

星光折射自主导航星敏感器及光学系统设计研究

伍雁雄^{1,2} 张新¹ 张继真¹ 王灵杰¹ 曲贺盟¹ 朱杨¹ 曾飞¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于星光折射间接敏感地平自主导航星敏感器的工作原理, 详细分析了星光折射星敏感器的探测参数设计, 包括探测谱段、恒星观测视场、探测概率及阈值星等、恒星探测能力等。星光折射星敏感器的观测视场分为折射星与非折射星两部分, 对折射星的观测视场随轨道高度增加而减小; 受限于大气光谱吸收, 观测折射星的谱段宜选择600~900 nm, 探测信噪比随大气折射高度降低而减小。采用高灵敏度的背薄电荷耦合器件(CCD)以及精度达到微米级的无热化光学系统匹配设计。结果表明, 光学系统像质良好, 单一星敏感器单星测量精度达到1", 满足目前航天自主导航对姿态及位置测量精度的需求。

关键词 光学设计; 星光折射; 星敏感器; 自主导航; 姿态测量

中图分类号 TN379

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0222001

Research on the Autonomous Star Sensor Based on Indirectly Sensing Horizon and its Optical Design

Wu Yanxiong^{1,2} Zhang Xin¹ Zhang Jizhen¹ Wang Lingjie¹ Qu Hemeng¹
Zhu Yang¹ Zeng Fei¹

¹Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Chinese Academy of Sciences, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract Based on stellar refraction indirectly sensing of autonomous navigation for horizon star sensor, a parameter design is analyzed for stellar refraction star sensor which is included by detect waveband, observation field, detect probability and threshold value of magnitude. The field of view (FOV) of star sensor is divided into two parts of refraction star and unrefraction star. The FOV decreases as orbit attitude increases. Limited by atmosphere absorption, the waveband needs to be 600~900 nm, and the signal-to-noise ratio (SNR) decreases as atmosphere height increases. High sensitive back-thinned charge coupled device (CCD) is applied and athermalizing optical system design is achieved. The result shows that imaging quality is good enough and measure precision of single star sensor achieves 1", which can meet the requirement of autonomous star sensor measure precision.

Key words optical design; stellar refraction; star sensor; autonomous navigation; attitude measurement

OCIS code: 220.3620; 280.4788; 120.3930; 120.5710

1 引言

随着我国航天技术的快速发展, 航天器对高精度自主导航能力的需求十分迫切。星光折射间接敏感地平技术利用高精度敏感器敏感地球临边的折射星光, 结合大气折射密度模型实现地平的精确定量, 从而实

收稿日期: 2014-07-11; 收到修改稿日期: 2014-09-02

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61007009)

作者简介: 伍雁雄(1982—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事光学系统设计和高精度星敏感器技术方面的研究。

E-mail: winsword@sina.com

导师简介: 张新(1968—), 男, 博士, 研究员, 主要从事非常规复杂光学系统设计等方面的研究。

E-mail: optlab@ciomp.ac.cn

现航天飞行器的高精度姿态、位置及速度的复合测量。与其他导航方式相比,采用单一设备即可实现多维的导航信息测量。

美国自 20 世纪 60 年代就开始了星光折射间接敏感地平自主导航的研究。起初开展了天体掩星、星光折射角测量等原理性研究^[1-2],到 20 世纪 90 年代投入使用的多任务姿态确定和自主导航系统(MADAN)^[3]利用星光折射自主导航原理,定位精度达到 100 m 以下。法国国家空间研究中心^[4]以低轨道地球观测卫星 SPOT 为背景,对大气折射的精确模型、测量原理、自然环境对观测的约束、误差分配和系统性能的优化等方面进行了深入分析和仿真试验,该系统的导航定位精度预计达到 300 m。

国内针对星光折射间接敏感地平自主导航技术开展了基础理论和导航方案的研究。研究工作主要集中在基本原理、导航算法以及大气密度模型等方面的研究^[5-6]。导航方案研究方面,文献[7]设计了一种组合大视场星敏感器,可以实现同时观测整个地球边缘的三颗折射星。文献[8]提出了一种适用于变轨航天器的星光折射解析定位新方法。文献[9]建立了星敏感器视场内折射星数的概率分布适用模型,为间接敏感地平星敏感器参数设计提供了指导作用。

综上所述,目前国内的研究大部分集中在基础理论及算法研究,针对星光折射间接敏感地平星敏感器的设计研究较少。本文从星光折射间接敏感地平的工作原理及工程应用角度出发,详细分析了星光折射星敏感器探测方案的主要参数设计,包括探测谱段的选择,恒星观测视场模型、探测概率及阈值星等的选择,以及探测能力的分析等。在此基础上,设计了适用于星光折射间接敏感地平的高精度星敏感器,单星质心定位精度达到秒。最后设计了一种适合于星光折射星敏感器的光学系统。

