

亚秒级甚高精度星相机光学系统设计

伍雁雄^{1,2} 吴洪波¹ 张继真¹ 王灵杰¹ 朱 杨¹ 张 新¹

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

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 高精度星相机是航天测绘、侦查相机实现精确定位测量的关键设备。分析了长焦距星相机光学系统设计难点, 采用新型双高斯向远摄型过渡的结构型式, 设计了精度达到亚秒级的星相机光学系统。光学系统焦距为 200 mm, 相对孔径为 $F/2$, 视场角为 $7.5^\circ \times 7.5^\circ$, 光谱范围为 500~800 nm。针对恒星色温范围大的特性, 在未采用特殊色散玻璃材料的情况下校正了光学系统的色差, 实现不同色温恒星的质心位置一致性; 采用负折射率温度系数的冕牌玻璃进行热补偿, 实现光学系统对恒星探测的亚秒级无热化设计。设计结果表明: 光学系统畸变优于 0.003%, 垂轴色差优于 $1.5 \mu\text{m}$, 2600 K~9800 K 范围内色温恒星的质心位置精度优于 $0.2''$; 在 0°C ~ 30°C 范围内, 焦距变化不超过 $5.1 \mu\text{m}$, 除 1 视场外质心位置精度均优于 $0.4''$ 。

关键词 光学设计; 星相机; 无热化; 消色差; 质心漂移量

中图分类号 TG502.33

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0716001

Optical System Design of Star Camera with High Precision Better than Second Level

Wu Yanxiong^{1,2} Wu Hongbo¹ Zhang Jizhen¹ Wang Lingjie¹ Zhu Yang¹ Zhang Xin¹

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

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to achieve accurate positioning measurement, high precision star camera is the key equipment of the space mapping or reconnaissance camera. The difficulties of optical system design about star camera with long focal length are analyzed. The new structure type of dual Gauss transited to telephoto is adopted, a sub-second star camera optical system is designed with focal length of 200 mm, relative aperture of $F/2$, angel of $7.5^\circ \times 7.5^\circ$, spectrum range of 500~800 nm. Due to the characteristics of stellar temperature in large range, the color correction of optical system is realized without the use of special dispersion glass, the consistency of centroid position is achieved under different color temperatures of stellar. In order to compensate thermal drifting, negative temperature coefficient of refract index of the crown glass is adopted, by which sub-second precision of athermalization is come true. It is shown that, the distortion of the optical system is better than 0.003%, the lateral color aberration is less than $1.5 \mu\text{m}$, the accuracy of centroid position is better than $0.2''$ in the range of 2600 K~9800 K. Between 0°C and 30°C , the change of focal length is less than $5.1 \mu\text{m}$, the accuracy of centroid position is better than $0.4''$, except the 1 field.

Key words optical design; star camera; athermalization; achromatism; centroid drifting

OCIS codes 220.3620; 280.4788; 120.3930; 120.5710

收稿日期: 2014-12-01; 收到修改稿日期: 2015-03-04

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等方面的研究。

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方面的研究。E-mail: optlab@ciomp.ac.cn

1 引言

星相机通过同步获取测绘、侦察卫星地相机当前影像的外方位元素,从而解算得到地相机高精度的定位信息。从测量原理来看,星相机属于广义的星敏感器,具有星敏感器的一系列优点,比如测量精度高、无需先验知识、无累积误差、无随动系统、可被动测量、稳定性高、安装使用方便等优点。在功能及应用方面,常规星敏感器属于姿态控制系统的组件;星相机属于与地相机地位相当的光学载荷,光机稳定性要求极高。在精度方面,常规星敏感器的姿态测量精度在 $5''\sim 30''$ 范围内,星相机测角精度需要达到秒级甚至亚秒级,技术难度更大。在体量方面,星相机为获得更高精度,光学系统的焦距、口径等参量比常规星敏感器要大。

美国研制的 HAST 高精度星相机采用了长焦距大相对孔径的光学系统技术,测量精度达到亚秒级^[1]。GeoEye-1 立体测绘卫星采用 HAST 星相机,可在无控制点的情况下实现平面精度达到 4 m,高程精度达到 6 m,最大指向测量误差优于 $0.4''(3\sigma)$ 的要求。HAST 星相机光学系统的焦距为 200 mm,口径达到 $\Phi 110$ mm,具体设计方法及性能评价未见披露。

