ISSN 1002-1582

Optical Technology

光学技术

Guangxue Jishu

增刊 / 1995

1995. 9

光学技术 增刊/1995

目 次

多通道双折射滤光器
——Ⅰ. 原理和视频光谱仪 …… 艾国祥 胡岳风(1)
多通道双折射滤光器
——Ⅱ. 全透射滤光器 …… 艾国祥 胡岳风(9)
多通道双折射滤光器
——Ⅲ. 多通道头及多通道望远镜 …… 艾国祥 胡岳风(14)
太阳多通道望远镜 60cm 镜筒光学系统设计 …… 王亚男(20)
多通道太阳望远镜主光路光学元件的检验
及光学系统调整原理与步骤简述 …… 李德培(31)
多通道太阳磁场望远镜各谱线光量的理论计算 …… 宋国峰 艾国祥(38)
太阳多通道双折射滤光器 …… 王敬山 艾国祥 何凤宝 邓元勇 毛伟军
宋国峰 张 斌 倪厚坤 章海鹰 叶祥明(41)
分裂级滤光器的亮度分布不均匀性 …… 邓元勇 艾国祥 王敬山(67)
高质量 PVA 塑料消色差波片 …… 王敬山 艾国祥 宋国峰(73)
等付里叶系数滤光器中的调节波长装置 …… 王敬山 艾国祥(78)
全反射棱镜在多通道双折射滤光器中的应用 …… 王敬山 艾国祥 邓元勇(84)
九通道双折射滤光器中组合晶体级的检测方法 ……
…… 王敬山 毛伟军 邓元勇 艾国祥(88)
窄带干涉滤光片在双折射滤光器中的使用和处理方法 …… 宋国峰 艾国祥(92)
多通道望远镜中光学零件的镀膜技术 …… 李开寿(97)
望远镜的机械结构设计…… 胡企千 邱敏华 尤 田(100)
赤道叉式太阳望远镜的纬轴平衡方法…… 胡企千(106)
多通道太阳望远镜 60 公分真空主镜筒的设计 …… 杨 还(109)
望远镜传动系统设计…… 薛俊苏(129)
0.1Å 和 Hα 滤光器的结构设计 …… 杨世模(138)
多通道太阳望远镜图像接收处理系统总体设计 ……
…… 张 斌 艾国祥 叶祥明 王敬山 宋国锋 邓元勇 刘 杨(141)
多通道太阳望远镜同步接收系统设计 ……
…… 张 斌 艾国祥 叶祥明 宋国锋 邓元勇(146)
多通道太阳望远镜后端数据处理系统 ……
…… 张 斌 叶祥明 邓元勇 刘 扬 王同江 刘学军(152)
多通道太阳望远镜滤光器恒温控制改进…… 张 斌 艾国祥 王敬山(159)

多通道太阳组合望远镜驱动电控系统设计报告…… 陈新知(167)
多通道滤光器计算机控制系统…… 初瑛仪(174)
多通道太阳望远镜波带调节的电控系统 ……
…… 叶祥明 艾国祥 张 斌 宋国峰 王敬山(179)
太阳多通道望远镜滤光器恒温电控设计…… 陆海天(185)
多通道望远镜的光量测定及CCD的选配 …… 宋国峰 艾国祥(187)
多通道太阳望远镜电控设计研制介绍…… 朱立卿(201)
多通道太阳望远镜的部分调试 ……
…… 宋国峰 艾国祥 王敬山 邓元勇 张 斌 叶祥明(204)
全日面太阳色球磁场望远镜 ……
…… 宋国峰 艾国祥 邓元勇 王敬山 刘 扬 杨世模 胡企千(211)
全日面太阳磁场望远镜 ……
… 宋国峰 艾国祥 邓元勇 王敬山 刘 扬 张 斌 杨世模 胡企千(215)
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(222)
多通道太阳磁场望远镜试观测报告 ……
…… 邓元勇 艾国祥 王敬山 宋国峰 张 斌 叶祥明(231)

多通道双折射滤光器
——Ⅰ. 原理和视频光谱仪

艾国祥　胡岳风
中国科学院北京天文台

摘要

在双折射滤光器中，用组合偏振光束分离器代替传统的偏振片，使滤光器的出射成为振动彼此垂直、光谱彼此互补的两束偏振光，即产生两个通道。当这种级连续使用时，能产生多通道双折射滤光器。当使各通道透过带连续分布于谱线附近光谱区时，能产生新型的视频光谱仪。文中还讨论了视频光谱仪的各种结构特性和优良性能，以及在太阳物理研究中如何防止太阳辐射生热的问题。

一、前言

当前研究太阳物理的光学仪器主要有两大类，一类是以光栅光谱仪为代表的光谱仪，另一类是双折射滤光器为代表的单色仪。这两类仪器都有了较长的历史，在太阳物理研究中发挥了巨大的作用，目前都在不断发展和完善。两类仪器都有其独到之处，但也存在明显的不足。光谱仪可获得很高光谱分辨率(10^6)的很宽范围的同时光谱，但同时可观测的视场只是一条狭缝，不能同时获得视面光谱。法国的Mein[1]进行了多狭缝光谱仪实验，以图获得稍大一点的视场。另一类扩大视场的办法是[2]将视面上的点光源由光导纤维引入狭缝进行光谱观测，这种办法不能用于视面天体，如太阳。与光谱仪正相反，以滤光器为代表的单色器能同时获得视面天体单色像，但不能获得同时的光谱。最近一个时期制成的万能双折射滤光器[3]，通过调节波长装置，在可见光区仅能获得不同时的光谱分布。寻找一种新仪器能同时具备以上两类仪器的优点是太阳物理研究的迫切需要，也是仪器向前发展的方向。

本文发展了一种新系统——多通道双折射滤光器[4]。通过使用组合偏振光束分离器代替原有的偏振片，使滤光器一级的出射分为彼此互补的两束凹槽光谱以实现多通道观测。在此基础上提出视频光谱的设想，并探讨了视频光谱仪的有关形式及优良性能。

二、多通道双折射滤光器原理

1. 偏振光束分离器

早在1974年，Banning[5]发明一种偏振光束分离器(简称偏光器)，利用Brewster角反射原理，选择多层膜膜层，当层数足够多时，反射和透射的光束差不多由交叉的线偏振光组成，如图1所示，其S和P成份为交叉的线偏振光。此后，进行了一系列研究，改进了全色性能、视场、透过率及材料稳定性等[6-8]。

目前这类偏光器的偏振度一般为99%以上，好的可达99.5%，视场可用于焦比8:1的会聚光中，工作波长范围可达3000Å左右，膜层数一般为8－10层，光的吸收一般小于10%，优质的可小于3%，透射性能比偏振片要好，偏振片一般吸收15%左右。

2. 组合偏振光束分离器（简称组偏器）

在传统的双折射滤光器中[9,10]使用偏振片，它只让轴向线偏振光通过，而把垂直方向的光吸收转化为有害的热量。与偏振片不同，偏光器利用两束光，使光信息率提高一倍。但它虽已发明进四十年却从未有滤光器使用过它。主要因为：偏振度只有99%，达不到滤光器所要求的99.9%；体积大，价格稍高，所以在双折射滤光器的使用中长期无人问津。为了克服它偏振度低的特点，我们设计了组偏器，如图2所示。在其两束光之后附加两片低偏振度的偏振片，其偏振度～90%，若偏光器偏振度为99%，则组偏器的偏振度为：

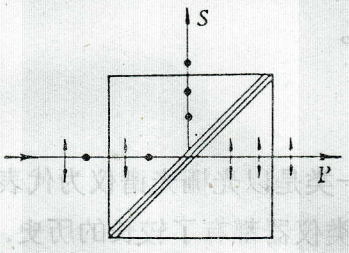


图1. 偏振棱镜

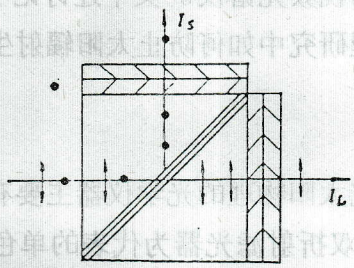


图2. 组合偏振光束分离器

$$P=1-(1-0.99)\times(1-0.9)=0.999$$

就可满足滤光器要求的99.9%。由于偏振度90%的偏振片透过可达95%以上，所以组偏器的透过率在85%至92%之间，比单独的偏振片要稍高些。随着多层膜技术的提高，可望达到更高的透过率。

3. 多通道滤光器原理

在单级的Lyot[9]滤光器中，当$P_2 \parallel P_1$时，其透过率为：$\tau_{\parallel}=\cos^2\pi\frac{\mu d}{\lambda}$，其中中$\mu$为双折射率，d为厚度。

当$P_2 \perp P_1$时，透过率为：$\tau_{\perp}=\sin^2\pi\frac{\mu d}{\lambda}$，这两个透过率是互补的，即$\tau_{\parallel}+\tau_{\perp}\equiv 1$。

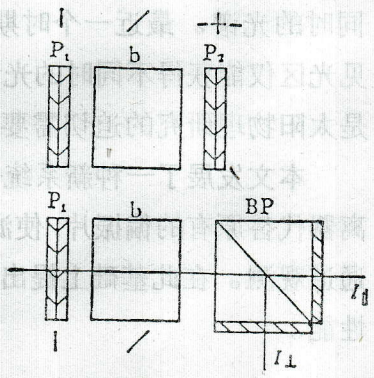


图3. 多通道滤光器与传统滤光器差别

由于同一时刻偏振片只能取一种状态，所以只能得到一束出射光，形成单通道。当出射偏振器采用组偏器时，如图3所示，可以得到光谱上互补的两束光$I_{\parallel}$和$I_{\perp}$，形成了二通道。下面用三级多通道滤光器的结构图（图4）和光谱透过轮廓图（图5）来进一步展示其工作原理。从图5不难看出，八个通道连续地排列在一段光谱之中，通过相应的滤光片（在传统双折射滤光器中一般称为前置滤光片，但在多通道中一般放在

各通道之后，也可称后置滤光片），以实现各通道的隔离。与传统双折射滤光器不同，实现通道分离，必须将干涉级数高的级用在光路的前部，否则得不到匹配的各个单通道滤光器，各通道不能都获得峰值透过，这个特点是实现多通道滤光器的构思关键，也是它区别于传统滤光器的主要结构特征。

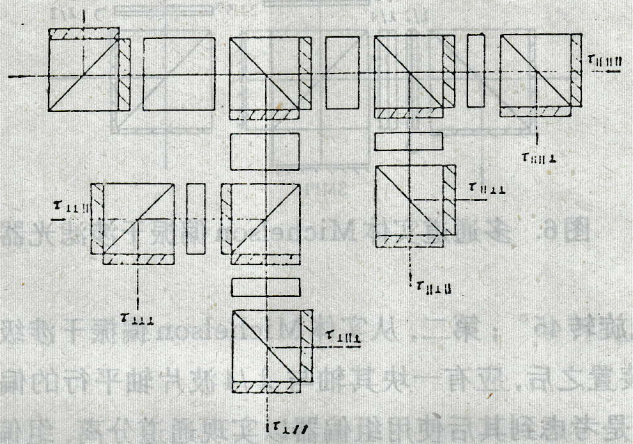


图4. 八通道结构示意图

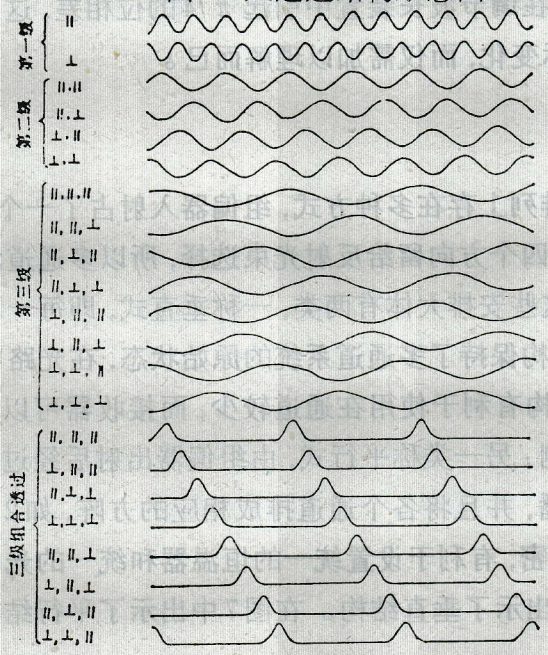


图5. 八通道出射轮廓图

4. 多通道实体Michelson偏振干涉滤光器

人们把Lyot-öhman滤光器称为双折射滤光器，这是根据所用材料而言的，从原理上讲，叫偏振干涉滤光器也许更为合适。早在1949年Evans[10]就提出过用两束光的偏振干涉实现更窄透带的设想。此设想在改进之后为Title和Ramsey[11]所实现，这种系统被称为实体Michelson偏振干涉滤光器，它的出现使滤光器的光谱分辨率有可能达到和超过光栅光谱仪，达到0.01Å左右，或≥60万左右。在实体Michelson系统中，同样可以实现多通道。如图6所示。这个系统与双折射系统原则上相同，但有两点差别：第一，从组偏器出来，进入实体Michelson偏振干涉级的线偏振光需要旋转45°角，以适应实体Michelson偏振干涉级的方位需要。我们加了一片方位为22.5°的$\frac{\lambda}{2}$

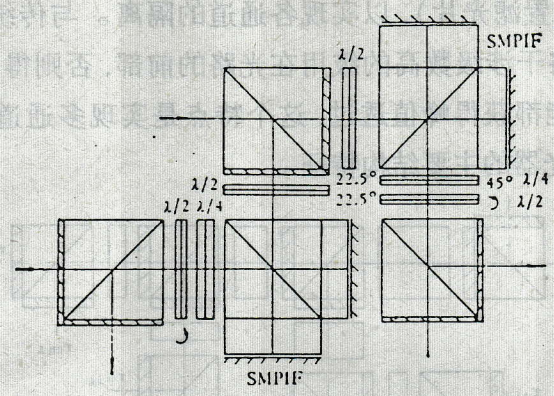


图6. 多通道实体Michelson偏振干涉滤光器

波片，使线偏振光旋转45°；第二，从实体Michelson偏振干涉级出射的光，经过 $\lambda/4$、$\lambda/2$调节波长装置之后，应有一块其轴与 $\lambda/4$ 波片轴平行的偏振器相接，如Lyot滤光器中那样，也是考虑到其后使用组偏器以实现通道分离，组偏器出射线偏振光方向取0° 和90° 方向，这在调节波长装置中引起 $\pi/4$ 的位相差，这个问题在调节波长装置中并不出现任何实际变化，而仅需加以理解而已。

5. 垂直与平行排列模式

多通道光束走向和排列上存在多种方式，组偏器入射占了一个方向，平行出射占一个方向，还有上下左右四个方向留给反射光束选择，所以多通道滤光器可根据需要作多种结构上的安排。这些安排大体有两类，一称垂直式，即每一块组偏器分出的两个光束彼此垂直，这种结构保持了多通道系统的原始状态，在光路中不需要再增光学附件，结构简单，这种结构有利于使用在通道较少，而接收器可以分立的情况下，如少数几个通道的照相观测；另一类称平行式，由组偏器出射后经过全反射棱镜，最后一律沿望远镜主光路传播，并且将各个通道排成相应的方阵，如2×2，3×3，4×4等。这种结构使滤光器结构紧密，有利于设置统一的恒温器和统一的光电接收器，如CCD块阵等。在图2、3、4中均出示了垂直结构。在图7中出示了平行结构，这是2×2阵的立体结构。

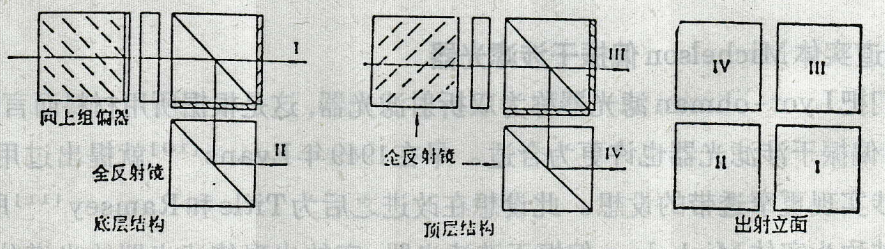


图7. 平行结构示意图

三、视频光谱仪

本节主要采用多通道滤光器的原理，发展一种视频光谱仪，并讨论它的各种形式

及有关特性。

1. 多通道与组偏器的数值关系

从图5中不难看出，多通道的数目决定于组偏器的数目，有下面的关系

$$M=2^N$$

其中N为滤光器级数，当N＝1，2，3…11，12时，M＝2，4，8…2048，4096等。组偏器数为M－1。这里要说明一点，在所有组偏器中至于最前面的第一块组偏器，它的功能与其后各块稍有差别，它只把自然光分为彼此垂直的两束线偏振光，即起到起偏器的功能，而其余的组偏器，它的出射光不仅在方向上是垂直正交的，而且所产生的凹槽光谱也是互补的，因而所产生的两个通道所孤立的光谱范围不是独立的。第一块组偏器只取分光束作用，而其后的凹槽光谱完全可以是独立的，即这两束光将独立构成自己的滤光器系统。在下篇文章中将介绍利用这一特性构成的全透射滤光器。

2. 连续视频光谱仪

在引言中提到了视频光谱仪的重要性和迫切性。采用多通道滤光器系统很容易实现它。如我们可以作成64×64＝4096的通道。其第一级的带宽约为1Å，将这些通道连续地排列在λ4000－7000Å的可见光范围上，就可实现连续视频光谱仪。双折射滤光器（特别是宽场的）具有很大的视场，Fabry-Perot系统也无法相比[12]。加上它的中心波长定位严格，并且长期稳定，如果每级采用调节波长装置将构成极其优良的视频连续光谱仪。

3. 多波段视频光谱仪

对于太阳物理研究来说，常常并不需要作连续的光谱观测，而仅仅需要在指定的Fraunhofer线及其附近作多谱线（多波段）观测，像在传统光栅光谱仪中，常用多波段光谱仪，这是大家十分熟悉的。多通道滤光器的带宽设计若为0.01Å，多通道数仍取4096个，选择10条谱线观测。根据谱线宽度及大体的位移范围，可确定每个波段（各条谱线）需要使用的通道数。如Hα可能要用256个通道，但λ5250磁敏线可能有48个通道就足够了，如图8所示。

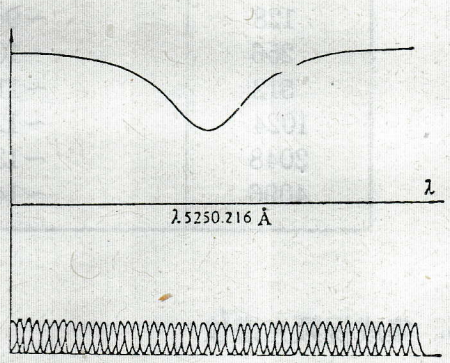


图8. 多波段中一个波段分布图

4. 多通道数与双折射晶体用量的关系

众多的通道会带来令人吃惊数目的窄带滤光器，令人望而生畏。幸运的是，恰恰是多通道滤光器的结构要求回答了这个难题，它要求把厚的晶体排在光路的前部，而把较薄的级排在各分支光路上，如图4和图5所示。这种排列使最厚级为所有通道所公用，因而大大减少了用材所引起的压力。双折射滤光器的最厚级厚度若为d，那么整

个滤光器用材为$2d-\frac{d}{2^{N-1}}$。一般考虑N级数较大，大体用材是2d。在一个双通道滤光器中，最厚级用材仍然是d，两个分开的滤光器各自用材大体是2d，所以共用材料3d。一个4通道滤光器，最厚级用材d，两个次厚级用材为$2\times\frac{d}{2}=d$，4个次次厚级用材为$4\times\frac{d}{4}=d$，其后4个更低的级次用材大体上为$4\times\frac{d}{4}=d$，所以4通道用才共计为4d。表1列出了各通道的用材量，不难看出，通道数是以2为乘积的几何级数增加，而用材量是以d增加的算术级数。另外值得强调的是，贵重的难于加工的冰洲石级用材很少，而大部分用材份额为较便宜的容易加工的石英所占据，而且这些石英片在大多数情况下（即采用调节波长装置情况下）完全可以加工成等厚的片子，这样的加工可以成批进行。另一面也应看到，虽然双折射级用料量不多，但组偏器、调节波长装置的用量很大。虽然这些元件并不昂贵，但也的确增加了相当的加工与调试工作量。

表1. 多通道滤光器用材量

通 道 数	双折射材料用量	与 单 通 道 比
1	~2d	1
2	~3d	1.5
4	~4d	2
8	~5d	2.5
16	~6d	3
32	~7d	3.5
64	~8d	4
128	~9d	4.5
256	~10d	5
512	~11d	5.5
1024	~12d	6
2048	~13d	6.5
4096	~14d	7

5. 集成视频光谱仪

双折射滤光器具有视场大的突出优点，多通道滤光器解决了同时获视面光谱的可能性，实体Michelson偏振干涉级使滤光器的光谱分辨率有提高到0.01Å的可能性。随着微电子学、固体电光器件的发展，CCD和Reticon，视面多元接收器已较普遍地被应用于天文观测领域。我们可以综合这些技术，设想成一种集成视频多通道光谱仪，以CCD或Reticon器件作为接收器，如$16\times16=256$通道，$32\times32=1024$，$64\times64=4096$通道，每一个器件占面积为$1\times1cm^2$左右。这些器件统一安排在一个致冷器或杜瓦瓶中，用统一的后继处理电路实现数字化，并送入计算机。很可能这意味着出现一代新的光谱仪，它的性能明显优于传统的光栅光谱仪和传统的单通道双折射滤光器。它很可能促进太阳物理，甚至天体物理研究的进一步发展。也许有人会问，这样多的CCD可能吗？只要看看近十年来计算机内存贮器及速度的变化，就应有信心，能实现这一

重要设计，即使在目前作256个CCD，估计值200万美元。这与一些大型天文仪器的价值相比仍然是一个具有实现可能的数目。

至于各通道的差异所引起的光源的同一性问题，只是仪器的系统差，完全可用计算机来做系统校正。

6. 解决强光吸收引起的发热问题

对强光源太阳光的少量吸收，都会使双折射晶体和实体Michelson偏振干涉级升温和引起温度不均匀。在传统Lyot-öhman滤光器中，最温敏的最厚级一般放置在滤光器的中后部。由于多级次的滤光作用，到这些级时，太阳辐射流量已经大大减弱。对这种辐射的少量吸收所引起的升温已到可忽略的程度。视频光谱仪要求将最厚的级置于最前面，这会引起较严重的问题。对冰洲石而言，波带随温度位移约为 -0.3Å/1℃，一个0.1Å带宽的滤光器，1/100度的升温都会引起1/30带宽的位移。吸收太阳光引起的升温受光照强度影响，而光照强度又受天气影响、太阳的时角以及天顶角有关，这些因素随时都在变化，因而引起波带位置的漂移。对实体Michelson干涉级来说，情况有些不同，这种级有很强的抗温敏性能[13]，但是特别害怕器件内部的温度不均匀性。强太阳光照射在器件的局部位置上，微小的吸光都会引起温度的不均匀性，它将引起器件通光孔径上长度和折射率的微小变化。这种变化只要超过1/100波长，就将严重影响固体Michelson级的性能，甚至使它失去作用。

当多通道视频光谱仪应用于太阳时，特别是应用于大口径太阳望远镜系统时，应十分注意由吸收引起的升温和升温不均匀问题。我们考虑下列措施将有利于改善这个问题的处境。

(1) 减小太阳观测区域为4′ ×6′ 或者3′ ×4′，在滤光器前的焦平面上加光栏来作到这点，这样进入滤光器的光量将相应减少为 ~1/40或 ~1/80，这种区域的减少与滤光器可达到的通光孔径以及CCD和Reticon目前的容量是相当的。

(2) 根据视频光谱仪的工作波长范围，先设置前置干涉滤光片，去掉不用的光谱范围，如可见光，只要 λ 3800至7000Å区域，则用干涉滤光片去掉 λ <3800Å和 λ >7000Å的光谱。

(3) 根据多波段视频光谱仪所选定的谱线，在滤光器的前面一级或几级设置普通的石英级，先去掉不用的光谱范围，然后再用多通道方案。

(4) 在第一块组偏器的出射两翼上，分别设置分区干涉滤光片，使两束光各自负担所观测的光谱区。如图2中I_L透过 λ 5500至7000Å的范围，I_S透过 λ 3800至5500Å的范围。

(5) 尽量吸收小的玻璃和双折射材料，实体Michelson级两臂上的玻璃吸收情况最好匹配，使在通光面上尽量产生接近的温度分布。

(6) 设置多通道头，先用带宽较宽的石英级隔离所用谱线，而后再研究各谱线光谱，这将在下篇中评述。

我们希望听到广大研究工作者者改善吸收发热提出更多更好的建议。

参考文献

[1] Mein, P., Solar Phys., 54 (1977), 45–51.