2 星光折射自主导航基本原理

如图 1 所示,当星光通过地球大气时,其光线会向地心方向弯曲。从轨道上看,当恒星的真实位置已经下沉时,其视位置还保持在地平之上。从航天器上观测得到折射光线相对于地球的视高度为 h_a ,而实际上它距离地面在一个略低的高度 h_g ,即折射高度。

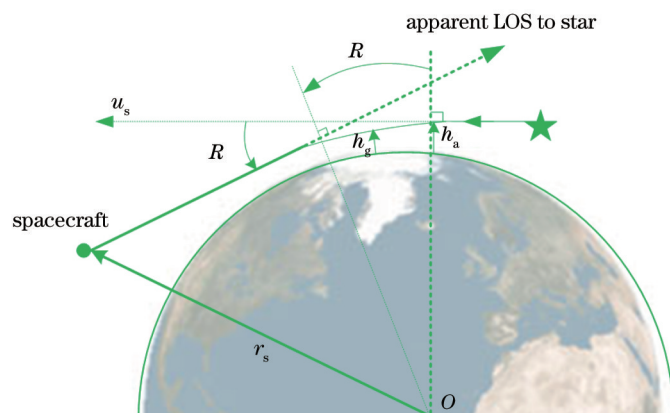


图 1 星光折射几何关系

Fig.1 Geometry model of stellar refraction

星光折射角 R 包含了与卫星位置有关的信息,而折射角和星光折射高度 h_g 与卫星位置没有直接的几何关系,只有视高度 h_a 才能起到将折射角观测与卫星位置联系起来的桥梁作用。根据资料分析^[5],在折射高度 $h_g=25$ km 处,大气密度百分比误差为 1% (1σ) 时引起的位置误差为 63.7 m,星敏感器 1" 的折射量测误差引起 500 km 高处的航天器误差为 55.6 m,两项相加引起的航天器位置误差为 84.6 m (1σ)。

因此,星光折射间接敏感地平自主导航的精度取决于大气密度模型以及星敏感器的测角精度。星敏感器作为唯一的测量设备,其精度直接决定了最终定位精度。与传统星敏感器相比,星光折射星敏感器不仅要实现姿态的高精度测量,并且要通过探测及识别地球临边的折射星,实现位置及速度的测量。因此,星光折射星敏感器的观测环境、视场选择、探测星等以及探测能力等方面与传统星敏感器有着较大的差异,复杂程度大幅增加。

3 主要参数设计

3.1 探测谱段的选择

实现对折射星的观测是解算地球矢量方向的基础,在星敏感器的折射星观测区域,星光将通过较长途径的大气衰减,某些波段的能量因大气吸收而无法穿越。与传统星敏感器相比,探测波段应根据大气光谱衰减的程度进行选取。根据大气密度模型,星光穿越平流层时,大气密度的估计误差小于1%,适合用于折射角的测量。为获得适用于折射星的观测谱段,采用大气仿真软件 MODTRAN 分析星光穿越不同大气高度时的透射率,星光穿越大气高度取 25~50 km,分析光谱范围为 200~1000nm。

大气密度随海拔增加而减小,当高度达到 100 km 时,大气压力小于 10^{-4} atm,对光谱透射率的影响可以忽略不计,在计算星光穿越大气的长度时,以卫星与恒星连线对应的海拔 100km 作为观测点进行计算,星光穿越大气的路径长度计算近似模型如图 2 所示。

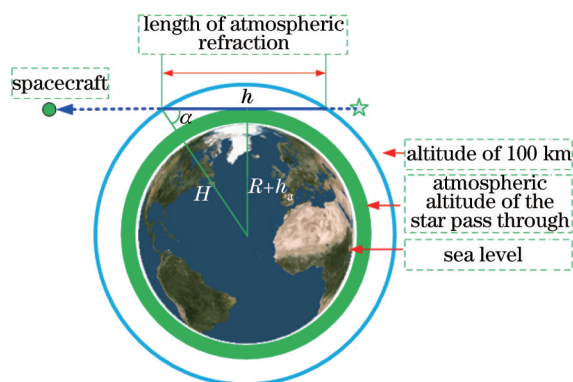


图2 大气厚度计算模型

Fig.2 Calculation model of atmosphere thickness

大气折射路径长度近似为

$$L = 2\sqrt{H^2 - (R + h_a)^2}, \quad (1)$$

观测天顶角为

$$\beta = 180^\circ - \alpha = 180^\circ - \arcsin\left(\frac{R + h_a}{H}\right), \quad (2)$$

式中 R 为地球半径,取 6371 km, H 为 100 km 大气层到地心的距离,取 6471 km, h_a 为折射星穿越的大气层高度。折射星穿越不同高度的大气层时,对应的大气厚度及观测天顶角计算如表 1 所示。

表 1 不同星光折射高度下大气折射厚度及观测天顶角的计算结果

Table 1 Results of thickness of atmosphere and zenith of observation in different stellar refraction heights

Parameter	Value						
Height of refraction h_a /km	20	25	30	35	40	45	50
Thickness of atmosphere L /km	2029	1965	1899	1830	1758	1684	1606
Zenith of observation β /($^\circ$)	99.02	98.73	98.44	98.13	97.81	97.48	97.13

