

# 一种折反式大视场强焦比平场 CCD 照相机

徐文莉

(中国科学院南京天文仪器研制中心, 南京 210042)

**摘 要** 介绍了折反式大视场强焦比平场 CCD 照相机的设计思想和方法, 给出了详细的结构参数和像斑弥散直径。照相机焦比 0.9, 对角视场  $22.2^\circ$ , 使用波长范围 390~900 nm, 以 660 nm 为分界波长分为红蓝两区照相机, 各用一块  $1024 \times 2048$  CCD 接收器。照相机像质优良, 结构全新。

**关键词** 多目标光纤光谱仪, 光学系统, CCD 照相机。

国家重大科学工程“大天区面积多目标光纤光谱望远镜”是一架卧式中星仪式反射施密特(Schmidt)望远镜, 主要用于光谱巡天工作<sup>[1]</sup>。望远镜焦面上的星像由芯径 0.32 mm 的光纤传输到光谱仪的狭缝上, 低色散多目标光纤光谱仪光谱分辨力为 0.9 nm。光谱仪准直镜焦比为 4, 焦距 600 mm, 光谱范围 390~900 nm, 采用 600 l/mm 的平面透射光栅作色散元件。为确保相邻两根光纤的星光光谱在 CCD( $24 \mu\text{m}/\text{pixel}$ )上不重叠, 相邻两行光谱之间的间隙不少于 3 个像素。在上述指标确定的情况下, 每台光谱仪狭缝上可安插的最大光纤数直接由照相机的焦比决定, 照相机的焦比越强, 可被 CCD 接收的光谱越多, 狭缝上安插的光纤数越多, 照相机的角视场又越大。大天区面积多目标光纤光谱望远镜要同时记录下 4000 颗星的光谱需要十几台低色散光谱仪, 要大幅度地降低造价就必须减少光谱仪的台数和 CCD 的尺寸, 关键也就是要能设计出强焦比大视场的 CCD 照相机。

## 1 设计思想

### 1.1 基本思路

1) 由于 390~900 nm 波长范围太宽, 故以 660 nm 为分界波长将整个波段分为红蓝两区, 各用一块  $1024 \times 2048$  CCD 接收, 由此照相机的焦距取为 140 mm; 2) 将处于准直光路中的平面衍射光栅作为孔径光阑, 口径为 150 mm; 3) 在光栅平面处建立直角坐标系, 沿光轴方向为  $z$  轴, 光栅色散沿  $y$  轴方向, 与光谱仪狭缝对应的照相机角视场沿  $x$  轴方向, 照相机对角视场为  $22.2^\circ$ , 相当于狭缝高 200 mm; 4) 为极小化相邻光谱的交差重叠并提高 CCD 的信噪比, 像斑点列直径的均方根值(RMS)值最好在一个像素以内; 5) 对强焦比的光学系统, 要控制好宽光束像差已非易事, 再要达到大视场时的轴外像差校正就更不容易, 在这种情况下, 基于初级像差理论求解初始结构是非常繁复的。另外因高级像差较大, 所得初始结构与

最后的可用结果也相差颇多,宜从已发表的镜头中选取初始结构进行仔细的分析、修改和像差平衡。

## 1.2 获得新设计

Wilson 在参考文献[2]中简单提到一种贝克超施密特(Baker Super-Schmidt)系统,它用了非球面改正板和弯月透镜的组合,消色差非球面改正板作为光阑位于两个同心弯月透镜的中心,设计实例的焦比为  $F0.82$ ,视场  $\pm 26^\circ$ ,在最佳弯像面上像斑 80% 能量集中在  $50 \mu\text{m}$  以内(书中只给出示意图,无分析及结构参数)。从表面上看这种结构是值得借鉴的。

作者首先着手设计与[2]所述指标一致的贝克超施密特系统,焦距 200 mm,焦比  $F0.82$ ,视场  $\pm 26^\circ$ ,设计波长取为 486 nm、589 nm 和 656 nm,弯焦面。球面反射镜的半径由焦距确定,消色差非球面改正板位于反射镜球心并作为系统孔径光阑。在光阑两边各加上一个同心弯月透镜(光线两次通过光阑后面的弯月透镜),使贝克超施密特系统在结构形式上具有对称形状,众所周知,在对称面上垂轴像差符号相反起相消作用,轴向像差符号相同起相加作用,因为焦面为弯焦面,不用校正场曲,主光线以法线方向入射同心弯月透镜,因此没有像散,余下要考虑的便是球差和色差。取定弯月透镜的厚度  $d$ ,当它的参数满足  $r_1 - r_2 = (n^2 - 1)d/n^2$  时,

