

文章编号 1004-924X(2008)02-0215-06

# 弯月镜结构补偿镜的折反型望远系统

康玉思, 刘伟奇, 冯睿

(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:**提出了一种基于弯月镜结构补偿镜的球面折反型望远系统,提出的新结构将传统折反系统中的非球面球面化,将基于弯月镜结构的补偿镜置于主镜与次镜之间代替前置大口径补偿镜,构成了双通光路,起两片透镜的作用。补偿镜直径仅是入瞳的 1/3,因此质量比前置大口径补偿镜的 R-C 望远镜轻巧,支撑结构简单。新型相机镜头的光学性能如下:全视场为  $2^\circ$ ,相对孔径可作到  $F\#7$ ,遮拦比为 0.33,MTF 衍射极限为  $0.40@70\text{ pl/mm}$ ,波长为  $400\sim 1100\text{ nm}$ ,加工和装校后总的  $\text{MTF}>0.35@70\text{ pl/mm}$ 。新型光学系统使光学元件制造容易,装校公差比传统的 R-C 结构宽松 2 倍。无前置校正镜的光学结构使机械结构简单,装调容易。

**关键词:**弯月镜结构补偿镜;折反望远镜;球面主反射镜;球面次反射镜;无前置补偿镜

中图分类号:TH743;TH703 文献标识码:A

## A refract-reflect telescope with meniscus corrector

KANG Yu-si, LIU Wei-qi, FENG Rui

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

**Abstract:** By making the aspheric surface into spheric in traditional refract-reflect system, a novel system for refract-reflect telescopes with a meniscus corrector was proposed. A meniscus corrector was laid between primary and secondary mirrors, instead of a front large aperture lens to form double pass optical path and play a role of two lenses. The corrector diameter is 1/3 that of the effective aperture, which shows its light weight and simple supporting structure. The optical properties of the telescope are described in field of view of  $2^\circ$ , relative aperture of  $F\#7$ , obscuring ratio of 0.33, MTF diffraction limit of  $0.40@70\text{ pl/mm}$  and wavelength range of  $400\sim 1100\text{ nm}$ . After correcting, the total MTF is more than  $0.35@70\text{ pl/mm}$ . The system improves the optical element manufacture, assembly tolerance is two times of the traditional R-C structure.

**Key words:** meniscus corrector; refract-reflect telescope; spheric primary mirror; spheric secondary mirrors; no fore corrected lens

收稿日期:2007-07-22;修订日期:2007-11-18.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2002AA311130)

## 1 引言

现在大批量生产的斯密特-卡塞格林型望远镜有大的长径比和比较窄的光谱波段两大缺陷,而本文所介绍的新型折反系统的弯月型校正镜,可对上述两个缺陷进行补偿。本文介绍了弯月补偿镜材料与次镜材料相同与不同时光学系统的性能,其结构优良,容易制造,表面全部采用球面。弯月校正镜直径仅是入瞳的  $1/3$ 。结构紧凑,长径比率仅为  $1.5 \sim 1.6$ ,即长度仅是最大口径的  $1.6$  倍。系统指标为  $F\#7$ ,全长是焦距的  $1/4$ ,全视场为  $2^\circ$ ,遮拦比为  $0.33$ ,波段较宽,为  $400 \sim 1100\text{nm}$ 。从原理上讲,斯密特-卡塞格林型望远镜不能消除色球差。若要降低长径比,则非球面的偏心差在大批量装配情况下,公差带就窄很多,严很多。为了应对这些缺陷,需提高次镜口径,减小平板非球面性,以减小由此平板产生的色球差,但由此也扩展了制造偏心公差,提高了中心遮拦比,从而降低了中高频的对比度。新型斯密特-卡塞格林型望远镜,孔径比可以做到  $1/6.3$ ,但是中心遮拦比高达  $18.5\%$ <sup>[2]</sup>,这样的望远镜不适合进行天文细节观察,如细结构的星云,月球环型山的细节等。 $F\#10$  斯密特-卡塞格林型望远镜也存在严重不足,如对于弱的散射目标,曝光时间需要长达几个小时,尤其是对于现代彩色底片;即使在合理的延时时间内( $1 \sim 1.5\text{h}$ ),对于现代的具有较高敏感度的黑白底片也没有足够的曝光量。通常避开这些不足的做法是:增加正负元件组合使相对孔径增大到  $F\#6.3$ ,其位于主镜之后,焦点之前。这样的正负元件组合可以起到平像场的作用,可以使视场达到  $1.4 \sim 1.7^\circ$ <sup>[3]</sup>。然而,这样的焦距转换器存在散射、光吸收等问题,在像面上产生类似化妆的背景效果<sup>[3]</sup>。为解决这些问题,本文提出了一种改进的折反结构系统。