仿真分析结果如图 3 所示,随着星光穿越大气的高度增加,大气吸收路径的长度减小;在 25 km 处大气对可见光谱段吸收作用明显,600 nm 处存在强吸收峰,透射率在 700 nm 以上较高,星等衰减不到 0.25 Mv;随着星光折射高度的增加,大气对短波波段衰减程度降低,在 320~1000 nm 范围内,大气透射率对星光的衰减作用减小,有利于星光的探测。选择 25~50 km 的穿越高度,探测波段宜取 600~900 nm。

3.2 观测视场、探测概率及阈值星等的选择

3.2.1 观测视场规划

对于星光折射星敏感器,探测视场分为两个部分,即非折射星和折射星,分别满足姿态计算和折射角解算的需求。星光折射星敏感器观测视场(FOV)模型如图 4 所示。星光折射高度的范围为 25~50 km,航天器的飞行高度在 500 km 以上,沿大气高度方向的视场较小, ω_0 为星敏感器沿地球大气高度方向的观测夹角, ω_s 为

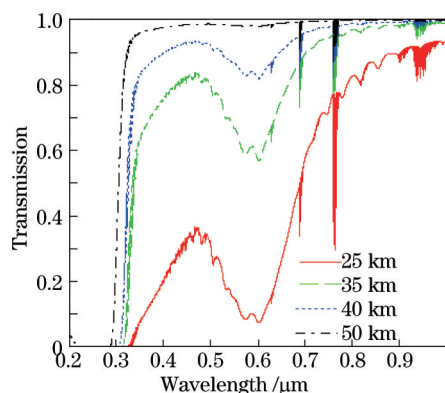


图3 星光穿越不同大气高度时透射率分布

Fig.3 Transmittance distributing in different atmosphere heights

总的视场。为实现视场配置的最优化,将探测器其中一条边沿地球切向方向放置,这可以充分提高非折射区的视场,并且沿地球圆周方向的折射区视场达到最大,如图5所示。这样放置的优点是能够避开对地球的观测,避免产生无效视场。

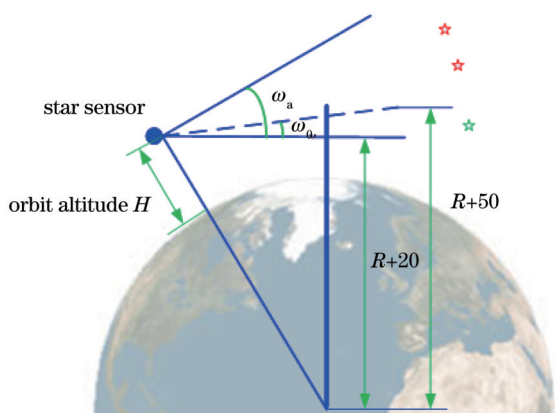


图4 星传感器探测视场模型

Fig.4 FOV of star sensor

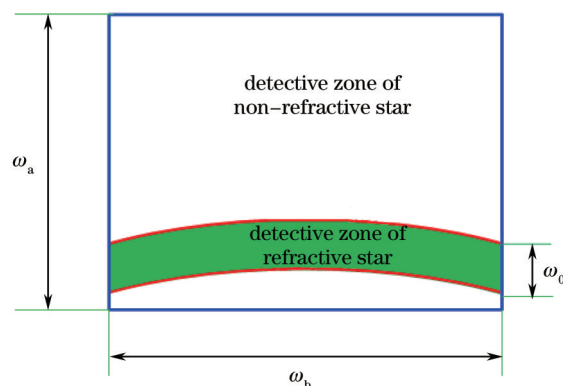


图5 探测视场分布示意

Fig.5 Layout of FOV distribution

当航天器在不同轨道高度时,星传感器的折射星观测视场发生变化。计算分析轨道高度在500~10000 km范围内,星传感器沿地球切向方向的观测视场 ω_0 统计结果如图6所示。随着轨道高度的增加,25~50 km范围内的大气折射高度所对应的视场降低,这将增大对折射星的观测难度,需提高探测星等。

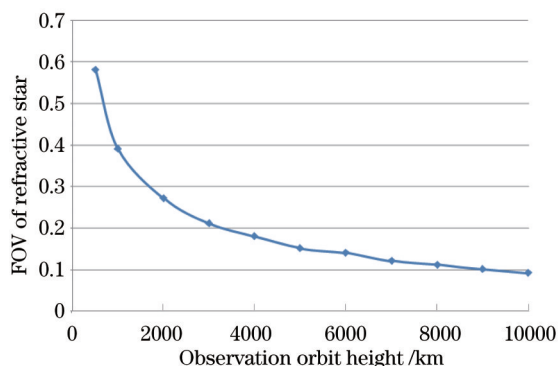


图6 星传感器在不同轨道高度观测视场 ω_0 值

Fig.6 ω_0 values of different orbit heights for star sensor

3.2.2 星探测概率及阈值星等

根据星光折射星传感器的工作原理,首先需要实现常规星传感器的功能,即对非折射恒星进行自主识

别及姿态解算,在该区域要满足对天区的星图识别;在此基础上,利用非折射星的位置信息判别并提取折射星。对于折射星的数量要求,根据其工作原理,在无先验信息的情况下,至少需要3颗以上的恒星满足位置的解算。在给定视场FOV内,天空中亮度不小于给定视星等的平均恒星数目 N_{FOV} 满足下式^[9]:

$$N_{\text{FOV}} = 6.57e^{1.08M_v} \left\{ \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \arccos[\sin^2(\omega/2)] \right\}, \quad (3)$$

