折反式大口径、大视场、宽光谱光学系统

明 名，杨 飞，赵金宇，张丽敏，吴小霞

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033)

摘 要：在地面的目标探测光学系统多采用大口径(>500 mm)同轴光学系统的前提下，系统探测的大视场和宽光谱就成了亟待解决的问题。设计了附带小口径球面透射校正镜组的折反式光学系统，利用该校正镜组校正了系统由于大相对口径、大视场和宽光谱带来的像差，使系统达到了预定的指标要求。其中只有主反射镜面形为二次非球面，设计参数也易于加工。在相应的实例要求下，用 ZEMAX 光学设计软件进行了优化评价，并给出了该系统的对星观测结果。该光学系统设计的口径为 Φ750 mm，相对孔径为 1:1.32，视场为 4°，光谱范围为 500~800 nm，系统实际探测能力在 15 Mv 以上。该系统结构简单，均采用普通玻璃材料，成本低，成像质量良好。

关键词：光学设计； 大视场； 校正镜； ZEMAX

中图分类号：TH743 **文献标志码**：A **文章编号**：1007-2276(2012)01-0149-06

Catadioptric optical system with large aperture, wide field of view and broad waveband

Ming Ming, Yang Fei, Zhao Jinyu, Zhang Limin, Wu Xiaoxia

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033 ,China)

Abstract: In the optical system, the apertures of most of target detecting systems on the ground are large (>500 mm) which are the on-axis optical systems, and the wide field of view and broad waveband become the most urgent problem to be solved. The catadioptric optical system with small aperture refractive corrector group was designed, which eliminated those aberrations brought by large relative aperture, wide field of view and broad waveband. The primary mirror was aspheric surface and easy to be fabricated. An example which optimized and evaluated with optical design software ZAMAX, and the practical result of observation for star were given finally. The aperture of this practical system was Φ750 mm, whose relative aperture was 1:1.32, the field of view was 4° and the waveband was from 500 nm to 800 nm, the practical capacity of detecting was above 15 Mv. The simple construction consists of several kinds of regular glass, and the imaging quality is very excellent.

Key words: optical design; wide field of view; corrector lens; ZEMAX

收稿日期：2011-05-10； **修订日期**：2011-06-23

基金项目：国家 863 计划(2009AA8080202)

作者简介：明名(1983-)，男，助理研究员，硕士，主要从事大口径光学系统的设计、检测与装调等方面的研究。

Email:mingm1118@yahoo.com.cn

0 引 言

目前,口径超过 500 mm 的天文设备几乎全部采用反射式光学系统。一方面,这样大口径的高质量透射材料难以制作和加工;另一方面,天文仪器使用的波段范围也较宽,普通的玻璃材料难以满足透过率要求,对色差的校正也很困难。

同轴反射式光学系统中,卡塞格林系统及其改进形式 RC 系统的应用最为广泛。卡塞格林系统由抛物面和双曲面组成,由于无法消除彗差,视场无法做大。其改进形式 RC 系统的主、次镜均为双曲面,虽然可以消除一定的初级彗差,但大视场带来的像散无法消除。

为了增大视场,并保证大视场下整个系统的成像质量,广泛采用在反射式系统中加入折射元件的方法来校正反射系统引起的像差。加入的折射元件主要是各种校正板和透镜组,根据折射元件添加的位置,大致可以分为两类:

一类系统是在主反射镜前加校正元件,如施密特校正板、马克苏托夫弯月镜等。由于校正元件位于主镜前面,其口径与主镜相当。而大口径的折射材料难以得到,因此,这类系统口径无法做得太大。

另一类系统是在主、次反射镜之后,即在第一像面之前不远处添加折射或反射元件[1],以校正主反射系统的像差。这些折射或反射元件通常处在会聚光路中,其尺寸比系统口径小得多。因此,这类系统的口径可以做得很大。这类系统主要应用在大型天文仪器和测量飞行载体弹道的靶场光学设备中[2]。

