

用于滤光器光谱调试的光谱仪系统

宋国峰, 艾国祥, 王敬山

沈龙翔, 张斌, 邓元勇, 聂映平

中科院 北京天文台 100080

提要

太阳磁场的光学观测主要是应用谱线的塞曼效应, 通过测量磁敏线分裂的偏振光来实现的。一般采用光谱仪或滤光器两类分光系统, 目前滤光器的应用越来越广泛。北京天文台现在正在运行的用于太阳磁场测量的滤光器就有五台, 其中的多通道滤光器是目前世界上独一无二的此类设备。多通道滤光器及其它的几台滤光器都是万能可调波长的滤光器, 要想获得准确的通带, 必须进行光谱调试。为了搞好光谱检测, 使这样的一些仪器能够尽快用于科学工作, 我们专门改进了一台60cm的望远镜和光谱仪, 使之能够适用于滤光器的光谱检测。本文叙述此望远镜的改进情况和光谱检测及处理的结果。

一、引言

窄带双折射干涉滤光器通常是透过带宽很窄的单色仪。确定这样的单色仪的透过波长和透过轮廓需要单色性很好的光源, 才能准确测量滤光器的光谱特性。

无论从光谱分辨本领, 还是从光量大小而言, 太阳光谱仪无疑都是最好的检测设备, 实际上大多数的滤光器都是在光谱仪上确定透过波长和透过轮廓的。我们要检测的滤光器是目前世界上最复杂的滤光器系统, 最窄的一个通道带宽仅为 0.05\AA , 而且还设计有人眼不敏感的紫外谱线, 因此我们用于滤光器检测的光谱仪系统要求则更特殊一些。

为了检测多通道滤光器等的光谱透过率和透过带轮廓, 我们改进了一台太阳望远镜。此望远镜为一台60cm的反射望远镜, 等值焦距39m, 准直镜成像镜焦距13.7m, 光栅大小为 $11.2\text{cm} \times 8\text{cm}$, 太阳象大小约为33cm。这样的一台望远镜并不适合滤光器的检测, 因此经过约一年时间的反复论证和修改后, 最后的系统基本满足了滤光器检测的需要。使用三年多的时间里, 利用此光谱仪系统先后完成了全日面磁场滤光器、 $H\alpha$ 滤光器、台湾滤光器、多通道滤光器的光谱检测任务, 为这些系统早日投入使用, 发挥了积极的作用。