## 2 改进的折反结构系统

### 2.1 新型 R-C 望远镜布局

图 1 所示的新型 R-C 折反望远镜的光学参数如下:

焦距为  $1\,000\text{mm}$ ,  $F\#7$ ,遮拦比为  $0.33$ ,最大半视场为  $1^\circ$ ,主镜到次镜距离为  $263\text{mm}$ ,其长

度约为焦距的  $1/4$ ,主镜口径  $175\text{mm}$ ,长径比 =  $263/175 \approx 1.5$ ,相对于传统的 R-C 望远镜是非常紧凑的结构。

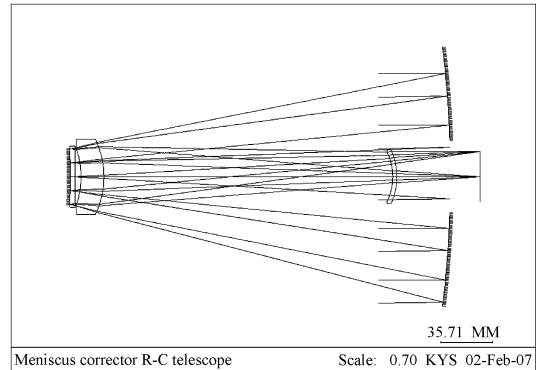


图 1 主、次反射镜为球面,弯月镜为校正镜的折反结构望远镜

Fig. 1 Telescope having two spheric surfaces and a meniscus corrector

### 2.2 弯月镜与次镜材料相同时系统的光学性能

图 2 中的 Mangin 反射镜与弯月镜是由同种材料制成的。两个半径的关系决定了其所引入的位置色差的正负,因为所引入的位置色差很小,所以其半径差也非常小,所引入的色球差与单纯的球面镜前后相差很小,故等光程的条件易于满足<sup>[5]</sup>,如图 2 所示。其特点如下:几乎是等半径的弯月镜是非焦型负透镜,其凹面朝着物方。Mangin 反射镜是负透镜,背面是反射面,作为次镜。应该强调的是,因为材料的一致性,系统的二级光谱非常小。在  $486.1\text{(F)} \sim 656.3\text{(C)}$  波段,系统的二级光谱将比采用消色差双透镜型的 R-C 型同焦距望远镜小  $100$  倍左右,比消色差型同焦距望远镜小  $170$  倍左右。此结构不仅消除了  $3$  个初级像差,而且基本消除了二级光谱。当弯月镜、次