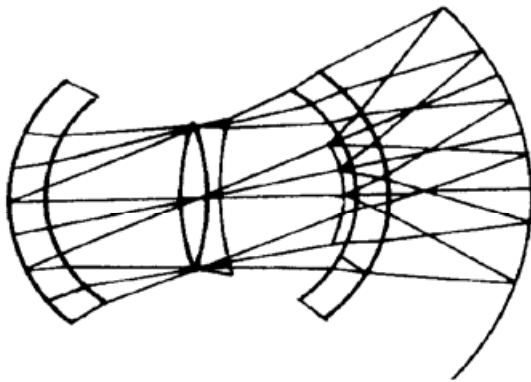


Fig. 1 Baker super-Schmidt, with  $F0.82$ ,  
 $W = \pm 26^\circ$

是自消色差的,同时它产生的负球差与反射镜产生的正球差起抵消作用,整体弯曲弯月透镜可使残余球差最小。弯月透镜的失同心所引起的像散以及残余球差可由非球面来校正,非球面方程取  $y^4$  项。最后的设计用了美国 Focus 公司的 ZEMAX 光学设计软件进行像差自动平衡,不断根据像差情况进行人为干预,确定优化方向,最后得到了与[3]中成像一致的结构(在本文称之为  $S_1$ ,如图 1 示)。

根据大天区面积多目标光纤光谱望远镜光谱仪照相机的设计要求,光阑位置设在光栅处。将光阑轴向偏离非球面改正板不会影响系统的三级球差、场曲和位置色差,但彗差、像散、畸变和倍率色差都要变化。由于 CCD 接收的是光谱,可不考虑畸变和倍率色差的影响。引入光栅和移动光阑后系统像差主要表现为彗差,而彗差可通过调节系统各面相对于光阑的位置来减小(比如非球面改正板向着光阑移动),加上两个弯月透镜的对称性约束条件取消,也增加了三个优化变数。在优化过程中,非球面改正板确实向着光阑移近,在它快要和第一个弯月透镜接触时取消这个距离变量,将两者之间的距离固定下来继续优化。由于第一个弯月透镜前后两面半径值差别很小,既光焦度很小,而且背向光阑,引起大的轴外像差,我们认为可在系统中去掉第一个弯月透镜以简化结构,并将消色差非球面改正板的各面加上适当的光焦度,它对场曲和倍率色差的影响可忽略,而球差、彗差可通过系统中其它参数重新平衡,最后的残余色差还可通过调整第二个弯月透镜的厚度来减小。经优化,得到了符合光谱仪照相机视场和焦比要求的焦面为球面的中间结果。

再进行平场,在焦面处加一块单透镜作为场镜,场镜将引入色差和彗差,色差可通过场镜远离焦面来控制,但这样又增加了彗差。众所周知,施密特改正板的轴向平移产生彗差,所以总可通过改正板的轴向平移使彗差为零。反复几次像差平衡,得到大部分像斑在一个像素以内、最大均方根像斑直径为  $35 \mu\text{m}$  的结果。这个结果还不尽人意,最麻烦的是非球面度

很大, 消色差非球面改正板胶合面的非球面最大磨削量高达 1.6 mm, 第三面的非球面最大磨削量为 0.54 mm。轴外像质稍差, 主要是高级像散的影响, 故在非球面方程中增加了  $y^6$  项, 优化后像质得到极大改善, 所有像斑都在一个像素以内, 胶合面的非球面最大磨削量也下降为 0.46 mm, 第三面的非球面最大磨削量为 0.57 mm。获得了像质优良的大视场强焦比 CCD 照相机的新结构, 记为  $S_2$ 。

可以想象, 新结构中非球面的加工仍然是个大问题, 据我们所知, 国内尚无加工非球面度这样大的非球面的技术水平。另外, 改正板第二块胶合镜两面都要磨成非球面, 不仅加工难度很大, 检验、胶合问题也多。因此, 对设计做了进一步的改进: 对任何光学系统, 在不同玻璃上用两个非球面就可对两个波长严格消球差, 考虑到反射引起的光程差是折射的两倍, 将胶合面处的非球面移到了反射镜上。实际上, 这个非球面可位于系统中任何其他面上, 最后像质都差不太多, 但非球面度比在反射面处大。

## 2 设计结果

以红区照相机为例, 结构如图 2 所示。表 1 是红区结构参数表。曲率半径以球心在顶点的右面为正, 轴上间隔指当前面到下一面的距离, 从左到右为正, 玻璃取自德国 Schott 公司生产牌号, 坐标变换指光栅引起的光路偏转, 角度大小为光栅第一级闪耀波长的闪耀角。