国内针对星敏感器光学系统的研究较多^[2-14]。在结构型式上,大多采用对称的双高斯型光学系统以降低垂轴像差。在像差校正上,研究了采用非球面、衍射面等方法降低光学系统像差。在评价方式上,都考虑到了畸变、色差以及温度等因素的影响,但大多采用能量集中度、光学传递函数等进行评价,对于质心位置精度的评价较少,尤其是在恒星色温及温度变化情况下对该精度的影响。文献[5, 13-14]定量分析了光学系统质心位置精度,考虑了温度或色温恒星的影响,但未同时实现无热化及色温不敏感的高精度设计。星敏感器光学系统焦距在 20~50 mm 范围内,最大不超过 95 mm,属于短焦距的光学系统。星相机属于长焦距、中等视场(FOV)及大相对孔径的光学系统,要达到亚秒级的精度,在无热化、色差控制等方面的难度急剧增加。

综上所述,目前国内针对长焦距大相对孔径星相机光学系统设计的研究较少。本文结合应用需求,采用新型双高斯向远摄型过渡的结构型式,研究分析了透射式光学系统的设计难点及评价方法;为解决色温恒星的质心位置一致性及其宽温度范围内光学系统测量参数的温度不敏感性之间的设计矛盾,采用常规玻璃组合校正色差及二级光谱,并将负折射率温度系数的冕牌玻璃作为负透镜进行热补偿,设计实现了一种精度达到亚秒级的星相机光学系统。

2 光学系统参数选择

星相机光学系统的核心指标包括弥散斑形状、能量集中度、质心漂移量等。星相机对恒星弥散斑的形状有特殊要求,需要实现高对称性;能量集中度是为了满足恒星探测信噪比和电子学系统细分精度的需求,一般要求弥散斑在 5 pixel \times 5 pixel 以内。质心漂移量是衡量光学系统测量精度的核心指标,对于一般精度的星敏感器,光学系统的质心漂移量在 10 μm 量级。对于 1'' 精度的星相机,光学系统需要实现亚微米级的质心位置精度要求。根据应用需求,星相机光学系统设计指标参数如表 1 所示。

表 1 光学系统设计指标

Table 1 Targets of optical system design

Parameters	Targets
Focal	200 mm \pm 2 mm
FOV	$\geq 7.5^\circ \times 7.5^\circ$
Entrance pupil diameter	≥ 100 mm
Waveband	500~800 nm
Energy concentration	$\geq 85\%$ in 3 pixel \times 3 pixel
Centroid excursion	$\leq 0.8''$
Distortion	$\leq 0.03\%$
Temperature	0 $^\circ\text{C}$ ~30 $^\circ\text{C}$

3 光学系统设计

3.1 精度评价方法

能量集中度、光学传递函数等只能作为星相机光学系统性能的定性分析手段。为评价光学系统设计达

到的精度,采用质心漂移量进行评价更为客观准确。质心漂移量定义为:在给定的像面采样尺寸范围内,光学弥散斑能量重心相对于基准位置的偏差值。单一色温及温度下的质心漂移量、畸变以及内方位元素可以通过高精度标定方法实现,恒星色温及温度变化引起的质心漂移量是星相机光学系统的主要误差来源,是导致星相机长周期低频误差的主要因素。对于本系统要求的0.8"精度要求,恒星色温及温度变化引起的质心漂移量评价方式及要求如下:

1) 色温质心漂移量:以等效黑体为2600、3100、4300、5000、5500、6000、6800、7600、9800 K的九种恒星辐射输入时,取500、530、560、590、620、650、680、710、740、770、800 nm等11种波长按下表权重进行加权后(见表2),选定5500 K恒星光为基准,在0、0.3、0.5、0.7、0.85、1等6种规一化视场下,其他恒星光所得弥散斑能量重心与由该基准恒星光所得弥散斑能量重心之间的偏差不得超过0.3 μm。

2) 温度质心漂移量:0℃~30℃温度范围内,取500、530、560、590、620、650、680、710、740、770、800 nm等11种波长按5500 K恒星基准光的权重进行加权(见表2),以20℃为基准,在0、0.3、0.5、0.7、0.85、1等6种规一化视场下,其他温度下对应视场所得弥散斑能量重心与由该基准温度下所得弥散斑能量重心之间的偏差不得超过0.5 μm。

表2 不同等效黑体温度恒星在不同波长上的加权值

Table 2 Weighted value of different wavelengths at different equivalent blackbody temperatures

Wavelength /nm	Temperature /K									
	9800	7600	6800	6000	5500	5000	4300	3600	3100	2600
800.00	10.58	13.67	15.73	18.82	21.23	24.59	28.30	32.59	37.21	43.48
770.00	25.25	32.20	36.78	43.61	48.83	56.04	63.46	71.37	79.60	90.00
740.00	30.76	38.51	43.54	50.95	56.46	63.98	70.77	77.00	83.06	89.65
710.00	38.26	46.95	52.50	60.55	66.33	74.12	79.92	83.84	87.21	89.46
680.00	47.47	56.97	62.94	71.46	77.31	85.08	89.22	90.00	90.00	87.39
650.00	53.77	62.98	68.66	76.61	81.76	88.48	90.00	86.96	83.30	76.18
620.00	59.82	68.19	73.24	80.14	84.23	89.48	87.98	81.05	74.02	63.36
590.00	55.54	61.59	65.16	69.92	72.36	75.43	71.69	62.94	54.79	43.87
560.00	61.17	65.97	68.74	72.32	73.70	75.40	69.25	57.96	48.11	36.06
530.00	82.18	85.67	87.62	90.00	90.00	90.00	79.32	62.66	49.10	34.00
500.00	46.27	44.69	43.85	42.69	40.94	38.91	31.27	21.71	14.97	8.67