二、仪器情况及改进设计的考虑

2.1 光谱仪的改进

太阳望远镜是五十年代设计制造的光栅光谱仪系统, 等效光路如图1示。等值焦距39m, 目的是为拍摄太阳的光谱精细结构。

我们的目的是要把这样一个望远镜改进成适合于滤光器检测的光谱仪。首先就要

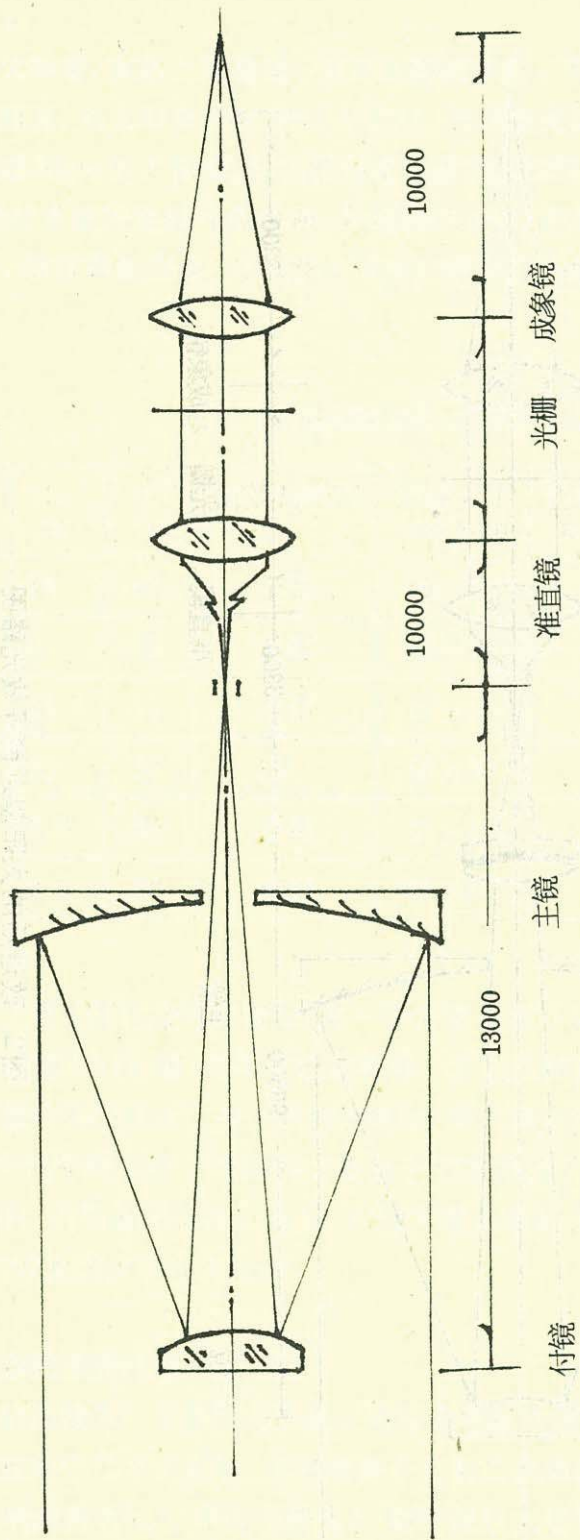


图1 太阳望远镜等效光路图

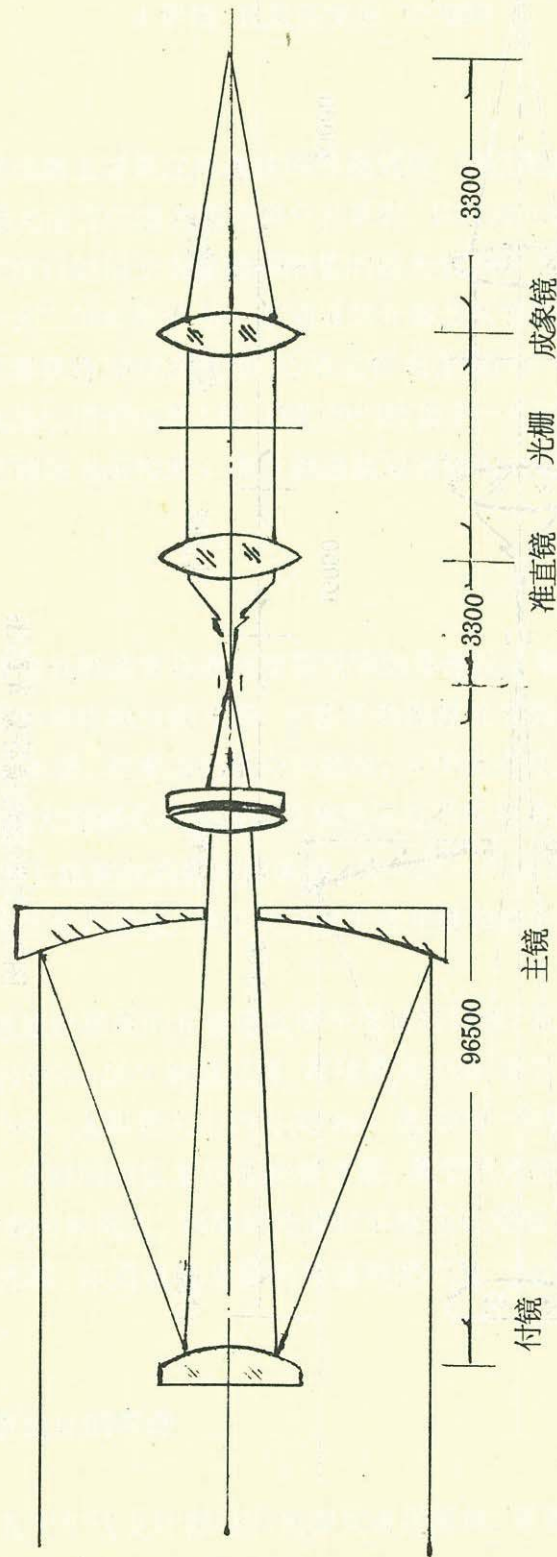


图2 改进后的太阳望远镜等效光路图

从滤光器的特点和对检测设备的特殊要求来考虑。

滤光器的带宽很窄^[1],即使透过率很高,总通光量也很小。通过这样一台仪器后的光能量就比较小,为增加成象屏的照度就要减小太阳象,这是修改太阳望远镜的主要原因。

减小太阳象,实际上就是减小系统的等值焦距。我们通过计算认为对60cm主镜的反射系统而言,当太阳象约为10cm左右时,通过滤光器后象面照度是比较适合CCD测量的。要成10cm的太阳像,则系统等值焦距约为10M左右,这样光强较原光路可提高10倍。但对系统的整体计算表明,各镜面的口径、焦距的不同的选取值,会产生对光谱分辨率、照度等的影响,还需要与所用光栅进行匹配。表1是对几种可选方案的计算结果。

