fig. 4 Limiting magnitude corresponding to Lagrange invariant

最小值。再根据拉氏不变量随着极限星等增大而单调减小的关系,极限星等取 4.9~5.5 MV 较为合理,此时遮光罩尺寸和光学镜头拉氏不变量均较小。为验证上述小型化设计方法,下面取极限星等 5.0 MV 为例,设计镜头和遮光罩。根据 STAR1000 CMOS 参数、计算入瞳直径的(5)式和图 2 中视场角与极限星等关系曲线,可计算得到入瞳直径、视场角和焦距分别为 28.2 mm、14°和 43.56 mm,工作波长范围选择探测器响应较高的 500~800 nm。

3 设计举例

3.1 镜头设计

双高斯结构与前文分析得到的指标参数相匹配,是当前星敏感器光学镜头主流结构^[16-18],其对称性有利于轴外像差的校正,优化设计得到的光学镜头光路如图 5(a)所示。从左到右第 1、5、6、7 片为 BK7,第 2 片为 SK16,第 3、4 片为 F2,镜片重 32 g,镜头总长 56 mm,考虑镜筒后重量约 120 g,光机结构如图 5(b)所示。

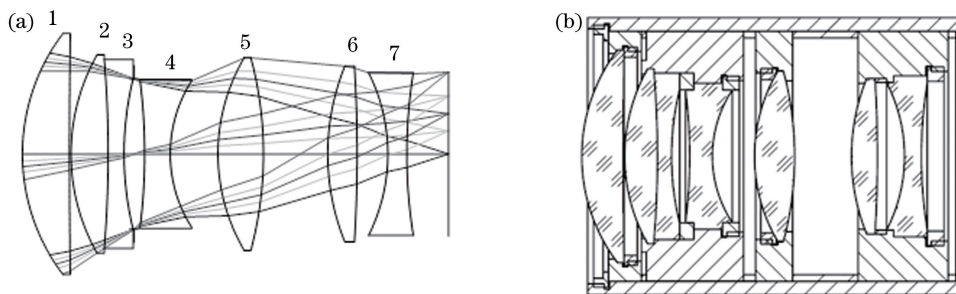


图5 设计的镜头。(a)光路图;(b)光机结构

Fig. 5 Designed lens. (a) Optical path; (b) optomechanical structure

表征镜头成像质量的点列图和能量集中度分别如图 6 和图 7 所示,图 6 中小方框表示焦平面探测器 3 pixel×3 pixel 个像元的大小范围,可见星点像弥散斑接近圆形,各视场星点像大小相近,且基本都在 3 pixel×3 pixel 像元内。图 7 所示的能量集中度曲线横坐标为包围圆半径,最大值为 22.5 mm 等于 1.5 个像元尺寸,纵坐标为包围圆内所集中的衍射能量百分比,可见星点像在直径为 3 个像元大小的包围圆内的能量集中度大于 90%,满足星点像质心提取算法要求^[12]。另外,此镜头全视场范围内的相对畸变小于 0.1%,横向色差小于 1/5 个像元,符合工程项目对星敏感器镜头像质的要求。

3.2 遮光罩设计

用于空间平台的星敏感器必须抑制太阳等强光源引起的杂散光,由于其探测星点目标,宜用点源透射率 (PST) 表征其杂光抑制能力。按照信噪比大于 5 的要求,空间中最强的杂散光源,即太阳光引起的杂光在像面上的照度应小于极限星等星像照度的 1/5,根据文献^[19]的计算方法,可计算得到所研究的光学系统要求 PST 阈值为 1.08×10^{-8} 。

根据所设计镜头的参数,即视场角 14°、第一块透镜的通光口径 34.4 mm、杂光抑制角 37.5°,可由(1)~(2)