文中以 Φ750 mm 目标探测光学系统为例,提出了一种新的主焦点光学系统结构形式,来实现大口径光学系统的大相对孔径、大视场和宽光谱。首先介绍了该系统要求的技术指标,并根据技术指标设计了主焦点光学系统,得出其相应的结构参数。然后对该主焦点系统的性能进行了分析,最后与该光学系统在实际应用中的成像结果进行了比较,证明设计结果与实际结果的成像质量是吻合的。

1 设计原理与指标要求

1.1 设计原理

位于地面的目标探测望远镜光学系统的主要探测目标来自空间各个轨道,其星等目标要求决定了望远镜系统的成像质量特点:像面的弥散斑小、能量集中度高、传递函数高。这样的性能要求决定了光学系统的孔径和视场:孔径越大,进入目标探测系统的能量就越多,能探测到的星等就越高;视场越大,系统所能探测到的范围就越大;光谱范围越宽,系统的探测功能就越好。

在视场和探测接收器尺寸一定的情况下,系统的焦距随之确定,即大视场和一定的像面尺寸决定了系统的短焦距以及大相对孔径[3]。

因此,文中的目标探测光学系统具有大相对孔径、大视场和宽光谱的特点。同时,这也是该系统设计的难点,因为大相对孔径、大视场和宽光谱分别带来难以消除的球差、彗差、像散和色差[4]。

对于这样的大口径光学系统,常规的设计思想是利用 RC 系统作为主光学系统来承担系统的光焦度,并消除初级球差和一部分彗差,然后在次镜与焦面之前设置校正镜组来消除剩余的彗差和像散。但是考虑到短焦距 RC 系统的次镜对主镜的遮拦较大,而且次镜自身为二次曲面的凸面,达到一定口径时,其加工和检测在国内现有水平下都很困难。因此,文中放弃了这种常规方案,只选用主反射镜来承担系统的大部分光焦度,在主焦点和主反射镜之间设置透射校正镜组,利用元件的各个参数来消除以上的像差,优化了系统结构,使系统加工、检测和装调都变得简单,同时得到了很好的成像结果。

1.2 指标要求

综合考虑到目标探测光学系统的性能,通光口径根据项目需求已经确定,即 D=750 mm,该系统要求其探测星等在 15 Mv 以上(含 15 Mv)。

所选用的 CCD 参数如下:分辨率为 2 048×2 048;像元尺寸为 24 μm。

利用选定的探测器参数和系统探测能力,根据点光源信噪比与探测能力的方程:

$$SNR=\frac{\varepsilon W_\lambda \sqrt{A_\mathrm{d}}}{4F^2\sqrt{\Delta f_\lambda}}\tau_a(\lambda)\tau_o(\lambda)D^*(\lambda)\Delta\lambda \tag{1}$$

式中:F 为相对孔径的倒数;Δf_λ=1/2 t_{int},t_{int} 为探测器积分时间;W_λ 为目标光谱辐射通量密度;ε 为目标的发射率;A_d 为探测器面积;$\tau_\mathrm{a}(\lambda)$为大气透过率;$\tau_\mathrm{o}(\lambda)$为光学系统透过率;$D^*(\lambda)$为探测器的光谱比探测

率；$\Delta\lambda$ 为光谱宽度。由上式就能得到系统的相对孔径应大于 1:1.33。

表 1 是该系统光学结构参数设计的指标要求。

表 1 系统光学参数要求

Tab.1 Requirement for optical parameters

Optical parameter	Requirement
Clear aperture	D=750 mm
Relative aperture	>1:1.33
Field of view	FOV>3°
Obscuration	<15 %
Wavelength range	500~800 nm