表1. 几种焦距情况下的相对计算结果

序号	f_2 m	D_2 cm	光量利用率	光栅大小 cm × cm	色散 $f \cdot m/d \cos \theta$ mm/A 之比	总亮度比
1	10	60	全部	50 × 50	1	1
2	5	30	全部	25 × 25	1/2	2
3	21.7	10	全部	10 × 10	1/6	6
4	25	10	1/9	10 × 10	1	1/9
5	3.3	30	全部	15 × 15	1/3	3
6	3.3	20	全部	15 × 15	1/3	3

通过上表计算比较可以看出,第一种方案是在不改变于准直镜焦距的情况下的结果。它需要较大的光栅,是不可能采用的。其它几种方案是与这个只换光栅方案的相对情况比较计算的结果。基于同样的理由,第二种方案并不足取。第三种方案色散降低太多,分辨率则下降。第四种方案由于照度降低了9倍,实际上与没有改太阳像大小是一致的,当然也不足取。第五、六种方案基本差不多,但考虑到衍射效应的影响,用30cm的准直镜效果会更好些。

2.2 望远镜的改进计算

太阳望远镜为一卡塞格林系统。将等直焦距改为10M,由于平面反射镜无光焦度,整个系统在外形尺寸计算时,只考虑两个反射二次曲面镜。

设主镜焦距为 f_1' ,等值焦距为 f ,则付镜放大倍数为

$$\beta = f/f_1'$$

由物象关系对付镜有 $l_2'/l_2 = \beta$

又要求成象在狭缝上,则 l_2' 可由实际光路的要求测量得到, l_2 可由上式得出。

下面是几种情况下的计算结果。

表2. 望远镜结构参数的计算结果

序号	f	f_1'	β	l_2	l_2'	Φ	$\Delta = f_1' - l_2'$
1	10	3	10/3	1	3.3	9.4cm	2
2	20	2	10	0.96	9.65	18.8cm	1
3	20	3	20/3	1.45	9.65	18.8cm	1.55
4	28.95	3	9.65	1	9.65	27.2cm	2

实际测量的 l_2' 即为9.65米。由上表计算可见第一种方案就不能得到狭缝处的象。第二种方案中要主、付镜间距离为1米而望远镜主、付镜间距离为2米,如果这样改动,望远镜的其它结构也要改动,根本不足取。第三种,第四种方案,主镜可以不动但太阳象并未缩小多少,而且第三种方案也要改变主、付镜距离,第四种方案是在只要改变付镜双曲线方程而不改变其它参数情况下设计的。但太阳象的大小距10cm的要求相差太大。光量显然不能增加多少。

要想获得10cm太阳象,且简单改变某些结构的设想,在上述几种方案中都难以实现。因此我们另外采用一种方法,将一块焦距2.8m的透镜与原望远镜的物镜系统组合后顺利得到了11cm的太阳象,而望远镜的其它参数并未改变,现在经过使用证明效果还很好。改进后的系统的光学示意图如图2所示。

改进后整个系统参数如下。

主镜: $\Phi = 600$

系统等值焦距: $f = 10000$

太阳象大小: $R_{\odot} = 5.5\text{cm}$

准直镜成象镜焦距: $f_2 = f_3 = 3300$

准直镜成象镜口径: $\Phi_2 = \Phi_3 = 300$

光栅大小: 150×142

光栅常数: $N = 1200$ 线/mm

系统角色散: $d\lambda/d\lambda = 0.4\text{mm}/\text{A}$

分辨能力: $A = MN = 0.03A$

三、光电接收系统

用肉眼定谱线的位置,重复精度非常低,且对窄的谱线也很难看清楚,紫外和红外光谱线人眼又不敏感。滤光器的谱线轮廓的精确测定仅靠眼睛是不能给出定量的数值结果的。

我们在改进光路的同时,设计了CCD接收器和图象采集系统,由于CCD本身的特性,

使得应用图象接收和处理系统不仅能准确获得滤光器的透过带轮廓,且对红外和紫外谱线均有一定的响应。由于固定了CCD靶面和监视器的展开,重复精度也非常好。整个系统框图如图3所示。

