

长焦距无热化星敏感器光学系统设计

伍雁雄, 乔 健, 王丽萍*

(佛山科学技术学院, 广东 佛山 528000)

摘要: 光学系统是自主导航星敏感器实现恒星光信号收集以及高精度姿态测量的核心组件。以高精度星敏感器光学系统为研究对象, 分析了影响光学系统探测不同色温恒星精度的机理, 恒星色温及环境温度变化引起的质心漂移量误差通过后期标定抑制的难度大, 需要在光学设计阶段进行控制; 建立了光学系统设计波长权重计算模型及分配方法; 在性能评价方面, 除了常规的能量集中度、畸变以及非对称像差之外, 提出采用恒星色温质心漂移量以及温度变化质心漂移量作为精度评价的主要指标。根据应用需求设计了一款基于航天卫星平台的长焦距星敏感器光学系统, 焦距为 95 mm, 相对孔径为 $F/2.4$, 视场角为 $8^\circ \times 8^\circ$, 探测光谱范围为 450~1 000 nm, 3×3 像元内能量集中度大于 85%。基于常规玻璃材料校正了超宽谱段长焦距光学系统的倍率色差, 全视场倍率色差不超过 $0.9 \mu\text{m}$ 。精度分析结果表明: 2 600~9 800 K 范围内不同色温恒星的质心漂移量小于 $0.36 \mu\text{m}$; 在工作温度 $0 \sim 40^\circ\text{C}$ 范围内, 焦距变化量小于 $2.7 \mu\text{m}$, 温度变化引起的质心漂移量小于 $0.45 \mu\text{m}$ 。

关键词: 星敏感器; 无热化; 光学设计; 长焦距; 质心漂移量

中图分类号: O439; V448 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200061

Optical system design of star sensor with long focal length and athermalization

Wu Yanxiong, Qiao Jian, Wang Liping*

(Foshan University of Science and Technology, Foshan 528000, China)

Abstract: Optical system is the core component of autonomous navigation star sensor to realize the collection of star light and high-precision attitude measurement. In this paper, the optical system of high precision star sensor was taken as the research object, the influence mechanism of the accuracy of optical system for detecting different color temperature stars were studied and analyzed. It is difficult to suppress the centroid drift caused by the changes of star color temperature and ambient temperature through later calibration, which needs to be controlled under the stage of optical design. The calculation model and allocation method of optical system design wavelength weight were established, and the performance evaluation was carried out. In addition to the conventional energy concentration, distortion and asymmetric aberrations, the centroid drift of star color temperature and ambient temperature change were proposed as the main index of accuracy evaluation. According to the application requirements, a long focal star sensor optical system based on space satellite platform was designed, with the focal length of 95 mm, the relative aperture of $f/2.4$, the field view of $8^\circ \times 8^\circ$, the spectrum range of 450-1 000 nm, and the energy concentration of more than 85% in 3×3 pixels. Based on the regular glass

收稿日期: 2020-03-01; 修订日期: 2020-04-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (61771139); 佛山科学技术学院高建科研项目 (CGG07141)

作者简介: 伍雁雄 (1982-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事光学系统设计和星敏感器技术方面的研究。Email: 364477424@qq.com

通讯作者: 王丽萍 (1985-), 女, 助教, 硕士, 主要从事星敏感器技术方面的研究。Email: home313@126.com

materials, the lateral color aberration of the optical system was corrected under ultra-wide spectral range and long focal. The lateral color aberration of the full field was less than $0.9\ \mu\text{m}$; The results of accuracy analysis show that the accuracy of centroid position is less than $0.36\ \mu\text{m}$ in the range of $2\ 600\text{--}9800\ \text{K}$, and the change of focal length is less than $2.7\ \mu\text{m}$ in the range of $0\text{--}40^\circ\text{C}$, and the accuracy of centroid position caused by temperature is less than $0.45\ \mu\text{m}$.

Key words: star sensor; athermalization; optical design; long focal length; centroid drifting

0 引言

星传感器通过探测并识别出成像视场内天体恒星,识别后利用恒星位置精确已知的特征计算出飞行载体在惯性空间的三维姿态信息。由于具有测量精度高、精度不随时间发生漂移等优势,成为航天飞行器首要采用的姿态测量设备。

星传感器设备主要由精密光学系统、探测器电子学以及软件算法等组成,光学系统是实现恒星光信号收集以及高精度姿态测量的核心组件。由于恒星光谱分布复杂以及航天工作环境恶劣,高精度星传感器光学系统面临着比常规成像光学系统更多维度的设计难度与挑战。恒星具有不同色温,透射式光学系统由于倍率色差导致不同色温恒星的质心位置发生变化;星传感器属于能量探测系统,识别并标定出不同色温恒星质心位置差异代价巨大。在航天应用环境,星传感器光学系统可能受发射力学振动或冲击导致测量系统的内方位元素发生改变,从而引入测量误差;空间环境温度变化范围较大,导致光学系统焦距发生变化、焦面移动以及像差发生变化,从而产生测量误差。星传感器光学系统的焦距、视场、探测口径以及探测光谱等指标直接影响着星传感器的星等探测灵敏度、单星测量精度、姿态测量精度以及星图识别概率等核心指标,也是决定星传感器体量的重要因素和小型化瓶颈技术。采用较长焦距、大相对孔径、较大视场、宽光谱范围、低畸变、无热化以及像方远心光路的光学系统技术有利于提高星传感器测量精度、适应空间温度环境以及提升小型化性能。