[2] William, D. Heacox, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 95 (1983), 591.

[3] Beckers, J. M., Appl. Opt., 14 (1975), 2061.

[4] Ai Guoxiang and Hu Yuefeng, Multichannel Birefringent Filter, A report in MSFC Workshop on Solar Vector Magnetic Fields, in May, 1984.

[5] Banning, B., J. Opt. Soc. Amer., 37 (1974), 729.

[6] Tarner, A. F. and Baumeister, P. W., Appl. Opt., 5 (1966), 69.

[7] Vere, J. T., Opt. Acta., 11 (1964), 315

[8] Chapman, P. B., Downs, M. J. and King, R. T., Appl. Opt., 8 (1969), 1965.

[9] Lyot, B., Ann. Astrophys., 7 (1944), 31.

[10] Evns, J. W., J. Opt. Soc. Amer., 39 (1949), 229.

[11] Title, A. M. and Ramsey, H. E., Appl. Opt., 19 (1980), 2046.

[12] Title, A. M., Research on Spectroscopic Imaging, Vol. 1, in LMSC -D674593, April, 1979.

多通道双折射滤光器
——II. 全透射滤光器

艾国祥　胡岳风
中国科学院北京天文台

摘要

利用多通道折射滤光器的原理，在由偏振光束分离器分开的两束光中，采用完全相同的单通道滤光器，再经最后检偏器将两束已经滤光的光汇合，而获得了全透射滤光器。这一设计上的改进，去掉了传统双折射滤光器一开始就去掉一半光能的缺点，这对恒星和星系单色观测至关重要。本文专门建议了一个在一个CCD接收器情况下，即可起全透射滤光器作用，又可由两通道获得不同波长两个单色星像的方法。

同样利用四通道、八通道……等，可以设计双通道和四通道……等全透射双折射滤光器。

一、前言

双折射滤光器作为视面单色器，具有很多的优点，视场大、带宽窄、透带位置稳定、调节方便、成像质量高等。由于双折射滤光器采用偏振光的干涉原理，与Fabry-Perot的膜层干涉不同，它只有在偏振光情况下才能工作，所以必须采用起偏振器，如人造偏振片等，一开始它就把自然光去掉了一半，这样使它的透过率一下子去掉了50%。虽然在窄带情况下它的透过率与Fabry－Perot相当（如0.5Å作H α 巡视的Daystar滤光器的透过率约为10%）。但带宽较宽时，如几十Å，它的透过率明显不如Fabry－Perot或干涉滤光片（如20Å，双折射滤光器仅能达到25-30%左右，而干涉滤光片可达60-70%）。在太阳单色光观测中，双折射滤光器一直处于领先地位，但在恒星和星系领域里几乎无人问津，我们想这与恒星观测领域惜光如命有关。从事恒星观测的天体物理学家，不愿意一下子就去掉50%的光，他们希望能获得 λ 4000-7000Å 连续可调，带宽约为20Å的滤光器，透过率越高越好，争取达到60%左右。这样高的透过率在传统双折射滤光器中是完全不可能的，即使没有任何吸收，透过率也只能达到50%。在多通道滤光器发明之后，我们采用多通道原理[1]，提出了全透射滤光器的方案，这个方案有可能达到60%左右的透过率，至少比最高透过率的双折射滤光器高出一倍。有一点说明，这里称呼的“全透射”的意义，限定在两方面，第一，它与传统的双折射滤光器一下子去掉50%的光相比，它是利用全部自然光；第二，当忽略吸收时，它可达到全透射。

本文继第一篇之后，主要讨论全透射滤光器的工作原理，它的各种型式以及一项具体应用建议。

二、全透射滤光器原理

在第一篇文章第三节第一段中指出，在多通道滤光器中，同样的组偏器放在不同位置作用稍有不同。放在第一片位置上的起起偏器作用，将自然光分为两束互相垂直的偏振光。而后面的的组偏器，不仅分出两束互相垂直的偏振光，而且这两束光的光谱也是互补的，是互相有关的。我们采用如图1的结构，由两通道滤光器组成全透射滤光器。BP_1和BP_2是组偏器，b_{1-6}是双折射晶体，晶轴成45°，P为一般偏振片，AR是全反射棱镜，这是一个双通道系统。在两个独立的滤光器中，所有元器件都是相同的。在起偏器BP_1中，互相垂直振动的线偏振光，在最后的检偏器BP_2中又汇合而成为一束自然光，这个系统在光路上是完全对称的。把滤光器的方向倒转180°，仍是同一个滤光器。我们这样排列，主要是使原理的说明变得清晰。这样排列，在弱光中吸收光所引起的发热是十分微小的，所以可以采用上面的对称排列方法。另外各晶体，b_1与b_1'……b_6与b_6'都是严格相同的，加工也较方便。事实上，从理论上和实际上都不要求作对称排列，除了尺寸配合，需要b_1和b_1'放在原位置之外，其他各级完全可以平行地排列在两个平行的通道里，如图2所示。也可以随意作出各种认为有必要的排列。平行排列的两个好处是：1. 如果采用调节波长装置，两束光可以只用一套转动输出件，而省去一套。2. 在强光照射下，两束光中各对应级次受热情况较为接近，各级在恒温槽中的情况和位置也较为接近。

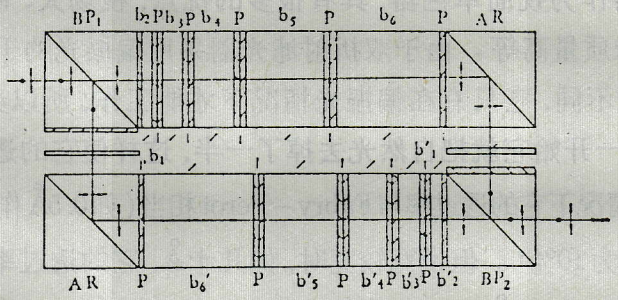


图1. 全透射滤光器原理图

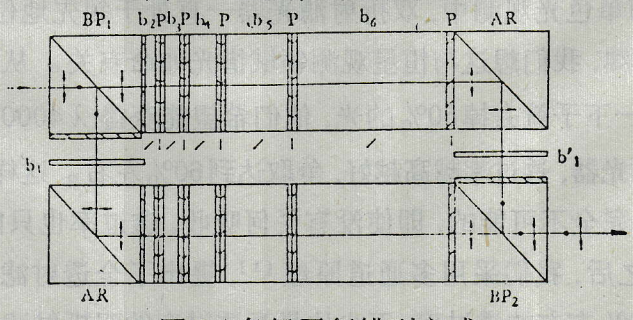
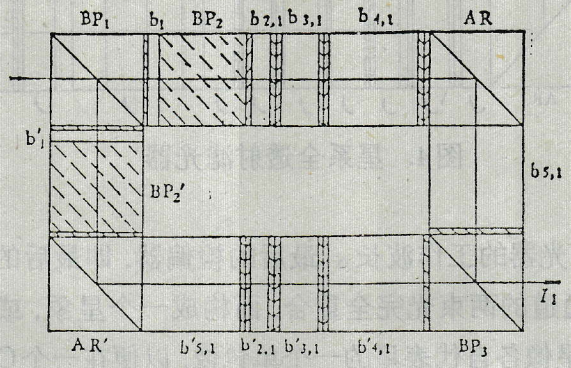


图2. 各级平行排列方式

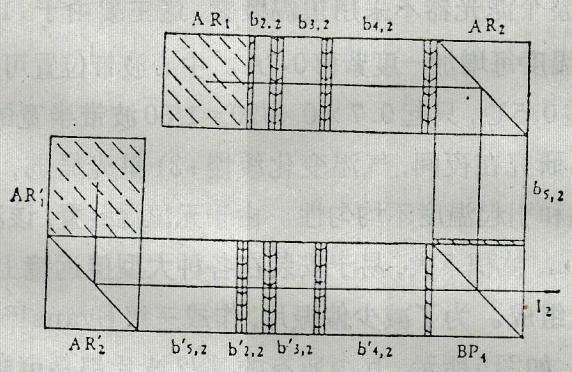
三、多通道全透射滤光器

在上节已叙述了由两个完全相同的滤光器构成全透射滤光器的情况，上节的全透射滤光器只适应于产生一个单色像，属于全透射单通道滤光器。下面讨论全透射多通道滤光器。以两通道为例。图3示出了它的结构图。在上层平面图中BP_2和BP_2'都是向

下反射的组偏器，除了增加这两块组偏器，其他光路都与图2的单通道全透射滤光器相同。由BP_3出射的I_1，是第一个全透射滤光器通道的光。在下层的平面图中，AR_1和$AR'_1{}'$全反射棱镜将BP_2和BP_2'向下反射的光引向第二平面，即下层平面，在下层平面上的光路与上层平面基本相同，最后经BP_4出射的I_2光，是另一通道的全透射滤光器的出射光。从上面的简单结构不难看出，可以形成任一通道的全透射滤光器，不过将更多地使用组偏器和全反射棱镜。具体设计时要小心仔细地排列，以得到紧凑的滤光器。



a. 上层平面图



b. 下层平面图

图3. 双通道全透射滤光器示意图

四、星系全透射滤光器

这里构思了一个星系全透射滤光器。恒星和星系观测惜光如命，采用全透射系统是理所当然的。全透射滤光器的发明，增强了双折射滤光器同Fabry－Perot滤光器的竞争力量。

这个滤光器的要求是：带宽20Å左右（在5500Å时），从λ 4000–7000Å连续可调，中心波长定准精度0.1Å左右，透过率要求达到60%左右。希望滤光器有两种工作状态，一是全透射只在一个波长上工作；二是全透射的两个通道具有单独的调波长装置，各自通过不同波长，然后在最后的起检偏器作用的组偏器中，两束光汇合。但离开一个很小的角度，此角要稍稍大于星像的大小，这样可以采用CCD接收器来获得一个星象的两波段测光，从而很容易确定星系电离状态等物理参数。图4是根据这些要求而作的一个初步设计。这个全透射滤光器由两个完全相同的通道组成，但每一个通道可以独立地确定自己的工作波长，各自的干涉滤光片I和I′可能作适当的转动而改变自己

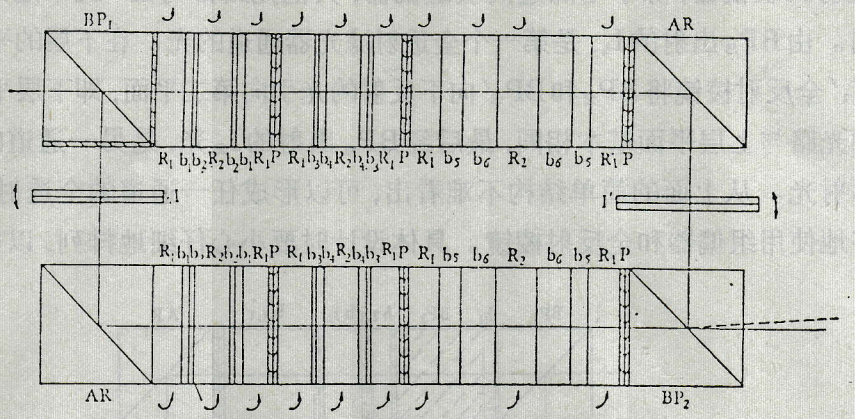


图4. 星系全透射滤光器

的中心波长，以适应滤光器的工作波长。最后的检偏器，即最后的组偏器BP_2可作微小的转动，或者使两通道的两束光完全重合，而构成一个星象，或稍作转动产生两个不重合的星像。每个星像各自代表星的一个单色像，以便在一个CCD接收器中能获得一个星的两个单色像，整个滤光器不采用恒温装置，这主要由于：1) 滤光器带宽较宽，约20Å左右，而石英级温度每增加一度紫移0.7Å。中心波带位置可以作系统温差改正，若观测室温度记录误差0.5℃，只起$0.7\times0.5/20=1/60$波带半宽的移动，这对星系单色像影响甚微；2) 星系研究在夜间，气温变化缓慢；3) 星光微弱，不会由于少量的光吸收引起晶体明显升温和引起温度不均匀性。由于无恒温装置，该滤光器长约160mm，宽约100mm，高约50mm，体积不大，易于安装在各种大型望远镜上使用。这个滤光器每个通道由六级简单级组成。为了减少偏振片，作成三级Evans[2]级。每级Evans级都是可以调节波长的。如图5所示，其中所有的$\lambda/2$波片都是可旋转的，用于调节中

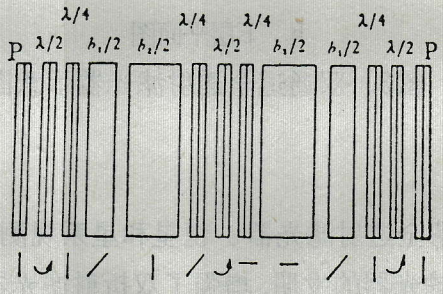


图5. 可调波长Evans级

心波长。偏振片P可由组偏器代替。作成Evans级可省三片偏振片，使透过率明显提高。在本系统中只用两块组偏器，两块偏振片。组偏器透过0.93，偏振片透过0.89，则偏振器件的透过率可达0.68，加上干涉滤光片吸收和玻璃及材料吸收约占12%左右，估计透过率为0.60左右。在Evans级中最厚的石英级，在λ5500Å时，带宽约20Å，干涉级数约250级，由滤光器带宽公式[2]

$$\Delta\lambda=\frac{1}{2}\cdot\frac{\lambda^2}{\mu d}\cdot\left(\frac{\lambda}{\mu}\cdot\frac{\mu}{\lambda}-1\right)^{-1} \qquad (1)$$

$\mu(\lambda 5500)=0.00917$, $(\frac{\lambda}{\mu}\cdot\frac{\mu}{\lambda}-1)^{-1}\approx 0.911$, 当 $\Delta\lambda=20$Å时, d=15mm。最薄的石英级厚度 $d=15mm/2^5=0.47mm$, 其带半宽 $\Delta\lambda_1=\Delta\lambda_6\times 2=640$Å, 全宽达1280Å, 所以干涉滤光片的半宽可以做得宽达1280Å, 这样宽的干涉滤光片只要稍作转动, 就可工作在 λ4000－7000Å的波长上, 并保持很高的透过率, 根据Lyot I 型宽视场级公式[2]

$$n=n_o\left(1+\frac{\psi^2}{4\omega}\left(\frac{1}{\varepsilon}-\frac{1}{\omega}\right)\right),$$

$$n-n_o=n_o\frac{\psi^2}{4\omega}\left(\frac{1}{\varepsilon}-\frac{1}{\omega}\right)=n_o\frac{\psi^2\mu}{4\omega^2\varepsilon} \qquad (2)$$

这里 n_o 是中心光线干涉级数, 对本滤光器 n=250, n 是光线偏离中心光线 ψ 角(弧度)时的干涉级数。对于石英 $\omega=1.546$, $\varepsilon=1.555$。在双折射滤光器中, 一般定义当 $n-n_o=\Delta n=0.1$ 时的 ψ 角为半视场, 由上述数据算得

$$2\psi=2\times 3437.'75\sqrt{\frac{4\cdot(1.546)^2\cdot 1.555\cdot 0.1}{250\cdot 0.00917}}$$

$$=6875.5\cdot\sqrt{0.648449}$$

$$=5536.'59=92.^\circ 3$$

这样算出的视场非常大, 由于在(2)式中忽略了 ψ 的四次项, 所以对大角度所算出的视场是夸大了的。从最保守的估计来看, 用到9° 左右的角视场是没有任何问题的, 因此把这种滤光器使用在焦比7:1的望远镜中是完全没有问题的。

在本工作中, 对于陈建生与邹振隆同志的有关建议和讨论特致谢意。

参考文献

[1] 艾国祥, 胡岳风, 中国科学A辑, 1986, 8: 889-896.

[2] Evans, J. W., J. Opt., Soc., Amer., 39 (1949), 229.

多通道双折射滤光器

——Ⅲ. 多通道头及多通道望远镜

艾国祥　胡岳风

中国科学院北京天文台

摘要

本文讨论多通道滤光器的第三种型式——带多通道头的滤光器。在多通道头中设置较初级的滤光器级次，分出各所需要的通道，使指定的工作谱线分别通过各通道，然后分别在各个通道之后配置高级次的滤光级，构成整个多通道滤光器。这一结构：1) 不需要将最热敏的最厚级置于滤光器最前部，避免了温敏引起的波带位置不稳定；2) 各通道可根据工作需要各自选择带宽；3) 有利于在其后配置众多的Fabry-Perot和Daystar等各种单通道滤光器；4) 可将天文台中现存的所有滤光器经过多通道头组合在一起，在一个镜筒中实现同时的多通道观测。

本文还讨论了与多通道滤光器相配合的多通道太阳望远镜的一些结构特点和设计方法。

一、前言

多通道滤光器从功能和类型来说可分三类：第一类是视频光谱仪[1]；第二类是全透射双折射滤光器[2]；本文主要叙述第三类　——带多通道头的滤光器的结构特点和设计方法。根据它的特点，提出了它的一些有重要价值的应用。

与多通道滤光器相匹配的太阳望远镜，产生了一些新的特点，与此相应，在多通道太阳望远镜的设计上提出了一些见解。

二、多通道头

太阳物理的研究有时并不需要把整个可见光谱区全部记录下来，而仅仅需要了解几条或十余条谱线。多波段视频光谱仪是可服务于这种分立谱线的研究的。这里讨论的多通道头也是服务于这一目的的，但这种系统的结构不同，因此具有不同的特性和使用价值。下面介绍多通道头。图1是一个四通道头的结构。多通道头中的第一块组偏镜BP1[1]将入射光分为彼此垂直的线偏振光，它起偏振镜作用，这两束光可以各自组成光谱上彼此独立的多通道系统。图1中只画了与入射光平行的光束，由它分成四通道的结构。b_1是双折射晶体，在多通道头中，通常为石英，其干涉级数较低，一般为几十级至百余级，因而对温度引起的波带相对位移较不敏感。由BP_2分出光谱上互补的两光束，平行束经b_2和BP_3，再分出两光束Ⅰ和Ⅱ；垂直束经b_2'和P再形成一级简单级，其后经b_3和BP_4再分出两光束Ⅲ和Ⅳ，总共构成分立的四个通道，可以分配于所需的四个波长上工作。多通道头与多波段视频光谱仪同属多通道双折射滤光器，但在结构上是不同的。多波段视频光谱仪中，最厚级是所有通道共用的，在最前部，

其后各级依次减薄。而多通道头中，第一级是较薄的级次，其后的级次较自由灵活，在多通道头之后的各个通道中的级次更可以自由地处理。

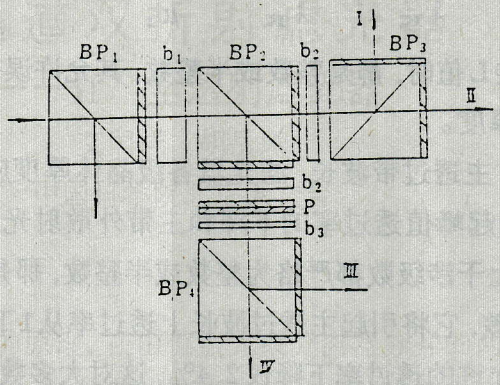


图1. 四通道头示意图

下面介绍一个四通道头的具体例子，选择的太阳谱线波长为 λ6563Å，λ6302Å，λ6102Å和 λ5889Å。当工作温度45℃时，由澳大利亚和美国提供的双折射率数据[3,4]计算得到，当对 λ6563Å的干涉级数为80.5时，λ6302，λ6102，λ5889分别为84，87和90.5。以此确定图1中b_1的厚度。经BP_2干涉级数为整数的波长 λ6302和 λ6102沿平行方向出射，干涉级数为半整数的波长，λ6563和 λ5889沿垂直方向出射。在平行方向之后，再设置b_1，其厚度为$b_1/1$，对 λ6302的干涉级数为42，对 λ6102的干涉级数为43.5，所以经BP_3，平行方向出射的是 λ6302，垂直方向出射的是 λ6102。在组偏镜BP_2的垂直方向，置b_2'，其厚度为$b_1/2$减掉 λ/4的厚度（可以通过调节波长装置实现），这时 λ6563和 λ5889的干涉级数分别为40和45，它都在平行光束中通过，所以在它后面仅需放置一片平行方向的偏振片P即可。在P之后再置b_3，其厚度大体上为$b_2'/2$，它对 λ6563和 λ5889的干涉级数分别为20和22.5，其后置组偏镜BP_4，λ6563沿平行出射，λ5889沿垂直出射。在图1中 λ6302沿I出射，λ6102、λ6563和 λ5889分别沿 II、III、IV出射。在这四束光被分开之后，不难匹配级次较高的双折射滤光器。