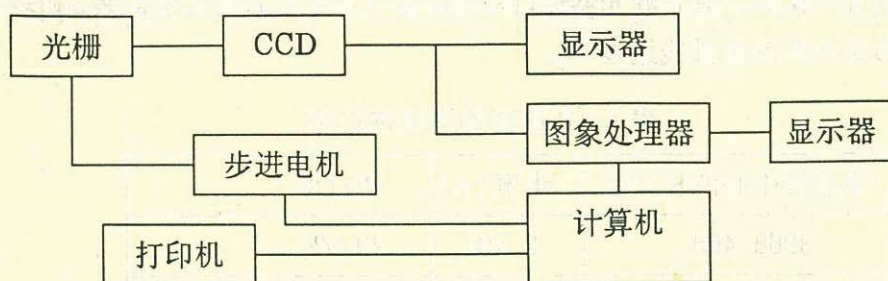


图3. 光电接收和图象处理系统框图

另外加入步进电机驱动光栅旋转,以改变CCD靶面所接收到的光谱区间,从而准确迅速地改变所使用的波长。

根据前面计算所得的角色散值,可以计算得到CCD的整个靶面,一次获得的光谱宽度。由第二节系统参数可知谱图常数为 $1\text{\AA}/0.4\text{mm}$,对1802CCD有 $1\text{\AA}/0.4\text{nm} \times 7.96\text{mm} \approx 20\text{\AA}$ 。即在显示器上可以看到 20\AA 左右光谱区间内的谱线。

四、滤光器透过带的确定

为了使滤光器每个通道的透过带确切地定在某一Frannhofer线上,必须先光谱仪上进行光谱调试。首先在CCD监视器上找到某一太阳谱线,即希望的滤光器通带位置,记下该谱线在监视器上的位置,这是用旋转光栅方法获得要求的太阳谱线。移动CCD的接收位置可以调整此谱线在监视器上的位置,然后把滤光器放置在狭缝前面,这样太阳光通过滤光器照射在狭缝上,然后通过光谱仪分光。在CCD上看到的是光谱仪所得到的光栅和滤光器透过带卷积后的光谱轮廓。在不放入滤光器前置干涉滤光片的时候,使滤光器各级都已完全匹配,应该能看到滤光器最宽一级透过波带为周期的凹槽光谱。而滤光器各级之间不匹配时,则会看到次极大,同时主极大透过带处的透光量也降低了。因此转动滤光器中这一透光路的所有步进电机可以使各晶体级的透过极大轮廓出现在相同的位置上,然后测量出这一极大轮廓位置与前面记录的太阳谱线位置的距离。通过计算把透过带移到太阳谱线的线心,这样可得到滤光器在每条太阳谱线附近的透过带轮廓,并可以记录下步进电机带动的旋转 $1/2$ 波片的位置,从而精确确定滤光器的透过波长。这种方法的光谱精度可达到 $0.01\text{\AA} \sim 0.02\text{\AA}$ 。

五、透过带轮廓的计算

前面介绍了滤光器透过光谱确定的方法和过程。它是调试过程,不能给出定量的结果。要详细计算滤光器的透过带轮廓和滤光器的光谱透过率,则需要用图象处理器将CCD采集的通过滤光器与光谱仪后的数据进行计算和处理,才能得到。

将太阳谱线在有与无滤光器时的透射光的光谱强度相比, 则可获得滤光器在对应谱线的附近的透过带轮廓和对应波长的透过率, 改变滤光器的透过带的中心波长, 可以计算出滤光器对所有波长的极大透过率。图4为用此光谱仪检测的台湾滤光器的各谱线的透过带轮廓。其它滤光器透过带轮廓参考本文集其他文献。表3和表4为通过计算获得的滤光器的各谱线透过率。

表3. 九通道各谱线透过率

透过带中心波长(A)	半宽(A)	透过率
3968.468	2.424	20.0%
4686.750	0.462	12.0%
5173.699	0.092	6%
5247.063	0.048	3%
5250.211	0.048	3%
5576.106	0.057	5.0%
5875.989	0.079	5.5%
6302.806	0.092	6%
6562.806	0.106	7%

表4. 台湾滤光器实际测得的各谱线透过率

透过带中心波长(A)	半宽 $\Delta \lambda$ (A)	透过率
6563.808	0.136	~11.0%
6302.505	0.125	~10.5%
6102.722	0.116	~10.1%
5875.743	0.106	~9.6%
5576.097	0.094	~9.2%
5324.185	0.083	~8.0%
5250.212	0.082	~7.8%
5172.699	0.081	~7.6%
4861.332	0.068	~6.5%
4685.682	0.062	~5.5%