在研究高精度星传感器光学系统设计技术方面,国内外已有较多文献。在光学系统结构型式上主要有复杂化双高斯型^[1-5]、远摄型^[6-7]、Petzval 型^[8-9]或者折反射式光学系统^[10]。在像差校正过程中引入非球面或衍射面校正高级球差或色差等^[8-9,11],巩盾等人实现 $100\ \text{mm}$ 长焦距星传感器光学系统设计^[11],采用衍射面校正了 $470\text{--}830\ \text{nm}$ 宽波段色差,但增加了光学

元件制造难度。在光学系统性能评估方面,主要通过能量集中度、倍率色差以及畸变等进行评价^[8,11-12];恒星色温或环境温度变化引起的质心位置变化未做深入研究分析及设计控制^[13-14],这是光学系统限制星传感器提升测量精度的主要误差来源,且后期难以通过标定技术校正。对于较长焦距星传感器光学系统,同时实现宽波段的色差校正以及大工作温度范围的无热化设计是十分困难的,甚至互为矛盾。

综上所述,目前针对长焦距宽波段无热化星传感器光学系统设计的研究较少。文中分析了色温恒星光谱分布特性,研究了不同色温恒星对透射式星传感器光学系统测量精度的影响机理;通过建立色温恒星在设计波段内的波长权重模型,确定了光学系统设计波长权重。提出采用质心漂移量评价色温恒星变化以及温度变化引起的质心精度变化,并对星传感器后期难以标定校正的色温质心漂移量以及温度质心漂移量误差进行约束与控制。在此基础上,根据航天工程应用需求,设计了一款高精度的长焦距、宽波段无热化星传感器光学系统。通过光阑前置以及将探测光谱范围提升到 $450\text{--}1\ 000\ \text{nm}$ 的方式实现了光学系统最大程度的轻量化设计;通过实现像方远心光路设计减少了光学系统受环境力学及温度变化产生的测量误差;基于常规玻璃材料实现了光学系统宽温度范围的无热化设计。最终实现星传感器光学系统的色温质心漂移量以及温度质心漂移量误差不超过 $0.45\ \mu\text{m}$ 。设计结果表明光学系统成像质量优异,满足使用要求。

1 光学系统设计参数选择

所研制星传感器选用长光辰芯光电技术有限公司科学级探测器 GSENSE2020BSI。探测器面阵规模为 $2\ 048\times 2\ 048$,像素尺寸为 $6.5\ \mu\text{m}\times 6.5\ \mu\text{m}$ 。光谱响应曲线如图 1 所示,探测器在可见光以及近红外波段均具有较高量子效率, $900\ \text{nm}$ 波长量子效率达到 0.4 以上。

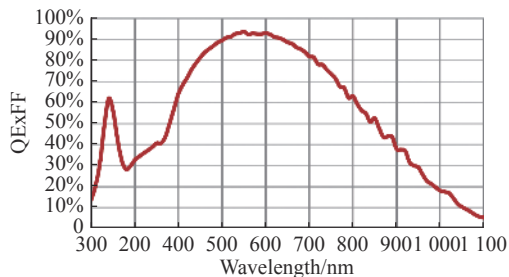


图 1 GSENSE2020BSI 探测器光谱响应曲线

Fig.1 Spectrum response curve of GSENSE2020BSI detector

星敏感器光学系统的主要设计指标包括焦距、探测视场、探测口径、光谱范围、畸变、远心度、能量集中度、质心漂移量以及工作温度范围等。选定探测器后,光学系统焦距决定了星敏感器像元分辨率,这是星敏感器实现单星测量精度的基础。探测口径与光谱范围共同影响星敏感器的探测星等;为了提高星敏感器恒星探测能力,充分利用 GSENSE2020BSI 探测器宽光谱高量子效率性能,成像光谱范围选择 450~1 000 nm,有利于降低光学系统探测口径,最大程度实现小型化;挑战及难度是宽谱段的轴向色差及倍率色差校正。能量集中度、质心漂移量是星敏感器光学系统特殊性能指标。能量集中度满足恒星亚像元细分精度的核心需求,一般要求弥散斑在 3×3~5×5 pixels。质心漂移量是衡量光学系统精度的重要指标,由彗差、畸变或倍率色差引起单一色温恒星、单一温度下的质心漂移量误差可以通过后期高精度星模拟器及转台标定而降低,由于恒星色温及温度变化引起的质心漂移量难以通过标定消除,需要通过光学设计进行控制。

综上,根据应用需求,确定光学系统主要设计指标如表 1 所示。

表 1 光学系统设计指标

Tab.1 Parameters of optical system design

Parameters	Values
Focal length/mm	95±0.5
FOV/(°)	≥8×8
Pupil(F#)	2.4
Waveband range/nm	450-1 000
Energy concentration	≥85% in 3×3 pixels
Centroid excursion(/")	≤1.5
Distortion	≤0.05%
Temperature/°C	0-40

2 光学系统设计与优化

2.1 设计波长权重计算模型及权重分配

天体恒星具有不同的色温,天文学家按照温度递减顺序表示为 O、B、A、F、G、K、M 等 7 个光谱型,每个光谱型细分为 0~9 个次例。恒星辐射出射度可表示为:

$$M_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{hc} \frac{1}{\lambda^5 (e^{\lambda k_B T} - 1)} \quad (1)$$