3.2 结构选型

星相机光学系统属于高精度的测量系统。影响精度的因素很多,如光学系统的彗差、垂轴色差以及畸变等不对称像差,温度变化引起的参量变化等;甚至恒星目标的光谱特性变化也将引起光学系统的测量精度发生变化。光学系统需要在温度范围内保持测量参数的高稳定性,并且需要实现光谱探测的不敏感性,尽量降低不同色温的恒星对测量的影响,需要注重以下三方面的设计要素:

- 1) 不对称像差的精细控制,实现光斑形状高对称和不同视场的一致性;
- 2) 无热化设计,实现在温度变化情况下,光斑特性以及光学系统内方位元素不变;
- 3) 色差与二级光谱的精细控制,实现光斑特性不随恒星色温变化而改变。

所设计的为长焦距、大相对口径高精度星相机光学系统,焦距为200 mm,口径为Φ100 mm,相对口径为1:2。为了实现光学系统的设计,比较分析了多种光学系统结构型式。一般来说,采用对称的双高斯型光学结构有利于降低彗差、畸变以及垂轴色差等非对称像差,但是难以实现远心光路,同时光阑在光学系统的中间,不利于杂散光的抑制。为了实现远心光路,采用新型双高斯型向远摄型光学型式过渡的方式,对前半部系统进行复杂化,将光阑前移至第一片透镜。在实现大相对口径的前提下,可以缩小筒长、减小镜片直径,有利于减轻光学镜头重量。由于光学系统的焦距长,产生较大的二级光谱,不利于光学系统实现光斑特性不受恒星色温变化的影响。为了尽可能地降低二级光谱像差,常规方法主要是采用特殊光学玻璃如CaF₂、HFK₆作为正光焦度的透镜,但该类玻璃的温度特性较差,温度变化不仅导致与测量相关的光学系统内方位元素发生改变,并且成像质量与光斑位置均会发生变化,难以满足星相机在无调焦情况下实现无热化的精度需求,只能在常规玻璃中进行玻璃材料的温度匹配设计。因此,同时保证恒星光斑质心位置的色温一致

性及温度一致性是高精度长焦距星相机光学系统的主要设计难点。

最终选择的光学系统为复杂化双高斯向远摄型过渡的结构型式,能够较好地满足星相光学系统的高精度设计需求,光学系统结构如图1所示。

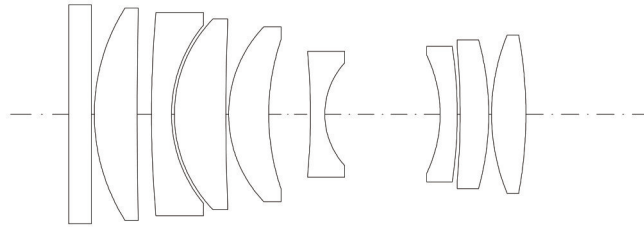


图1 光学系统结构图

Fig.1 Structure of optical system

3.3 无热化设计

星相机光学系统实现无热化设计至关重要。温度发生变化时,对于一般成像光学系统会引起像质下降,体现在光学传递函数的退化。对于星相机光学系统,还会引起与测量相关的参数如内方位元素的改变;光学系统的像差特性如彗差、色差等发生变化,会导致能量集中度、质心位置精度发生变化。地面进行所有工作温度范围内的精度标定难度及代价很大,应该由光学系统设计实现。

根据光机系统被动消热差的设计理论,在稳态均匀温度场下,薄透镜系统的位置热差、倍率色差均由光学材料、机械材料的热膨胀系数、折射率温度系数等决定。对于透射式光学系统,实现无热化的设计关键在于选择合理的光机材料进行匹配。

无热化设计时应同时满足以下条件:

$$\frac{1}{h_i} \sum_i h_i \phi_i = \phi, \tag{1}$$

$$\frac{1}{h_i^2} \sum_i h_i \frac{\partial \phi_i}{\partial T} = \frac{1}{h_i^2} \sum_i h_i p_i \phi_i = \frac{1}{h_i^2} \sum_i h_i \left(\alpha_i - \frac{1}{n-1} \frac{\partial n}{\partial T} \right) \phi_i = 0, \tag{2}$$

$$\frac{1}{h_i^2} \sum_i h_i \frac{\partial \phi_i}{\partial \lambda} = \frac{1}{h_i^2} \sum_i h_i \theta_i \phi_i = \frac{1}{h_i^2} \sum_i h_i \left(\frac{1}{n-1} \frac{\partial n}{\partial \lambda} \right) \phi_i = 0, \tag{3}$$