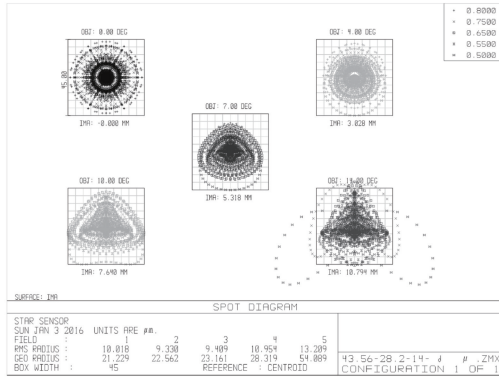


图 6 点列图
Fig. 6 Spot diagram

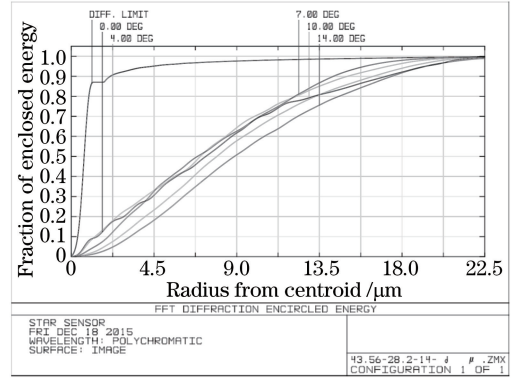


图 7 能量集中度曲线
Fig. 7 Encircled energy curves

式,计算得到遮光罩长度 66.4 mm,入光端通光口径 67.5 mm。考虑到设计及加工余量,取其长度为 68 mm,入光端通光口径为 68 mm。为了提高遮光罩的杂光抑制能力,在其内壁设计挡光环,经多次优化后,得到其高度为 7 mm、厚度为 1 mm、朝向遮光罩入光端的边缘倾角为 30°。当遮光罩采用铝合金材料,壁厚为 2 mm 时,重量约 180 g。得到的星敏感器光机结构模型如图 8 所示,挡光环距离光学镜头第 1 面的位置如表 1 所示。利用 Light Tools 软件分析杂光抑制性能时,遮光罩内壁、挡光环表面、镜筒表面和镜片边缘的辐射特性设置如表 2 所示,设置追迹光线数为 2000000,停止追迹的相对光线功率阈值为 10^{-10} ,再增加追迹光线数像面处照度基本不变,已达到稳定效果。

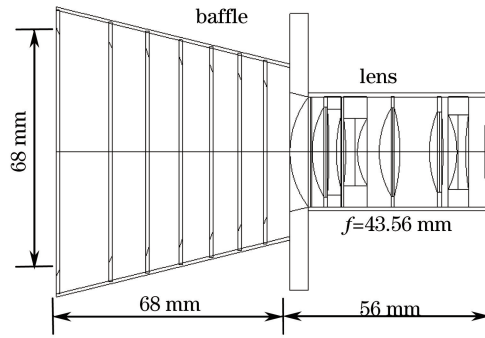


图 8 光机结构模型
Fig. 8 Optomechanical model

表 1 挡光环位置

Table 1 Position of vanes

Vanes number	Distance to first surface of lens /mm
1	7.72
2	15.09
3	23.17
4	32.02
5	41.73
6	52.38

表 2 光机结构表面辐射特性

Table 2 Surface radiation performance of optomechanical model

Surface	Absorptivity	Lambert reflectivity	Specular reflectivity
Baffle	0.98	0.01	0.01
Vanes	0.98	0.01	0.01
Tube	0.95	0.025	0.025
Lens edge	0.95	0.02	0.03

设平行光入射到遮光罩的入光端,得到不同入射角下像面处的杂光照度,由其与入光端处的照度比值得到该杂光入射角时像面处的 PST 值,如图 9 所示为所设计得到的光机系统的 PST 曲线。可见平行光入射角度为 37.5° 时,系统的 PST 值为 3.19×10^{-9} , 小于要求的阈值 1.08×10^{-8} , 表明此遮光设计能够有效地抑制太阳光引起的杂散光, 满足杂光抑制要求。

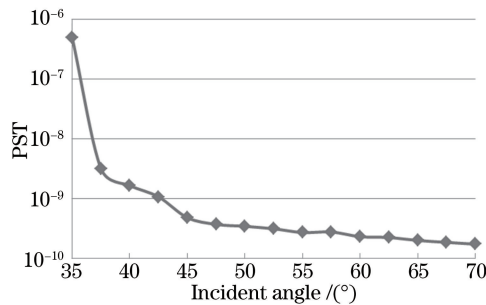


图 9 不同杂光入射角度时的点源透射率曲线

Fig. 9 PST under different stray light incident angles

4 结 论

研究了基于 CMOS 焦平面探测器的星敏感器光学系统小型化设计。根据极限星等与遮光罩尺寸、拉氏不变量的关系, 优选极限星等与光学系统参数进而实现小型化。当杂光抑制角为 37.5° , 探测器为 STAR1000 CMOS 时, 确定极限星等范围为 $4.9 \sim 5.5$ MV 时遮光罩尺寸和拉氏不变量较小。设计了极限星等取 5.0 MV 时的光学镜头和遮光罩。光学镜头像质良好、结构紧凑, 遮光罩尺寸小, 两者组成的光学系统重量为 300 g, 长度为 124 mm, 实现了星敏感器光学系统的小型化设计。所介绍的分析方法, 可用于其他观测恒星, 并使用遮光罩抑制杂光的光学系统的小型化设计。