式中: λ 为辐射波长, μm ; h 为普朗克常数,取 $6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$; c 为光速,取 $2.997 \times 10^8 \text{ m/s}$; k_B 为玻耳兹曼常数,取 $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; T 为绝对温度,单位为 K。

当恒星色温发生变化时,恒星中心辐射波长会发生改变,不同色温恒星的中心辐射波长 λ_p 由维恩位移定律确定:

$$\lambda_p \cdot T = 2897.8(\mu\text{m} \cdot \text{K}) \quad (2)$$

对于 A~M 光谱型的恒星,色温范围为 2 600~11 500 K,其中心辐射将波长在 350~1 000 nm 范围变化。由于透射式光学系统不可避免会产生色差,不同色温恒星光信号通过光学系统后质心位置将会发生变化。在设计时,需要确定不同色温恒星设计波长的权重,并以此进行设计或评价光学系统成像性能。CodeV 或 Zemax 等光学设计软件采用离散波长和权重来表征光学系统光谱响应能力,假定离散波长数量共 N 个,谱段间隔为 $\Delta\lambda$,最大设计波长为 λ_{long} ,最小设计波长为 λ_{short} ,满足:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_{\text{long}} - \lambda_{\text{short}}}{N} \quad (3)$$

式中: λ_{short} 取 450 nm; λ_{long} 取 1 000 nm; N 取 11; 光学设计选用离散波长为 475、525、575、625、675、720、775、825、875、925、975 nm。

每个离散波长的权重代表以该波长为中心、宽度 $\Delta\lambda$ 光谱范围的辐射出射度总和,由下式确定:

$$W_T(\lambda_i) = K \frac{\int_{\lambda_i - \Delta\lambda/2}^{\lambda_i + \Delta\lambda/2} M(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\lambda_{\text{short}}}^{\lambda_{\text{long}}} M(\lambda, T) d\lambda} \quad (4)$$

K 为常数因子,选择合适数值以确保 $W_T(\lambda_i)$ 权重在 1~100 范围之内。

由于探测器在成像光谱范围内不同波长的量子效率存在差异,光学设计波长的权重分配应同时考虑色温恒星以及探测器量子效率的影响。波长 λ 到达探测器靶面处的有效辐射出射度为:

$$E_d(\lambda, T) = M(\lambda, T) Q_E(\lambda) \quad (5)$$

综合公式 (4)、(5), 得到光学系统设计时离散波长的权重计算模型为:

$$W_{\text{sys}}(\lambda_i) = K \frac{\int_{\lambda_i - \Delta\lambda/2}^{\lambda_i + \Delta\lambda/2} M(\lambda, T) Q_E(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\text{short}}}^{\lambda_{\text{long}}} M(\lambda, T) Q_E(\lambda) d\lambda} \quad (6)$$

取不同色温恒星分别计算出光学系统设计与性

能评估的离散波长权重值, 温度选择 2 600、3 100、4 300、5 000、5 500、6 000、6 800、7 600、9 800 K 等典型温度。得到不同色温恒星的波长权重分布如表 2 所示。2 600~9 800 K 范围内的色温恒星波长权重差异较大, 表明星敏传感器光学系统设计应对透镜材料引起的色差及二级光谱进行控制, 在性能评价时需要分别按照对应色温下的波长权重进行分析。

表 2 不同色温恒星的波长权重分配值

Tab.2 Distribution values of wavelength weight with different temperature stars

Wavelength/nm	Temperature/K								
	2 600	3 100	4 300	5 000	5 500	6 000	6 800	7 600	9 800
475	10	18	37	44	47	48	50	52	55
525	32	51	87	96	99	99	99	99	99
575	51	71	97	99	98	95	91	88	82
625	70	86	99	94	90	85	78	73	66
675	87	96	95	86	80	73	65	60	51
725	98	99	86	74	67	60	53	47	38
775	99	92	72	60	53	47	40	35	28
825	92	80	56	45	39	34	29	25	19
875	83	68	44	34	29	25	21	18	13
925	68	53	32	24	20	17	14	12	9
975	31	21	12	9	7	6	5	4	3

2.2 精度评价方法

光学传递函数能够客观评价星敏传感器光学系统的成像质量, 但无法准确评价光学系统设计精度性能。影响星敏传感器光学系统精度的因素包括能量集中度、畸变以及导致光斑失对称分布的像差等; 在外界环境不变的情况下, 畸变、彗差以及倍率色差等校正到较小量后, 采用星模拟器对星敏传感器进行全视场多点标定及多项式拟合可以将质心测量误差校正。星敏传感器面临探测目标光谱变化及工位环境温度变化的复杂性, 光谱分布差异以及温度改变引起的像差变化会导致星敏传感器光学系统弥散斑的质心位置发生变化。为了准确评估光学系统设计精度误差, 采用质心漂移量进行评价更为客观量化。针对难以标定消除的星敏传感器光学系统误差来源, 恒星色温质心漂移量与温度变化质心漂移量是需要考虑并通过设计控制的。