式中 h_i 为第一近轴光线在薄透镜的高度, ϕ 为光学系统总光焦距, ϕ_i 为薄透镜组的光焦距, p_i 为薄透镜的热差系数,也称温度焦移系数, α_i 为材料的热膨胀系数, $\frac{\partial n}{\partial T}$ 为材料的折射率温度系数, θ_i 为薄透镜的消色差系数, $\frac{\partial n}{\partial \lambda}$ 为材料的折射率波长系数。

通过上述方程,可进行多种光学材料的匹配设计。在兼顾光焦距合理分配、色差合理校正的基础上,选择合适的透镜材料进行热匹配。常见的冕牌、火石玻璃材料的热差系数分布统计如图2所示。特殊玻璃如 CaF_2 , HFK_{61} 等材料的消色差阿贝数较大,适合消除长焦距光学系统的色差;但它们的热差系数较大, HFK_{61} 达

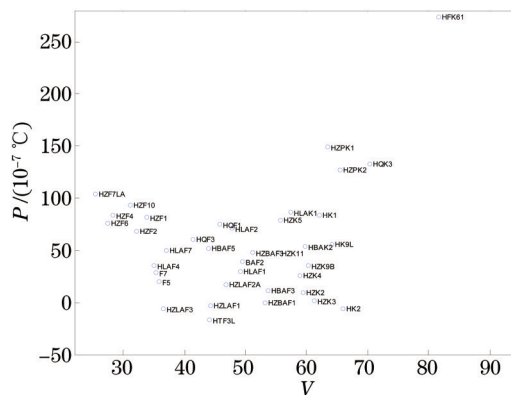


图2 透镜材料的热差系数分布图

Fig.2 Thermal differential coefficient distribution chart of lens materials

到 $272 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}$, CaF_2 达到 $524 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}$, 作为正透镜时非常不利于无热化设计。由于光学系统的总光焦度为正, 在选择消色差玻璃时, 负透镜尽量选择热膨胀系数大且折射率高的材料, 折射率温度系数应尽量小或为负值, 使得焦移系数的绝对值尽量大; 正透镜尽量选择热膨胀系数小、折射率温度系数小且折射率低的材料, 使得焦移系数尽量小。本设计突破常规设计理念, 采用了负折射率温度系数的冕牌玻璃 HFK_{61} 材料作为负透镜进行热补偿设计, 取得了比较好的无热化效果。

3.4 色差校正

星相机为能量探测系统, 无法进行光谱识别。不同色温恒星的光谱分布具有较大差异, 地面或在轨标定针对不同色温恒星的质心位置作高精度标定的难度较大。因此, 恒星色温改变引起的质心位置变化量必须控制在亚微米级, 对应的角度变化在亚秒级以内。

需要指出的是, 对于色差的校正, 主要是针对垂轴色差而言的, 因为垂轴色差会导致不同波长的主光线在像面的像度有差异, 导致不同色温恒星的质心位置在像面上发生漂移。在光学玻璃材料的 P - V 分布图上, 几乎所有的玻璃均位于一条倾斜线上, 称为正常玻璃线。只有 HFK_{61} 、 CaF_2 偏离较大, 作为正透镜容易校正色差及二级光谱。正如 3.3 节中指出的, 为兼顾高精度的无热化设计, 特殊玻璃作为正透镜校正色差及二级光谱的方法只能舍弃。因此, 只能在常规玻璃中进行组合选择, 进行色差的校正。

如果不采用 HFK_{61} 或 CaF_2 特殊玻璃校正色差及二级光谱, 可行的设计方法是采用三种及以上玻璃组合进行校正。在 P - V 图上选择三种玻璃, 使得其中两种玻璃位于正常玻璃线的右上方, 与位于正常玻璃线左下方的另一种玻璃组合。使得右上方的两种玻璃 $A(P_1, V_1)$ 和 $C(P_3, V_3)$ 组合成假想玻璃 $\bar{B}(\bar{P}, \bar{V})$, 再与左下方的玻璃 $B(P_2, V_2)$ 进行组合, 令 $\bar{P} = P_2$, 则可以在尽可能地降低单元透镜的光焦度的基础上, 较好地消除色差及二级光谱。玻璃选择方法如图 3 所示。

