

文章编号 1004-924X(2007)03-0303-05

# Cook 结构补偿镜的球面折反型望远系统

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:**基于 Cook 结构补偿镜提出了一种球面折反型望远系统。该系统将传统折反结构中的非球面球面化并用基于 Cook 结构的补偿镜代替传统的前置大口径补偿镜。将该镜置于次镜之后,其直径减小了很多,支撑结构也变得简单易行,整个系统容易制造。系统光学性能如下:全视场为  $0.5^\circ$ ,相对孔径可以做到  $F/7$ ,遮拦比为 0.42,MTF 衍射极限为  $0.45@50\text{pl}$ ,设计、加工和装校后总的 MTF 可以做到  $0.40@50\text{pl}$ ,非常接近衍射极限水平。

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

中图分类号:TH703 文献标识码:A

## A refract-reflect telescope with Cooke as compensated lens

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

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

**Abstract:** This paper introduces a new design about refract-reflect telescope using spheric surfaces instead of aspheric mirrors or large fore corrected lens, which lays a small Cook corrected lens behind the second mirror to compensate aberrations. This lens still achieves diffraction limit level in its full field of  $0.5^\circ$  and  $F\#7$ , obstruction ratio of 0.42 and MTF  $0.45@50\text{pl}$ . The finished assemblage MTF is over  $0.4@50\text{pl}$  close to diffraction limit, it is shown that this new configuration can bring up a low cost telescope.

**Key words:** Cook compensated lens; refract-reflect telescope; spheric primary mirror; spheric second mirror; fore corrected lens

## 1 引言

本文提出了一种 Cook 结构作为补偿镜,替代传统的折反望远镜的前置大口径补偿镜,而且全部面型球面化的望远系统。此结构是主、次镜都是球面反射镜,Cook 镜作为补偿镜位于次镜之

后,补偿前面球面镜的剩余球差,在像面附近存在一弯月镜负责平衡场曲。折反望远系统通常有两种结构形式。第一种:主、次反射镜为非球面的折反望远系统。此类结构的主镜和次镜均采用非球面,主镜是抛物面,次镜是双曲面,或者是椭球面,在接近像面的位置上还要加入一个校正场曲的弯月镜,这种结构中非球面的加工和系统装调是该

系统应用的难点。第二种:主、次反射镜为球面,但有前置校正镜的折反望远系统。此类结构虽然无非球面反射镜,但主反射镜前有一个或两个大口径的前置校正镜组,用来校正轴上球差,其口径基本与入瞳直径相当。这种大口径前置校正镜,由于口径大,获得高品质的大尺寸光学材料很困难,且价格也非常高。以上两种结构都给实际加工带来困难,也增加了系统的制造成本。目前国内的非球面,尤其是大口径非球面的加工、检测和装调也都相当困难;而且大口径球面透镜需要大块的光学材料。对大尺寸的光学材料,要保证材料良好的光学均匀性、汽泡、条纹度等光学指标,其制造难度非常大,成本也很高。在保证相同成像质量的前题下,如何用球面代替非球面,用小口径透镜代替大口径,降低加工难度,减小制造成本,以获得更高性价比的新型实用望远系统正是本文所讨论的核心内容。新结构望远镜技术指标是:焦距 2 500 mm,入瞳 350 mm,系统  $F/7.1$ ,中心遮拦比取 0.42。在像面处 CCD 的 50 pl MTF 衍射极限达 0.45。视场角为  $0.5^\circ$ ,  $MTF > 0.4 @ 50 \text{ pl/mm}$ 。波长 450~660 nm,全长小于 1.1 m。

## 2 改进的折反结构系统

### 2.1 系统结构

此望远镜使用基于 Cooke 结构补偿镜来解决补偿球差的问题<sup>[1-3]</sup>。在这里使用 Cooke 三片式镜头头作为初始优化结构,经过优化圆满地校正了球差。值得注意的是,这里的 Cooke 镜组中每片镜都是弱光焦度,光线几乎不偏折,入射角很小,因此引入的色差,球差也非常小,反而把球面反射镜的剩余球差给予校正。校正镜结构如图 1。

此新型系统全部采用球面设计,避开了非球面镜或前置大口径球面校正镜的经典折反系统的设计模式,系统结构简单,便于加工,可大大降低成本。具体结构如图 2。

图 2 中将经典折反结构中的非球面改为球面,并加上后置 Cooke 结构校正镜组。这种结构的特点是由非球面改为球面而带来的轴上球差,通过后置小口径 Cooke 结构球面镜组加以校正。后置球面镜组替代了前置大口径球面校正镜,其球差校正效率比前置校正镜困难得多,但通过复