工作环境温度为 20 °C 时, 等效黑体温度为 5 500 K 的恒星光信号通过光学系统后在像面的质心坐标为 (x_{c5500}, y_{c5500}) , 其他色温恒星的质心位置 (x_{cT_b}, y_{cT_b}) 两者差值定义为恒星色温质心漂移量:

$$\delta x_{cT_b} = x_{cT_b} - x_{c5500} \quad (7)$$

$$\delta y_{cT_b} = y_{cT_b} - y_{c5500} \quad (8)$$

当工作环境温度发生变化时, 取 5 500 K 色温恒星作为输入光信号, 温度为 T 时质心位置 (x_{cT}, y_{cT}) 与 20 °C 时质心位置的差值定义为温度变化质心漂移量:

$$\delta x_{cT} = x_{cT} - x_{c5500} \quad (9)$$

$$\delta y_{cT} = y_{cT} - y_{c5500} \quad (10)$$

根据要求, 恒星色温质心漂移量以及温度变化质心漂移量设计要求如下:

(1) 恒星色温质心漂移量。以等效黑体温度为 2 600、3 100、4 300、5 000、5 500、6 000、6 800、7 600、9 800 K 等 9 种色温恒星作为辐射输入, 取 475、525、575、625、675、720、775、825、875、925、975 nm 等 11 种离散波长按表 2 进行加权后, 由于 5 500 K 色温恒星位于 2 600~9 800 K 色温恒星的中心温度位置, 且所对应的 G 系光谱型色温恒星的数目最多, 以 5 500 K 色温恒星为基准, 在 0、0.3、0.5、0.7、0.85、1 W 等规一化视场下, 其他色温恒星经过光学系统后弥散斑的能量重心与由该基准色温恒星弥散斑能量重心之间的偏差不大于 0.5 μm。

(2) 温度变化质心漂移量。0~40 ℃ 温度范围内, 取 475、525、575、625、675、720、775、825、875、925、975 nm 等 11 种波长按 5 500 K 色温恒星进行加权, 以 20 ℃ 为基准, 在 0、0.3、0.5、0.7、0.85、1 W 等规一化视场下, 其他温度弥散斑能量重心与基准温度下弥散斑能量重心之间的偏差不超过 0.75 μm。

2.3 光学系统结构选型

传统星敏传感器透射式光学系统结构型式主要包括复杂化双高斯、远摄型以及 Petzval 3 类, 在球面透镜的基础上引入特殊色散光学玻璃材料、非球面以及衍射面等校正大相对孔径高级球差及宽波段倍率色差。文中综合考虑以上光学系统结构型式校正正像差的优势, 摒弃不利于提高设计精度以及增加制造难度的设计元素, 采用光阑前置的光学系统结构型式, 将光阑设置在第一片透镜的第一个光学面上, 如图 2 所示。光阑前置的方式有利于降低光学系统的体积与重量, 实现小型化设计。当星敏传感器镜头焦距较长及设计波段较宽时, 光学系统的色差及二级光谱较大, HFK61 或 CaF2 等特殊色散玻璃能够校正长焦距及宽波段下的色差, 但这类玻璃的热膨胀系数大, 温度改变后焦面发生较大偏离, 成像质量下降。为了解决宽波段的色差校正和无热化的设计矛盾, 此设计前透镜组采用 3 种常规玻璃材料组合, 中部透镜组采用 4 种常规玻璃组合的方式, 联合优化校正宽波段色差及二级光谱, 并采用钛合金作为结构材料, 实现了无热化成像要求, 确保恒星色温质心漂移量与温度变化质心漂移量误差满足设计要求。像面前设置正光焦度透镜, 实现近像方远心光路设计, 降低光学系统受环境力学、温度变化引起的测量误差。光学系统采用全球面透镜设计, 避免了采用复杂非球面或衍射面光学元件加工检测难度及成本高的问题。

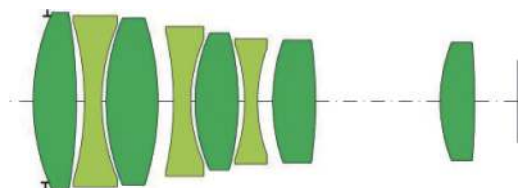


图 2 光学系统架构

Fig.2 Schematic diagram of optical system

2.4 光学系统优化

采用 Zemax 光学软件进行设计与优化, 主要设计流程与优化过程如下:

(1) 基于设计指标要求与光学系统结构选型, 在 Zemax 软件中输入符合设计要求的初始光学系统数据, 包括焦距、视场、探测口径、透镜半径、厚度及材料等, 初始优化时波长权重均设定为 1;

(2) 建立初始优化函数, 基于 Zemax 默认的优化函数, 选择类型为 RMS、计算准则为 Spot Radius, 并控制光学系统的焦距、透镜中心厚度、边缘厚度、空气间隔、系统长度等参数, 以透镜半径、厚度、空气间隔等为优化变量, 开始初始阶段优化, 优化过程中所有光学面保持为球面面型, 通过控制光线在光学面的入射角较小, 避免高级像差的产生, 并重点校正轴上球差, 获得像质初步满足要求的光学系统结构;

(3) 此时色差尤其是倍率色差较大, 通过替换光学玻璃材料的方式, 在保持光学系统结构型式不变的情况下, 前组采用 3 种常规玻璃材料组合以及中组采用 4 种常规玻璃组合的方式, 联合校正宽波段下的色差及二级光谱; 为保证后期无热化优化效果, 玻璃不选择 HFK61、CaF2 等线胀大的特殊色散玻璃。

(4) 色差校正与优化的同时, 逐步增加对畸变、像方远心等参数的控制, 控制参量逐渐减小, 避免因迭代步伐过大导致光学系统优化崩溃;