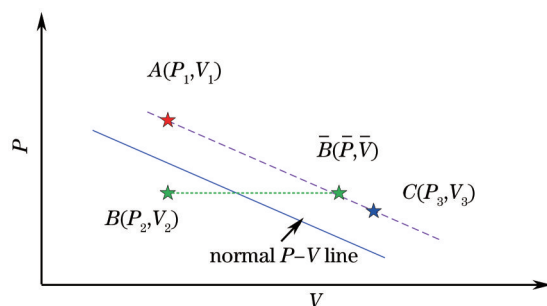


图 3 三种玻璃组合校正色差及二级光谱方法

Fig.3 Method of correcting color aberration and secondary spectrum using three glass materials

组合的假想玻璃 \bar{P} , \bar{v} 有如下关系:

$$\bar{P} = \frac{v_3 P_1 - v_1 P_3}{v_3 - v_1} + \bar{v} \left(\frac{P_3 - P_1}{v_3 - v_1} \right), \quad (4)$$

令 $\bar{P} = P_2$, 则可求出 \bar{v} 。

在归一化条件下, 令 $\varphi = 1$, $h = 1$ 。采用三种玻璃进行消色差及二级光谱的公式为:

$$\begin{cases} \bar{\varphi} + \varphi_2 = 1 \\ \frac{\bar{\varphi}}{\bar{v}} + \frac{\varphi_2}{v_2} = 0 \\ \frac{\bar{\varphi}}{\bar{v}} \bar{P} + \frac{\varphi_2}{v_2} P_2 = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

通过(5)式求出 \bar{v} 和 φ_2 , $\bar{\varphi}$ 是 $A(P_1, V_1)$ 和 $C(P_3, V_3)$ 两个单元透镜的组合光焦度, 即:

$$\bar{\varphi} = \varphi_1 + \varphi_2, \quad (6)$$

两个单元透镜的光焦度分配由下式确定:

$$\frac{\bar{\varphi}}{\bar{v}} = \frac{\varphi_1}{v_1} + \frac{\varphi_3}{v_3}, \quad (7)$$

则:

$$\begin{cases} \frac{\varphi_1}{\bar{\varphi}} = \left(\frac{1}{\bar{v}} - \frac{1}{v_3} \right) / \left(\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_3} \right) \\ \frac{\varphi_3}{\bar{\varphi}} = \left(\frac{1}{\bar{v}} - \frac{1}{v_1} \right) / \left(\frac{1}{v_3} - \frac{1}{v_1} \right) \end{cases}, \quad (8)$$

由此确定 φ_1 和 φ_3 , 并确定 φ_2 。

4 设计结果及精度评价

4.1 设计结果

采用双高斯型光学系统作为初始结构进行复杂化设计,光阑前移向远摄型过渡。在对称结构失调时,控制非对称像差如彗差、畸变等,通过多种常规玻璃组合实现垂轴色差及二级光谱的抑制。设计过程中考虑了非球面,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。最终实现全球面设计,有利于工程实现。光学系统除窗口外,共8片透镜,采用 BaF_1 、 LaF_1 与 LaF_2 组合实现三种玻璃组合校正色差及二级光谱,最后一片正透镜采用冕牌玻璃 HFK61 玻璃实现热补偿。设计结果如表3所示,均达到预期要求。

表3 光学系统设计结果

Table 3 Results of optical system design

Parameters	Results
Focal	199.9778 mm
FOV	7.5°×7.5°
Entrance pupil diameter	Φ100 mm
Waveband	500~800 nm
Energy concentration	≥90% in 3 pixel×3 pixel
Centroid excursion	≤0.6"
Distortion	≤0.003%
Temperature	0 °C~30 °C

光学系统的像散及畸变曲线设计如图4所示,各视场畸变均不超过0.003%,即使在不校正畸变的情况下,畸变引起的主光线与理想高斯位置的偏差不大于0.5",这为后期的标定提供了较好的条件。

光学系统的倍率色差如图5所示,各视场倍率色差统计如表4所示。在500~800 nm 范围内,倍率色差不超过1.5 μm,得到了比较完善的校正,为实现恒星色温质心位置的一致性奠定了基础。