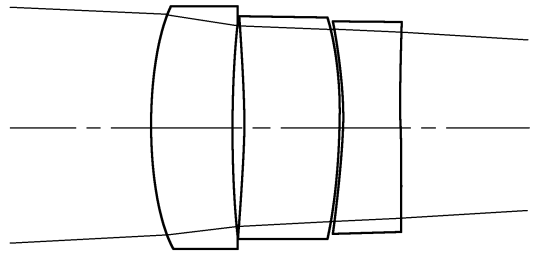


图 1 作为校正镜的 Cooke 机构

Fig. 1 Cooke lens used as a compensated lens

杂化后,仍能平衡主反射镜产生的球差。但小口径的后置校正镜从材料熔炼到加工难度远比大口径的前置校正镜容易得多、便宜得多。

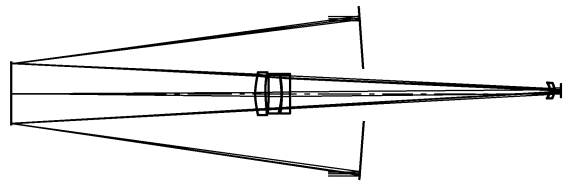


图 2 主、次反射镜为球面且无前置校正镜的折反结构望远镜

Fig. 2 Telescope with primary and second mirrors in spherical surfaces but without fore corrected lens

### 2.2 系统性能分析

经过对具体系统进行设计和计算,系统的传递函数特性如图 3。次反射镜造成的遮拦比设计为 0.42,经计算系统  $F/7$  的传递函数特性如图 4。

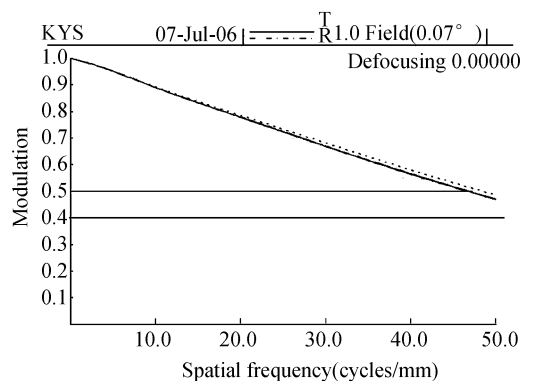


图 3 系统的传递函数

Fig. 3 Camera's MTF in diffraction limit

从图 3 和图 4 的传递函数曲线可以看出,其

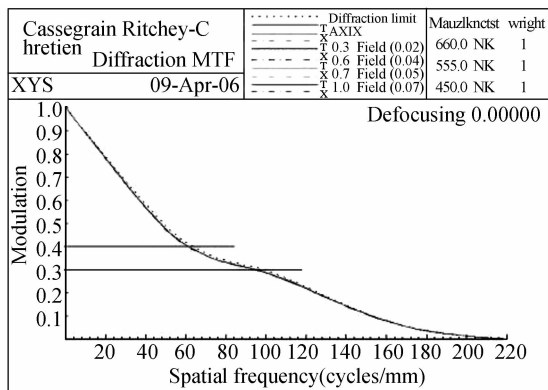


图4 遮拦比为0.42的MTF

Fig. 4 MTF with obstruct ratio of 0.42

光学性能达到了衍射极限,就是说在一定条件下对经典的折反望远系统可以采用球面代替非球面,小口径后置 Cooke 结构校正镜代替大口径前置校正镜,其系统的光学性能一样能够达到同等水平。这种改进的球面系统,由于后置校正镜口径小,重量减轻,更加有利于支撑结构。同时使加工、装调容易了很多,使系统的最终性能容易接近设计水平,避免了非球面系统或大口径前置校正镜系统由于加工、装调困难而带来的最终性能难以达到设计指标的问题,这对实际的工程应用是很有意义的。

### 2.3 Cooke 校正镜的关键作用

当把经典折反望远系统中的非球面用球面代替后,带来的问题是轴上球差无法校正。因为这种折反望远系统结构与折射系统中的摄远结构相似,两反射镜相当于折射系统摄远结构的前、后镜组,且只有两个变量(半径),而且焦距还限制了它们曲率的范围,无法通过改变两反射镜参数达到校正球差的目的,所以必须另加校正镜。研究发现,在无校正镜组时,在像方光路接近  $F/7$  的水平,而且像方视场角在  $0.2^\circ$  左右时,若采用双分离透镜,虽经过反复优化,却无论如何也得不到优秀的像质,结构如图5所示。