Table 1. Optical parameters of the red camera

element	radius/mm	thickness/mm	material	diameter/mm	remark
grating	$\infty$	0		150	600 l/mm, $m=1$
coordinate break		45			Tilt about $x$ -axis $27.905^\circ$
doublet	$\infty$	15	LLF6	165.3	
	141.459	37	BK7	175.5	
	$\infty$	121.407		177.5	high aspheric surface 1
meniscus	- 635.489	40	BK7	228.8	
	- 282.174	79.306		239.2	
mirror	- 367.514	- 79.306	MIRROR	255.7	high aspheric surface 2
meniscus	- 282.174	- 40	BK7	160.1	
	- 635.489	- 33.472		125.8	
flattener	- 87.888	- 10	BK7	62.4	
	$\infty$	- 1		56.8	
focal plane	$\infty$				1024×2048 CCD

高次非球面 1 的表达式为:

$$z = 2.3547371 \times 10^{-8} y^4 + 4.4202456 \times 10^{-13} y^6$$

高次非球面 2 的表达式为:

$$z = cy^2 / (1 + \sqrt{1 - c^2 y^2}) - 2.0599982 \times 10^{-10} y^4 - 3.4674472 \times 10^{-15} y^6$$

坐标原点取在非球面顶点上,  $c$  为顶点曲率,  $y$  为曲面上某点的高度,  $z$  为该点相应的沿光轴方向的坐标。高次

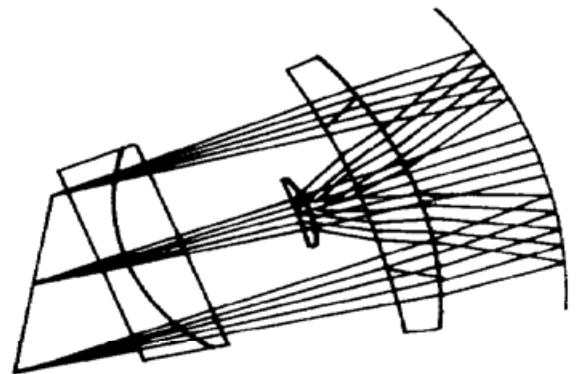


Fig. 2 Illustration of the red camera

非球面 2 为  $\phi 255.7$  mm, 与其最接近比较球面的最大负偏差为 0.010 mm, 最大正偏差为 0.017 mm, 故最大磨削量为 0.027 mm, 可见非球面 2 的加工是没有任何问题的。高次非球面 1 为  $\phi 177.5$  mm, 与其最接近比较球面的最大正偏差为 0.253 mm, 最大负偏差为 0.425 mm, 故最大磨削量为 0.678 mm。现在只有一个非球面的加工难度很大, 与  $S_2$  比较, 尽管非球面 1 的非球面度有所上升, 必须依靠国际一流的加工技术, 但  $S_2$  要加工三个类似的非球面, 还要求精确的非球面胶合技术。从表 1 还可看出, 我们尽可能地采用了平面以简化加工。

红蓝两区像斑直径的均方根值列于表 2, 在给出的 60 个像斑直径均方根值中只有一个为 27  $\mu\text{m}$ , 其余都在一个像素以内, 像质优良, 完全符合设计要求。

这是一个大视场强焦比平场 CCD 照相机的新结构。

Table 2. RMS spot diameters of the blue and red cameras

$x$ -field/( $^\circ$ ) (corresponding slit height, mm)	blue channel/nm					red channel/nm				
	390	460	530	600	660	660	720	780	840	900
0. (0)	21	18	17	6	15	19	15	16	14	10
1.91 (20)	21	17	16	6	16	19	15	16	14	11
3.81 (40)	20	16	14	7	18	21	16	16	14	12
5.71 (60)	17	14	12	8	20	21	17	16	14	14
7.59 (80)	12	15	11	10	22	17	15	14	12	14
9.46 (100)	20	24	17	16	27	20	11	10	11	18

感谢王亚男研究员的有益讨论。

### 参 考 文 献

- [1] Wang Shouguan, Su Dingqiang *et al.*. . Special configuration of a very large Schmidt telescope for extensive astronomical spectroscopic observation. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(25) : 5155~ 5161  
 [2] Wilson R N. *Reflecting Telescope Optics I*. Springer-Verlag, 1996.

## A Refracting-Reflecting Flat CCD Camera with Quick $F$ -Ratio and Wide Field

Xu Wenli

(Nanjing Astronomical Instrument Research Center, The Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042)

(Received 14 July 1998; revised 21 November 1998)

**Abstract** A refracting-reflecting flat CCD camera with quick  $F$ -ratio and wide field is introduced. The design idea and method are presented. The detailed structure parameters and spot spread diameters are given. The camera covers waveband of 390~ 900 nm and is divided into blue and red channels in 660 nm. Each channel has a  $1024 \times 2048$  CCD detector. The camera has excellent image quality with  $F0.9$ , diagonal field  $22.2^\circ$ .

**Key words** multi-objects fiber spectrograph, optical system, CCD camera.