其中, M_v 为探测的星等, ω 为星敏感器的视场角。

3.3 探测能力分析

星敏感器所探测的目标恒星是理想的点光源,在给定积分时间与探测器性能的条件下,对恒星的探测能力通过信噪比(SNR)计算,这是影响星敏感器单星测量精度的决定性因素。探测的噪声源包括光子散粒噪声、暗电流噪声、读出噪声、背景噪声、固定图形噪声,响应非均匀性噪声等,目标的探测信噪比为

$$R_{\text{SN}} = S/\sigma_s = S/\sqrt{\sigma_{\text{read}}^2 + S + S_B + N_D + \sigma_{\text{FPN}}^2 + \sigma_{\text{PRNU}}^2}, \quad (4)$$

其中 S 为信号光电子数, σ_{read} 为探测器电路读出噪声, S_B 为背景光电子数, N_D 为暗电流噪声, σ_{FPN} 为固定图形噪声, σ_{PRNU} 为响应非均匀性噪声。实际应用时,固定图形噪声和响应非均匀性噪声通过预先测量进行补偿,星空黑背景噪声可忽略,则(4)式可简化为下式^[10]:

$$R_{\text{SN}} = S/\sigma_s = S/\sqrt{\sigma_{\text{read}}^2 + S + N_D}. \quad (5)$$

4 高精度星光折射星敏感器的设计

根据上述对星光折射星敏感器特性的分析结果,设计一个高精度的星敏感器系统,单星测量精度达到 $1''(1\sigma)$,应用轨道高度为500 km,探测视场不小于 $8^\circ \times 8^\circ$,探测波段为600~900 nm,探测折射星及非折射星的平均星数均不小于3颗。

4.1 探测视场

选择高灵敏度的CCD201作为探测器,该探测器在近红外波段具有较高的量子效率,适合穿越大气层的恒星探测。该探测器的基本参数为:靶面尺寸13.3 mm×13.3 mm,像元尺寸为13 μm×13 μm,填充因子为1,600~900 nm范围的平均量子效率为0.65,帧频为15 frame/s。据此,系统的探测视场分配如表2所示。

表2 探测折射星及非折射星的视场分配

Table 2 FOV admeasurements of refractive stars and non-refractive stars

	ω_a	ω_b	ω_o
FOV $l(^\circ)$	8	8	0.57

折射区的视场为 $8^\circ \times 0.57^\circ$,星敏感器探测不同星等恒星的平均星数如表3所示。选择7.1M_v恒星作为折射区域的阈值星等。

表3 折射星探测平均星数

Table 3 Average numbers of refractive stars

Magnitude	5 M _v	6 M _v	7 M _v	7.1 M _v	8 M _v
Average number inside FOV	0.3	0.9	2.8	3.1	8.2

非折射区的探测视场为 $8^\circ \times 7.4^\circ$,星敏感器探测不同星等恒星的平均星数如表4所示。选择6 M_v恒星作为阈值星等可以满足3颗星的探测要求。由于折射区的探测星等已经达到7.1 M_v,而非折射区无大气衰减,探测星等可以优于7.1 M_v,可以增加观测的恒星数量,提高3颗星的探测概率。

表4 非折射星探测平均星数

Table 4 Average numbers of non-refractive stars

Magnitude	5 M _v	6 M _v	7 M _v	8 M _v
Average number inside FOV	2.2	6.6	19.5	57.4

4.2 信噪比计算

光学系统口径取 $\Phi 65$ mm,分别计算折射天区和非折射天区下恒星的探测信噪比,非折射天区的大气透

射率取 1, 而折射天区的平均透射率取 0.6(对应 25 km 处), 随着穿越大气层的高度增加, 平均透射率逐渐接近于 1。计算结果见图 7、图 8。

从计算结果可以看出, 探测器采用 CCD201, 光学系统口径取 $\Phi 65$ mm, 积分时间 100 ms 时, 非折射天区没有大气衰减, 6 Mv 的探测信噪比优于 75.7, 折射天区在相同积分时间探测 7.1 Mv, 恒星的信噪比为 26.8。