参 考 文 献

- 1 Arnoux J J. Star sensor baffle optimization: some helpful practical design rules[C]. SPIE, 1996, 2864: 333-338.
- 2 Liao Zhibo, Fu Ruimin, Zong Xiaoying. Design of specular baffle of star sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(1): 66-69.
廖志波, 伏瑞敏, 宗肖颖. 星敏感器反射式遮光罩设计[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(1): 66-69.
- 3 Zhu Yang, Zhang Xin, Wu Yanxiong, *et al.* Research on the optical design and stray light suppression for off-axis reflective space astronomical telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0822002.
朱 杨, 张 新, 伍雁雄, 等. 离轴反射式空间天文望远系统设计及其杂散光抑制研究[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0822002.
- 4 Li Jijun, Du Yungang, Zhang Lihua, *et al.* Research progress on CMOS image sensors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(4): 45-52.
李继军, 杜云刚, 张丽华, 等. CMOS 图像传感器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(4): 45-52.
- 5 C C Liebe, L Alkalai, G Domingo, *et al.* Micro APS based star tracker[C]. Aerospace Conference Proceedings, IEEE, 2002, 5: 2285-2299.
- 6 Hiroyuki Kawano, Yukio Sato, Kenji Mitani, *et al.* New light-shielding technique for shortening the baffle length of a star sensor[C]. SPIE, 2002, 4767: 62-69.
- 7 Nardell C A, Wertz J, Hays P B. Image processing, simulation and performance predictions for the MicroMak star tracker[C]. SPIE, 2005, 5916: 59160U.
- 8 Dong Y, Xing F, You Z. An APS based autonomous star tracker[C]. SPIE, 2004, 5633: 225-233.
- 9 You Zheng, Wang Chong, Xing Fei, *et al.* Key technologies of smart optical payload in space remote sensing [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2013, 34(1): 35-43.
尤 政, 王 翀, 邢 飞, 等. 空间遥感智能载荷及其关键技术[J]. 航天返回与遥感, 2013, 34(1): 35-43.
- 10 《光学仪器设计手册》编辑组. 光学仪器设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1972: 618-621.
- 11 薛鸣球. 关于拉氏不变量[J]. 长春光学精密机械学院学报, 1982, (4): 1-5.

- 12 Wu Feng. Study on the key technologies for autonomous star sensors[D]. Suzhou: Soochow University, 2012.
吴 峰. 自主导航星敏器关键技术的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2012.
- 13 Wu Feng, Shen Weimin. Design of optical system for autonomous APS star sensors[C]. SPIE, 2009, 7506: 75060F.
- 14 Dong Ying, Xing Fei, You Zheng. Determination of the optical system parameters for a CMOS APS based star sensor[J]. Journal of Astronautics, 2004, 25(6): 663-668.
董 瑛, 邢 飞, 尤 政. 基于 CMOS APS 的星敏器光学系统参数确定[J]. 宇航学报, 2004, 25(6): 663-668.
- 15 Lü Bo, Liu Weiqi, Zhang Daliang, *et al.* Optical system design of large entrance pupil catadioptric star sensor[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(7): 0716002.
吕 博, 刘伟奇, 张大亮, 等. 折反射式大入瞳星敏器光学系统设计[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0716002.
- 16 Li Jing, Yang Baoxi, Hu Zhonghua, *et al.* Development and performance testing of optical system for star sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0522005.
李 璟, 杨宝喜, 胡中华, 等. 星敏器光学系统的研制与性能测试[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0522005.
- 17 He Lingna, Cui Weixin, Pei Yuntian. Design and optimization of the optical system of the star sensor based on CMOS APS[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(11): 24-30.
何灵娜, 崔维鑫, 裴云天. 基于 CMOS APS 的星敏器光学系统结构设计与优化[J]. 光电工程, 2007, 34(11): 24-30.
- 18 Wu Yanxiong, Zhang Xin, Zhang Jizhen, *et al.* Research on the autonomous star sensor based on indirectly sensing horizon and its optical design[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0222001.
伍雁雄, 张 新, 张继真, 等. 星光折射自主导航星敏器及光学系统设计研究[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0222001.
- 19 Kawano H, Shimoji H, Yoshikawa S, *et al.* Solar-light shielding using a near-hemispherical lens for a star sensor[J]. Optical Engineering, 2006, 45(12): 124403.