(5) 色差校正与优化的后期, Zemax 默认优化函数的选择类型改为 PTV, 计算准则为 Spot Radius, 提高像面弥散斑圆度及对称性;

(6) 校正好宽波段色差及二级光谱后, 光学系统在常温下的像质满足要求, 但温度变化后的像差未进行控制, 利用 Zemax 多重结构方式, 建立 0、5、10、15、20、25、30、35、40 ℃ 等 9 个温度点的多重结构, 对 9 个温度下的像质同时进行控制, 镜筒结构件材料选择钛合金 (线胀系数为 $9.5 \times 10^{-6}/K$), 优化时分析不同温度下的成像质量, 并适当替换 1~2 种光学玻璃材料, 最终获得宽温度范围下的优异成像质量;

(7) 根据波长权重分配值, 建立等效黑体温度为 2 600、3 100、4 300、5 000、5 500、6 000、6 800、7 600 以及 9800 K 等 9 种色温恒星, 以及 0、10、20、30、40 ℃ 等 5 个温度点的多重结构, 考虑优化效率, 温度控制点减少一半, 共 45 个多重结构;

(8) 评估不同色温恒星的质心漂移量以及不同温度下的质心漂移量设计结果, 根据超差情况进行适当的微量优化调整, 尤其是 2 600 K 色温恒星与 9 800 K

色温恒星的波长权重差异较大,需要精细控制倍率色差,调整优化过程中保持焦距、畸变、厚度、系统长度等参量复合设计指标要求;

(9) 完成优化及评估,形成并输出光学系统设计报告。

优化流程的关键环节如图 3 所示。

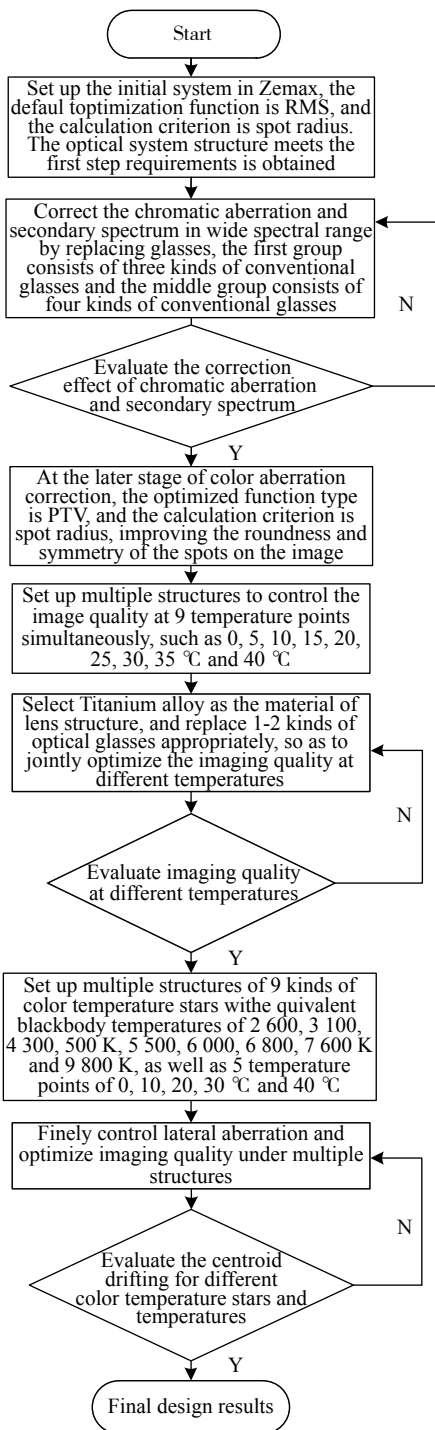


图 3 优化设计流程图

Fig.3 Flow chart of optimization design

3 设计结果

光学系统经优化设计结果如表 3 所示,光路结构如图 4 所示。共 8 片球面透镜,后截距为 10.3 mm,总长 108 mm,各项设计结果均满足设计指标要求。光学系统实现了远心光路的设计,全视场的远心度优于 0.8°,保证了探测视场内的照度均匀性。

表 3 光学系统设计结果

Tab.3 Results of optical system design

Parameters	Results
Focal length/mm	94.932 1
FOV/(°)	8×8
Pupil(F#)	2.4
Waveband range/mm	450-1 000
Energy concentration	≥85% in 3×3 pixels
Centroid excursion/(")	≤1.0
Distortion	≤0.003 25%
Temperature/°C	0-40