在定性地讨论多通道头之后，下面讨论如何定量确定多通道头中各级晶体厚度的方法。这里首先应说明的两点是：第一块组偏镜所分开的两束光，在光谱关系上是彼此独立的，所以每一束光中的通道可以独立设计。另外为了紧凑和对称，应尽可能使每一束光中的通道数相等，每一个通道所经历的组偏镜相等，要满足这些条件，每束光中通道数宜用偶数，对整个滤光器来说宜用4的倍数。

下面讨论第一组偏镜中的一束光中的通道设计。设所需波长为 λ_1，λ_2，λ_3，…λ_i，i为通道数，如上所述，i最好为偶数。这些波长对应的双折射率为 μ_1，μ_2，μ_3，…μ_i，对厚度$d_{I,L}$的双折射晶体，干涉级数为：

$$N_{K,L}=\frac{\mu K d_{I,L}}{\lambda_K},\ K=1,2,\cdots\cdots i \qquad (1)$$

在i个波长中，任选一个波长，为方便，选 λ_1。当$d_{I,L}$对 λ_1产生的干涉级数$N_{I,L}$为$1,1\frac{1}{2},2,2\frac{1}{2},\cdots\cdots\frac{L}{2}$时，由下式计算其他波长上的干涉级数。

$$N_{K,L}=\frac{\mu K \cdot d_{1,L}}{\lambda_K}=\frac{\mu K}{\lambda_K}\cdot\frac{N_{1,L}\lambda_1}{\mu_1} \tag{2}$$

当$N_{K,L}$在某些L值时，都是整数或半整数，其允许误差 ±0.05，将这时的$d_{1,L}$值，作为第一级晶体的厚度。

从原则上讲，对主透过带波长，滤光器各级晶体厚度应设计得具有整数或半整数干涉级数，否则将引起峰值透过率的下降和主带外散射光的增加。在多通道头中，要使各通道所有波长上干涉级数都严格为整数或半整数，那是十分困难的。所以我们确定允许 ±0.05的误差，它将引起主透过波长上透过率从1下降为$\cos^2(\pm 9^\circ)=0.976$，我们认为这一最大允许的透过率下降仅2.4%，这对大多数太阳研究目的来说，是可以容忍的。在多通道头中，其后的次级，由于其厚度只有第一级的1/2，1/4，1/8左右，即干涉级数只有第一级的1/2，1/4，1/8等。如第一级干涉级数为39.05和45.95，则它们的一半是19.525和22.975，与半整数或整数之差，减为0.025，即比第一级的误差减少了一半，再往后面的级，误差更将减少。关于散射光，主要是各级之间匹配的严格与否引起的。在双折射晶体加工中，一般允许1/50－1/100波长厚度的误差。在多通道头中，即使第一级误差高0.05＝1/20波长，第二级最多达0.025＝1/40波长，所以两级间匹配至少相差1/40波长，已非常接近加工误差的大小，其后的匹配误差，还会以 ±0.05/2N，N＝1，2，3……减少。所以不会产生明显的散射光。在多通道头之后，各个波长已经分置于各单通道之中，在匹配比多通道头中第一级更厚的级次时，可以设计为逐步地把允许误差，按 ±0.05/2M减少，其中M是比多通道头中第一级更厚的级次数。

有时会出现这种情况，在某一组偏镜出射的波长全部是整数或半整数，这时组偏镜的使用就失去意义，可以用一般偏振片所代替，如图1中从第二组偏镜垂直出射光束的情况。

这里需要讲明的一点是，$N_{K,L}$在某个L值时，全部$N_{K,L}$为整数或半整数（在允许误差之内）的情况是比较多的，这里存在着对L值的最佳选择方案。我们建议根据下列四点作选择。1）应考虑可用优质干涉滤光片的带宽和透过率选择L值。干涉滤光片一般要用来作各主带之间的隔离滤光片；2）选择更为靠近整数或半整数的组合（误差的控制）；3）考虑整个滤光器的对称和紧凑要求；4）多通道头在望远镜中的尺寸匹配。

在结束本节之前，让我们小结一下多波段视频光谱仪与带多通道头的滤光器的同异点。两种类型都可用于多条分立的光谱线研究，对不同谱线都可作谱线附近光谱的多通道研究。不同点在于：①在多波段视频光谱仪中，整个滤光器中的最厚级必须置于最前部，而带多通道头的滤光器中，最厚和次厚的一些级次可以放在滤光器中部或后部，所以带多通道头的滤光器抗太阳辐射致热的能力较强；②多波段光谱仪中各通道带宽基本上相同，而带多通道头的滤光器各通道带宽可不相同，也可以相同；③多波段光谱仪能大幅度节省较厚级次的冰洲石原材料，而多通道头滤光器原则上很难节省较厚级次的冰洲石原材料。

三、多通道头的应用

基于上节中讨论的带多通道头的滤光器的一些特点，构成了多通道头的一些有价值的特殊应用。

1. 多通道头避开了把最厚的晶体级置于滤光器最前部的结构，因而避开了热敏引起的滤光器波带位置不稳定问题。在多通道头之后，如有需要，仍然可以在由多通道头分离的各光束中，设置一条谱线的视频光谱仪，而起到研究该谱线视面光谱的作用。但这样所用原材料耗费较大。

2. 多通道头之后设置的滤光器带宽可以自由选择，有利于根据谱线的特性及研究工作的需要选择带宽，以及充分利用光量以提高信噪比。

3. 利用多通道头，在各通道之后配置相应的Fabry-Perot与Daystar滤光器，可以较容易地实现多波段的单色光观测，如多波段的耀斑单色像观测，或白光耀斑多窄波段观测。这些波段观测在相同大气和望远镜至光路中同时进行，有关细节可有很好地对应，可以获得很高的时间分辨率。

4. 白光耀斑的巡视与观测，要求在较宽带宽的几个连续谱上进行观测，带宽一般为20－50Å，完全可用多通道头满足其同时观测要求。

5. 把已经有的滤光器组成多通道滤光器。在不少天文台只有一个圆顶和一架望远镜，但有众多的滤光器，这些滤光器不能同时观测，更换很麻烦。另一些天文台有几架望远镜，配置有几个滤光器。望远镜的质量有好有坏，而且观测时还要几个人同时监视。对上述两种情况都可以通过在最佳望远镜上设置多通道头，把所有滤光器组织在一起，以一、二个人进行同时观测。这是一种多快好省的方法，而改装多通道头只花很少经费和人力。

四、多通道望远镜结构特点

用多通道望远镜可以使一个望远镜起到多个望远镜的作用，而且由于各通道是在完全相同的大气条件和完全相同的主光路中同时观测，这非常有利于研究各种太阳现象以及细节的相互关系。这种紧凑而高效能的望远镜若能放入太空，可能发挥出更大的威力。由于使用多通道滤光器，望远镜结构上作了一些新的考虑，现介绍如下：

双折射滤光器在太阳望远镜中的使用有两种状态。一是在准直光中使用，这多为专门配置滤光器的望远镜所采用，如Hα色球望远镜。另一是在会聚光中使用，一般放在主焦面之前。这种情况下，往往望远镜仅把滤光器作为终端附件之一而使用。图2示出了这两种状态的结构。

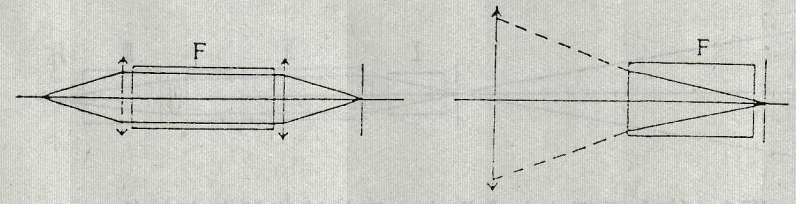


图2. 滤光器在平行光与会聚光中的使用结构

在双折射滤光器中，最贵重和难找的高质量材料莫过于冰洲石。与望远镜匹配的滤光器的通光孔径涉及到冰洲石的用量，因此在滤光器与望远镜的匹配考虑中，首推滤光器孔径的选择。

1. 在平行光中，滤光器极小孔径的计算。当物镜直径为D，准直镜角放大率为M，观测太阳视面区域的视场角为 θ' 时，滤光器光程总长为 $L=n\cdot l+l'$，其中n为滤光器材料的平均折射率，l为材料长，l′为空间剩余长度。滤光器通光孔径由两部分组成，第一部分是物镜在平行光中的成像的大小，通过场镜可以把物镜象成在滤光器中部。物镜像的大小为 $d=D/M$。第二部分是由视场角 θ' 在平行光中引起的光束倾斜导致的孔径增加 $d'=M\cdot L\cdot \theta'/3437.75$。两部分相加构成通光孔径

$$\Phi=d+d' \tag{3}$$

由 Φ 对M求极值，$\Phi/\ M=0$，可得 $d=d'$，带入(3)得到

$$\Phi_{min}=2d=2d' \tag{4}$$

(4)表明当物镜像大小与视场倾斜大小相当时，有极小通光孔径。

2. 会聚光中，极小通光孔径的计算。D为物镜大小，f为焦比，$f=F/D$，太阳像视场角 θ'。滤光器通光孔径也由两部分组成。第一部分太阳的观测视场区在焦平面上的大小为d。$d=D\cdot f\cdot 0.009\cdot \theta'/31'$。另一部分是在滤光器前部，由于会聚光增加的孔径 $d'=L/f$，其中L也是滤光器光程总长度。两项相加，通光孔径为

$$\Phi=D\cdot f\cdot \theta'\cdot 0.00029+L/f \tag{5}$$

Φ 对f取极值，$\Phi/\ f=0$，可得 $d=d'$，即

$$\Phi_{min}=2d=2d' \tag{6}$$

(6)式表明，当这两部分孔径相等时，有极小值条件。

由于滤光器中存在离轴光线引起的透过带位移，放大倍数M过大和焦比f过小会引起不容忽略的透过带位移，因此这些因素在望远镜与滤光器的匹配设计中均应综合考虑。上面两段仅考虑了M和f对 Φ 的影响，只提供了局部考虑的数字根据。

3. 多通道滤光器在望远镜中的设置结构。

在多通道滤光器中，由于使用较多的组偏镜，在整个滤光器中，组偏镜只比通道数少1[1]；使用全反射棱镜以使滤光器对称和紧凑；为了达到很高的光谱分辨率，如0.01Å；使用实体Michelson干涉级，以及广泛使用调节波长装置和全色波片等，这些都是具有相当长度的部件，所以物镜也希望较大。这些因素都会增加滤光器的通光孔径，使滤光器变得昂贵。为了克服这些困难，在滤光器与望远镜的配合上，我们采用图3的结构。其中Ⅰ是设置在准直镜之前的发散光之中，可放置多通道头等。为简便，

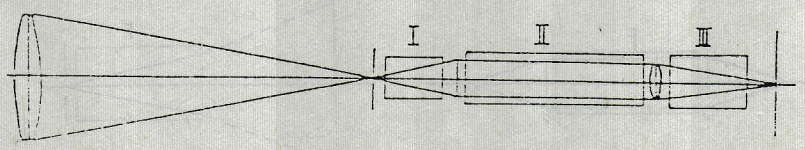


图3. 综合平行光与会聚光方案的滤光器装配结构

图3中只画了一个通道。II是滤光器主体，放在平行光之中。III是滤光器的尾部，这个位置是处于焦平面之前的会聚光之中。我们安排的这种结构，即把滤光器分三段单独放置，我们考虑这有如下主要好处：①便于影响滤光器通光孔径的滤光器的有效长度，减少到大约原来一体设计时长度的三分之一左右，这样通光孔径就可明显减少，容易取得合适的冰洲石，以制造具有高光谱分辨率的滤光器，并节省经费；②可以明显减少望远镜筒的长度；③可以把一些实验性的设计单独放置，可以随时加进去或者撤出来；④把一些对热敏感的高级次级放在后部，增加波带的稳定性等。当然这种分段设计和放置也会带来一些其他问题，如恒温器就要作三个等，但这些问题带来的问题不大，也不难解决。

参考文献

[1] 艾国祥，胡岳风，中国科学(A辑)，8 (1986).
[2] 艾国祥，胡岳风，中国科学(A辑)，9 (1986).
[3] Smarrtt, R. N. and Steel, W. H., J. Opt. Soc. Amer., 49 (1959), 710.
[4] Billings, B. H., in American Institute ofPhysics Handbook, third edition (1972), 6.

太阳多通道望远镜60cm镜筒光学系统设计

王亚男

南京天文仪器研制中心，210042

提要

本文叙述了太阳多通道望远镜60cm镜筒光学系统中主要光学部件的设计思想，给出了整个系统设计结果及点列图。

一、设计要求

口径60cm，物镜采用格里高里系统，格氏焦距为10米，系统焦距为12米和6米两种。通过双折射滤光器后，在9个波长处工作，工作波长为396.8nm，468.6nm，517.4nm，524.7nm，525.0nm，557.6nm，587.6nm，630.3nm，656.3nm。视场直径7.′2，象质优于0.″5。

二、光学系统设计（图1是光学系统的示意图）

1. 物镜

物镜采用格里高里系统，主镜口径600mm，顶点曲率半径3000mm，焦比F/2.5，系统焦距10000mm，焦面位置取在主镜后550mm处，副镜顶点曲率半径629.156mm，副镜放大率6.66667，主、副镜之间的距离为1861.7647mm。因为视场不大，采用经典格氏系统，主镜是抛物面，$e^2=1$，副镜是$e^2=0.5463137$的椭球面，两个焦点至顶点的距离分别为361.7647mm与2411.7641mm，可以在一个焦点放光源，另一个焦点放刀口，直接进行检验，不需要补偿系统。

2. 准直镜

格里高里系统的主镜做为入射光瞳，它被副镜成象于副镜前离副镜420mm处。准直镜应将此入瞳象成象于滤光器的中点，这样光束在滤光器中是对称的，两端光束口径相同，可使滤光器口径最小。设计光学系统时，滤光器尚未设计好，只能根据李挺估计的滤光器长度设计。因为9个通道中滤光器的长度不同，而且相差很大，事实上也做不到在每个通道中光瞳象都处于中点。当时估计滤光器长640mm，考虑到滤光器的视场，准直镜的口径等方面的合理性，得出准直镜的焦距为400mm，口径为37mm，放大率为25，滤光器处的视场为1.°5。在格氏焦点附近放置了多通道头，光线由多通道头出来时已被分成5路，每一路用一个准直镜，共有5个准直镜，各路光在多通道头中经过的光程不同，共有三种不同的光程，与之对应的准直镜应放在不同的位置。

3. 成象镜

为满足有两种不同的系统焦距的要求，考虑了三种方案，首先考虑用两个焦距不

同的成象镜，互相转换得到两种焦距，机械上实现起来有困难；又想用两组透镜，改变它们之间的距离来改变焦距，但象质不好；最后采用的办法是先设计一个成象镜使系统焦距为12000mm，然后再用一个缩焦系统将焦距缩小一半，而焦面位置不变。缩焦系统可以从光路中移进移出，以改变系统的焦距。

成象镜是一个两片型透镜组，焦距为480mm。滤光器处的视场是1.°5，一般两片型透镜组不可能在这么大的视场上达到很高的成象质量，但因优化时是将准直镜和成象镜联合起来一起修改的，可以使整个系统的彗差与象散得到平衡，因此可以得到很好的象质。优化时用486.1nm和656.3nm两种波长消色差，结果表明，9个通道可用相同结构的准直镜和成象镜，只是准直镜的位置和各通道最后成象的最佳象面位置不同，这只要对每一通道调焦即可。此时系统的焦距为12000mm。

缩焦系统由两组透镜构成。第一组透镜将太阳象成在一个适当的位置，第二组透镜再将其成象于原来的象面上，并满足焦距等于6000mm的要求。第一组透镜放在成象镜后100mm处，第二组与第一组相距250mm，两组透镜的焦距分别为760mm和175mm。除396.8nm通道外，其它8个通道缩焦系统的结构都是一样的，第一组是双分离透镜组，第二组是双胶合透镜组。对396.8nm通道，另外设计了一个缩焦系统，两组都是双分离透组。

三、成象质量

在表1与表2中分别列出了系统焦距为12000mm和6000mm时，各通道、各视场的最大象斑直径，图2和图3是它们的点图。

表1. 系统焦距为12000mm时最大象斑直径

视场半径 / 象斑 / 波长	0	1′.2	2′.4	3′.6
396.8nm	0.12	0.11	0.12	0.12
468.6nm	0.07	0.07	0.06	0.12
517.3nm	0.06	0.06	0.07	0.17
524.7nm	0.05	0.04	0.05	0.12
525.0nm	0.05	0.05	0.05	0.14
557.6nm	0.06	0.06	0.08	0.20
587.6nm	0.08	0.07	0.08	0.21
630.2nm	0.08	0.08	0.11	0.27
656.3nm	0.07	0.07	0.09	0.24

表2. 系统焦距为6000mm时最大象斑直径

视场半径 / 象斑 / 波长	0	1′.2	2′.4	3′.6
396.8nm	0.18	0.15	0.12	0.29
468.6nm	0.09	0.11	0.16	0.44
517.3nm	0.06	0.08	0.14	0.35
524.7nm	0.13	0.14	0.17	0.40
525.0nm	0.09	0.10	0.13	0.39
557.6nm	0.05	0.07	0.13	0.29
587.6nm	0.06	0.06	0.11	0.25
630.2nm	0.09	0.08	0.14	0.24
656.3nm	0.08	0.07	0.10	0.20

Design of the Multichannel Solar Telescope 60cm the Optical System

Wang Yanan
Nanjing Astronomical Instrument Center
Chinese Academy of Sciences
Nanjing 210042

Abstract. In this paper, design for the optical system of the 60cm tube of the Solar Multiple Channel Telescope is described briefly and the result is given. Image quality is shown by the maximum diameters and the diagrams of the image spreads.

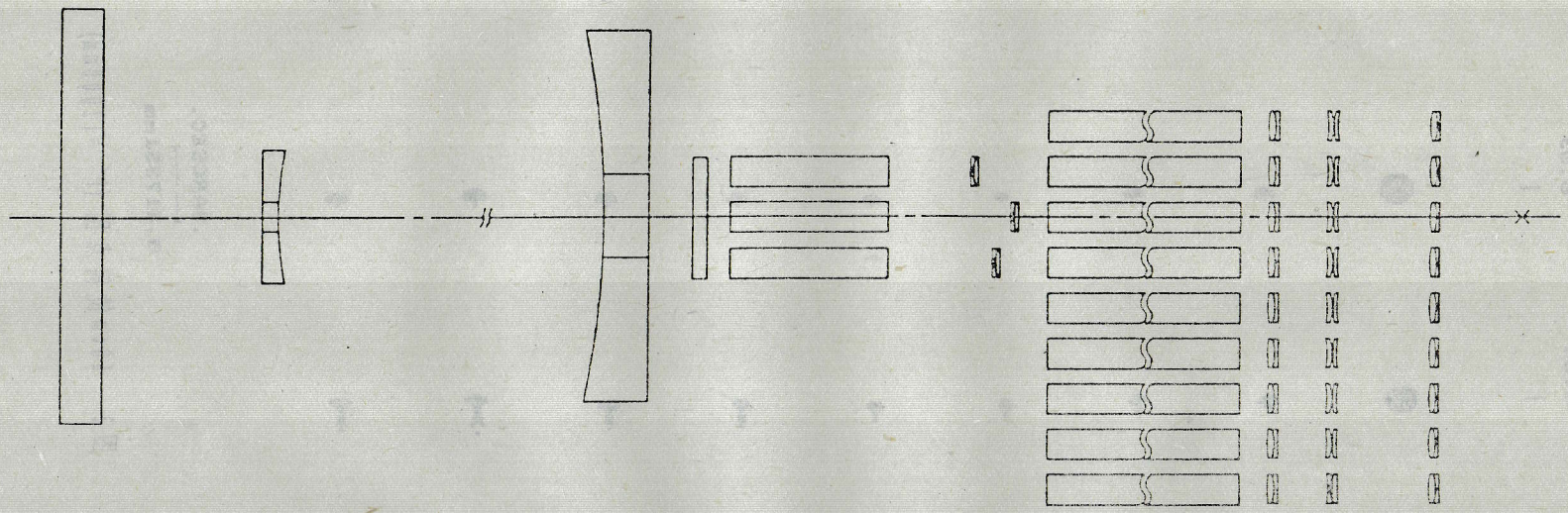


图1 60cm镜筒光学系统

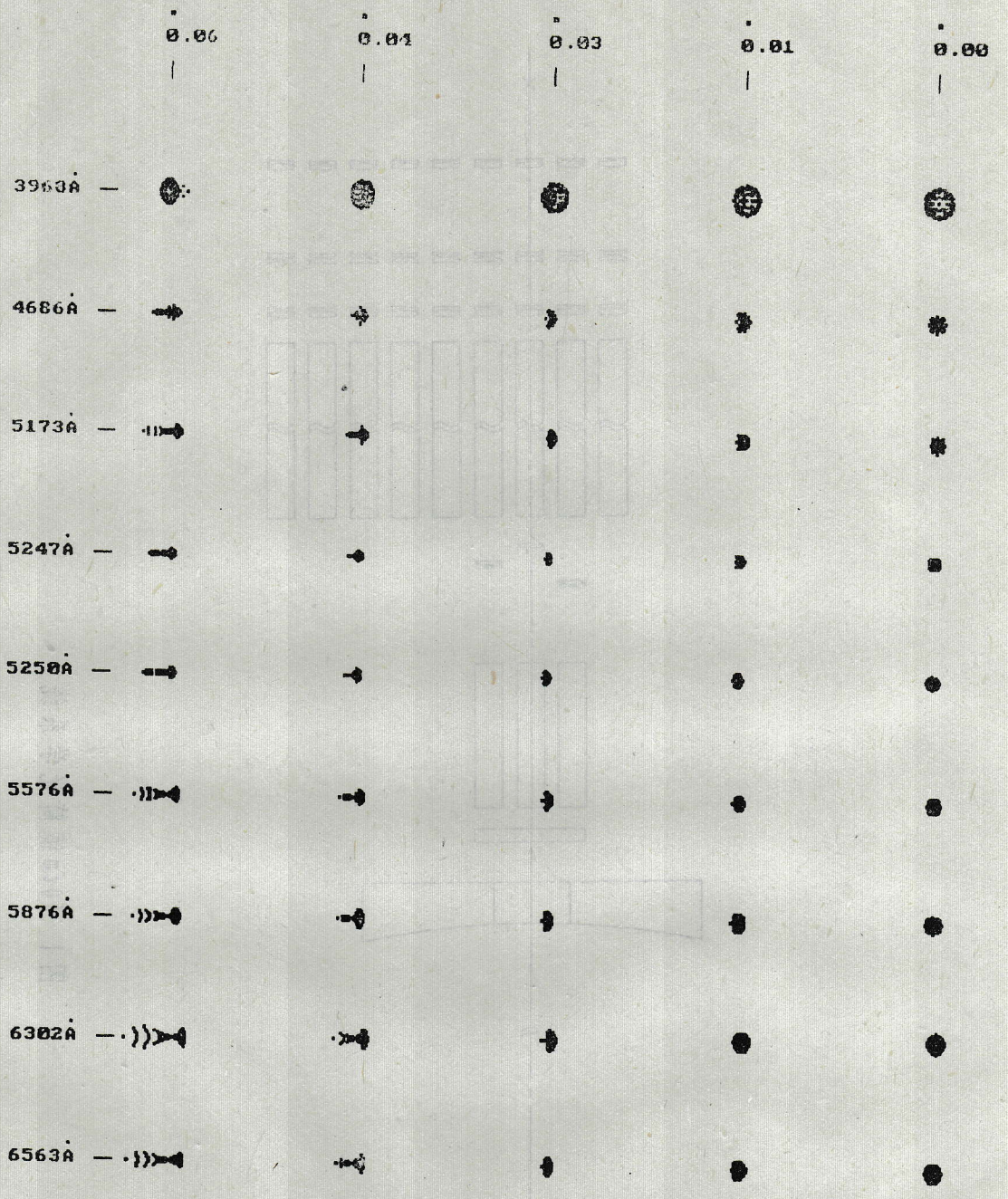


图 2　60cm镜筒点图 (f' =12000mm)