将此补偿镜复杂化后,使用了 Cooke 结构补偿镜,完美地平衡了球差。设计过程中发现校正镜组位置非常关键。实验初将其置于主镜之后,优化过程中却发现它离次镜越近,优化效率越高。本设计最终将其定于图6的位置上,这是因为如仅仅考虑像差校正,校正镜越向前像质越好,但反

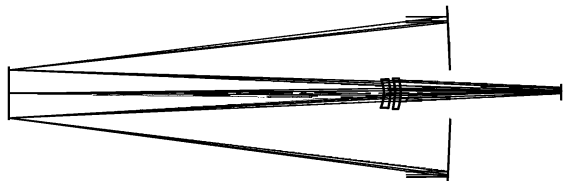


图5 仅两片透镜作为校正镜的机构

Fig. 5 Structure of only two lenses as corrected lens

射光路的遮挡也随之增大,由于系统的优化应兼顾球差和遮拦比,因此本系统将校正镜组定位在一般折反望远系统中遮光罩位置,这样即保证了校正像差与通光孔径的和谐统一,其位置如图6。

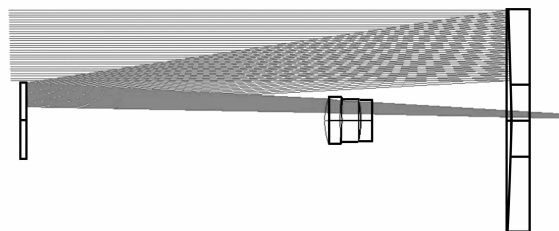


图6 位于遮光罩处的补偿镜

Fig. 6 Compensated lens lying the obstruct cover for hold up straight light from out wold

从仿真光路可以看出,校正镜已经很靠近次镜,而且不能再靠前了,否则将会遮挡反射光路,此位置是遮光罩位置,正好是合理的校正镜组固定位置。

该系统遮拦比:次镜直径/入瞳直径=0.42。这种系统还有一个特点,即将孔径光阑面设在次镜上,而不像一般折反型望远镜结构放到主镜上。这样设置有两大好处:一是全系统接近对称形式,对轴外像差校正有利,但不影响轴上光束的校正;二是这样做可以使遮拦比降低,否则若光阑设在主镜上,轴外视场将加大次镜口径,导致遮拦比的升高。

折反型望远系统结构遮拦比的降低会导致中高频 MTF 下降,故将光阑设置于次镜。而主镜口径仅由 350 mm 增加到 356 mm,尺寸几乎不变。该系统试图将遮拦比进一步降低,但这样做导致了主镜和次镜的曲率增大,结果使校正镜的校正能力达不到衍射极限,分辨率严重下降<sup>[7]</sup>。

### 2.4 场镜校正作用

在该系统中靠近像面位置处,还要加一个场校正镜,以提高像质,仿真光路如图7。

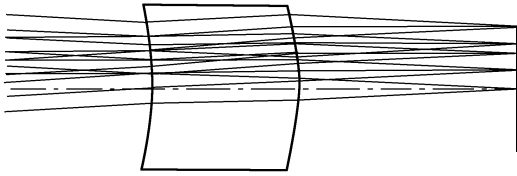


图 7 场镜光路仿真

Fig. 7 Field lens

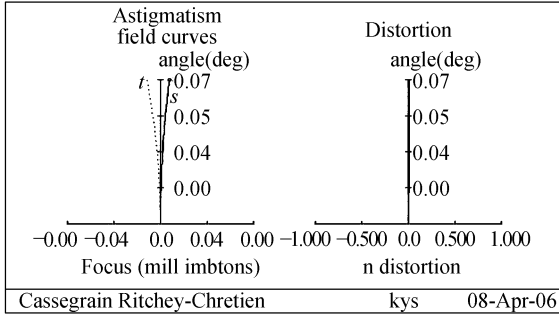


图 8 全视场象散和畸变

Fig. 8 Astigmatism and distortion of full field

轴外光束与轴上光束在入射到场校正镜前质量似乎相同,可以把此镜去掉,但优化后发现,尽管像质有所改善,但仍就达不到衍射极限。所以对于此折反望远系统,此场镜是必不可少的<sup>[8]</sup>。图 8 是没离焦时的像散和畸变图。