根据上面的要求和探测器的尺寸参数，该光学系统要求在全视场内，成像在 CCD 上的弥散斑尽量为圆形，且其成像弥散斑应位于 2×2 pixel 之内，RMS 弥散斑直径小于 48 μm，系统 80 %的能量集中在半径为 24 μm 的圆内，系统在 CCD 探测器Nyquist 采样频率处的 MTF 值大于 0.4，全视场内系统的成像畸变小于 1 %。

2 设计与分析

2.1 光学参数的确定

根据系统选用的探测器尺寸参数，可以得出该目标探测光学系统的靶面大小为：

$$D_{image}=24\ \mu m\times 2\ 048\times\sqrt{2}=69.51\ mm \tag{2}$$

而系统焦距可由以下公式[4-5]求得：

$$f=D_{image}/\tan(FOV) \tag{3}$$

根据第 1 节中的技术指标要求，如果选择视场为 3°，那么根据公式(2)可以得到焦距 f=1 326.33 mm，系统的相对孔径 D/f=0.57<1:1.33，这样不符合系统的要求。因此，为了满足相对孔径的要求，系统焦距必须满足：

$$f\leqslant\frac{D_{sys}}{1/1.33}=1\ 000\ mm \tag{4}$$

对于光学系统，焦距越短，系统的相对孔径越大，优点是进入系统的能量更多，但由于初级球差与相对孔径的平方成正比，其缺点是球差急剧增大；视场越大，系统探测范围越广，但是彗差、像散、畸变和倍率色差都随视场增大急剧增加，因此，如何消除这些轴外像差是关键[5-6]。对探测器尺寸一定的光学系统，焦距和视场成反比。为了平衡像差，经过计算后，选取系统焦距 f=990 mm，根据公式(2)可以计算得到视场角 FOV=±2°。

2.2 结构尺寸的设计

在该光学系统中，根据系统焦距，初步得到主反射镜的曲率半径为 1980 mm。为了消除系统大视场带来的彗差和像散，以及宽光谱带来的色差，经过计算与分析，该系统采用了透射校正镜组，由 3 片透镜组成。

校正镜组位于主反射镜与主焦点之间，其结构如图 1 所示。

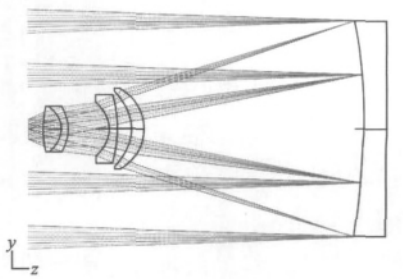

图 1 主焦点光学系统的结构形式

Fig.1 Structural style of prime focus optical system

从表 2 的参数可以看出，优化设计后的主镜为抛物面，焦比约为 f/1.51。

表 2 主反射镜结构参数

Tab.2 Parameters of primary mirror

Primary mirror	Parameter
Element number	M1
Surface type	Paraboloid
Radius/ mm	2 270.67
Clear aperture/ mm	750

根据系统遮拦要求，得到校正镜组镜筒(结构参数见表 3)的最大直径需要满足下式要求：

$$D_{max}\leqslant D_{sys}\times\sqrt{0.15}=290\ mm \tag{5}$$

表 3 校正镜组结构参数

Tab.3 Parameters of corrector group

Parameter	Corrector group		
Element number	L1	L2	L3
Surface type	Spheric	Spheric	Spheric
Clear aperture/ mm	270	234	154
Whole aperture/ mm	280	240	158
Edge thickness/ mm	15	58	43.10
Radius of front surface/ mm	158.29	400.40	143.16
Radius of back surface/ mm	177.93	118.67	94.03 429.76

由表 3 可知，系统由主反射镜和透射校正镜组构成，其中主反射镜面形为抛物面，校正镜组由两片单透镜和一片双胶合透镜组成，各个表面面形都是球面。这样，系统中只有主反射镜为非球面，且其面形为抛物面，既可以用补偿器法进行检测，又可以用相应口径的标准平面镜对其面形误差进行检测。各个透射校正镜面形均为球面，在国内现有的加工与检测技术条件下都是很容易实现的。这样的结构组成，不但使系统变得更简单，同时也使得加工和检测成本大大降低。