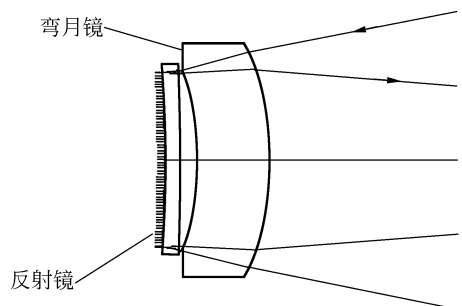


图 2 作为校正镜的弯月镜结构

Fig. 2 Meniscus lens used as a compensated corrector

镜和场镜材料都选择熔石英时,系统的光学性能达到衍射极限的水平,图 3,4,5,6 为像质曲线。

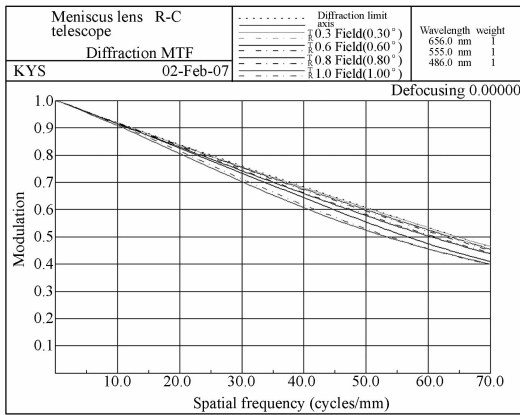


图 3 系统的传递函数 MTF>0.4@70 pl/mm  
Fig. 3 MTF of diffraction limit

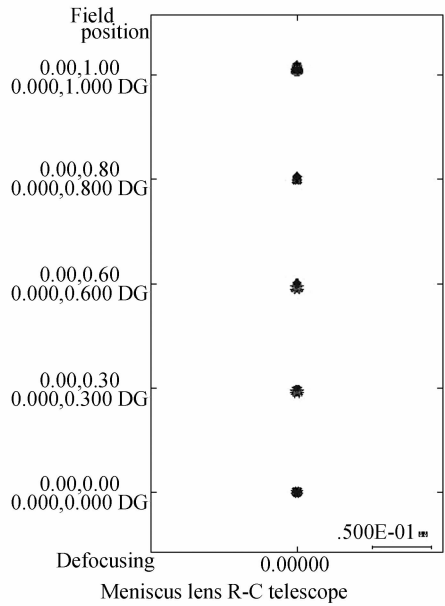


图 5 5 个视场的点列图  
Fig. 5 Spot diagram for 5 fields of view

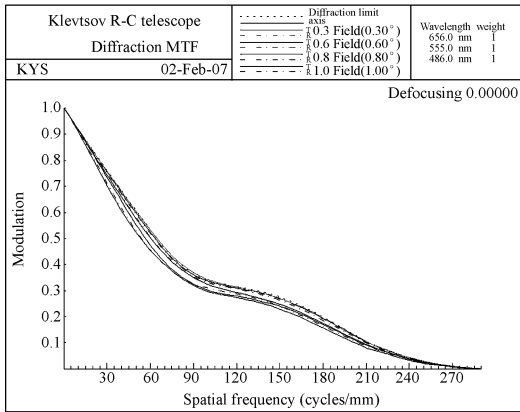


图 4 系统的传递函数,遮拦比 0.33,F#7  
Fig. 4 MTF with obscuring ratio of 0.33,F#7

此系统结构是按波长 F,555 nm,C 光来校正的。根据上述分析,系统的二级光谱将很低。

这里考证此望远镜在更宽波长范围情况下的性能。当波长为 400~1 100 nm 时,色球差曲线和 MTF 几乎不下降,且在这个波段内由于二级光谱极低,因此像面不用重调焦。

图 7 和图 8 分别显示的是 400~1 100 nm 的球差曲线和 MTF 曲线。可以看出,当工作波长在此波段时,CCD 不需要重新调焦。

继续研究表明,若玻璃采用 nd(1.66~1.76),则系统可以作到 F#8,若玻璃采用 nd(1.46~1.52)则系统可以作到 F#7,遮拦比 0.33,然而二级光谱和倍率色差将稍大一些。详

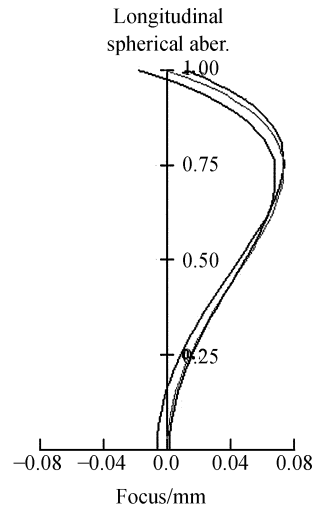


图 6 F,D,C 光的球差曲线  
Fig. 6 F,D,C spherical aberrations

细的研究表明,在 F#8,F,C 波段情况下,校正镜由 K9 材料制成,入瞳 125 mm,剩余轴向像差的大小取决于校正镜的直径(等于 1/3 的入瞳直径),和校正镜的放大率(即全系统焦距/主反射镜焦距),一般根据设计要求在 -3~-4 倍之间<sup>[6]</sup>。另外,研究发现剩余像差大小与校正镜材料折射率大小成正比,即:随 nd 的下降或随弯月镜的厚度的增大,剩余像差将变小。但其不可过厚,否则将引起倍率色差变大和光吸收问题。近似的倍率