从图 8 可以看出,场镜过校正,使  $t/s$  对称于像面,这样的过校正让  $t$  和  $s$  像散互补,而不是某些理论所讲的轴外子午球差补偿  $t$  像散。实际上,如果像面落在了  $t$  和  $s$  之间,那么它们在像面上的光斑接近圆形而不是偏线条状,可见这样的补偿效果是非常理想的<sup>[9,10]</sup>。

## 2.5 具体结构参数

上文分析的初始结构,经 CODEV 优化,得到的结构参数如表 1。

表 1 结构参数

Tab. 1 Configuration Parameters

面数	曲率半径	面厚度	折 / 反模式	材料
OBJ	INFINITY	INFINITY		
1	-2 578.609	-794.319 492	反	
STOP	-1538.787	550.000 00	反	
3	154.139	25.000 00	折	QK3_CHINA
4	341.211	4.965		
5	-442.164 7	30.	折	ZF6_CHINA
6	-214.279	1.000 000		
7	-220.302	18.000 000	折	ZBAF21_CHINA
8	2 071.892	598.973		
9	-24.737	10.000 000	折	QK3_CHINA
10	-28.443	15.000 000		
Image surface	INFINITY	0.000 000		

## 3 结 论

本文讨论了在不采用非球面或大口径前置校正镜情况下,完全用球面反射镜设计出与经典的折反系统具有同等光学质量的新型望远系统。此设计优势在于,系统结构简单,加工、装调简单得多,设计指标容易达到,透镜的口径小,光学材料熔炼容易,光学质量能够满足要求。本系统采用了球面反射镜和小口径后置校正镜,进而将光学

材料和加工成本大大降低,同时对机械结构的要求也降低了。当然这种系统与典型的折反望远镜相比存在一定的不足,主要是视场变小了,典型折反望远镜全视场可达  $1.5^\circ$ ,而此系统只能做到  $0.5^\circ$ 。因此,它适合于较小视场,需要考虑经济方面的项目应用。新型结构参数中相对孔径为  $F/7$ ,遮拦比为 0.42,MTF 衍射极限是  $0.45@50\text{pl}$ ,设计、加工和装校后总的 MTF 可以做到  $0.40@50\text{pl}$ ,与传统非球面系统像质相同。

## 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] WARREN J S. *Modern Lens Design*[M]. second edition. Washington: SPIE Press, 2005.
- [3] MILTON L. *Lens Design*[M]. third edition. USA: Marcel Dekker, 2001.
- [4] 张轶楠,傅汝廉,孙强. 折/衍混合 petzval 光电摄像物镜设计[J]. 光学精密工程,2005,13(1):1-3.  
ZHANG T N, FU R L, SUN Q. Design of hybrid refractive-diffractive petzval objective in visible band[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1):1-3. (in Chinese)
- [5] 杨近松,胡君. 光学镜头结构智能化设计系统[J]. 光学精密工程,2005,13(增):21-25.  
YANG J S, HU J. Development of intellectualized design system for structural design of optics lens[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(supp.):21-25. (in Chinese)
- [6] 李春艳,李怀锋,孙才红. 高精度星敏感器天文标定方法及观测分析[J]. 光学精密工程,2006,14(4):558-560.  
LI C Y, LI H F. Astronomical calibration method and observation analysis for high-accuracy star sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4):558-560. (in Chinese)
- [7] 沈为民,薛鸣球,余建军. 长波红外广角地平仪镜头的光学设计[J]. 光学精密工程,2002,10(4):329-332.  
SHEN W M, XUE M Q, YU J J. Optical design of a wide-angle lens for long-wave infrared earth sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(4):329-332. (in Chinese)
- [8] ROBERT E, FISCHER F. *Optical System Design*[M]. Washington: SPIE Press, 2000.
- [9] 康玉思,刘伟奇. 扫描式匀场照明技术研究[J]. 光学精密工程,2004,12(4):45-47.  
KANG Y S, LIU W Q. New technology of a uniform illumination field with a scanner[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(4):45-47. (in Chinese)
- [10] HU J S, WU X. Manufacturing and testing of X-ray imaging components with high precision[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(5):620-625. (in Chinese)

作者简介:康玉思(1977—),男,长春人,现在中国科学院长春光学精密机械与物理研究所攻读博士学位,主要从事光学设计方面的工作,目前从事激光电视的研制。E-mail: kyshdl@163.com