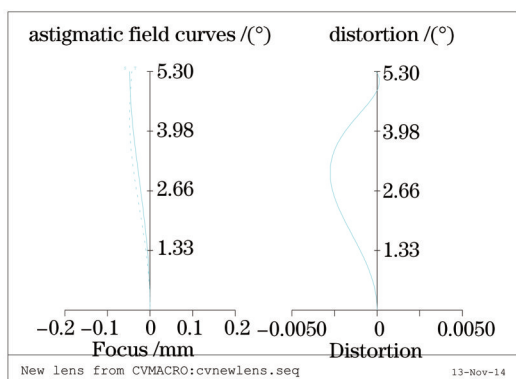


图4 光学系统像散及畸变设计曲线

Fig.4 Astigmatism and distortion curves of optical system

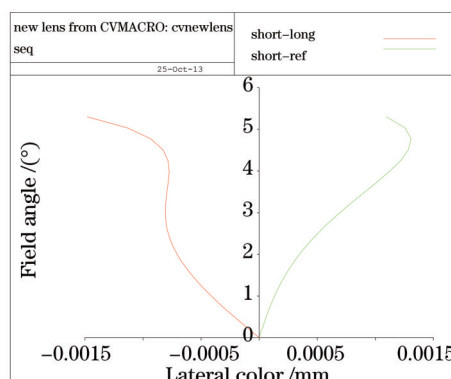


图5 垂轴色差设计曲线

Fig.5 Design curves of lateral chromatic aberration

各视场的弥散斑分布如图6所示,轴上轴外成像均匀,弥散斑接近于圆形,有利于实现高精度质心细分。能量集中度曲线如图7所示,满足3 pixel×3 pixel内弥散斑能量高于85%的成像质量要求。

表4 垂轴色差统计

Table 4 Statistics of lateral chromatic aberration

Field	Lateral color / μm	
	Short wave-reference wave	Short wave-long wave
0.3	0.024	-0.061
0.5	0.557	-0.796
0.7	1.004	-0.783
0.85	1.285	-0.828
1	1.094	-1.482

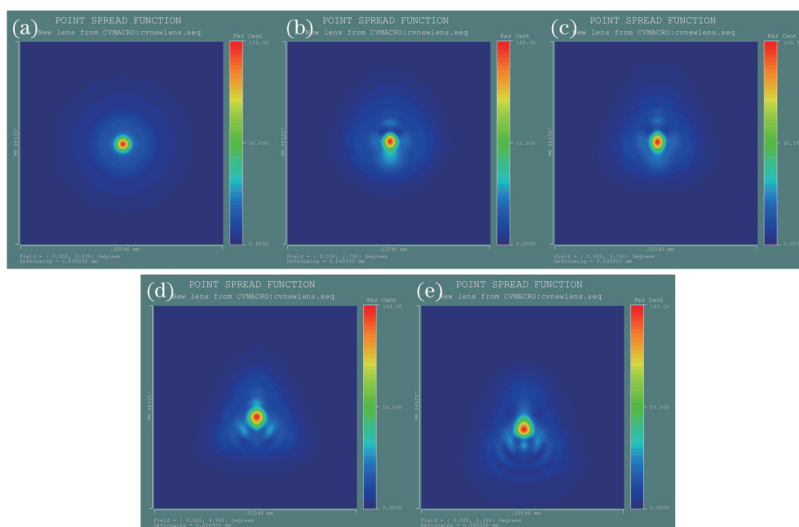


图6 衍射点斑图。(a) 0° ; (b) 0.5° ; (c) 0.7° ; (d) 0.9° ; (e) 1.0°

Fig.6 Spot diagrams of diffraction. (a) 0° ; (b) 0.5° ; (c) 0.7° ; (d) 0.9° ; (e) 1.0°

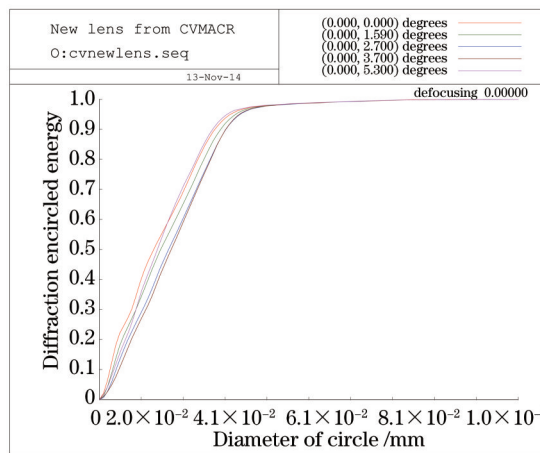


图7 能量集中度曲线

Fig.7 Encircled energy curves

4.2 精度评价结果

4.2.1 色温质心漂移量

以 5500 K 的色温恒星为基准,计算 2600 K~9800 K 色温恒星的质心位置相对于基准恒星的质心变化值统计如表 5 所示。视场分布如图 8 所示,除 1 视场外,恒星色温变化引起的质心漂移量均小于 $0.2 \mu\text{m}$,导致的角度变化不超过 $0.2''$ 。

4.2.2 温度质心漂移量

在 0°C ~ 30°C 温度范围内焦距值统计如表 6 所示,焦距相对变化如表 7 所示,分布如图 9 所示。在 0°C ~ 30°C 范围内的焦距变化值不超过 $5.1 \mu\text{m}$,变化率小于 0.0026% 。