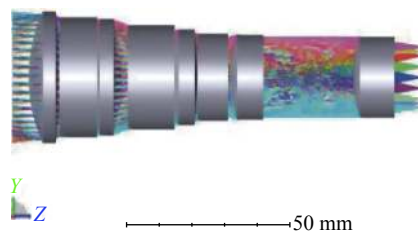


图 4 光学系统光路图

Fig.4 Light path diagram of optical system

3.1 畸变与色差

像散与畸变曲线设计如图 5 所示,全视场最大相

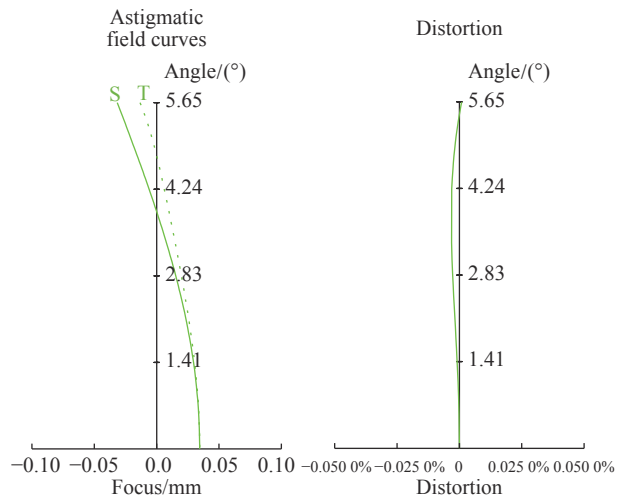


图 5 光学系统像散与畸变设计曲线

Fig.5 Design curves of astigmatism and distortion

对畸变不超过 0.003 25%, 引起主光线位置偏差不超过 0.46", 测角误差较小, 满足星敏传感器高精度测量需求。倍率色差曲线如图 6 所示。在 450 ~1 000 nm 范

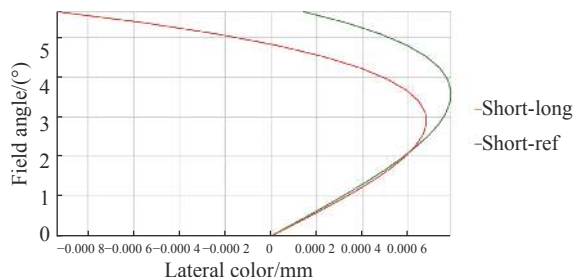


图 6 倍率色差设计曲线

Fig.6 Design curves of lateral chromatic aberration

围内, 倍率色差不超过 0.9 μm, 获得了较完善校正, 有利于降低恒星色温质心漂移量的误差。

3.2 光学传递函数 (MTF) 与能量集中度

MTF 全面评估一般光学系统成像质量的综合指标。根据选用探测器像元为 6.5 μm, 计算出奈奎斯特频率为 77 lp/mm, 设计结果如图 7 所示, 全视场的光学传递函数值 MTF 均优于 0.55@77 lp/mm, 成像质量优异。星敏传感器通过细分算法实现亚像元质心定位精度, 要求恒星光信号在探测器靶面形成 3×3~5×5 pixels 大小的弥散斑, 通过能量集中度指标来评价星敏传感器光学系统是否满足细分要求。设计结果如图 8 所示, 满足 3×3 pixels 内弥散斑能量高于 85% 的成像质量要求。

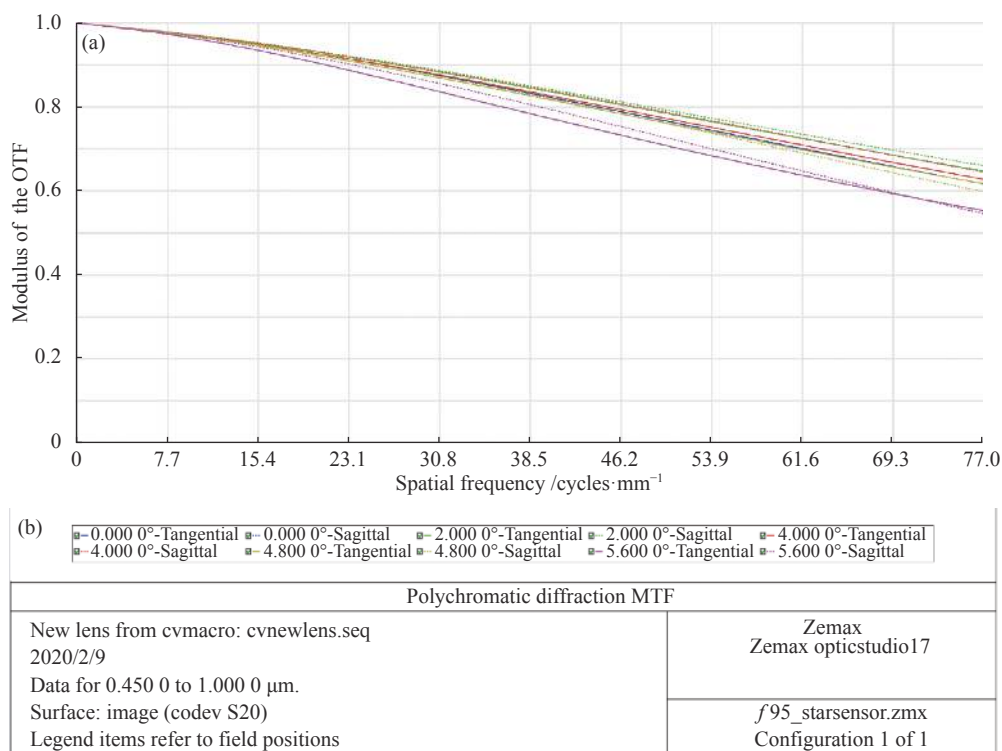


图 7 光学传递函数设计结果

Fig.7 Design result of MTF

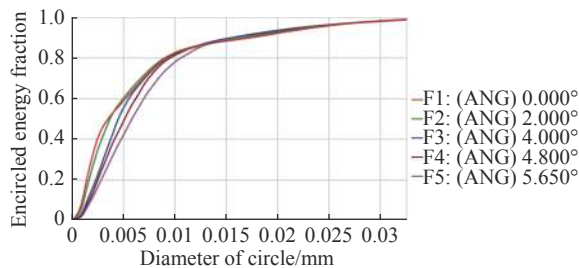


图 8 能量集中度曲线

Fig.8 Encircled energy curves

3.3 精度分析

此处重点分析后期难以通过高精度星模拟器标定校正的恒星色温变化质心漂移量以及温度变化质心漂移量两种误差, 评估方法详见 2.1 节及 2.2 节。

3.3.1 恒星色温质心漂移量误差

以等效黑体温度 5500 K 的恒星为基准, 计算 2 600、3 100、4 300、5 000、6 000、6 800、7 600、9 800 K 等 8 种色温恒星光信号经过光学系统后, 在像面弥散斑的能量重心与由该基准色温恒星弥散斑能量重心