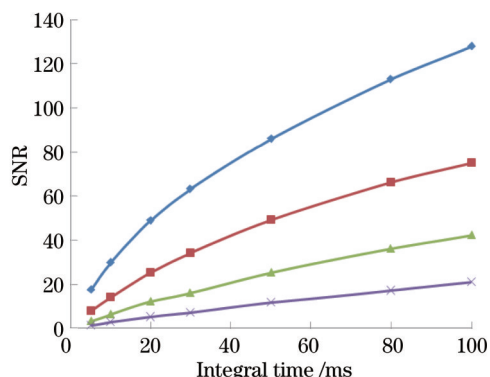


图 7 非折射天区不同积分时间下恒星探测信噪比

Fig.7 SNR with different integral times in non-refractive regions

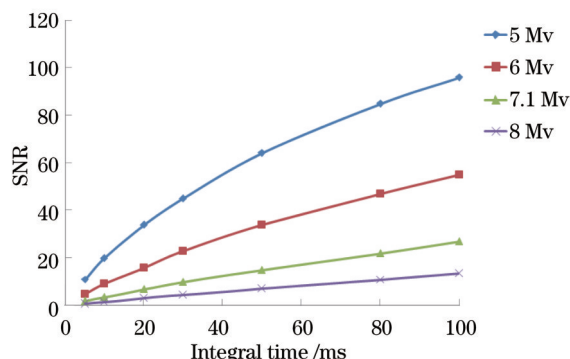


图 8 折射天区不同积分时间下恒星探测信噪比(取大气透射率 0.6)

Fig.8 SNR with different integral times in refractive regions (atmosphere transmittance is 0.6)

4.3 探测精度分析

当光学系统像差校正较好时, 电子噪声成为影响恒星质心测量精度的主要因素。在噪声相对于信号很小、各像元间的噪声不相关, 且所有像元上同一噪声都具有零均值和相同的噪声方差时, 噪声引起的星点质心在一维方向(设为 x 方向)的均方根误差由下式表示^[11]:

$$\sigma_x = \frac{m^2 \sigma}{\sqrt{12} S}, \quad (6)$$

式中 m 为开窗大小, σ^2 为噪声方差, S 为信号光电子数。

代入各种噪声表达式得到下式^[11]:

$$\sigma_x = \left[\left(\frac{\sigma_{\text{PSF}}}{\sqrt{S}} \right)^2 + \left(\frac{m^2 \sqrt{t_m N_D}}{\sqrt{12} S} \right)^2 + \left(\frac{m^2 \sqrt{t_m N_{\text{NUD}}}}{\sqrt{12} S} \right)^2 + (0.2\sigma_{\text{PRNU}})^2 + \left(\frac{m^2 \sigma_{\text{RN}}}{\sqrt{12} S} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (7)$$

式中 σ_{PSF} 为高斯弥散斑半径, N_D 为暗电流, N_{NUD} 为暗电流非均匀性, σ_{PRNU} 为光响应非均匀性, σ_{RN} 为读出噪声。

假设质心精度计算采用 3×3 窗口, 即 $m=3$, $\sigma_{\text{PSF}}=0.55$ pixel。在 100 ms 积分时间下, 不同星等恒星质心精度误差计算结果见表 5 及表 6。

表 5 $m=3$ 时, 非折射天区不同星等恒星质心精度误差

Magnitude /Mv	8	7	6	5
Electrons of single	3.3×10^3	8.2×10^3	2.1×10^4	5.2×10^4
σ_x	0.035	0.015	0.007	0.003

表 6 $m=3$ 时, 折射天区不同星等恒星质心精度误差(大气透射率取 0.6)

Table 6 As $m=3$, centroid precision error for different magnitudes in refractive region (atmosphere transmittance is 0.6)

Magnitude /Mv	8	7.1	7	6	5
Electrons of single	2.0×10^3	4.5×10^3	4.9×10^3	1.2×10^4	3.1×10^4
σ_x	0.058	0.026	0.024	0.011	0.005

通过计算分析, 随着信号电子数的增加, 探测信噪比随之增加, 电子学噪声引起的质心位置误差随之下降, 非折射天区星等优于 6 Mv、折射天区星等优于 7.1 Mv 时, 误差可以控制在 $1/38$ pixel 内。

单星测量精度是星光折射星敏感器的核心指标, 探测器选用 CCD201 时, 像元尺寸为 $13 \mu\text{m}$, 对应单像

元空间角分辨率为 $28.2''$,非折射区的阈值星等取 $6 M_v$ 时,单星质心误差精度优于 $0.2''$,折射区的阈值星等取 $7.1 M_v$ 时,单星质心误差精度优于 $0.74''(1\sigma)$,均满足 $1''(1\sigma)$ 的单星测量精度要求。

5 光学系统设计

采用单一星敏感器同时探测折射恒星与非折射恒星,如果选用全反射式光学系统,两者的探测波段可以不相同,可以最大化的提高系统探测能力。然而全反射式光学系统无法实现大视场设计,并且地球临边的折射星数量有限,选用透射式光学系统是最好的方式。