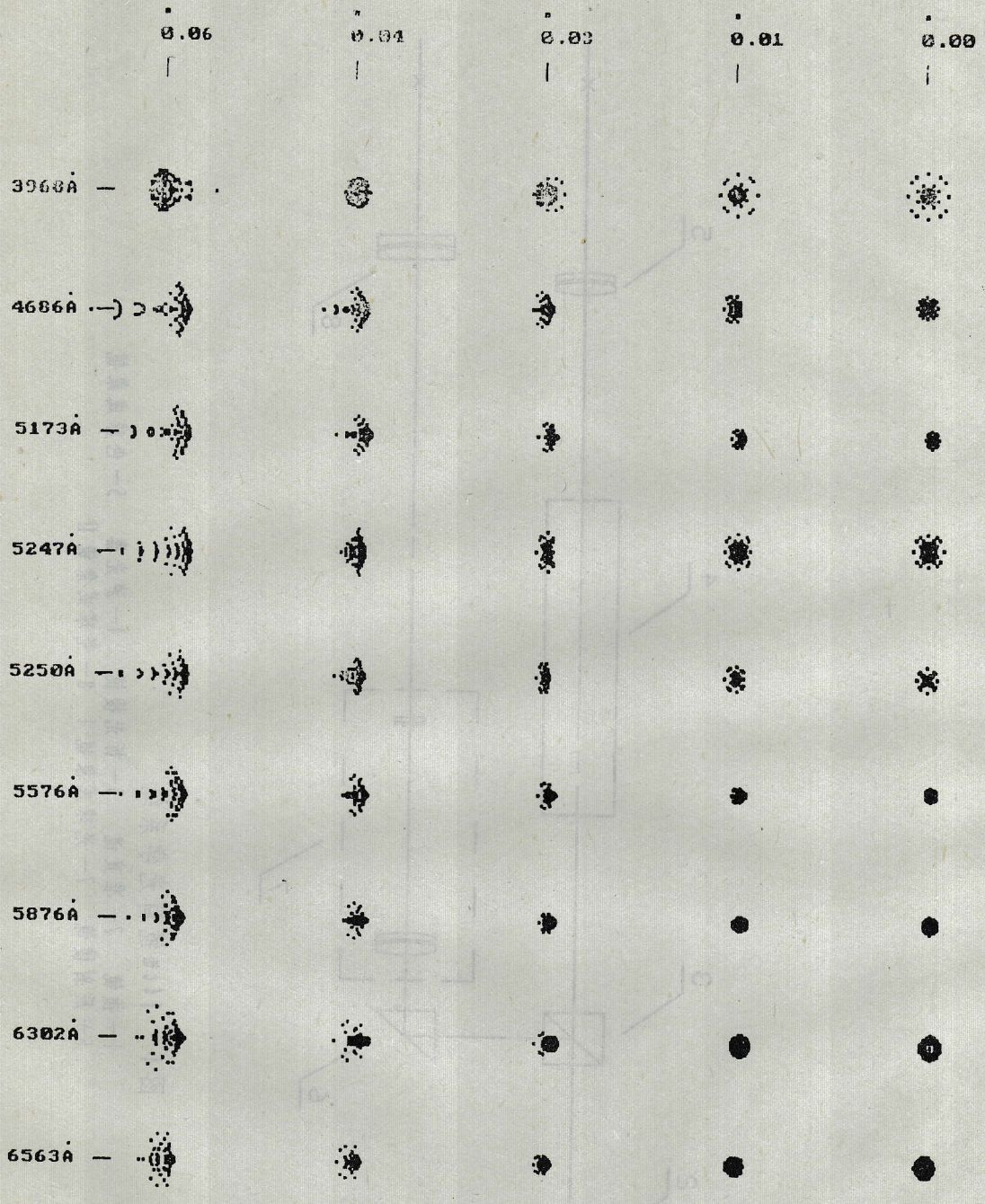


图3　60cm镜筒点图 (f′=6000mm)

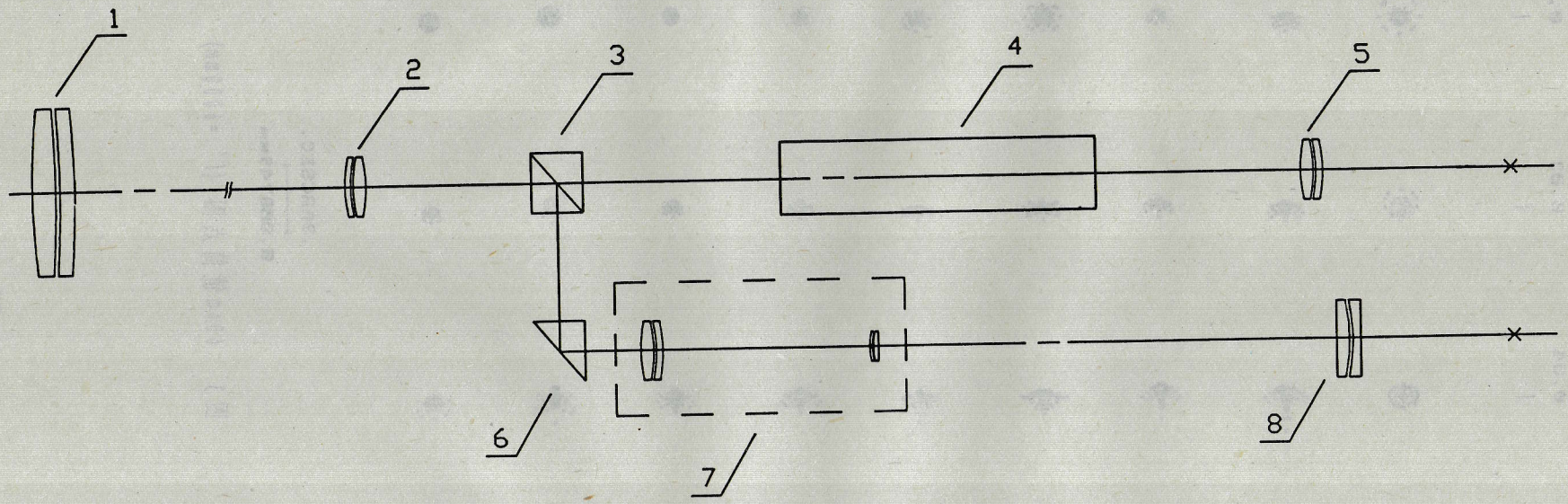


图 4　14cm镜筒光学系统

1—物镜　2—准直镜　3—析光棱镜　4—泸光器　5—色球成象镜
6—反射棱镜　7—光球成象镜 I　8—光球成象镜 II

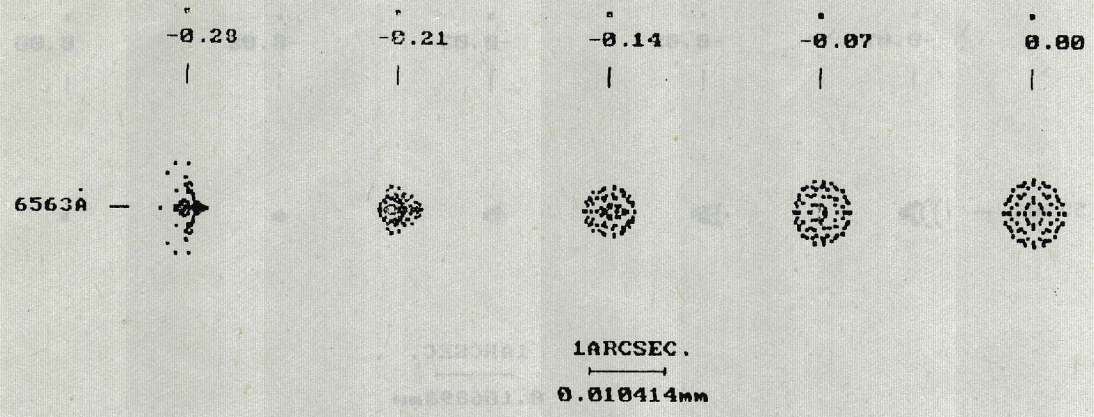


图5　14cm镜筒色球光路点图

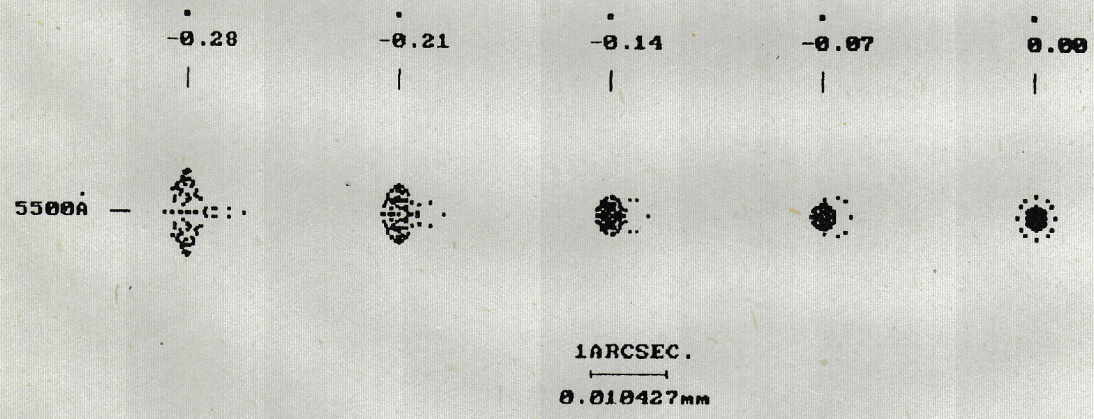


图6　14cm镜筒光球光路点图（太阳象直径20mm）

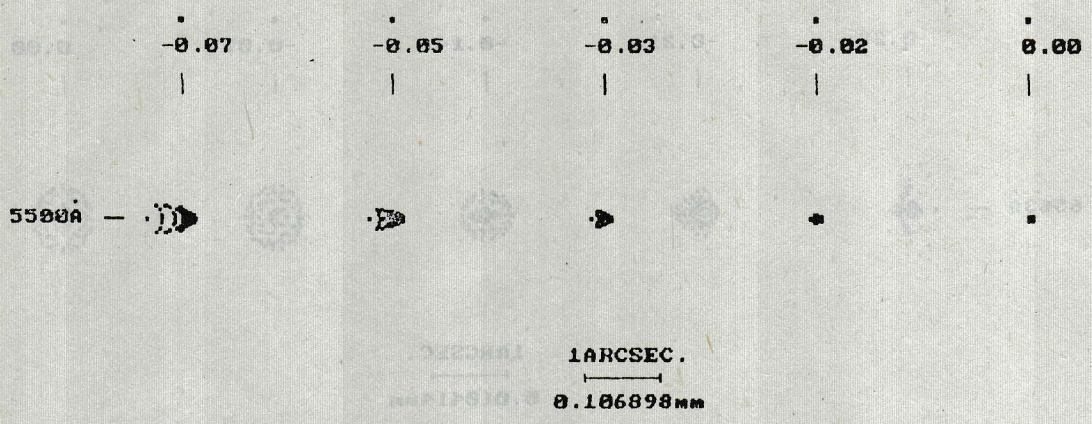


图 7　14cm镜筒光球光路点图 (太阳象直径200mm)

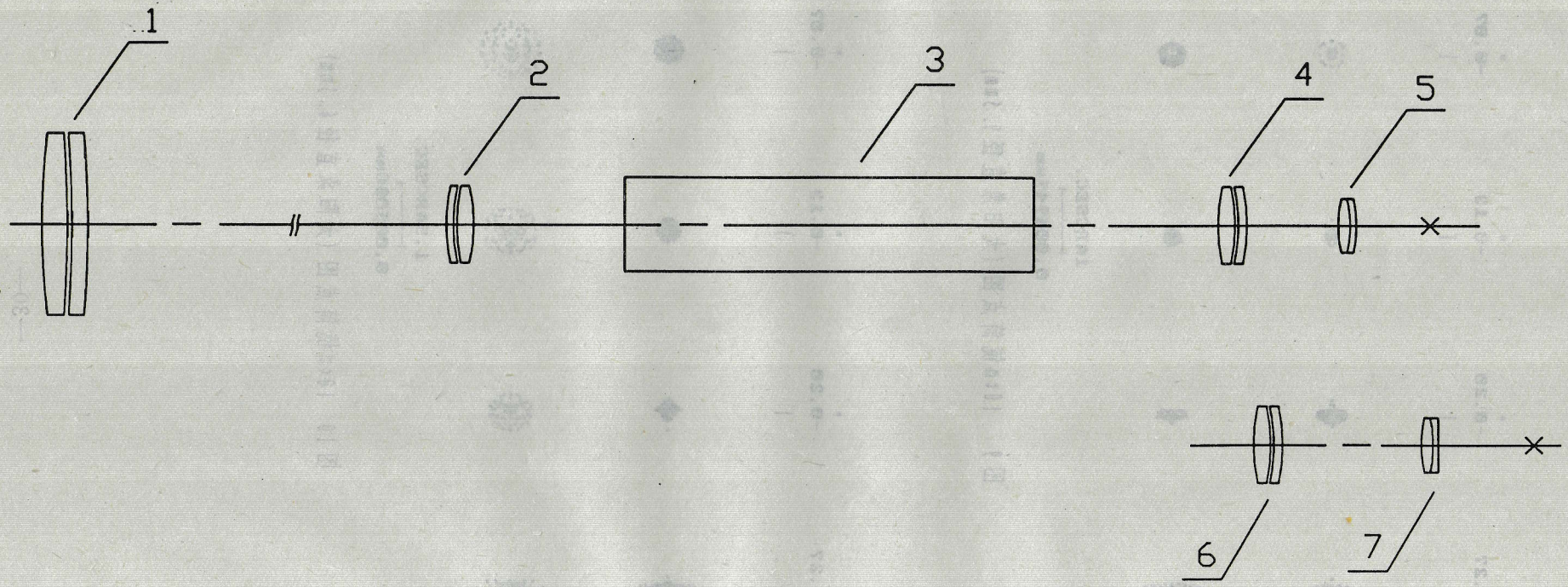


图 8　10cm镜筒光学系统

1—物镜　2—准直镜　3—泸光器　4—成象镜 I　5—法卜里透镜 I
6—成象镜 II　7—法卜里透镜 II

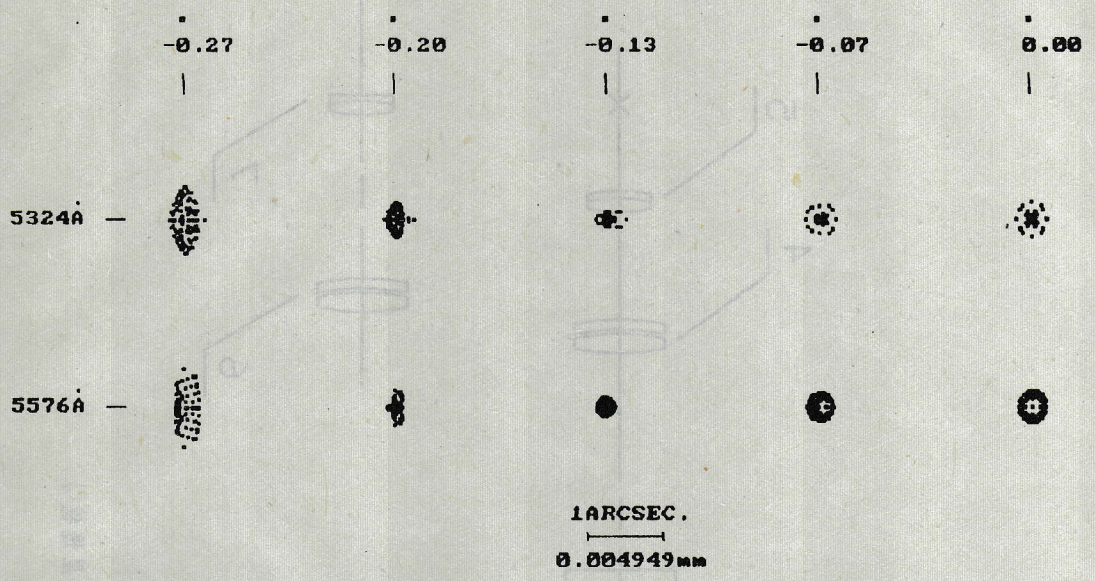


图9　10cm镜筒点图（太阳象直径9.5mm）

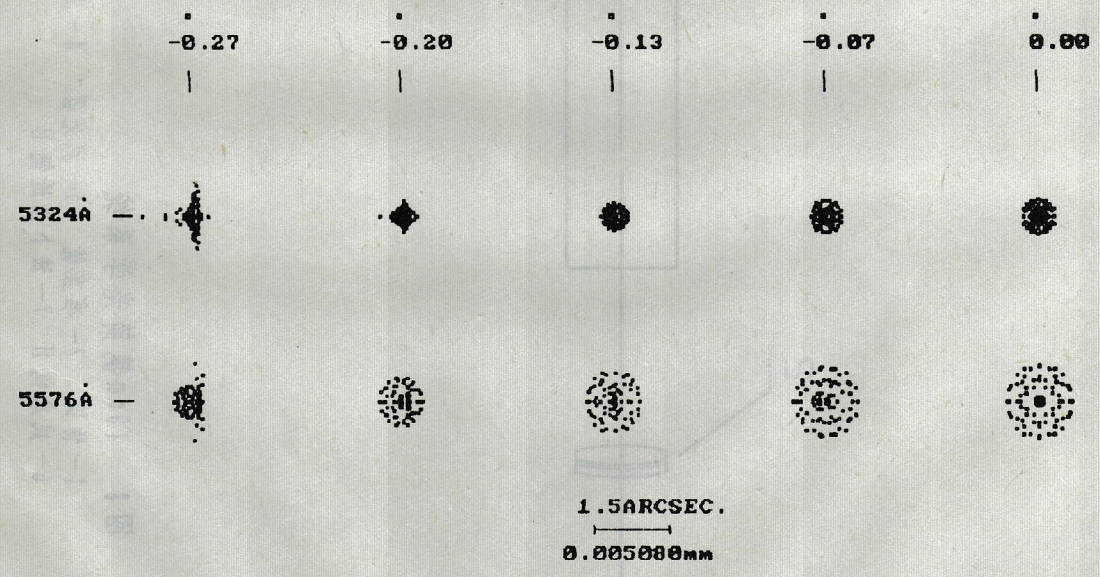


图10　10cm镜筒点图（太阳象直径6.5mm）

多通道太阳望远镜主光路光学元件的检验及光学系统调整原理与步骤简述

李德培

中国科学院南京天文仪器研制中心，210042

提要

本文叙述了多通道太阳望远镜除滤光器部份的光学元件的检验及光学系统的调整原理与步骤。

一、主光路光学元件的检验[1]

1、主镜：Φ620×86，通光 Φ600，中孔 Φ116，$\mathring{R}3000$，$e^2=1$ 为凹抛物面。

用平面自准直法检验见图1，在抛物面焦点F处放置阴影仪刀口，光线在标准平面上反射一次，在抛物面上反射两次，使检验精度提高了一倍。

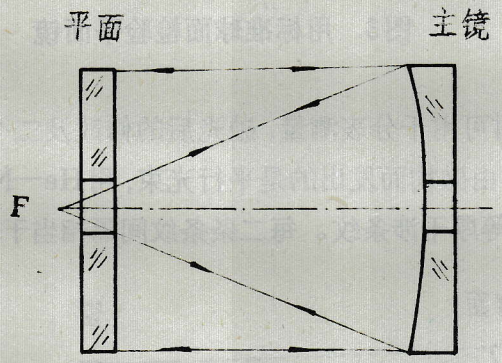


图1. 平面自准直法检验主镜

2、副镜：Φ154×15，Φ。148，中孔 Φ40，$\mathring{R}629.156\approx\mathring{R}629$，$e^2=0.5463137$，为凹椭球面。