之间的偏差,取 0、0.3、0.5、0.7、0.85、1 W 等 5 个规一化视场下,统计结果如表 4 及图 9 所示,恒星色温

变化引起的质心漂移量均小于 0.36 μm ,对应的角度变化不超过 0.78"。

表 4 恒星色温改变质心变化相对值 (单位: μm)

Tab.4 Relative value of centroid drifting under change of star temperature (Unit: μm)

Relative field	0 W	0.3 W	0.5 W	0.7 W	0.85 W	1.0 W
2 600 K	0	-0.038 4	-0.075 6	-0.152 9	0.089 6	0.268 4
3 100 K	0	-0.042 5	-0.068 7	0.317 5	0.207 8	-0.236 4
4 300 K	0	-0.034 6	-0.045 2	0.249 3	0.187 6	-0.197 8
5 000 K	0	-0.015 8	-0.027 2	0.132 1	0.096 2	0.105 8
Relative centroid drifting/ μm	5 500 K	0	0	0	0	0
	6 000 K	0	0.008 4	0.009 6	-0.156 2	-0.126 5
	6 800 K	0	0.012 7	0.015 3	-0.184 4	-0.152 3
	7 600 K	0	0.015 2	0.018 5	-0.232 1	-0.205 9
	9 800 K	0	0.027 8	0.048 7	-0.355 4	-0.248 1

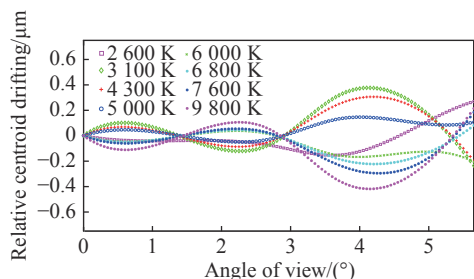


图 9 恒星色温改变质心变化相对值分布

Fig.9 Relative value of centroid drifting under change of star temperature

3.3.2 温度变化质心漂移量误差

取 5 500 K 色温恒星为研究对象,以 20 $^{\circ}\text{C}$ 下的质心位置为基准,评价 0、5、10、15、25、30、35 $^{\circ}\text{C}$ 以及 40 $^{\circ}\text{C}$ 温度下质心位置相对于基准位置的变化,以此评估星敏感器光学系统无热化设计效果。不同温度下相对于 20 $^{\circ}\text{C}$ 的质心漂移量统计如表 5 所示,除以视场外温度变化引起的质心漂移量均小于 0.45 μm ,对应的角度变化不超过 0.98"。

以 20 $^{\circ}\text{C}$ 焦距为基准,焦距随温度变化统计如表 6

表 5 温度改变质心变化相对值 (单位: μm)

Tab.5 Relative value of centroid drifting under change of temperature (Unit: μm)

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Relative field					
	0 W	0.3 W	0.5 W	0.7 W	0.85 W	1.0 W
0	0	-0.201 3	-0.286 4	-0.389 6	-0.254 1	-0.756 2
5	0	-0.089 5	-0.152 6	-0.256 8	-0.215 2	-0.198 3
10	0	-0.065 8	-0.095 6	-0.201 7	-0.195 8	-0.232 5
15	0	-0.023 1	-0.012 6	0.058 9	0.037 5	0.025 9
20	0	0	0	0	0	0
25	0	0.033 5	0.015 2	0.085 6	0.075 3	0.085 2
30	0	0.074 6	0.112 3	0.193 3	0.172 5	0.264 6
35	0	0.113 5	0.203 7	0.356 4	0.250 9	0.325 4
40	0	0.250 4	0.321 8	0.450 5	0.279 5	0.563 7

表 6 不同温度下系统焦距及相对变化值

Tab.6 Focal lengths and relative change under different temperatures

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Focal length /mm	94.929 4	94.930 2	94.930 8	94.931 5	94.932 1	94.932 7	94.933 3	94.933 9	94.934 5
Difference / μm	-2.7	-1.9	-1.3	-0.6	0	0.6	1.2	1.8	2.4

所示。在 0~40 °C 范围内,焦距变化值不超过 2.7 μm,变化率小于 0.003%。

4 镜头研制与性能初步测试

目前已经完成光学镜头的加工与装配,镜头采用定心装调的方式,装调偏心与倾斜误差分别控制在 10 μm 与 15" 以内,透镜中心间隔控制误差在 10 μm 以内,保证了装调精度。采用美国 OPTIKOS 的光学传递函数仪测试了光学镜头轴上光学传递函数以及弥散斑分布;图 10 为光学镜头传递函数实测值,优于 0.59@77 lp/mm,图 11 为弥散斑分布图,实测结果接近设计值,满足使用要求,验证了光学系统设计方法的可行性。图 12 为实测光学弥散斑。