与常规星敏感器光学系统相比,星光折射星敏感器光学系统的焦距更长,口径更大,且精度要求更高。对多种星敏感器光学系统结构型式进行比较分析^[12-14],采用复杂化三片型向远摄型光学系统过渡的结构型式,通过对前半部的系统进行复杂化,这样带来的好处是既可以增大相对口径,提高像质,还可以实现缩小筒长,减轻光学镜头重量。由于光学系统的焦距长,引入较大的二级光谱,为了降低二级光谱像差,设计时采用了特殊色散的光学玻璃NPK52A,取得了较好的效果。

设计过程中还考虑了采用非球面,但是在设计中发现,系统的单色像差已经可以得到较好的校正,主要是二级光谱像差量较大,非球面并不能解决二级光谱的问题。为了消除二级光谱像差,设计也考虑了二元光学的方法,由于国内目前二元光学的加工工艺还不成熟,尚不能应用到工程实践。

根据星光折射星敏感器对其光学系统的指标要求,设计结果如表7所示。光学系统结构如图9所示,像质分析如图10所示。光学系统的弥散斑形状与尺寸得到了较好的控制,影响星敏感器姿态测量精度的像差如畸变、彗差以及垂轴色差等均得到了较好消除,为提高星敏感器的精度提供了保障。此外,采用光学玻璃与结构材料匹配,实现被动无热化设计,在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内成像质量基本不变,光学传递函数如图11所示。

表7 光学系统设计指标及设计结果

Table 7 Design targets and results of optical system

Performance parameters	Targets	Results
Focal	95 mm±2 mm	94.965
FOV	$\geq 8^{\circ}\times 8^{\circ}$	$8^{\circ}\times 8^{\circ}$
Entrance pupil diameter	$\geq 65\text{ mm}$	65 mm
Waveband	600~900 nm	600~900 nm
Energy concentration	$\geq 85\%$ in 3 pixel×3 pixel	$\geq 90\%$
Distortion	$\leq 0.05\%$	$\leq 0.01\%$
Lateral color	$\leq 2\text{ }\mu\text{m}$	$\leq 1.2\text{ }\mu\text{m}$
Centroid excursion	$\leq 1\text{ }\mu\text{m}$	$\leq 0.25\text{ }\mu\text{m}$

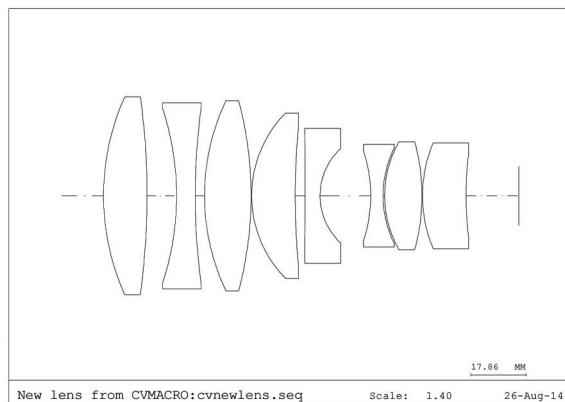


图9 光学系统结构

Fig.9 Layout of optical system

目前,星光折射星敏感器光学系统完成了加工及装配,与探测器之间进行高精度的像面匹配,集成如图12所示。采用单星模拟器进行星点探测性能的测试,如图13所示。100 ms积分时间内, $6 M_v$ 恒星的中心像