它有两个无象差点，到镜面顶点距离分别为S＝361.8及S′≈2412，因此可以在这二点分别放光源及刀口进行检验。见图2，该法优点是不会引入其他附加误差，检验精度高。

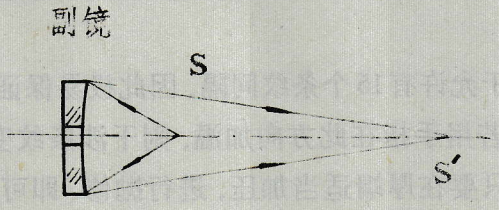


图2. 在二无象差点S，S′检验副镜

3、密封窗：有二块，分别置于镜筒二端出口处。

1) 大密封窗：Φ660×40，平行度要求＜1″，即相当于边缘最大厚薄差要小于3μm，光线通过它后波面变形＜λ/8。

二个平面可分别用标准球面在球心检验，见图3。可以同时检验平面的平直度及局部差。

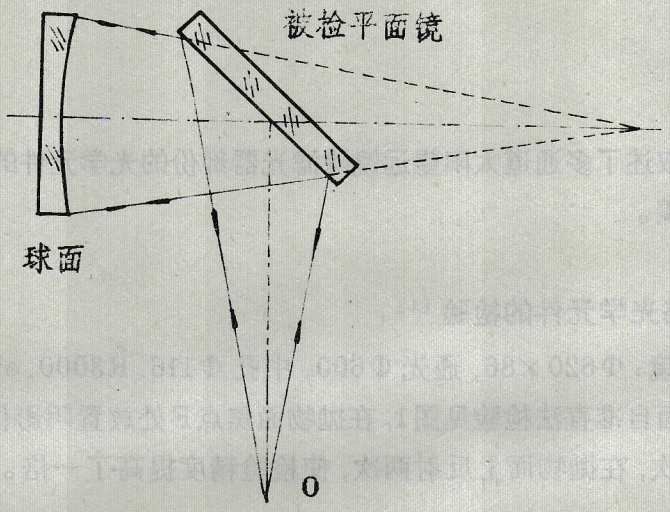


图3. 用标准球面检验平面镜

平面的平行度细磨时可用千分表测量，抛光后的修改及二个面的组合检验可以用干涉法检验[2]。如图4，由抛物面发出的是平行光束，用He—Ne激光作光源，波长为632.8nm。眼看到的是等厚干涉条纹。每二条条纹间隔相当于厚薄差为0.2μm，对于

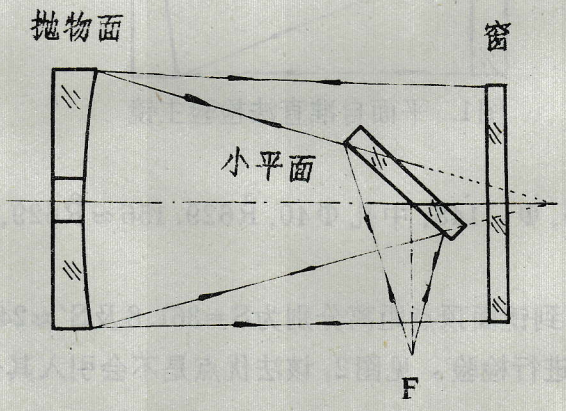


图4. 用干涉法对平行平面的平行度及光程差进行检测

3μm的厚薄差要求，相当于允许有15个条纹间隔，因此极易保证＜1″。厚薄方向是与干涉条纹垂直的方向，若用手指在此方向加温，则干涉条纹变形，凸起指向薄处，因此在此窗厚薄超差时，只要在厚端适当加压，进行抛修，即可逐渐修好，看到的干涉条纹取决于二个表面的加工质量、玻璃的均匀性及厚薄差，是综合检验的结果。

2) 小密封窗：Φ160×20，平行度要求＜1″即相当于表面厚薄差要小于0.77μm。

用本单位生产的平面干涉仪进行检验[3]。两个表面分别读出N及△N，用水银灯做单色光源 λ =546.1nm即可看到综合性的等厚干涉条纹。0.77μm相当于三个半干涉条纹间隔，因此用上法极易控制表面及平行度。

4、准直镜、成象镜、缩焦器、……等小光学件，这些都是普通成熟的产品，无特殊加工、检测困难，在此不赘述。

二、光学系统的调整原理与步骤简述

1、建立基线

1) 在主镜中心孔镜面顶点附近建立十字丝A，它是在主镜表面附近，做为永久标记。

2) 在方箱观测孔中心建立临时十字丝， 使交点位于观测点接收器中心B，如图5。BA的连线即为将来建立的基线，也即主光路的光轴。

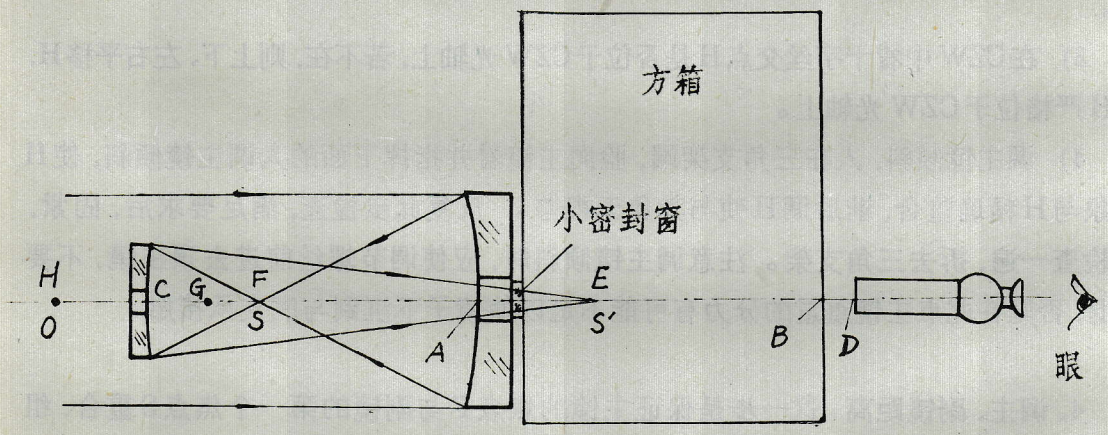


图5. 主光路中各点的位置

3) 在观测点B后装国产测微准直望远镜记为CZW(下同)。转动CZW镜筒使分划线与方箱的边平行，即尽量使分划线的方向与赤径、赤纬运动方向一致，便于以后操作。以远倾斜，近平移原则调到使CZW光轴与BA重合，此时CZW光轴即为将来的主光轴，注意应先将自准直光源装入CZW， 否则光轴会由于增加重量而有变化，因此CZW座应稳定可靠，不易移动！

4) 接通自准直光源，用CZW前的自反射目标D看小密封窗的反射象是否与CZW光轴重合，重合表示小密封窗平面与光轴垂直，否则要视情况垫镜筒与方箱的接合面。

2、调副镜平移及倾斜

1) 事先在副镜中孔表面顶点装有十字丝C(现仪器上是插入的，在顶点前一小段距离，机械设计使镜面倾斜时是沿球面滑动，此球面的球心在镜面顶点附近)。

2) 平移副镜，在CZW中监视，使C落在CZW光轴上。C将永久保存在副镜中心。

3) 副镜前后调焦到极限位置，看在此调焦过程中C是否一直在CZW光轴上，若不

在则表示调焦轴线不与CZW光轴(即主光轴)平行,需调副镜支承叶片或改变B点位置,这要视具体情况而定。调好后固紧。

4) 接通CZW光源,其位移分划板D在副镜前得到反射共轭象G。用一小块透明白纸沿光轴前后移动找到它的清晰象,在CZW中看,这象的中心是否也在CZW光轴上,若不在,则调副镜倾斜使象G的中心与光轴重合然后固紧,总检查一遍,无误即可。

3、调主镜倾斜,此步也可以放在调副镜平移及倾斜前进行,因考虑到要在镜筒前端面安放三脚支架,所以选用先调副镜后调主镜的顺序。调时脸在支架后,面向主镜面。

1) 在筒前安装预先制作好了的三角支架,架端有可调白色十字丝H,它位于主镜顶点曲率中心O附近。

2) 前后、左右、上下调整此十字丝位置直至将H放到主镜外带法线与光轴交点附近,此时可看到H与它被主镜反射的象,调到使二者上下、左右大致重合和无视差为止。

3) 在CZW中看十字丝交点H是否位于CZW光轴上,若不在,则上下、左右平移H,使H严格位于CZW光轴上。

4) 调主镜倾斜,人在三角支架端,脸向主镜看并指挥下面的人调主镜倾斜,使H的象与H精确重合,前后调H使与其象无视差。 反复此步检查,满足要求后,固紧,再检查一遍,拆去三角支架。注意调主镜倾斜时,应使调节螺丝前进去顶主镜,不要后退,否则在此点主镜重量的分力有可能不足以使镜子下沉到与底支承接触。

4、调主、副镜距离:这一步是保证主镜的焦点F与副镜的第一个焦点S重合,组合后的焦点在S′,见图5。

1) 首先查出磨制好的主、副镜的实际参数,如F,S,S′等,算出组合后焦点位置距主镜室背面可测处的距离。在此距离处设置一个毛玻璃上画分划线E。毛面磨到303#砂。

2) 精确放置E并与光轴垂直,测准毛面到主镜背面的距离,在CZW中监视,看E平面形成的自反射象D是否与CZW光轴重合,不重合调到大致重合。E也在CZW中心。

3) 用测距仪在镜筒上方端面向内看,测出在S′处的E上分划线的距离。若E经副镜、主镜反射后在测距仪的读数为有限远,则表明测距仪接收到的是发散光束。所以此时应将副镜向远离主镜的方向调,否则向反方向调。所调方向是否对,可用测距仪直接监视。只要副镜在调焦过程中,测距仪内上、下两半个视场中二段被分割的垂直线是逐渐靠近,副镜的调焦方面就是正确的,一直调到E在测距仪中指示为无穷远时,副镜调焦结束,记下此时副镜调焦读数及当时温度,备案存档。取去E,使通光。若想精调E见[4]。

5、安装并调整光阑位置:光阑矩形孔$1.78\times2.18mm^2$理想位置应放在副镜的第一

共轭点S处与主镜焦面F重合。它到副镜的距离应事先测好放准确，否则将不能充分利用主镜的通光孔径，见图6。

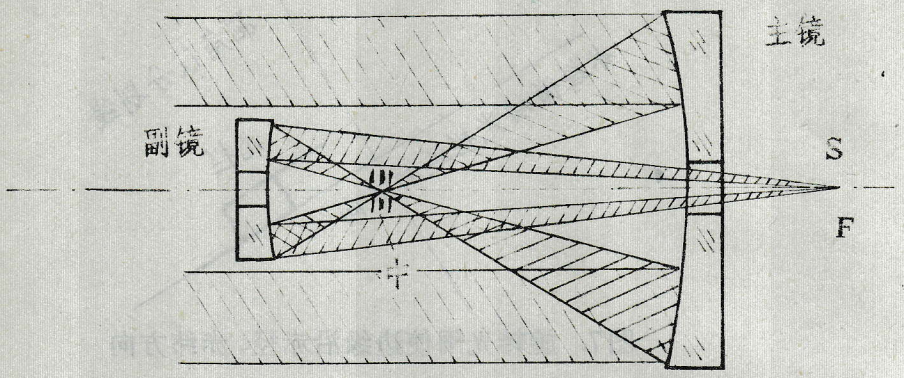


图6. 光阑应位于焦面理想位置（中）

此光阑与遮光筒连接于副镜框上，要求装上后不能破坏调好的副镜的位置及光轴，否则不但将反工，亦达不到理想的调校。当然此光阑也可以不与副镜连接，而放在主镜焦面F处，但要进行温度补偿，补偿镜筒由于温度变化引起光阑与主镜距离的变化。

1) 在CZW中监视平移光阑（现在是倾斜遮光筒），使光阑对角线交点位于CZW光轴上。调光阑方向，转动使长边与CZW中水平分划线大致平行。

2) 验证副镜在装光阑过程中是否产生倾斜或移动及光阑对角线中心交点是否在光轴上：调焦CZW找到在S′处的光阑象，看此象对角线交点是否也在CZW光轴上，可稍微倾斜遮光筒“平移”光阑使位置正确，在S处动一点，S′处的象将动很多。再检查光阑是否仍置中，反复调正确。

若在S处光阑位置正确，而在S′处光阑象偏离很多，可能副镜位置变了应反回去调副镜，直至装入光阑后S，S′处的光阑及其象位置与CZW光轴对称为止。

3) 精调光阑长短边方向：在镜筒前放置平行光管或测角仪，调整方向使看到主镜反射的光阑象旋转测角仪镜筒，使分划线之一是沿赤经、赤纬运动方向。方法是：开动赤经（纬）轴微动，看光阑象运动方向，选其上某一标志点在赤经微动时的轨迹，旋转测角仪镜筒使分划线之一与此轨迹重合，反复调几次使此标志微动时一直在此分划线上，表示此分划线已调到赤经（纬）运动方向，然后旋转光阑使长边与此分划线重合见图7，再微动赤经，若光阑长边及其延长线一直与此分划线重合，则光阑方向就已调好。

4) 固紧所有螺钉，再在CZW中检查光阑及其象位置是否正确，若有变化应再调整。

5) 用测距仪检查S处的光阑是否位于主镜焦面，这是因为光阑旋转方向时有可能使得光阑前后移动。可以用光阑长边及延长线为准检测，在测距仪内指示为无穷远则位置正确，否则又要再次调整，检查一遍。

若采用光阑与副镜脱开的机构，则这一步应在装光阑时调整，同时也不会破坏已调好的副镜的位置。

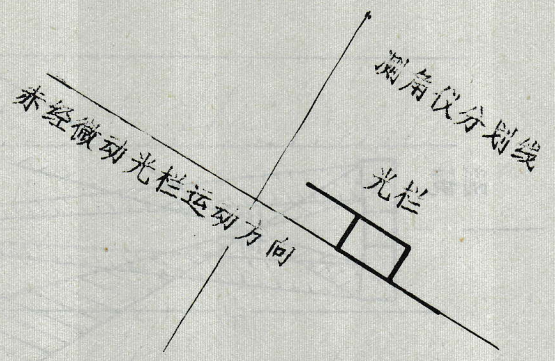


图7. 旋转光阑使边缘沿赤径、赤纬方向

6) 安装冷却管及45° 反光镜，将无用的太阳光反射到镜筒外。

7) 进行总检查，把以上所有位置检查一遍包括装入E、……等，无误后吸出镜筒内部灰尘，打扫干净，用的确良布盖严，防止灰尘入内。

6、吊装筒前大密封窗并抽真空看是否漏气。

7、准直镜、成象镜的安装与调整：准直、成象二组透镜的安装应在实验室内装校好，要保证同轴及相互位置，不可装反。靠机械保证光轴与镜筒同轴。

1) 将准直镜及成象镜座前后加十字丝定好中心装入，以CZW光轴为准粗调使十字丝交点均在光轴上。

2) 先装入准直镜，在CZW中观测，调焦到相应各球面的球心（经折射后的球心）第一面是直接反射的，看诸透镜是否同轴。注意此时应关闭镜盖使筒内全黑，否则看不清各面的自反射象。同轴时这四个反射象均在光轴上。

3) 装入成象镜，依上法精调成象镜座，使光轴重合。取走CZW及其支架，现支架不够牢，时间长后会变动！ 应予改进。

4) 在成象镜前（即靠近准直镜端）用一块镀铝平面镜做自准直检验，在接收器焦面放置有标志的透明玻璃，前后调焦成象镜，用放大镜观看，使成象镜焦面与接收器焦面重合，这可以通过看玻璃面上的标志与其平面自准直象有否视差而决定，当二者无视差时则标志与焦面重合。固定成象镜调焦位置，取走平面镜。

5) 在成象镜前装入无光焦度的滤光片，旋转，调焦准直镜，观测太阳，使太阳象通过成象镜后清晰的成在接收器焦面上。此时光阑象与太阳象应同时清晰。若不同时清晰，副镜可做微量调焦使清晰，因为测距仪基线短仅300，现在是用全口径精度高。

6) 夜晚看恒星，用刀口切割，用阴影检验法看组合光路的星象质量[5]，加工误差，有否镜面夹紧变形、……等，也可拍下阴影图供分析、存档。

7) 打定位销钉

8、滤光器九通道头及本体基座位置的确定、调整。事先在它们所有的入、出口处加白色十字线，使交点通过中心。取走准直镜及成象镜。

1) 找出主光轴：用副镜中心十字丝交点C及主镜顶点十字丝交点A为准，它们的连线即为主光轴。

在方箱外侧原位置再装调CZW，使光轴通过C及A(可以从1.78×2.18mm²的矩形光阑孔中看到C)。

在E处装画有十字线的透明底片玻璃，调之使十字线交点在CZW光轴上。

2) 在大密封窗前装入简易装置，并装激光管，从前方投入一束He—Ne气体激光束，平移，倾斜此光束使通过光阑及E处的十字丝交点，可在CZW中监视激光射到E处的位置。注意要用深色玻璃减弱激光束，保护眼睛。

固紧此激光束装置，再检查一遍，无移动时，这束激光就代表了主光轴。注意此简单装置要有一定稳定性，不能随时间推移而走动！变形！取走E处的薄玻璃。

3) 装入滤光器头部，在CZW中看头部前、后十字丝交点，调整基座方位及倾斜，使两十字丝交点均在CZW光轴上，现在是用CZW上的测微鼓测出读数后垫底座使满足要求。接通激光电源，可以从滤光器头的后部看到5个激光束，其中468.6nm，通道激光束应在中间(因为是对它调整的)，而其余通道不一定在中间，因此，还要将头绕主光路转一角度，使5束激光均在出口中央十字丝交点。固紧头部，检查一遍，合要求即可。

4) 装入滤光器本体，它将五个通道的光分为九个通道的光，依上法调，使主光路上的前后出口的十丝在CZW光轴上，装入准直镜及成象镜到原位置。

5) 接通激光电源，在九通道体末端看，是否还要绕主光轴旋转九通道体，使激光束均在通道出口中心。因为有的太暗，有的被CZW架挡住了，现约能看出4个通道有激光束。旋转后固定好。

6) 取走CZW及激光管。

7) 通冷却水冷却光阑，观测太阳，在九通道体后分别可以看到九个太阳象及光阑象，均基本在中央并在成象镜焦面上，太阳象清晰可见。

8) 安装CCD，精调CCD位置，使达到观测日面上同一位置。

先后参加过此项工作的主要有许万云、曾金珠、朱政、赵树棠、任荣吉、邹维曜、单学东、倪厚坤等同志，及北京天文台怀柔观测站的同志。在此一并致谢！

参考文献

[1] 李德培，光学技术，5卷(1982)，P2

[2] 李德培等，天文学报，16卷(1975)，P51

[3] 李德培，光学零件加工经验汇编，科学出版社(1968)，P147

[4] 李德培，光仪技术，11卷2期(1990)，P34

[5] 李德培，天文仪器资料汇编第三集，(1967)，P1

多通道太阳磁场望远镜各谱线光量的理论计算

宋国峰　艾国祥

北京天文台　100080

提要

多通道太阳磁场望远镜是一台综合性的太阳物理观测设备，其核心部分是一台可同时透过九条太阳谱线的万能双折射滤光器。整个系统具有窄带高透过率等特点，但由于带宽很窄和采用视频商业化CCD作为数据接收元件，所以太阳象大小、视场、接收器靶面大小及接收器动态范围需要全面系统地安排。因此仪器整体性能参数需初步估算才能确定上述各部件参数。本文讨论仪器望远系统的一些参数的设计。

一、引言

太阳作为强光源类的观测目标，光度测量要根据所测物理参数的需要，有选择性地提取其中有用的光辐射信号。太阳磁场是通过磁敏谱线在磁场作用下的塞曼效应的大小获得的。即测量塞曼效应两个分量的不同偏振态的子谱线的光量差。塞曼效应两个子谱线的光量差，显然不可能象连续谱辐射的太阳光一样为几乎所有的探测器都能探测得到。可见光区的磁敏谱线又都比较窄，要想精确测量塞曼分裂的大小，则需滤光器的透过带宽足够窄。因此虽然太阳光非常强，但有用信号却也显得比较弱，加上其它因素的影响，还必须提高透过率或增大聚光能力才能得到良好的观测信号的信噪比。

多通道太阳望远镜较之前些年研制的太阳磁场望远镜而言，物镜口径加大，聚光能力增加了许多。但由于使用镀铝反射面，望远镜几何光路的透过率有所下降，而且部分通道滤光器的透过带宽非常窄，达到0.0048nm，总体上单位象面光量有所下降。而且由于仪器自身尚有许多地方有待改进和应用更先进的技术，这里探讨的是非理想状况下，整个仪器能保证运转，获得实用观测资料的一种方案。

二、光量的对比计算

根据整个系统的要求，我们对多通道太阳磁场望远镜各谱线的光量与太阳磁场望远镜所用两条谱线的光量进行了对比计算，计算结果如表 1 所示。这是一个估算的结果，但可以初步判定在系统等值焦距6M，即太阳象大小为55.85mm时，几乎所有谱线的光量均比35cm太阳磁场望远镜探测器上单位面积上的接收光量要小。这里只计算工作谱线线心位置的情况，对线翼位置因为与滤光器测量磁场时设置的偏离谱线线心的位置有关。可以找出磁场最为灵敏的线翼位置进行测量。理论计算其相对光量较之线心的计算则更不精确，此处则未予列出。等值焦距12M时，各谱线的光量则更小。

表1. 多通道太阳望远镜与太阳磁场望远镜光量的对比计算(部分谱线)