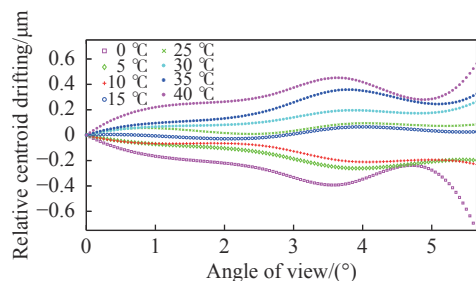


图 10 温度改变后,质心变化相对值分布 (单位: μm)

Fig.10 Relative value of centroid drifting under change of temperature

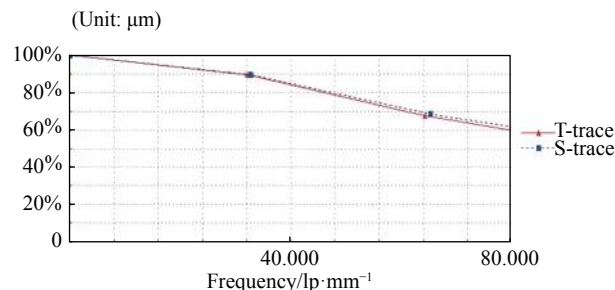


图 11 轴上 MTF 实测结果图

Fig.11 Measurement results of MTF on axis

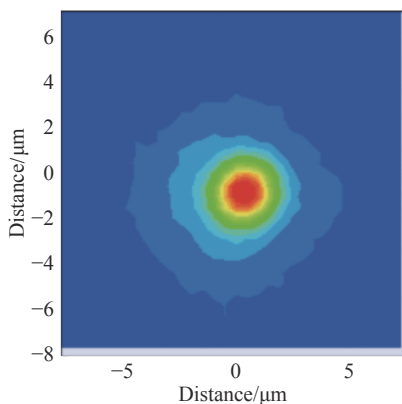


图 12 实测光学弥散斑

Fig.12 Measurement of optical spot

5 结 论

针对航天卫星自主导航星敏感器对高精度光学系统的需求,文中设计了一款长焦距无热化宽谱段星敏感器光学系统,实现了长焦距、中等视场、宽成像谱段、低畸变以及近远心光路等优点,镜头焦距 95 mm,视场角 8°×8°,相对孔径 $F/2.4$,成像光谱范围覆盖 450~1 000 nm,畸变优于 0.00 325%。在研究方法上,研究了恒星色温及温度变化引起光学系统测量精度变化的机理,建立了基于恒星色温及探测器光谱响应能力的设计波长权重分配模型;识别并提出采用恒星色温变化质心漂移量以及温度变化质心漂移量评价星敏感器光学系统的精度设计结果,这是星敏感器整机后期难以通过标定技术消除的误差。在光学系统设计方面,采用光阑前置的光学系统结构型式,选择多组常规玻璃组合校正长焦距超宽谱段轴向色差及倍率色差,实现探测光谱宽度从 300 nm 提升到 550 nm,全视场倍率色差不超过 0.9 μm,降低了光学系统体积与重量,有利于星敏感器小型化。镜头设计与研制结果表明,光学系统在等效黑体温度为 2 600~9 800 K 色温恒星范围内的全视场质心漂移量不超过 0.36 μm,0~40 °C 范围全视场质心漂移量不超过 0.45 μm,镜头成像质量良好,满足航天卫星高精度星敏感器应用需求。

参考文献:

- [1] Yang Haoming, Wang Lingjie, Weng Zhicheng, et al. Optical system of light star tracker with wide field and large aperture [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(2): 151-154. (in Chinese)
- [2] Yan Peipei, Fan Xuewu. Design of optical system of very high Precision star sensor with small F -number [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 49(9): 116-123. (in Chinese)
- [3] Zhang Huang, Wu Lingling. Design of optical system of star sensor [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2014, 33(12): 61-64. (in Chinese)
- [4] Han Long, Fu Qiang, Wang Chao, et al. Design of optical system of star sensor with wide spectrum and lager relative aperture [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(1): 199-202. (in Chinese)
- [5] Zhu Yang, Zhang Xin, Wu Yanxiang, et al. Optical system design and ghost analysis for ultraviolet star sensor [J]. *Infrared*

- and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0118003. (in Chinese)
- [6] Wei Ming, Wang Chao, Fu Qiang, et al. Opto-mechanical system design of light and compact star sensor with large relative aperture [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2019, 42(1): 23-26. (in Chinese)
- [7] Meng Xiangyue, Wang Yang, Zhang Lei, et al. Lens design of star sensor with large relative aperture and wide spectral range [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(7): 0718005. (in Chinese)
- [8] Du Kang, Liu Chunyu, Xie Yunqiang, et al. Lens design of micro star sensor with large aperture based on aspheric surface [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(6): 96-103. (in Chinese)
- [9] 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. (in Chinese)
- [10] Lu Bo, Liu Weiqi, Zhang Daliang, et al. Optical system design of large entrance pupil catadioptric star sensor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(7): 0716002. (in Chinese)
- [11] 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. (in Chinese)
- [12] Zhan Chao. Optical system design of star sensor[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016. (in Chinese)
- [13] Liu Haibo, Tan Jichun, Hao Yuncai, et al. Effect of ambient temperature on star sensor measurement accuracy [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(12): 40-44.
- [14] Liu Haibo, Tan Jichun, Shen Benjian, et al. Effect of color temperature on position accuracy of star sensor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(11): 35-42.