表 5 恒星色温改变质心变化相对值

Table 5 Relative value of centroid drifting under change of star temperature

Relative field	0	0.3	0.5	0.7	0.9	1.0
2600 K	0	-0.0560	-0.0620	0.1470	0.1190	0.1090
3100 K	0	-0.0590	-0.0680	0.0020	-0.1990	-0.2810
3600 K	0	-0.0480	-0.0590	-0.0610	0.0610	0.3070
4300 K	0	-0.0280	-0.0370	0.0340	0.0330	0.1500
5000 K	0	-0.0120	-0.0160	-0.0140	0.0110	0.0520
5500 K	0	0	0	0	0	0
6000 K	0	0.0050	0.0080	0.0090	-0.0080	-0.0230
6800 K	0	0.0150	0.0210	0.0240	-0.0170	-0.0590
7600 K	0	0.0180	0.0280	0.0320	-0.0230	-0.0780
9800 K	0	0.0250	0.0450	0.0550	-0.0290	-0.1140

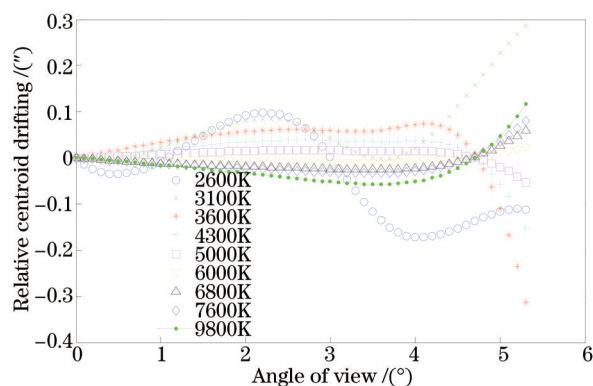


图 8 恒星色温改变引起质心位置的角度变化量

Fig.8 Relative change of angles about centroid drifting caused by star temperature

表 6 不同温度下系统焦距值

Table 6 Focal lengths under different temperatures

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	0	3	6	9	12	15	18	20	24	27	30
Focal length /mm	199.9729	199.9744	199.9778	199.9762	199.9796	199.9778	199.9747	199.9780	199.9782	199.9806	199.9818

表 7 不同温度下相对 20 $^{\circ}\text{C}$ 系统焦距的变化值

Table 7 Changes of focal length relative to 20 $^{\circ}\text{C}$ under different temperatures

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	0	3	6	9	12	15	18	20	24	27	30
Difference / μm	-5.1	-3.6	-0.2	-1.8	1.6	-0.2	-3.3	0	0.2	2.6	3.8

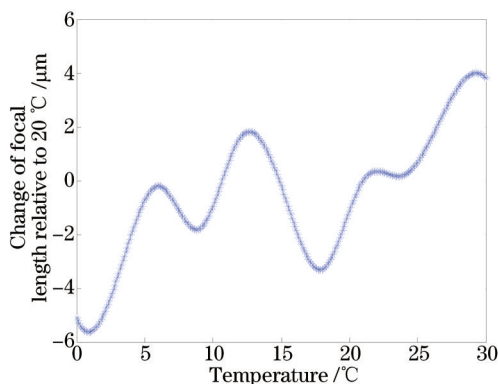


图 9 不同温度下焦距相对变化曲线

Fig.9 Relative changes of focal length under different temperatures

在不同温度下,系统焦距以及焦面像质的变化都会导致质心位置发生改变。实际使用时测出当前温度以及质心位置变化量的代价较大,以 20 $^{\circ}\text{C}$ 下的质心位置为基准,评价温度变化后质心位置相对于基准位置

的变化,以此评估星相机光学系统无热化的能力。不同温度下相对于 20 °C 的质心漂移量统计如表 8 所示,分布如图 10 所示,除 1 视场外,最大线量不超过 0.4 μm,对应角度变化不超过 0.4”。

表 8 不同温度下各视场相对于 20 °C 的质心漂移量统计

Table 8 Statistics of centroid drifting value under different temperatures relative to 20 °C

Temperature /°C	Relative field /μm					
	0	0.3	0.5	0.7	0.85	1
0	0	0.2502	0.3496	-0.1423	0.1937	1.0680
5	0	0.1226	-0.0968	-0.3523	-0.2484	-0.2322
10	0	-0.0514	-0.1249	-0.2196	-0.2021	-0.2809
15	0	0.0264	0.0003	0.2620	-0.0300	-0.0017
20	0	0	0	0	0	0
25	0	0.0813	0.1011	-0.0028	0.2063	0.0771
30	0	0.1415	0.2165	-0.3330	0.2924	0.7226