由于弯月镜不能过厚,故设定  $d_2$  为 16.8 mm。最终的结构参数见图 9。

Surface #	Surface type	Y Radius	Thickness	Glass	Refract mode	Y full aperture
Object	Sphere	Infinity	Infinity	AIR	Refract	
1	Sphere	-767.397 6	-243.000 0	AIR	Refract	173.673 7 $\phi$
2	Sphere	-68.626 8	-16.800 0	SIO2_SPECIAL	Refract	52.000 0 $\phi$
3	Sphere	-65.221 0	-4.300 0	SIO2_SPECIAL	Refract	42.903 3 $\phi$
4	Sphere	-1 884.358 2	-3.500 0	SIO2_SPECIAL	Refract	42.478 4 $\phi$
Stop	Sphere	-438.748 5	3.500 0	SIO2_SPECIAL	Refract	41.296 5 $\phi$
6	Sphere	-1 884.358 2	4.300 0	SIO2_SPECIAL	Refract	41.288 6 $\phi$
7	Sphere	-65.221 0	16.800 0	SIO2_SPECIAL	Refract	41.248 1 $\phi$
8	Sphere	-68.626 80	217.000 0	AIR	Refract	44.248 9 $\phi$
9	Sphere	-43.577 6	3.000 0	SIO2_SPECIAL	Refract	34.576 2 $\phi$
10	Sphere	-49.074 4	57.022 9	AIR	Refract	35.355 4 $\phi$
Image	Sphere	Infinity	0.000 0	AIR	Refract	34.910 1 $\phi$

图 9 结构参数, CODE V 格式

Fig. 9 Configuration parameters in CODE V

### 2.3 弯月镜与次镜材料不同时系统的光学性能

为比较当弯月镜与次镜材料不同时光学性能的变化,本文对同样光学指标进行分析,即焦距为 1 000 mm,  $F\#$  7, 遮拦比为 0.33, 最大半视场为  $1^\circ$ , 波长  $\lambda$  为 486 nm, 555 nm, 656 nm。经过初始结构的 CODE V 优化, 结构如图 10, 校正镜见图 11。

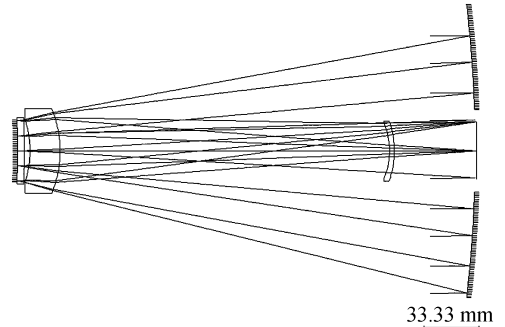


图 10 不同材料制成的 R-C 望远镜

Fig. 10 Layout of meniscus corrector with different materials

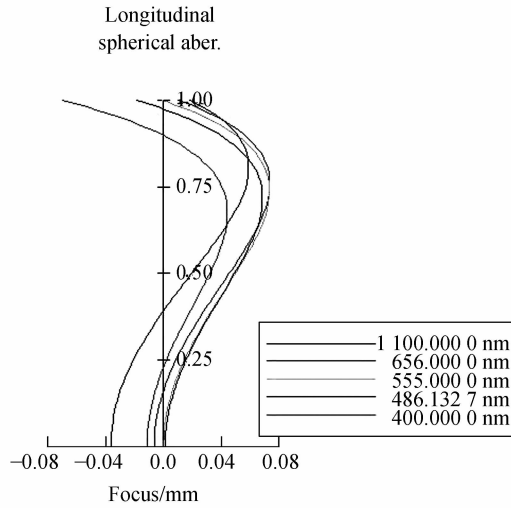


图 7 波长 400~1 100 nm 的球差曲线

Fig. 7 Spherical aberrations in 400~1 100 nm

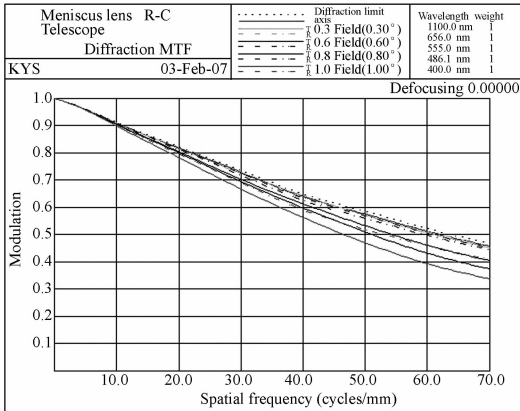


图 8 波长 400~1 100 nm 的 MTF 曲线

Fig. 8 MTF of  $\lambda$  (400~1 100 nm)