2.3 大视场渐晕分析

在这种大视场结构的光学系统中，由于校正镜组的存在，使得该系统对轴上点目标和轴外点目标的相对孔径不同，各个视场都会出现不同程度的拦光，即渐晕。

渐晕导致各个视场最后进入探测器的能量不同，严重时可能对系统最终的探测能力产生一定影响。

计算渐晕时，各校正镜组的遮拦应以校正镜组镜筒整体外径为准，即校正镜组中最大一片透镜的全口径加上机械固定件厚度，经实际测量为 292.25 mm。此时，实际的中心遮拦已经大于系统的设计要求(290 mm)，经过计算后，得到系统的遮拦比为 15.21%，表明遮拦比的增加很小，几乎不影响光能的利用率，也不对要求的空间频率的 MTF 产生有害影响。

表 4 给出了该光学系统在不同视场时由渐晕导致不同的实际相对孔径值和在探测器像面的相对照度值。从表中的数据比较可以发现，最大渐晕导致的能量与轴上点能量相差 0.037 倍，对目标星等来说，仅相差 0.04 个星等。因此，由校正镜组引起的渐晕对系统的探测能力几乎没有影响。

表 4 渐晕相关参数

Tab.4 Vignetting parameters

Half field of view/(°)	Relative aperture	Relative illumination
0	1:1.320	1
0.5	1:1.322	0.997
1	1:1.326	0.991
1.6	1:1.335	0.978
2	1:1.344	0.964

2.4 光学成像性能分析

位于地面的目标探测系统主要探测空间轨道的点目标。根据该系统的功能要求，通过体现点目标成像特性的几个光学指标来评价所设计的大口径、大视场和宽光谱光学系统的成像质量，分别是点列图、能量集中度、调制传递函数。

图 2 是该目标探测光学系统的点列图，它体现了系统对点目标所成像的弥散斑大小。该系统全视场内的 RMS 弥散斑半径小于 16 μm，直径明显小于两个像元尺寸。

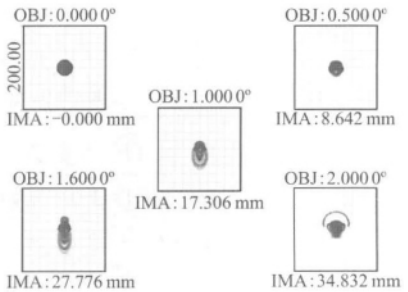

图 2 系统成像点列图

Fig.2 Spot diagram of system imaging

图 3 是该目标探测光学系统的能量集中度曲线，它体现了系统对点目标所成像的能量分布情况。该光学系统要求其能量越集中越好，全视场内 80% 的能量集中度半径小于 16 μm，直径明显小于两个像元尺寸。图 4 是该目标探测光学系统的调制传递函数曲线，它体现了系统对空间目标成像的分辨能力。该光学系统在所使用探测器的 Nyquist 频率处的 MTF 值为 0.51。

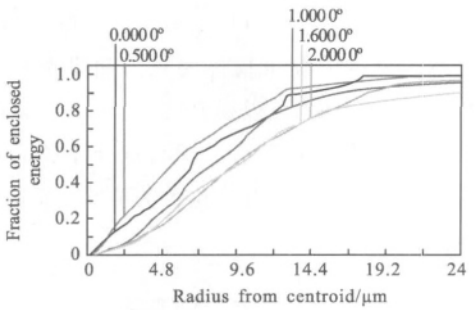

图 3 系统成像的能量集中度曲线

Fig.3 Encircled energy curves of system imaging

图 5 是该目标探测光学系统的百分比畸变曲线，它既不影响成像的清晰度，也不降低系统的探测能力，只是使成像的大小和形状发生一些变化。该光学系统边缘视场的百分比畸变值最大，为 0.71%，满足设计指标小于 1%的要求。