物镜通光孔径	35cm		60cm					
波长nm	532.4	486.1	524.7063	525.0211	630.2507	517.2699	557.6106	656.2808
大气外太阳辐射强度	190	194	191	191	155	191	190	155
大气透过率(从天顶至70天顶距)	-0.8 ~0.42	-0.76 ~0.35	0.8 ~0.4	0.7 ~0.3	0.8 ~0.4	0.8 ~0.4	0.8 ~0.4	0.75 ~0.35
物镜接收面积	962cm²		~2600cm²					
系统透过率(光学件吸收和反射引起)	0.8	0.8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
双折射滤光器及磁分析器透过率	3%	3%	1.5%	1.5%	3%	3%	3%	3%
滤光器半宽nm	0.015	0.012	0.0048	0.0048	0.0092	0.0092	0.0057	0.0106
谱线剩余强度 线心	0.25	0.15	0.33	0.37	0.44	0.14	0.235	0.17
太阳像直径	43.7mm		55.85mm					
接收面相对光强(忽略其它因素)线心	100	45	23	25	78	29	30	21

三、提高光量的方法和可行性

对天文观测，提高光量的最直接的方法便是增大望远镜口径。增大物镜口径，聚光能力加大，同时理论分辨率也提高，但对一个给定的观测台址，因为受大气条件的限制，增大口径并不意味着就能提高分辨率，而往往只意味着可以增加光量，而同时制作成本和技术难度将以幂指数上升。因此这种最直接的办法也是最难实现的解决方案。另一种办法是提高系统透过率，减少物镜所得光能的损失，这是一个行之有效的办法。目前我们在滤光器的设计和其它光学元件设计上都力争获得最大的有效透过率。增加滤光器带宽，在不得已的时侯也是可以采取的。还有一种方案就是减小太阳象，使能量更为集中，同时使同样大小的光电接收靶面接收到更大视场的太阳光。当然，这要以牺牲空间分辨率为代价。

表2是三种等值焦距下采用TV1802型CCD和TM860型CCD一次观测的视场大小。从表中可以看出用同样的CCD，不同等值焦距下接收的太阳能量相差很大，因此可以通过改变系统等值焦距的方法，增加探测焦面的照度。

表2. CCD靶面对应太阳象大小

等值焦距	太阳象直径	TV 1802 CCD靶面对应太阳大小	TM860 CCD靶面对应太阳大小
400cm	37.2mm	6.84′×5.55′	7.57′×5.68′
600cm	55.85mm	4.56′×3.70′	5.04′×3.78′
1200cm	111.7mm	2.28′×1.85′	2.52′×1.89′

对一个实际使用的观测系统，对光量的实际情况需要整体考虑。如提高系统信噪比，亦可以提高探测器的性能，降低对系统光量的要求。这方面的问题在CCD选样时已考虑，在此不赘述。

提高有限口径望远镜系统的光量，还有一种行之有效的方法，就是提高反射系统的反射率，目前使用的镀铝反射镜在可见光区反射率平均只有85%左右，如果改用镀银反射膜可达到95%左右，即提高1/8左右的光量。如果按双反射面计算，则可以提高1/4～1/3左右的光量。总结前述提高仪器的总体性能的方法，可以归纳如下三个方面。

①提高系统的反射率和透过率

②减小太阳象大小，增加照度

③提高接收器件的灵敏度

在多通道太阳磁场望远镜的调试中，上述三种方案均有所考虑。实际测量中的具体问题，基本上得到解决。但系统的性能还有改进余地。

参考文献

1. 艾国祥，胡岳风，北京天文台台刊，8 (1～10)，1986，6
2. 宋国峰等，多通道太阳望远镜的部分调试，鉴定报告，1994
3. 王敬山等，多通道双折射滤光器，鉴定报告，1994

The Light of the Multi-channel Solar Magnetic Field Telescope

Song Guofeng, Ai Guoxiang
Beijing Astronomical Observatory
Chinese Academy of Sciences
Beijing 100080

Abstract

By using Multi-channel Solar Magnetic Field Telescope, we can observe the sun in nine spectral line at same time. Because of the passband of the universal Birefringent filter was too narrowed, we must calulated the system transmitance and other parameters for determined some of the system general structure. In this paper, an overview of some parameters of the telescope in presented and some method of improved the system are discussed. More detailed dicussion of individual components and results will be publised separatly as appropriate.

太阳多通道双折射滤光器*

王敬山[1]，艾国祥[1]，何凤宝[2]，邓元勇[1]
毛伟军[2]，宋国峰[1]，张斌[1]，倪厚坤[2]，章海鹰[2]，叶祥明[1]

1 中国科学院北京天文台 100080
2 中国科学院南京天文仪器研制中心 210042

摘要

太阳多通道望远镜是目前世界上规模最庞大、结构最复杂、功能最强的太阳观测仪器。其核心部分——多通道双折射滤光器，包括九通道双折射滤光器、太阳全日面磁场滤光器和H α 精细结构滤光器。它的投入使用，使得三维（或多层次）太阳矢量磁场和视向速度场的同时测量成为现实，这在太阳磁场和速度场的测量历史上是一个飞跃。本文分别描述这三台滤光器的光学设计、光谱调试方法及磁场、视向速度场的测量原理。

一. 引言

双折射滤光器在太阳的观测中起着非常重要的作用，它是一种视面单色器，利用它可以进行视面的太阳单色像、矢量磁场或视向速度场的观测。目前世界上形形色色的滤光器不下几十台，包括万能滤光器，都是单通道滤光器，只能观测太阳上的一个层次，不能同时利用不同的谱线来进行多层次的太阳观测。如果能同时在多条谱线上观测，就可以得到太阳上各种现象的三维演化，这必然会大大促进太阳物理的进展。多通道双折射滤光器的发明（艾，胡，1986a，1986b，1987），就能实现这一目标。九通道双折射滤光器是世界上第一台多通道双折射滤光器，它的每一个通道都是万能可调的，谱线可以覆盖从3900Å～6600Å的可见光波段。利用偏振分束器及全反射棱镜，把一束光分成九束光，可同时获得九条谱线的信息。全日面双折射滤光器，可以在二条谱线上工作，在5324Å线上测量全日面太阳磁场；在5576Å线上，可测量全日面视向速度场。H α 精细结构滤光器可以得到很好的H α 精细结构资料。该系统共用了光学元件1679片，见表1，旋转件及步进电机69个，恒温探测器多达20只，CCD接收器多达14只。

表1. 多通道滤光器光学元件数量统计

冰洲石	石英	M_gF_2	KD*P	偏振分束器	全反射棱镜	偏振片	干涉滤光片	玻璃
78	496	424	14	21	8	101	14	523
		总计： 1679						

* 国家自然科学基金项目

本文在以下几节中分别讨论这三台滤光器的光学设计、调试方法及磁场、速度场的测量原理。

二. 九通道双折射滤光器

2.1 光学设计

九通道双折射滤光器是由头和体组成的多通道双折射滤光器(艾, 胡,1987),分为九通道头和九通道体两部分,一束光进入九通道头后,被分成五束光,再进入九通道体,分成九束光出射出来,就得到了九个波长的单色像。(九通道头的光学设计图如图1,九通道体的光学设计图如图2a,2b)。

5172.699A $\Delta\lambda \sim 0.092$A	5247.063A $\Delta\lambda \sim 0.048$A	5250.211A $\Delta\lambda \sim 0.048$A
4685.750A $\Delta\lambda \sim 0.462$A	6302.511A $\Delta\lambda \sim 0.092$A	5576.106A $\Delta\lambda \sim 0.057$A
3968.468A $\Delta\lambda \sim 2.424$A	5875.989A $\Delta\lambda \sim 0.079$A	6562.808A $\Delta\lambda \sim 0.106$A

图3. 九通道滤光器工作波及透过带半宽

每个通道的工作波长及透过带半宽如图3所示,各晶体的设计参数列于表1中。除了5173 Å路, 5247 Å路, 5250 Å路中各有一个等付利叶系数晶体级外,其它各晶体级都采用Lyot或宽视场Lyot级的设计。每个晶体级中都用了消色差波长调节装置,因此每一个通道都是一台万能可调滤光器。

2.1.1 偏振片的研制

多通道滤光器中共需一百余片偏振片,其偏振度要求大于99.90%,透过率大于42%。我们采用的是美国Polaroid公司生产的HN系列偏振膜,该偏振膜的两边有一种CAB膜(Title, 1976)。这种CAB膜起到保护易碎的偏振膜的作用,但是当光线通过时,会产生大量的杂散光。绝大部分的杂散光来源于偏振膜与CAB膜之间的区域,当CAB膜去除后,几乎所有的杂散光都可消除掉。

CAB膜溶于丙酮,丙酮溶液可在8小时内去除CAB膜。当CAB膜完全溶解后,应在清洁的丙酮溶液中清洗几次。然后,用干净毛巾将偏振膜擦洗干净。用两片K9保护玻璃胶合起来,在工作温度下固化,成品的偏振片就做成了。经测试,在可见光波段,其偏振度和透过率都满足我们的要求。

2.1.2 消色差波片的研制

在物理光学仪器中,波片(包括1/2和1/4波片)是个极其重要的光学元件。一般来

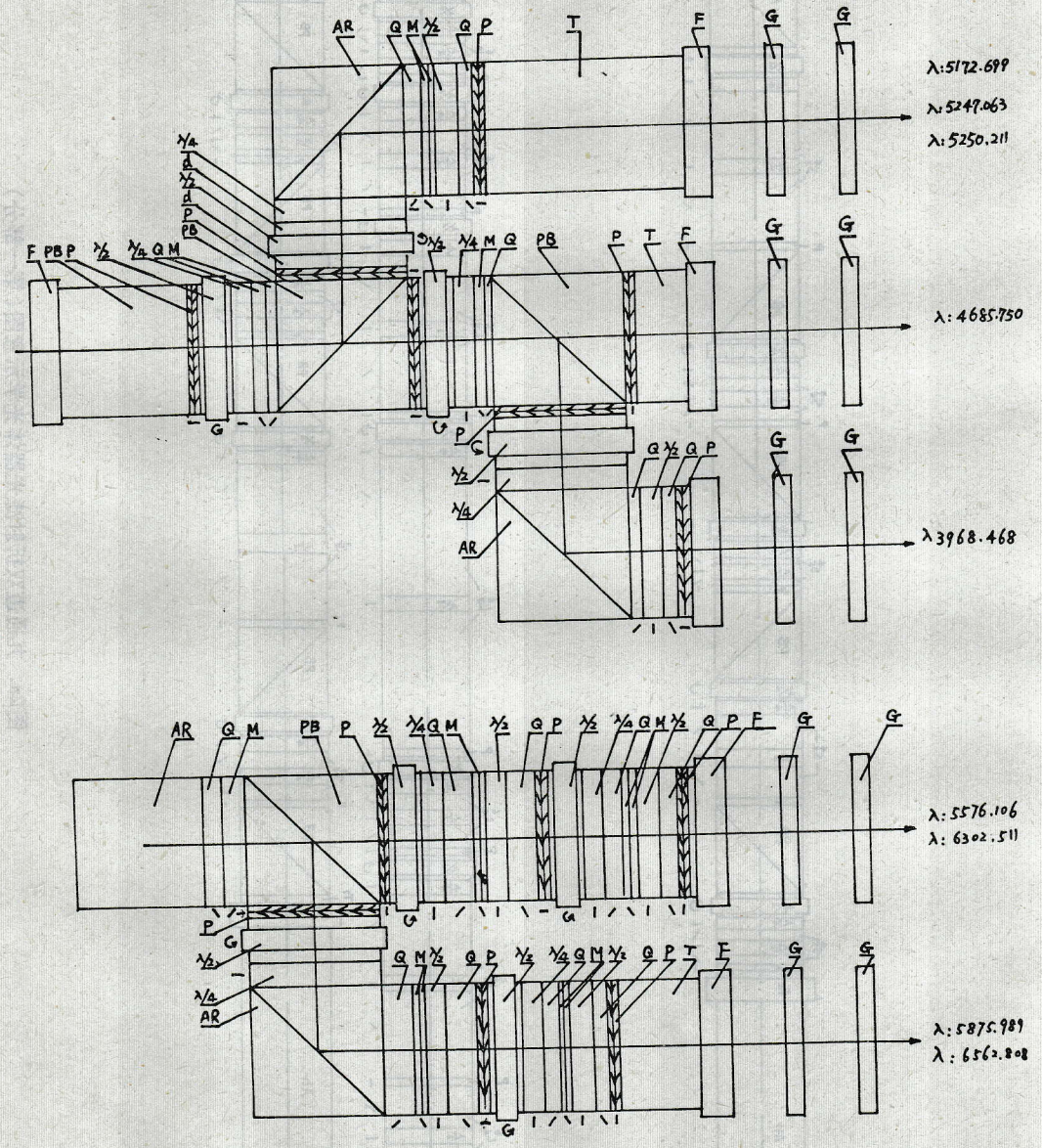


图1. 九通道双折射滤光器头光学示意图

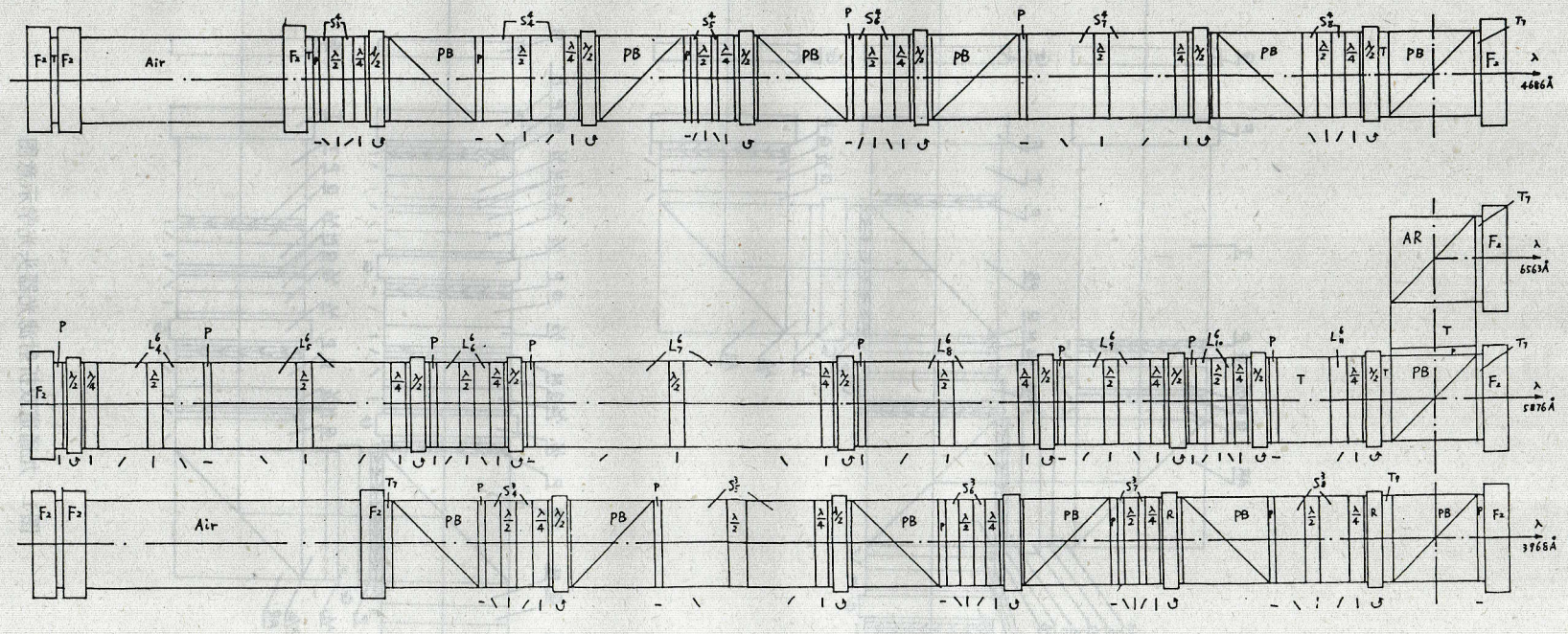


图2a. 九通道双折射滤光器体光学示意图(第一部分)

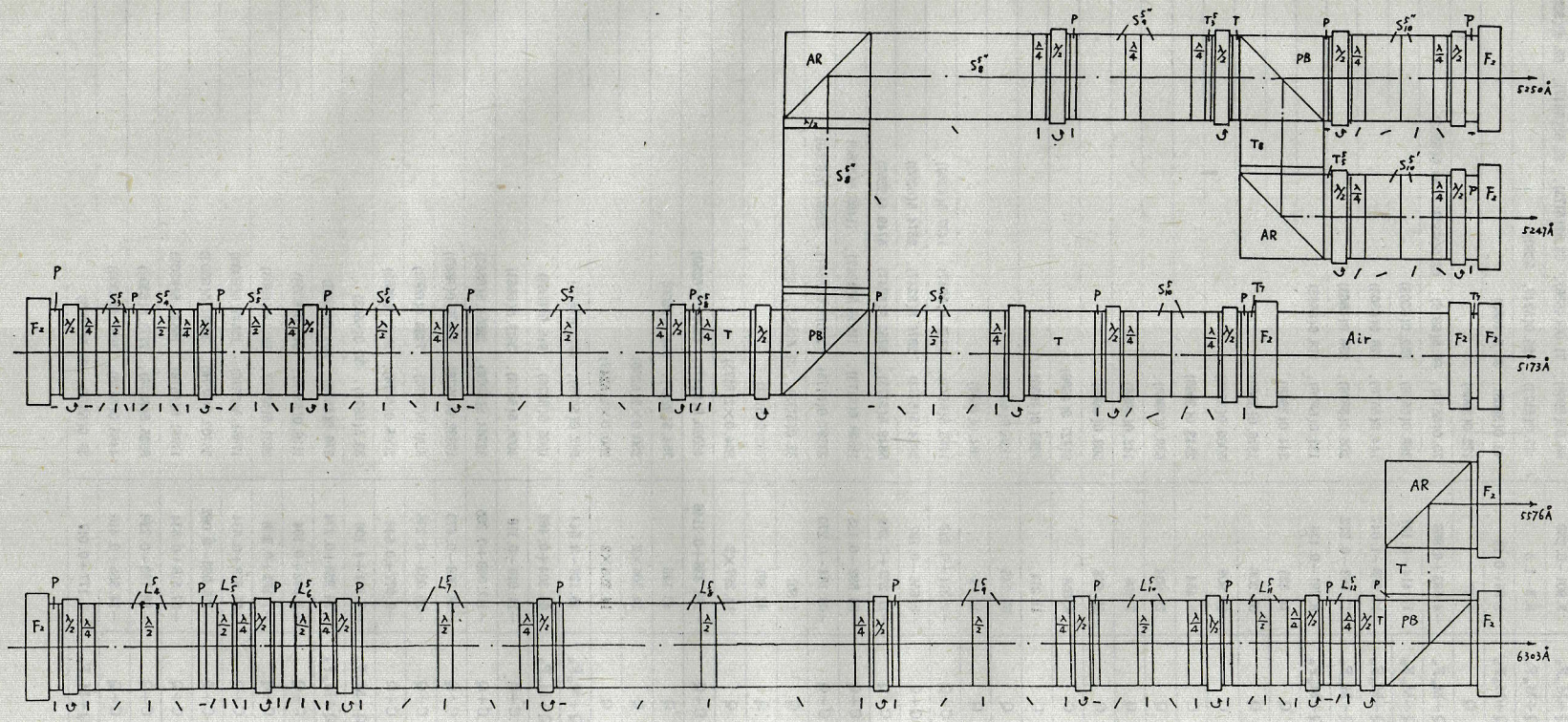


图2b. 九通道双折射滤光器体光学示意图(第二部分)

表2. 九通道滤光器各晶体级设计参数

	No.	材料	厚度 (mm)	延迟级数(Wavelength A)	视场状况
头	S_1	$Q+M_gF_2$	3.901−0.259	86.03(3968), 71.00(4686), 63.52(5173), 62.52(5247), 62.48(5250)	窄
	S_2^a	$Q+M_gF_2$	8.8−1.3	127.0(5173), 125.0(5247, 5250)	宽
	S_2^b	$Q+M_gF_2$	1.86−0.13	43.0(3968), 35.5(4686)	窄
	S_3^a	Q	7.17	172.0(3968)	宽
	L_1	$Q+M_gF_2$	−4.593+6.856	70.0(5576), 66.5(5876), 62.0(6303), 59.5(6563)	窄
	L_2^a	$Q+M_gF_2$	17.414−0.137	288.0(5576), 252.0(6303)	宽
	L_3^a	$Q+M_gF_2$	10.089−1.047	144.0(5576), 126.0(6303)	宽
	L_3^b	$Q+M_gF_2$	17.563−0.272	266.0(5876), 236.0(6563)	宽
	L_3^c	$Q+M_gF_2$	8.781−0.136	133.0(5876), 118.0(6563)	宽
体	S_3^b	Q	14.323	344.0(3968)	宽
	S_3^c	Q	57.208	1376.0(3968)	宽
	S_3^d	C	10.909	5066.0(3968)	宽
	S_3^e	C	5.454	2543.0(3968)	宽
	S_3^f	Q	28.604	688.0(3968)	宽
	S_4^a	Q	7.156	142.0(4686)	宽
	S_4^b	Q	28.622	568.0(4686)	宽
	S_4^c	C	5.658	21427.0(4686)	宽
	S_4^d	C	11.314	4293.0(4686)	宽
	S_4^e	Q	57.245	1136.0(4686)	宽
	S_4^f	Q	14.32	284.0(4686)	宽
	S_5^a	C+Q	−4.314+0.228	1462.5(5173), 1438.5(5247), 1437.5(5250)	宽
	S_5^b	C+Q	−8.656−0.197	2924.5(5173), 2876.5(5247), 2874.5(5250)	宽
	S_5^c	C+Q	−17.282+0.259	5849.5(5173), 5753.5(5247), 5749.5(5250)	宽
	S_5^d	C+Q	−34.592−0.135	11698.5(5173), 11506.5(5247), 11498.5(5250)	宽
	S_5^e	C+Q	−69.184−0.270	23397.0(5173), 23013.0(5247), 22997.0(5250)	宽
	S_5^f	Q	1.801	32.0(5173), 31.5(5247, 5250)	窄
	S_6^a	Q	42.891	762.0(5173)	宽
	S_{10}^a	Q	14.297×2	254.0×2(5173)	宽
	$S_5^{a\prime}$	C+Q	−138.336+0.1146	46026.5(5247), 45994.5(5250)	宽
	$S_6^{a\prime}$	Q	43.146	754.5(5247), 754.0(5250)	宽
	$S_{10}^{a\prime}$	Q	14.306×2	250.0×2(5250)	宽
	$S_{10}^{a\prime}$	Q	14.296×2	250.0×2(5247)	宽
	L_4^a	$Q+M_gF_2$	35.126−0.544	532.0(5876), 472.0(6563)	宽
	L_5^a	$Q+M_gF_2$	68.304+0.462	1065.0(5876), 945.0(6563)	宽
	L_6^a	C+Q	−14.016−0.118	4095.5(5876), 3619.5(6563)	宽
	L_7^a	C+Q	−112.069+0.265	32764.5(5876), 28956.5(6563)	宽
	L_8^a	C+Q	−56.066−0.473	16382.0(5876), 14478.0(6563)	宽
	L_9^a	C+Q	−28.033−0.236	8191.0(5876), 7239.0(6563)	宽
	L_{10}^a	C+Q	−6.977+0.546	2048.0(5876), 1810.0(6563)	宽
	L_{11}^a	$Q+M_gF_2$	−3.164+4.106	33.5(5876), 30.0(6563)	窄
	L_4^b	$Q+M_gF_2$	34.828+0.274	576.0(5576), 504.0(6303)	宽
	L_5^b	C+Q	−3.592+0.104	1116.0(5576), 972.0(6303)	宽
	L_6^b	C+Q	−7.182+0.208	2231.5(5576), 1943.5(6303)	宽
	L_7^b	C+Q	−57.518+0.534	17851.5(5576), 15547.5(6303)	宽
	L_8^b	C+Q	−115.093−0.062	35702.5(5576), 31094.5(6303)	宽
	L_9^b	C+Q	−57.518+0.534	17851.5(5576), 15547.5(6303)	宽
	L_{10}^b	C+Q	−28.788−0.298	8925.5(5576), 7773.5(6303)	宽
	L_{11}^b	C+Q	−14.365+0.416	4463.0(5576), 3887.0(6303)	宽
	L_{12}^b	$Q+M_gF_2$	2.177+0.017	36.0(5576), 31.5(6303)	窄