色差如式(1)所示<sup>[7]</sup>:

$$\frac{\Delta f_{\lambda_1 \lambda_2}}{f_{\lambda_0}} = \frac{n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}}{n_{\lambda_0}^2} x \frac{d_2}{h_3} (1 - \alpha_2), \quad (1)$$

式中:  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_0$ , 分别对应两端波长和中心波长,  $h_3$  为弯月镜内表面高度,  $d_2$  为其厚度,  $\alpha_2$  为弯月镜的放大率。平衡轴上剩余像差后, 剩余倍率色差范围在 0.006~ -0.012。式(1)表明,  $(n_1 - n_2) / n_{\lambda_0}^2$  值小的材料, 适合作为校正镜的材料。计算表明, 在所有的材料选择后, 倍率色差范围为 0.04% ~ 0.08%。此望远镜的独特优势在于工作波段 (400~1 100 nm) 较宽。当初始结构选定后, 经 CODE V 进行优化。用软件进行玻璃的选择, 最初为玻璃列表的最右下角即肖特的 FK5, 但由于熔石英物理性能更有优势, 故最终选定熔石英。

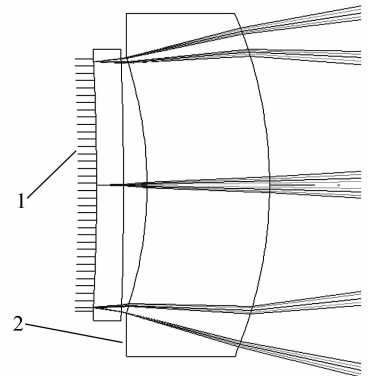


图 11 不同材料制成的校正镜

Fig. 11 Corrector with different materials

系统结构全长为 278 mm,主镜直径为 173 mm,望远镜长径比为  $278/173 \approx 1.6$ ,结构也很紧凑。校正镜的弯月镜由 BAK7 材料制成,次镜由 LaF7 材料制成,场镜为  $KF_2$ 。此结构光学性能见图 12、13。

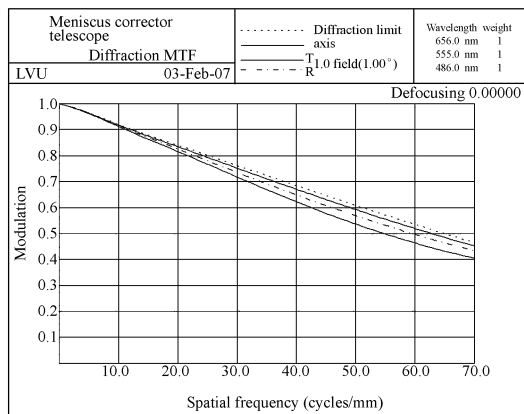


图 12 校正镜由不同材料制成的望远镜的 MTF  
Fig. 12 MTF of lens made of different materials

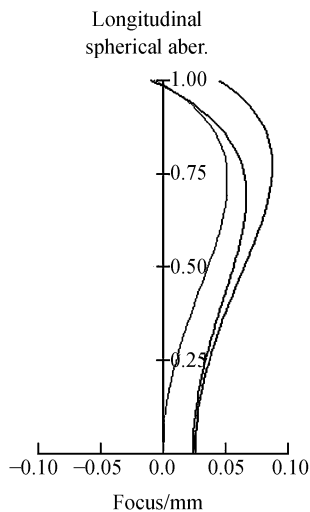


图 13 F,D,C 光的球差曲线  
Fig. 13 F,D,C spherical aberrations

图表所示上述结构的相机光学性能几乎完全一致,事实上,当系统波长扩展到 400~1 100 nm 时,性能差异非常明显,从而验证了上文的理论,即由于材料的一致性,使系统的二级光谱非常低<sup>[8]</sup>,而波长扩展后系统的光学性能将下降,见图 14、15。