六. 结束语

目前, 这台光谱仪已成功使用了近四年的时间, 为多通道望远镜及其它太阳观测

仪器的研制提供了技术保障。但限于经费等原因,望远镜光谱仪等在自动化方面还很落后,有待进一步的更新改进。

在仪器安装、调试等一系列工作中,得到了北京天文台有关部门的大力支持,特别是怀柔站的李焕荣、刘扬,刘桂林,刘德林等同志大量的辅助工作,在此表示感谢。

The Spectroheliograph for Adjusting the Filter

Guofeng Song, Guoxiang Ai, Jingshan Wang
Longxiang Shen, Bing Zhang, Yuanyong Deng
Xiangming Ye, Yingping Nie
Beijing astronomical Observatory
Chinese Academy of Sciences
Beijing 100080

Abstract. In 1990's, we designed several universal birefringent filters (UBF) for observed the sun. These UBF must be test on spectroheliograph. Therefore we improved a 60cm Diameter telescope, for this proposal. In this paper, an overview of this improving and testing for the telescope and spectroscope is presented along with a summary of its status and some data of the filter.

除表面... 滤光器... 透过带... 轮廓... 6563Å... 6102Å... 5876Å... 5324Å... 5173Å... 4861Å

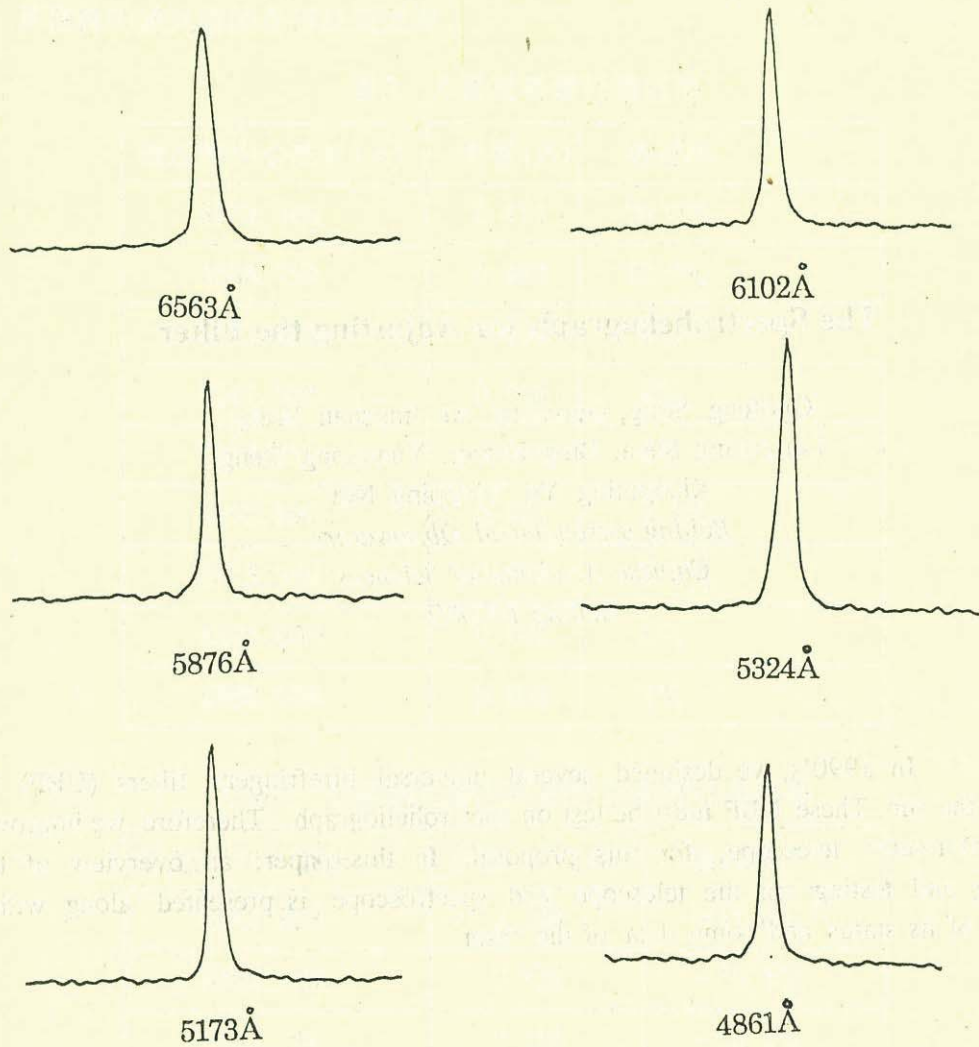


图4. 台湾滤光器各谱线透过带轮廓