讲，它的位相延迟是波长和温度的函数。为了使滤光器在很宽的光谱范围内都适用，要求波片是消色差的（也就是说，波片的位相延迟随波长的变化不大）。消色差波片的设计一般分为两大类：一类是由不同种双折射晶体构成的“晶体波片”，另一类是由同种材料构成的“组合波片”（Title, 1975; Wang, et al., 1993a）。在多通道滤光器中采用晶体波片的设计方案。晶体消色差波片的构成材料是天然水晶和人造MgF_2晶体。若设一晶体波片，对于波长为λ_1，λ_2的光来讲，其位相延迟为n=1/2或1/4，则有以下方程成立：

$$\mu_Q(\lambda_1)d_Q+\mu_{MgF}(\lambda_1)d_{MgF}=n\lambda_1 \qquad (2.1)$$

$$\mu_Q(\lambda_2)d_Q+\mu_{MgF}(\lambda_2)d_{MgF}=n\lambda_2 \qquad (2.2)$$

其中μ_Q、μ_{MgF}分别为水晶和MgF_2晶体的双折射率，d_Q、d_{MgF}分别为水晶和MgF_2的厚度。对于不同的设计波长，可以得不同的水晶、MgF_2厚度。设计参数如表3所示，实测位相延迟的最大相对误差小于3.0%（邓元勇等，1993）。

表3. 多通道滤光器中消色差波片的设计参数

设计波长 λ1, λ2 (A)	水晶厚度 MgF_2厚度(mm)	位相延迟	最大相对延迟误差 $\Delta r_{max}/r$	光谱的使用范围 $\Delta\lambda$(A)
5576.106 6562.808	0.7962 0.6394	180°	0.0245	~1800
5250.211 6302.511	0.6836 0.5532	180°	0.0056	~1700
4685.750 6302.511	0.5714 0.4660	180°	0.0262	~2200
3968.468 4685.750	0.3666 0.3061	180°	0.0123	~1100
4226.728 6173.339	0.4404 0.3638	180°	0.0157	~1400
5324.182 5576.106	0.5682 0.4630	180°	0.0018	~650
4226.728 6173.339	0.2579 0.2116	90°	0.0157	~2400

2.1.3 消色差波长调节装置

当一厚度为d，双折射率为μ的晶体b，放在两偏振片P_1与P_2之间，且其光轴与偏振片的偏振轴成45°，如图4所示。那么振幅相同的寻常光（o光）和非寻常光（e光）便会产生偏振干涉，透过率为：

$$P_1 \parallel P_2: T(\lambda)=\cos^2(\pi\mu d/\lambda),$$

波长$\lambda=\mu d/n$时，n=1, 2, 3, ……，透过率为极大。

$$P_1 \perp P_2: T(\lambda)=\sin^2(\pi\mu d/\lambda),$$

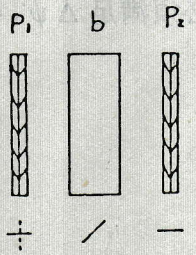


图4. 滤光器的简单级

波长 $\lambda = \mu d /(n+1/2)$ 时，n＝0，1，2，3，……，透过率为极大，这就是最简单的Lyot级结构。

为了能使不同波长的光极大地通过，可在图4中加上波长调节装置。一般来讲，有以下三种类型（如图5所示）：

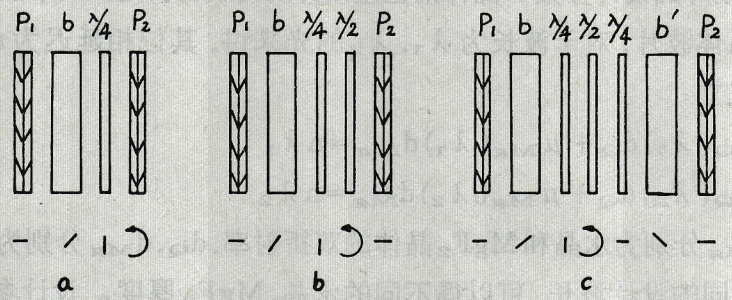


图5. 三种波长调节装置

①旋转偏振片型，图5(a)，透过率为$T(\lambda)=\cos^2(\pi\mu d/\lambda+\psi)$，$\psi$ 为偏振片的旋转角度，其周期为 π；

②旋转1/2波片型，图5(b)，透过率为$T(\lambda)=\cos^2(\pi\mu d/\lambda+2\psi)$，$\psi$ 为1/2波片的旋转角度，其周期为 $\pi/2$；

③宽视场旋转1/2波片型，图5(c)，透过率为$T(\lambda)=\cos^2(\pi\mu d/\lambda+2\psi)$，$\psi$ 为1/2波片的旋转角度，其周期为 $\pi/2$。

如果其中的波片是消色差的，那么在消色差的光谱范围内，这一晶体级就是万能可调的，那么这种波长调节装置，就是消色差波长调节装置。

以上这三种调节波长的的方法对Lyot级，Evans级都适用，但对等付利叶系数滤光器（或Solc滤光器）不能适用（Wang, et al., 1993b）。等付利叶系数滤光器是在两偏振片之间放置数片等厚晶片组成，相互之间的晶轴成一定规律地排列。只要将每片晶片分成两片（两片厚度不一定相等!），在其中间加上 $\lambda/4$＋旋转 $\lambda/2$＋$\lambda/4$（两 $\lambda/4$ 光轴平行，并与晶体光轴成45°），就得到了等付利叶系数滤光器中的波长调节装置。在九通道滤光器中，有三级二片型的等付利叶系数级，其波长调节装置如图6所示。当 $\psi_1-\psi_2=\alpha_1-\alpha_2$ 时，透过率为：

$$T(\lambda)=\{\sin^2 2\alpha_1\cos[\delta-2(\psi_1+\psi_2)]+\cos^2 2\alpha_2\}^2 \qquad (2.3)$$

其中 $\delta=\pi\mu(\lambda)d/\lambda$，$\alpha_1=62°\ 38'$，$\alpha_2=27°\ 22'$，$\psi_1$ 和 ψ_2 分别是第一片、第二片旋转1/2波片的旋转角度，其周期为 π。当等付利叶系数滤光器的透过带移动时，必须满足 $\Delta\psi_1=\Delta\psi_2$，$2(\Delta\psi_1+\Delta\psi_2)$ 就是所移动的位相差。

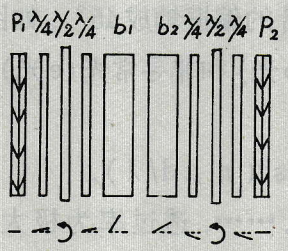


图6. 等付利叶系数滤光器中波长调节装置

2.1.4　组合级的设计及检测(王敬山，毛伟军等，1995)

在九通道滤光器中，有许多晶体级必须使得两个波长或多个波长的光能同时通过。考虑到晶体的双折射率不能精确地确定，这些组合级只能按照以一种晶体为主，再用另一种薄晶体(两片薄晶片相减)来补偿的原理设计的，薄晶体的延迟级数很小，通过改变其厚度，就能使得整个晶体级的延迟级数为整数或半整数。

组合级有两类，一种是水晶(厚)+MgF_2(薄)，另一类是冰洲石(厚)+水晶(薄)。当将两种晶体抛光好后，用两种光(波长为 λ_1 和 λ_2)来检测，得到的延迟为 N_1+n_1 和 N_2+n_2(其中 N_1、N_2 为整数或半整数，n_1、n_2 为小数)。因为每个晶体级中都有消色差的波长调节装置，只要改变薄晶体的厚度 Δd_2，使整个晶体级延迟级数的尾数(小数)在两个波长上相等即可，亦即，

$$n_1-\Delta n_1=n_2-\Delta n_2 \tag{2.4}$$

其中 $\Delta n_i=\mu_2(\lambda_i)\Delta d_2/\lambda_i, i=1,2,$

则可得

$$\Delta d_2=\frac{(n_2-n_1)\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1\mu_2(\lambda_2)-\lambda_2\mu_2(\lambda_1)} \tag{2.5}$$

也就是说，只要将 d_2 减薄 Δd_2，那么这一组合级就满足要求了。

2.1.5　可调双折射滤光器中晶轴方向排列的确定

在多通道双折射滤光器中的每一个晶体级中，都采用了消色差波长调节装置，因此，每一个通道都是一个万能可调的滤光器。从历史上看，在滤光器的设计、装配和调试中，最困扰人们且最易出错的，就是晶体、波片等元件的晶轴方向排列问题。多通道滤光器包含的晶体元件多达千片，可调级近百个，如果元件的晶轴方向的排列出现一点问题，就会造成极大的困难，因此对元件的晶轴方向排列的规律进行了普遍的探讨。在多通道滤光器的研制过程中，我们找到滤光器的三个普遍规律 (王敬山等，1991)：

(1) 透过带的调节方向(红移或紫移)与晶体级中偏振片的取向无关。

(2) 旋转等效性：以光线传播方向为旋转轴，将光路中的各个元件旋转任意相同的角度，光路的状态都是等效的。

(3) 可逆等效性：入射光的转播方向不变，而使整个光路倒转180°，则与倒转前的光路状态等效。

基于以上三个规律，我们得到了“符号相乘法则”：1/4波片与和它靠近的双折射晶体快轴间的方位角、1/2波片的旋转角、位相差的变化，三者的正负号遵从符号相乘规则，见表4。

根据“符号相乘法则”，可以统一地确定晶轴方向的排列，使得当所有旋转1/2波片向某一个方向旋转时，各晶体级的波带统一地向同一方向移动(红移或紫移)，这在滤光器的光谱调试、透过波带的移动等方面，非常方便。在九通道滤光器中，旋转

1/2波片是由步进电机来驱动的，我们约定当电机走“+”步时，各晶体级的透过波带向长波方向移动（红移），当电机走“−”时，各透过波带向短波方向移动（紫移）。我们就是按照这一约定，并根据“符号相乘法则”来确定九通道滤光器中晶轴方向的排列的。

表4. 波长调节方向与各元件方向排列之间的关系

$\lambda/4$与其靠近的晶体快轴间的方位角	$\lambda/2$的旋转角	位相差的变化	波带调节方向
+	+	+	红移
+	−	−	紫移
−	+	−	紫移
−	−	+	红移

2.1.6 九通道滤光器的透过率

对于4686Å，3968Å，6303Å(5576Å)，6563Å(5876Å)路，透过率公式：

$$T(\lambda)=\prod_{i=1}^{N}\cos^2\left[\frac{\mu_i(\lambda)d_i}{\lambda}+2\psi_i\right] \tag{2.6}$$

其中ψ_i是波长调节装置中旋转1/2波片的旋转角度，4686Å：N＝8，3968Å：N＝5，6303Å：N＝12，6563Å：N＝11。

对于5173Å，5247Å，5250Å三个通道，透过率公式：

$$\begin{aligned}T(\lambda)=&\left\{\prod_{i=3}^{N}\cos^2\left[\frac{\mu_i(\lambda)d_i}{\lambda}+2\psi_i\right]\right\}\\&\cdot\left\{\sin^2 2\alpha_1\cos\left[\frac{\mu(\lambda)d}{\lambda}+2(\varphi_1+\varphi_2)\right]+\cos^2 2\alpha_2\right\}^2\\&\cdot\left\{\prod_{j=1}^{3}\cos^2\left[\frac{\mu_j(\lambda)d_j}{\lambda}+2\psi_j\right]\right\}\end{aligned} \tag{2.7}$$

对于5173Å：N＝10，5247Å和5250Å：N＝11。

2.1.7 宽视场KD*P调制器

KD*P调制器作为磁分析器，是双折射滤光器中非常重要的组成部分。当加上方波交流电压时，它是±1/4波片。这种设计方案如图7示，两块KD*P晶体分别加正、负电压，使其成为$+\lambda/8$和$-\lambda/8$，中间为一消色差$\lambda/2$，这样便可得到+或$-\lambda/4$，然而KD*P晶体的厚度不能太厚（小于1.5mm），否则会有较大的位相延迟误差。但把KD*P晶体加工得很薄是很困难的。为此又设计了另一种宽视场KD*P调制器（如图8）。第一和第四块KD*P厚度为2.34mm，各加正负电压，成为$\pm\lambda/4$；第二和第三块KD*P厚度为1.63mm，各加正负电压，成为$+\lambda/8$，这样位相延迟的相对误差可控制在3.0%以内。

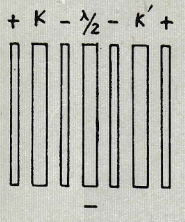


图7. 宽视场KD*P调制器

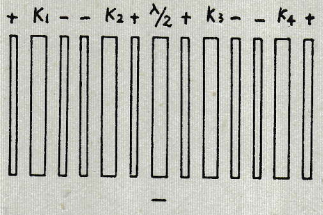


图8. 宽视场KD*P调制器的另一种设计

2.2 滤光器的光谱调试方法及部分结果

为了使滤光器每个通道的透过带确切地在某一Fraunhofer线上，必须先在光谱仪中进行光谱调试。首先在CCD监视器上找到某一太阳谱线，记下该谱线在监视器上的位置，然后把滤光器放置在狭缝前面。转动这一通道的所有步进电机，使各晶体级的透过极大轮廓在相同的位置上，再通过计算离太阳谱线的距离，把透过带逐步移到太阳谱线的线心，这样可得到滤光器在每个太阳谱线附近的透过带轮廓，这种方法的光谱精度可达到0.01Å～0.02Å。旋转 $\lambda/2$ 旋转一周，步进电机的步数为43200步，Lyot级旋转 $\lambda/2$ 的周期为10800($\pi/2$)步。对于等付里叶系数晶体级，旋转 $\lambda/2$ 的周期为21600(π)。如图9a，b，c，d，e，f，g，h所示，是用微机采下来的谱线轮廓，由于滤光器的光谱分辨率很高(大部分通道透过带半宽～0.05Å左右)，透过率较低，致使噪音过大。另外，CCD对某些谱线(特别是靠近紫区的谱线)灵敏度太低(宋国峰等，鉴定报告)，也使信噪比降低。九通道滤光器的透过率见表5(不加干涉滤光片)。

表5. 九通道滤光器各通道的透过率

波长	6562.808	6302.511	5875.989	5576.106	5250.211 5247.063	5173.699	4686.750	3968.468
透过率%	～7.0	～6.0	～5.5	～5.0	～3.0	～6.0	～12.0	～20.0

将滤光器放入望远镜后，还需用光电倍增管细调。光电倍增管作为接收器，调动每个通道的所有电机，使滤光器的光亮达到极小，这样就把每个通道的透过带都调到了太阳谱线的线心，这样达到的精度高于千分之五。

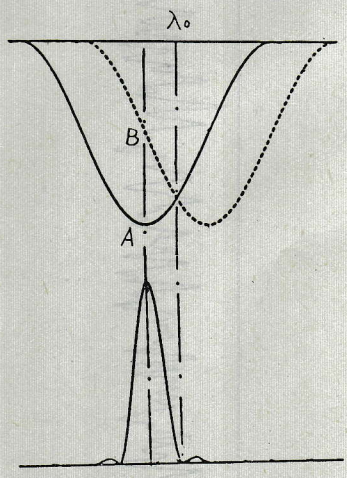


图10. 九通道滤光器测量纵向磁场原理示意图

2.3 磁场的测量方法及部分结果

将KD*P调制器放在滤光器的最前端。加上方波电压时，它是正1/4波片(+45°)或负1/4波片(−45°)，左旋光或右旋光通过它后，便变成线偏振光。因为滤光器的最前面是一偏振片，所以当KD*P调制时，总是只有一种圆偏振光(左旋或右旋)被允许通过。根据塞曼效应，纵向磁场使谱线分裂成左旋和右旋圆偏振光，这两种波长相差 $\Delta\lambda_H$。当KD*P上的电压为正时，只有左旋