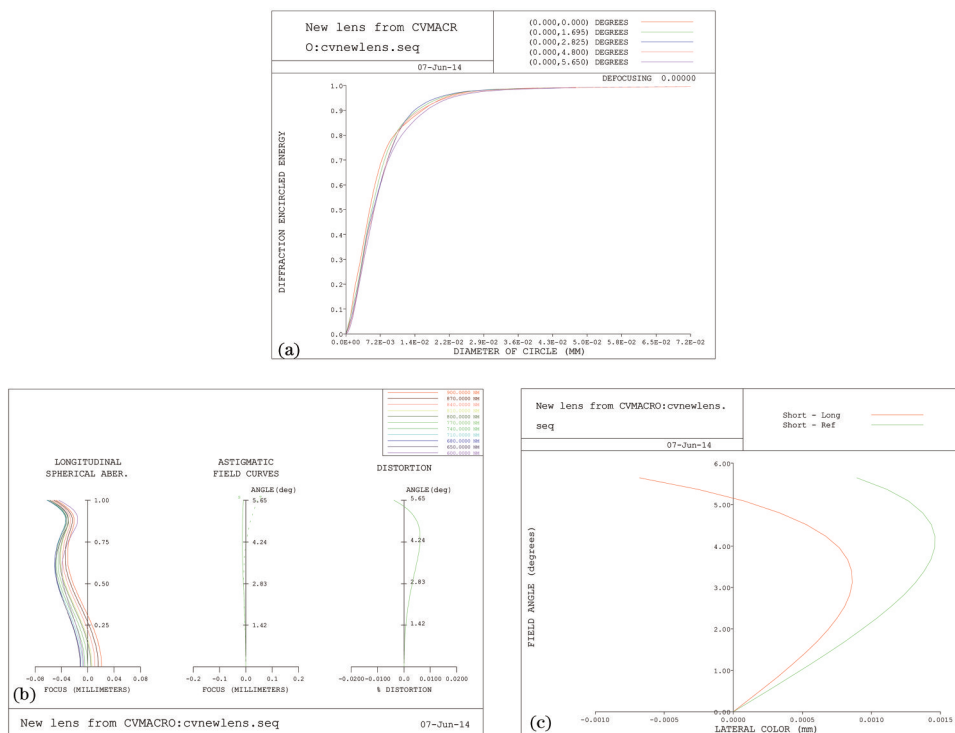


图 10 光学系统像质设计结果。(a)能量集中度曲线;(b)球差、象散及畸变;(c)垂轴色差

Fig.10 Design results of optical system imaging quality. (a) Energy concentration curves; (b) spherical aberration, astigmatism and distortion; (c) lateral aberration

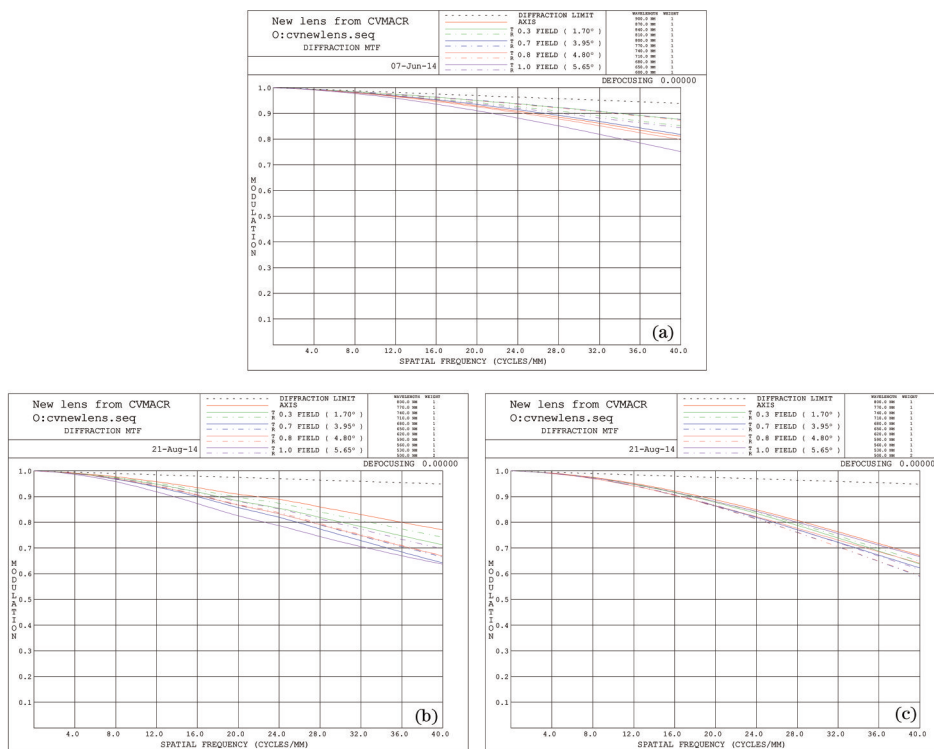


图 11 无热化设计结果。(a) 20 °C; (b) -30 °C; (c) 50 °C

Fig.11 Results of athermalization design. (a) 20 °C; (b) -30 °C; (c) 50 °C

元信噪比测试值最大达到 67.6,与计算分析结果相比略低,主要是由于测试环境杂光的影响及单星模拟器为视星等标定两方面原因引起。各视场的星点弥散斑均在 3×3 像元范围,且轴外的光斑分布对称,利于后续的