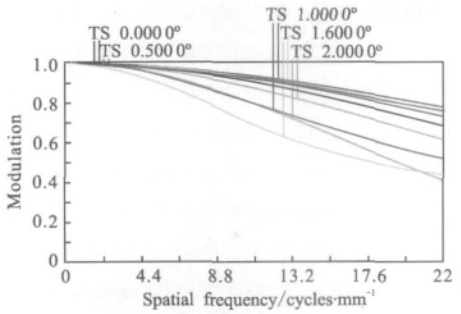

图 4 系统成像的 MTF 曲线

Fig.4 MTF curves of system imaging

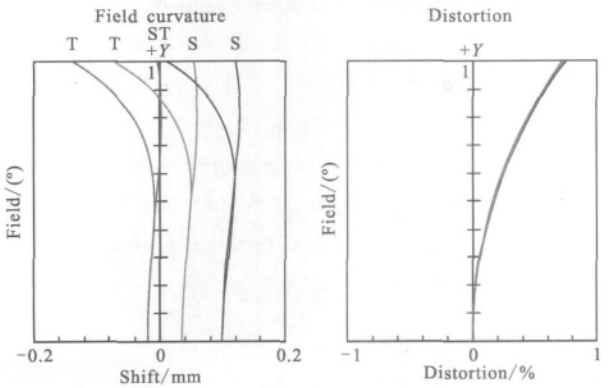

图 5 系统成像的百分比畸变曲线

Fig.5 Percent distortion curves of system imaging

这些性能分析表明，该光学系统的设计结果均满足目标探测望远镜最初设定的技术要求，在通光口径为 Φ750 mm，相对孔径为 1:1.32，视场为 4°，光谱范围为 500~800 nm 时具有很好的成像质量。

3 观测实验

为了验证该光学系统设计的成功性，文中用已经调试完毕的该目标探测望远镜进行了对星观测。

图 6 是中心视场(0°)处，星等为分别为 17.32 Mv、16.02 Mv、16.17 Mv、16.57 Mv 的目标通过光学系统后在探测器上成像的截图，像斑尺寸和能量集中度均在 2×2 个像元内。

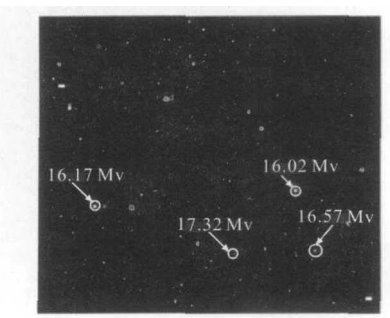

图 6 中心视场的目标所成的像

Fig.6 Image of target around center field

图 7 是边缘视场(+2°)处，星等分别为 16.07 Mv 和 15.76 Mv 的目标通过光学系统后在探测器上成像的截图，像斑尺寸和能量集中度均在 2×2 个像元内。

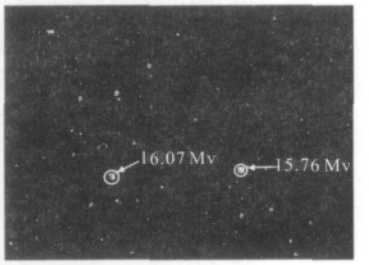

图 7 边缘视场的目标所成的像

Fig.7 Image of target on the edge of full field

从该系统实际成像的情况可以看出，其光学系统的设计是成功的，它使得系统在全视场范围内探测能力均高于 15 Mv，成像的像斑尺寸均在 2×2 个像元内。因此，根据实际对星观测成像的结果可以得到该光学系统的特点：