波段扩展后,对不同材料的配对原则是色散尽量相同,但 nd 要尽量差得大。研究这些方案组合的玻璃配对发现:若反射的次镜 nd 增大,修正

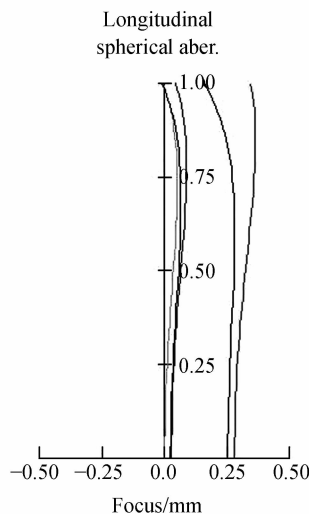


图 14 波长 400~1 100 nm 的球差曲线  
Fig. 14 Spherical aberrations in 400~1 100 nm

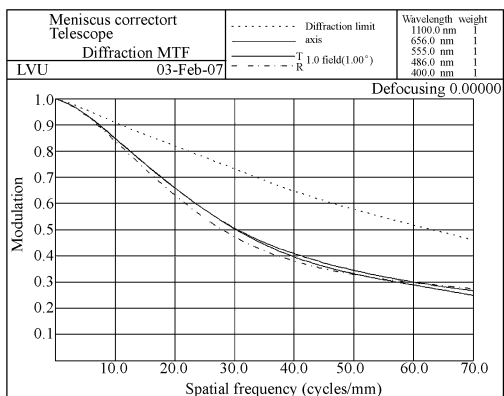


图 15 波长 400~1 100 nm 的 MTF 曲线  
Fig. 15 MTF of  $\lambda$ (400~1 100 nm)

球差能在较大波段范围内修正色球差。当弯月镜 nd 为 1.5,反射镜 nd 为 1.8 左右时,剩余轴上像差在波段 450~750 nm 内将被校正。若弯月镜 nd 高于 1.62,导致反射镜 nd 高到不现实的值,可缩小可匹配的玻璃范围来约束二级光谱。若弯月镜 nd 低至 1.46~1.55,则反射镜 nd 上升到 1.74~1.76。然而,尽管合适色散的玻璃范围相当的小,仍然可以选择到在波段 436~852 nm 有较低二级光谱的玻璃。因此,弯月镜合理的 nd 值应在 1.52~1.58。经过 CODE V 优化选择玻璃类型和系统结构参数,最终结构参数如图 16。

严格的像质计算表明, F # 7 (入瞳直径 143 mm), BAK7/LaF7 材料制成的补偿镜,如考虑遮拦比和衍射效果,则在波段 405~768 nm 其

Surface #	Surface type	Y radius	Thickness	Glass	Refract mode	Y full aperture
Object	Sphere	Infinity	Infinity	AIR	Refract	○
1	Sphere	-769.826 4	-252.000 0	AIR	Refract	172.627 0 <sup>⊙</sup>
2	Sphere	-65.843 7	-18.300 0	BAK7_CHIN	Refract	48.265 9 <sup>⊙</sup>
3	Sphere	-60.605 1	-3.500 0		Refract	38.210 4 <sup>⊙</sup>
4	Sphere	-582.483 4	-4.000	LAF7_CHIN	Refract	37.841 2 <sup>⊙</sup>
Stop	Sphere	-374.644 4	4.000	LAF7_CHIN	Refract	36.729 5 <sup>⊙</sup>
6	Sphere	-582.483 4	3.500 0		Refract	36.844 8 <sup>⊙</sup>
7	Sphere	-60.605 1	18.300 0	BAK7_CHIN	Refract	36.815 7 <sup>⊙</sup>
8	Sphere	-65.843 7	200.000 0	AIR	Refract	40.577 6 <sup>⊙</sup>
9	Sphere	-44.633 9	3.000 0	KF2_CHIN	Refract	33.161 2 <sup>⊙</sup>
10	Sphere	-52.758 8	49.926 9		Refract	33.987 5 <sup>⊙</sup>
Image	Sphere	Infinity	0.000 0	AIR	Refract	34.910 1 <sup>⊙</sup>