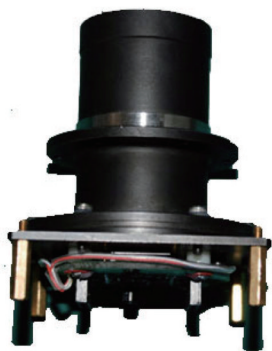


图 12 研制的光学镜头及探测器组件集成

Fig.12 System combination of developed lens and detector

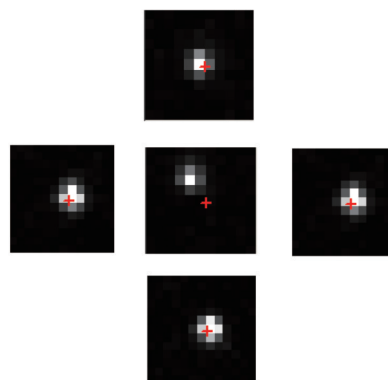


图 13 中心视场及边缘视场的星点弥散斑测试结果

Fig.13 Star dispersion testing result of center and marginal fields of view

电子学细分处理。

6 结 论

详细分析了星光折射星敏传感器所主要面临的光学探测问题及设计参数的选择。利用 Modtran 进行了仿真分析,确定了折射星的探测谱段为 600~900 nm。建立了单星敏传感器视场观测模型,分析了探测概率及阈值星等的选择,推导了折射星与非折射星的探测能力。研究表明,折射星的观测视场随轨道增加而降低,增加了恒星探测难度;由于存在大气衰减及受限于折射视场小,折射星的阈值星等需要高于非折射星。在此基础上,设计了应用于 500 km 轨道高度、精度优于 1" 的星光折射星敏传感器。结合高灵敏度的背薄 CCD201,并采用长焦距大相对孔径的光学系统,在 100 ms 积分时间下,阈值星等为 7.1 Mv 的折射星信噪比达到 26.8,单星测量精度达到 0.74",满足星光折射自主导航对星敏传感器的高精度测量要求。最后,研究了满足星光折射星敏传感器的光学系统设计,设计结果表明,采用复杂化三片型向远摄型光学系统过渡的结构型式在成像质量、重量尺寸方面具有较大优势,能够满足应用需求。研究工作对于星光折射间接敏感地平自主导航星敏传感器技术的发展具有参考意义和应用价值。

参 考 文 献

- 1 M A Chory, D P Hoffman, J L Lemay. Satellite autonomous navigation—status and history [C]. Las Vegas, USA: IEEE Transaction on Position, Location and Navigation Symposium, 1986: 110–121.
- 2 R T Savely, B F Cockrell, S Pines. Apollo Experience Report on board Navigational and Alignment Software [R]. Washington, D. C., National Aeronautics and Space Administration, 1972.
- 3 R B Gounley, R L White, E Gai. Autonomous satellite navigation by stellar refraction [J]. Journal of Guidance, 1984, 7(2): 129–134.
- 4 J Anthony. Air force Phillips laboratory autonomous space navigation experiment [C]. Huntsville, AL AIAA Space Programs and Technologies Conference, 1992. 24–27.
- 5 Fang Jiancheng, Ning Xiaolin, Tian Yulong. Spacecraft Autonomous Celestial navigation Principle and Method [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. 103–108, 185–186.
房建成, 宁晓琳, 田玉龙. 航天器自主天文导航原理与方法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006. 103–108, 185–186.
- 6 Hu Jing, Yang Bo. Precise research on stellar horizon atmospheric refraction model [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(7): 773–777.
胡 静, 杨 博. 精确星光大气折射导航观测模型的研究 [J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(7): 773–777.
- 7 Xue Shenfang, Ning Shunian, Jin Shengzhen, et al.. The starlight refraction in autonomous orbit determination for satellite by large field of view star sensors [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(7): 971–974.
薛申芳, 宁书年, 金声震, 等. 组合大视场星敏传感器自主定轨中的星光折射 [J]. 光学学报, 2006, 26(7): 971–974.
- 8 Wang Xinlong, Ma Shan. High precision autonomous localization method for high altitude and long-flight-life of unmanned aerial

- vehicle [J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2008, 29(s1): 39-45.
- 王新龙, 马 闪. 高空长航时无人机高精度自主定位方法[J]. *航空学报*, 2008, 29(s1): 39-45.
- 9 Wang Haiyong, Jin Guangrui, Zhao Yanwu. Applicable probability distribution model of refracted star number in field of view of indirectly sensing horizon star sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1201002.
- 王海涌, 金光瑞, 赵彦武. 间接敏感地平星传感器视场内折射星数的概率分布适用模型[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1201002.
- 10 He Jiawei, He Xin, Wei Zhonghui. Design and application of scientific CCD camera for star sensor [J]. *Opto- Electronic Engineering*, 2012, 39(3): 12-18.
- 何家维, 何 昕, 魏仲慧. 科学级 CCD 相机在星传感器中的设计与应用[J]. *光电工程*, 2012, 39(3): 12-18.
- 11 Bruce R Hancock, Robert C Stirbi, Thomas J Cunningham, *et al.*. CMOS active pixel sensor specific performance effects on star tracker/imager position accuracy [C]. *SPIE*, 2001, 4284: 43-53.
- 12 Yan Peipei, Fan Xuewu, He Jianwei. Design of hybrid refractive-diffractive star sensor optical system with small F-number [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2458-2463.
- 闫佩佩, 樊学武, 何建伟. 折/衍混合大相对孔径星传感器光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(12): 2458-2463.
- 13 Fan Qiaoyun, Li Xiaojuan. Selection of optical system parameter for an all-day used star sensor [J]. *Acta Optical Sinica*, 2011, 31(11): 1122001.
- 樊巧云, 李小娟. 全天时星传感器光学系统设计参数选择[J]. *光学学报*, 2011, 31(11): 1122001.
- 14 Gong Dun, Tian Tiejun, Wang Hong. Design of wide band and large relative aperture star sensor optical system with asphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0822001.
- 巩 盾, 田铁印, 王 红. 含有非球面的宽波段大相对孔径星传感器光学系统设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0822001.

栏目编辑: 韩 峰