(1) 主反射镜的非球面系数能够消除系统的大部分球差，解决了大相对孔径的问题；

(2) 选择合适的玻璃材料制作各球面校正镜能够消除宽光谱带来的色差，解决了宽光谱的问题；

(3) 各球面镜的曲率半径和非球面系数能够消除残余的球差和大视场带来的彗差和像散，解决了大视场的问题；

(4) 系统校正镜组焦距不长，二级光谱不大。虽然存在部分场曲、畸变，但对点目标成像，可以通过预先的图像修正来处理，因此，它们对成像质量影响都很小。

4 结　论

大口径同轴光学系统一直以来都无法同时满足大相对孔径、大视场和宽光谱的要求。文中以地基的 Φ750 mm 目标探测光学系统为例，采用小口径球面透镜组作为主反射镜焦面前的校正镜组，将光学系统设计成主焦点的形式，同时实现了该光学系统的大相对孔径、大视场与宽光谱。它在不增大系统遮拦比的情况下，均匀校正和平衡各种像差，使系统最后的成像质量良好。该系统的主反射镜面形为抛物面，

透射校正镜面形全部都为球面，加工和检测要求在国内现有水平下都很容易实现，并且大大降低了系统成本。目前，该望远镜已经装调完毕，文中给出了其对星观测的成像结果，实际探测星等高于 15 Mv，完全满足指标，证明光学系统的设计是成功的。这种级别的口径，又同时满足大相对孔径、大视场和宽光谱的系统设计在国内尚属首次。文中的设计适用于口径在 Φ500 mm 与 Φ1 200 mm 之间的目标探测光学系统。

参考文献：

[1] Song Yanfeng, Shao Xiaopeng, Xu Jun, et al. Off-axis three-mirror reflective optical system [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2008, 37(4): 706-709. (in Chinese)
宋岩峰, 邵晓鹏, 徐军, 等. 离轴三反射镜光学系统研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(4): 706-709.

[2] Li Huan, Xiang Yang. Optical design of off-axis three-mirror telescope systems of imaging spectrometers [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2008, 38(3): 500-504. (in Chinese)
李欢, 向阳. 成像光谱仪离轴三反望远系统的光学设计[J]. 红外与激光工程, 2008, 38(3): 500-504.

[3] Tian Tieyin, Wang Hong, Gu Feng′an. Optical system design of three-line array stereoscopic mapping camera [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2009, 17(11): 2692-2698. (in Chinese)
田铁印, 王红, 谷凤安, 等. 三线阵立体测绘相机光学系统设计[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(11): 2692-2698.

[4] Gong Guangbiao, Ji Yiqun, Zhu Shanbing, et al. Design of a fore-optical objective with large relative aperture for spectral imagers [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2009, 38(5): 889-892. (in Chinese)
宫广彪, 季轶群, 朱善兵, 等. 一种大相对孔径成像光谱仪前置物镜设计[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(5): 889-892.

[5] Timothy P Grayson. Curved focal plane wide field of view telescope design [C]//SPIE, 2002, 4849: 269-274.

[6] Bely P Y. The Design and Construction of Large Optical Telescopes[M]. New York: Springer, 2003.

下期预览

提高波前探测精度的高阶矩方法

夏爱利[1,2]，马彩文[1]

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所，陕西 西安 710119；2. 中国科学院研究生院，北京 100049)

摘　要：夏克-哈特曼波前传感器测量畸变波前的探测精度主要取决于光斑质心的测量精度。提出了一种提高光斑质心探测精度的新方法，在优化的探测窗口内使用高阶矩方法计算光斑的质心。首先，在整个子孔径内，通过一阶矩方法获得光斑的近似中心，然后以这个近似中心为中心，包含整个光斑，建立一个矩形窗口，并在该窗口内通过高阶矩方法重新计算光斑的质心。通过该方法，在优化的探测窗口外，噪声的影响基本被消除；在优化的探测窗口内，噪声的影响也因为光斑权值比重的增大而削弱。实验结果证明：与传统方法相比，新方法提高了光斑质心测量的精度、重复性和稳定性。