图 16 结构参数, CODE V 格式

Fig. 16 Configuration parameters in CODE V

点列图直径(包括 80%)的尺寸要  $< 28 \mu\text{m}$ 。尽管为  $F\#7$ , 但机构还是非常紧凑的, 从主镜到补偿镜距离仅是主镜口径的 1.6 倍。如果有必要, 可以引入 1 个有光焦度的透镜组来负责像散和场曲方面的校正。如 3 片透镜结构即可使视场提高到  $1.5^\circ$ , 相对口径提高到  $1/5$ 。本文仅仅用一片薄透镜来控制轴外的校正, 若用更多的透镜则可以把在半视场  $1^\circ$  的情况下的畸变由现在的  $0.7\%$  降低到  $0.02\%$ 。

实际计算表明, 由同种材料制成校正镜的望远镜的主镜跟补偿镜光轴对准差可以是 R-C 望远镜, 或 Schmidt-Cassegrain 望远镜的  $1.7\sim 2$  倍,

### 参考文献:

- [1] 袁旭沧. 光学设计[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1988.  
YUAN X C. *Optical Design*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988. (in Chinese)
- [2] 杨德华, 戚永军, 朱振东, 等. 光学拼接镜面微位移主动调节机构的设计和实测[J]. 光学精密工程, 2005, 13(1): 1-5.  
YANG D H, QI Y J, ZHU ZH D, et al.. Design of hybrid refractive-diffractive Petzval objective in visible band[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1): 1-5. (in Chinese)
- [3] WARREN J S. *Modern Lens Design* [M]. Washington: SPIE Press, 2005.
- [4] MILTON L. *Lens Design*[M]. New York: Marcel Dekker, 2001.
- [5] 勾志勇, 王江, 王磊, 等. 衍射极限非球面准直透镜[J]. 应用光学, 2006, 27(6): 8-10.  
GOU ZH Y, WANG J, WANG L, et al.. Diffraction-limited aspheric collimator[J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, 27(6): 8-10. (in Chinese)
- [6] 张舸, 赵文兴. 轻型反射镜镜体结构参数的分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(1): 48-54.  
ZHANG G, ZHAO W X. Analysis on structural parameters of light-weighted mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 48-54. (in Chinese)
- [7] 茹志兵, 华珂. 一种宽光谱紫外镜头的设计[J]. 应用光学, 2003, 24(1): 11-14.  
RU ZH B, HUA K. Design of a wide spectral UV lens[J]. *Journal of Applied Optics*, 2003, 24(1): 11-14. (in Chinese)
- [8] 巩岩. 极紫外太阳望远镜成像质量检测系统设计[J]. 光学精密工程, 2006, 6(14): 969-974.  
GONG Y. Testing system for performance of EUV solar telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 6(14): 969-974. (in Chinese)

作者简介: 康玉思(1977—), 男, 吉林长春人, 博士研究生, 主要从事光学设计方面的研究工作。E-mail: kyshdl@163.com

导师简介: 刘伟奇(1958—), 男, 吉林长春人, 博士生导师, 主要从事激光显示方面的研究工作。E-mail: liuwq@ciomp.

原因在于使用了非球面。在此相机中, 次镜-弯月镜组直径为  $50 \text{ mm}$ , 装配过程是: 先将其定心安装好, 因为其直径不大, 所以这两元件同心度和倾角差非常小。此元件组再作为一整体装配到镜筒里, 其同心度对 MTF 的敏感参数为  $0.05 \text{ mm}$ , 最大视场  $1^\circ$  的 MTF 可以减小  $0.017@70 \text{ pl/mm}$ , 设计指标是  $0.4@70 \text{ pl/mm}$ , 这个水平非常适合大批量生产组装的合理宽度。

### 3 结 论

与 Schmidt-Cassegrain, Ritchey-Chretien, Maksutov's meniscus cassegrain 相对比, 本文所提出的望远镜具有高像质(全视场范围内  $\text{MTF} > 0.35@70 \text{ pl/mm}$ ), 宽波段( $400\sim 1100 \text{ nm}$ ), 小孔径(相对孔径可达  $1:7$ )等优点, 这些优点使得它结构紧凑(长径比  $1.5\sim 1.6$ ), 加工方便(无非球面), 校正镜尺寸小(仅为入瞳的  $1/3$ ), 另外消杂散光能力强, 具有相对较宽的中心偏差(中心对准偏差  $0.05 \text{ mm}$ )。基于这些优点, 这种新型 R-C 望远镜非常适合用于大批量生产。