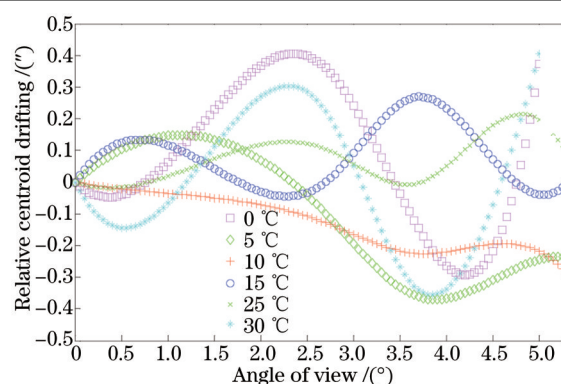


图 10 不同温度下相对 20 °C 质心位置的漂移量

Fig.10 Centroid drifting value under different temperatures relative to 20 °C

5 结 论

结合星相机探测目标光谱特性及使用环境温度的应用要求,分析了亚秒级长焦机星相机光学系统的主要设计难点。单一色温恒星或特定工作温度下的质心位置可以通过高精度标定方法实现,恒星色温及工作温度改变是引起精度漂移的主要因素,并且难以校正。研究并设计了一种新型复杂双高斯型向远摄型过渡的光学系统结构型式,结合光机被动无热化设计思想及三种以上玻璃组合校正色差的方法,设计了精度达到亚秒级的长焦距星相机光学系统,焦距为 200 mm,相对孔径为 $F/2$,视场角为 $7.5^\circ \times 7.5^\circ$,谱段为 500~800 nm,光学系统畸变优于 0.003%,垂轴色差优于 1.5 μm,同时实现色温一致性和无热化一致性的亚秒级精度要求。在不采用特殊色散玻璃材料作为正透镜的情况下校正了系统色差,在 2600 K~9800 K 范围内,恒星色温改变引起的质心漂移量优于 0.2”。研究了常用光学玻璃的热差分布曲线,提出并采用负折射率温度系数的冕牌玻璃作为负透镜补进行热补偿,实现了在 0 °C~30 °C 温度范围内,光学系统焦距变化不超过 5.1 μm,除 1 视场外质心位置精度均优于 0.4”。

参 考 文 献

- 1 Dan Michaels, James Speed. New Ball Aerospace star tracker achieves high tracking accuracy for a moving star field[C]. SPIE, 2004, 5430: 43-52.
- 2 Wu Feng, ShenWeimin. Design of catadioptric system for star sensors with wide field of view[J]. Optical Technique, 2004, 30(2): 142-145.
吴 峰, 沈为民. 折反式大视场星敏传感器光学系统设计[J]. 光学技术, 2004, 30(2): 142-145.
- 3 Wu Feng, ShenWeimin. Design of a light and compact optical system for star sensors[J]. Acta Photonic Sinica, 2004, 33(11): 1336-1338.
吴 峰, 沈为民. 轻小型星敏传感器光学系统的设计[J]. 光子技术, 2004, 33(11): 1336-1338.

- 4 Wang Hu, Miao Xinghua, Wen Desheng, *et al.*. Optical system design of star sensor with wide-view field and small F-number[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2005, 34(12): 1822-1824.
王 虎, 苗兴华, 汶德胜, 等. 宽视场大相对孔径星敏传感器光学系统设计[J]. *光子技术*, 2005, 34(12): 1822-1824.
- 5 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 的星敏传感器光学系统结构与优化[J]. 2007, 34(11): 24-30.
- 6 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.
杨皓明, 王灵杰, 翁志成, 等. 大孔径大视场轻小型星敏传感器光学系统[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(2): 151-154.
- 7 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): 2458-2464.
闫佩佩, 樊学武, 何建伟. 折/衍混合大相对孔径星敏传感器光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(12): 2458-2464.
- 8 Fan Qiaoyun, Li Xiaojuan. Selection of optical-system parameters for an all-day used star sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1122001.
樊巧云, 李小娟. 全天时星敏传感器光学系统设计参数选择[J]. *光学学报*, 2011, 31(11): 1122001.
- 9 Yan Peipei, Fan Xuewu. Design of optical system of very high precision star sensor with small F-Number[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(2): 092202.
闫佩佩, 樊学武. 大相对孔径甚高精度星敏传感器光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(2): 092202.
- 10 Liu Jian, HaoYunca, Chang Jun, *et al.*. Athermalization of star tracker system[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2010, 30(2): 223-225.
刘 健, 郝云彩, 常 军, 等. 无热化星敏传感器光学系统设计[J]. *北京理工大学学报*, 2010, 30(2): 223-225.
- 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.
巩 盾, 田铁印, 王 红. 含有非球面的宽波段大相对孔径星敏传感器光学系统设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0822001.
- 12 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. 星敏传感器光学系统的研制与性能测试[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0522005.
- 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.
刘海波, 谭吉春, 郝云彩, 等. 环境温度对星敏传感器测量精度的影响[J]. *光电工程*, 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.
刘海波, 谭吉春, 沈本剑, 等. 色温对星敏传感器恒星定位精度的影响[J]. *光电工程*, 2009, 36(11): 35-42.

栏目编辑: 韩 峰