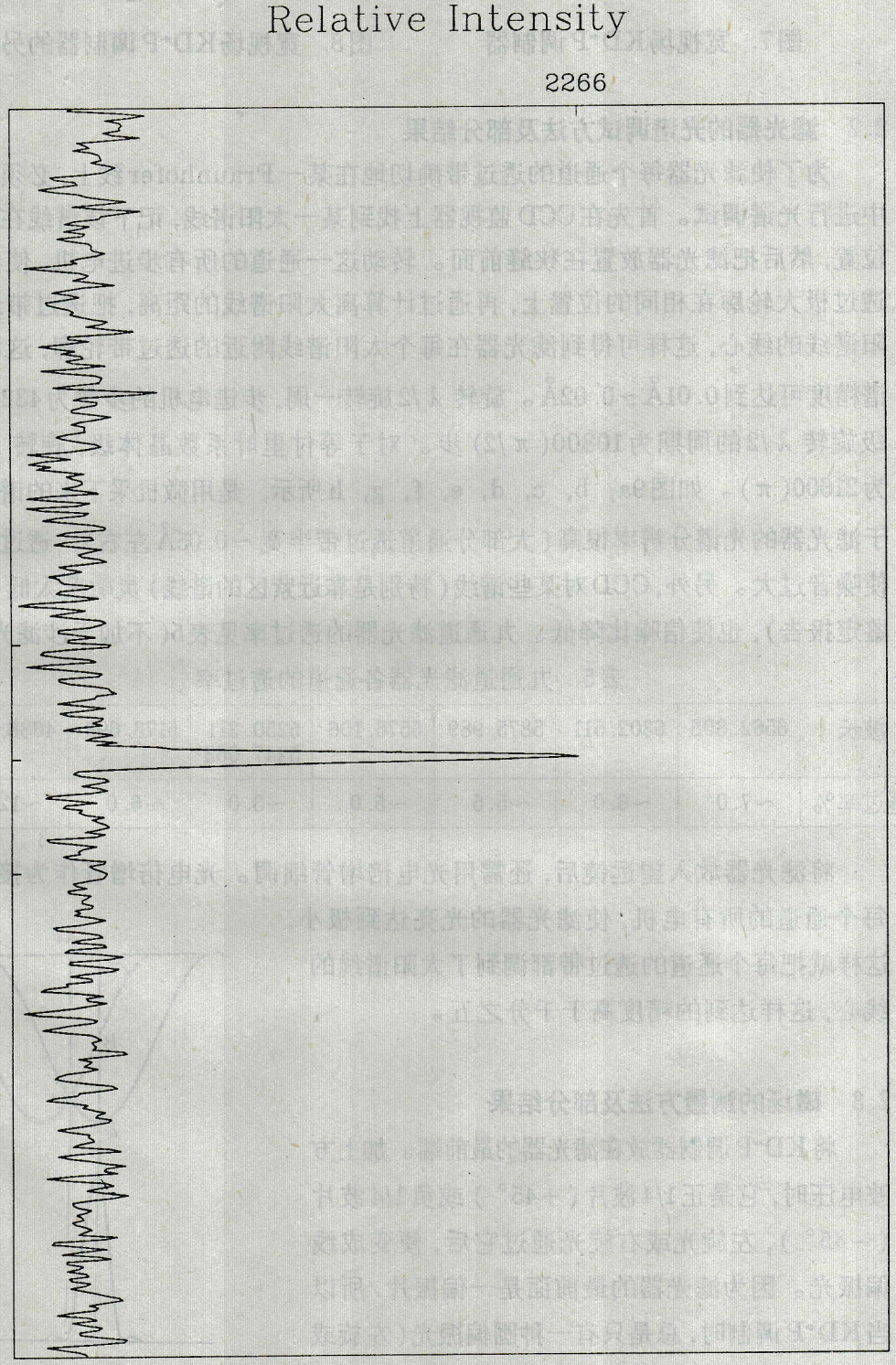


Fig. 9a

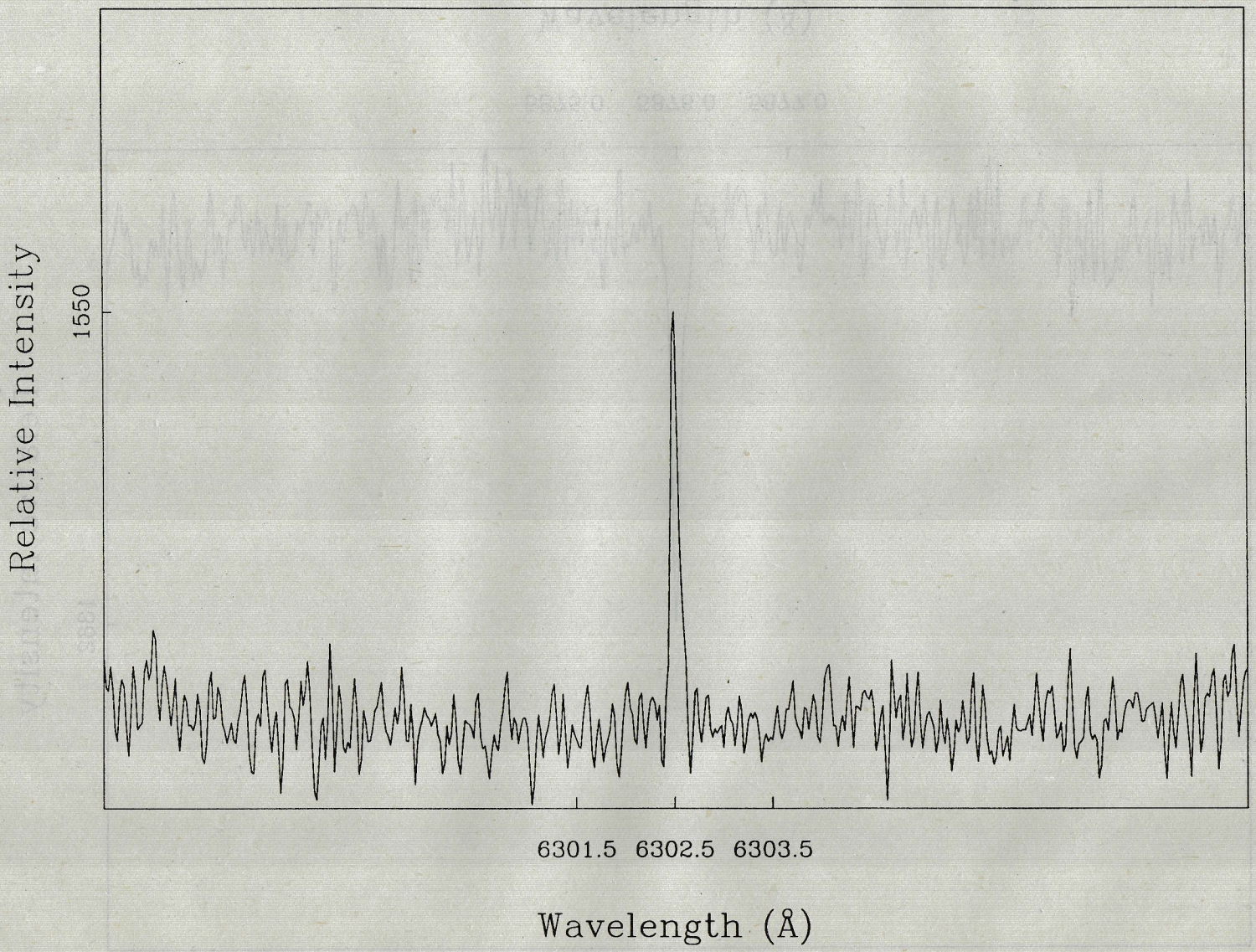


Fig. 9b

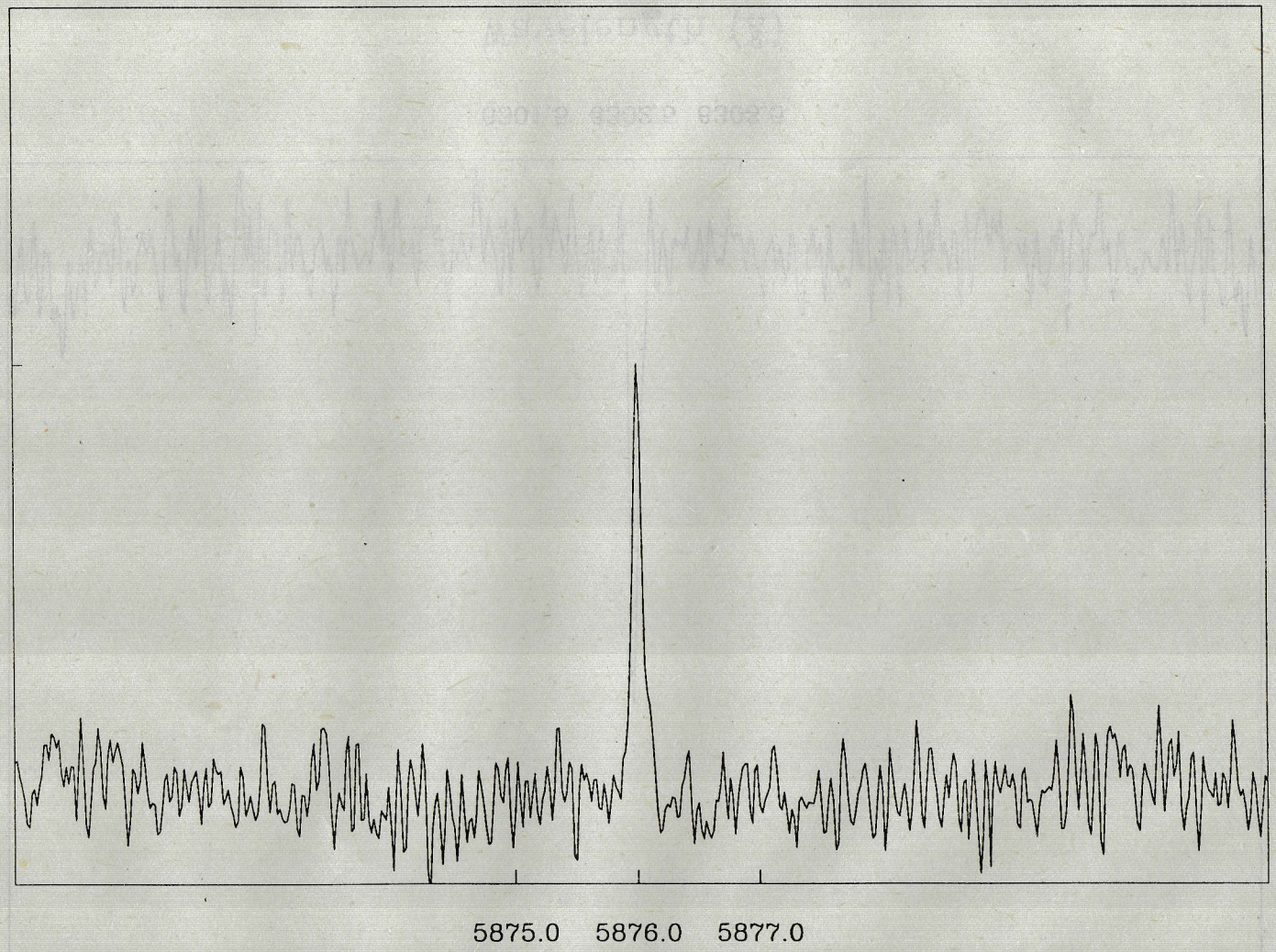


Fig. 9 c

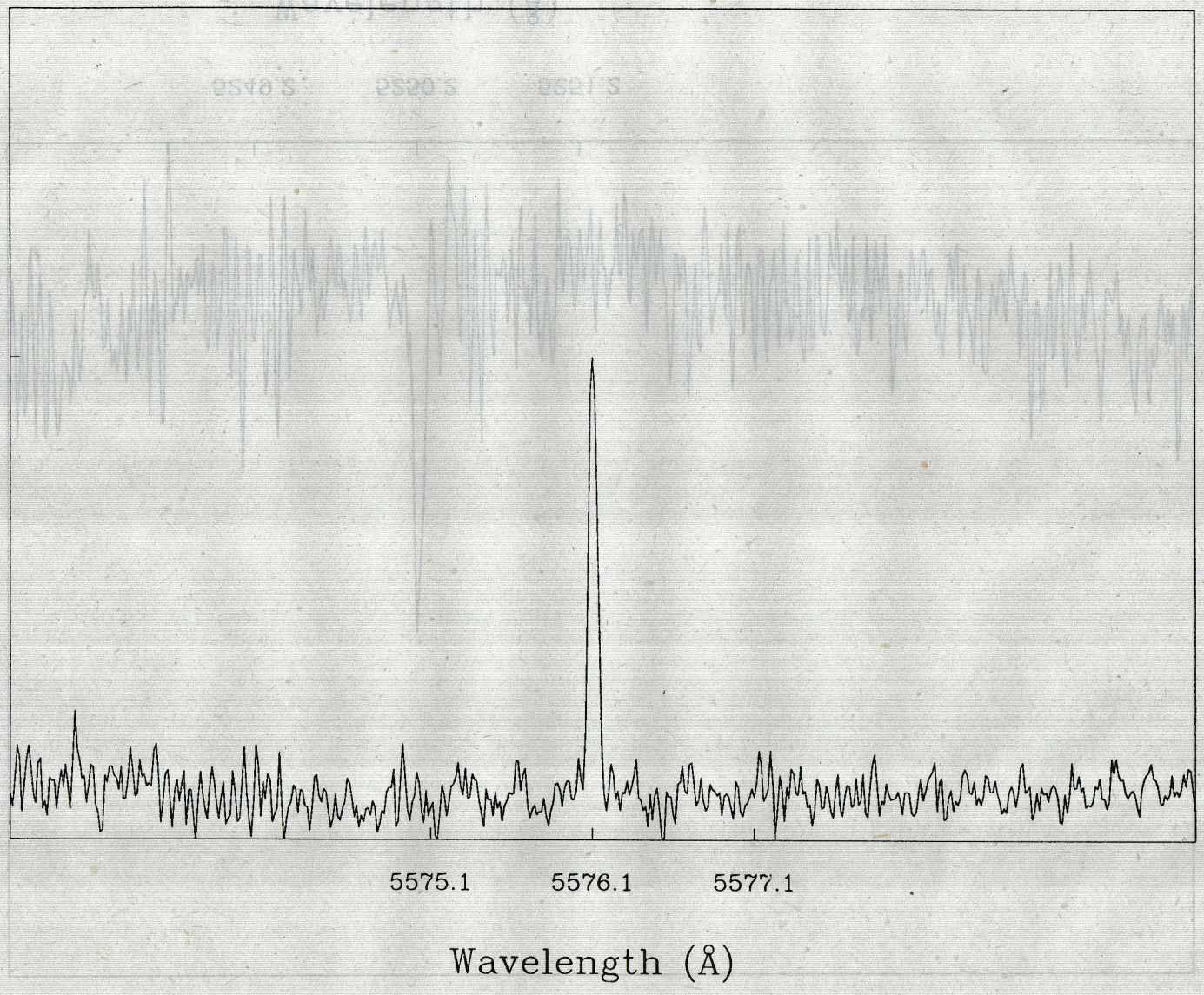


Fig. 9d

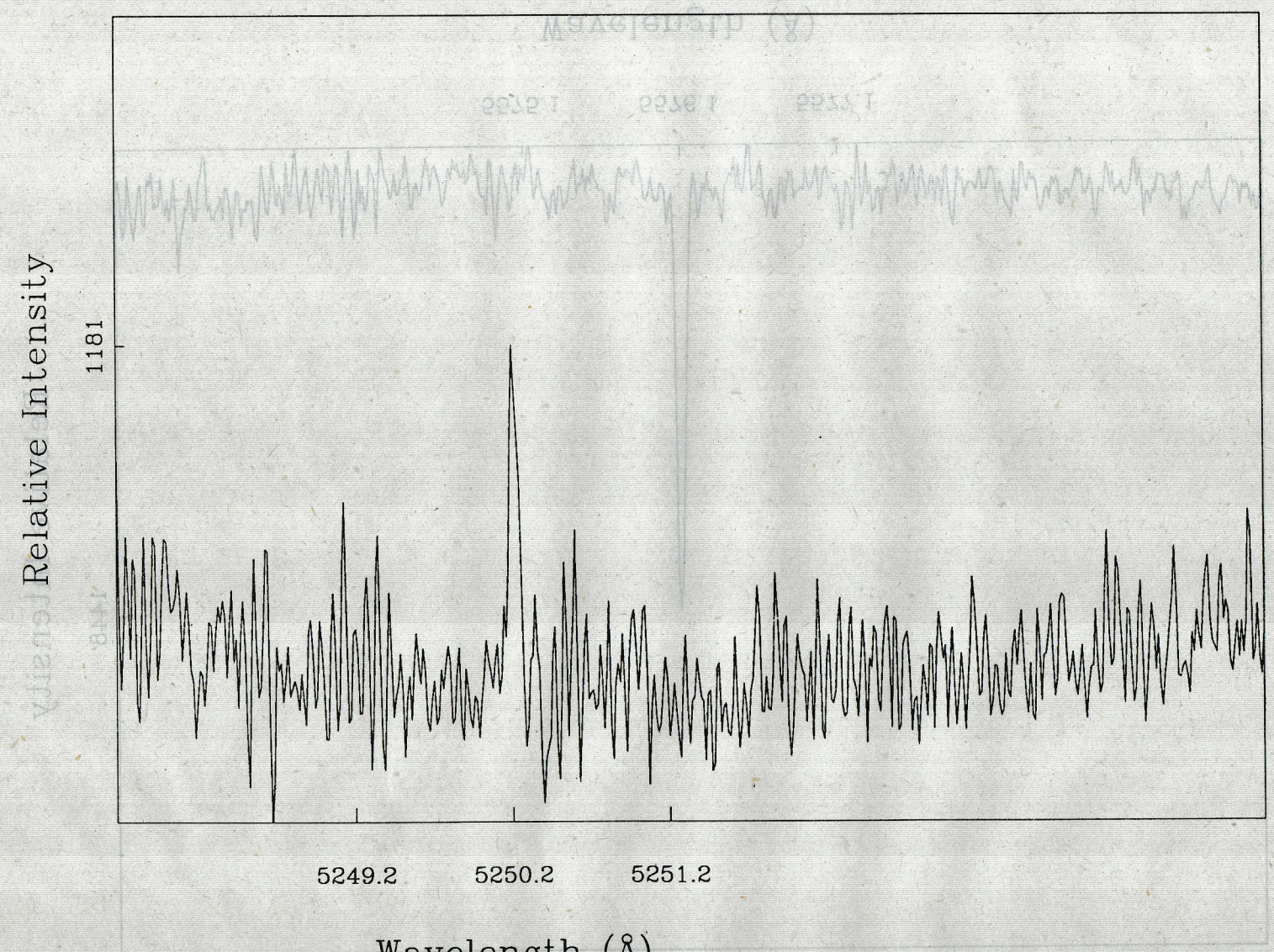


Fig. 9e

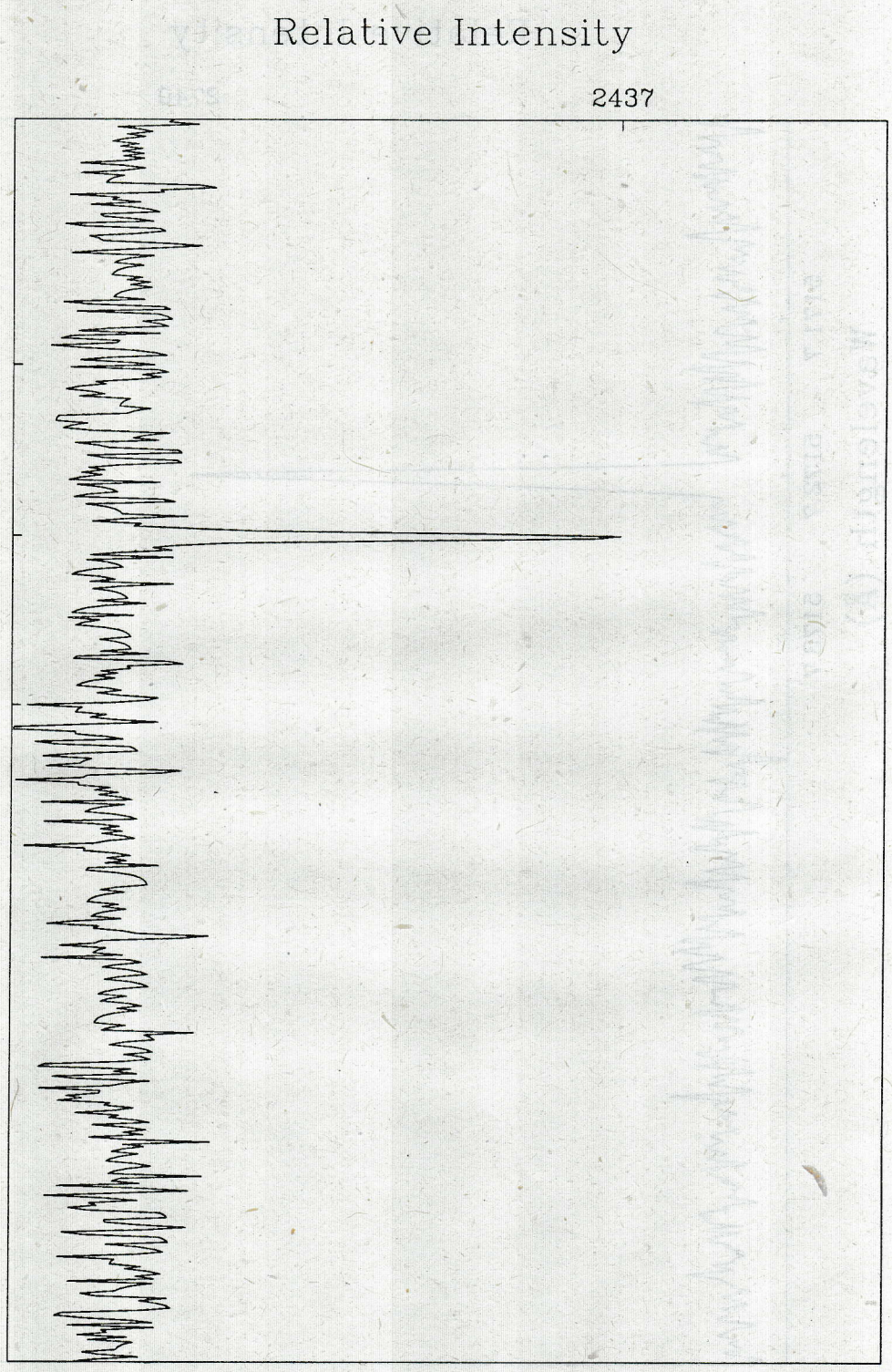


Fig. 9f

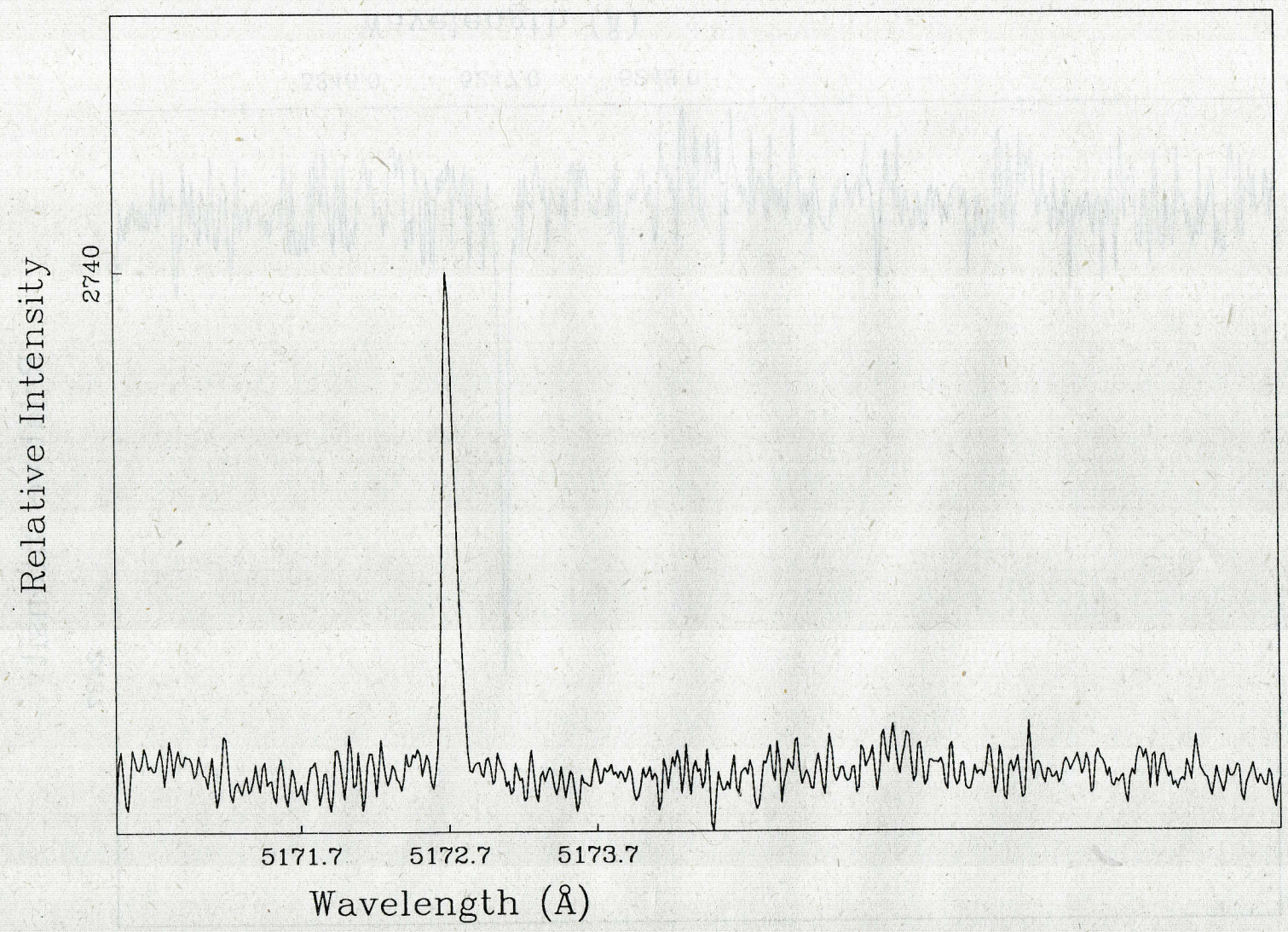


Fig. 9 g

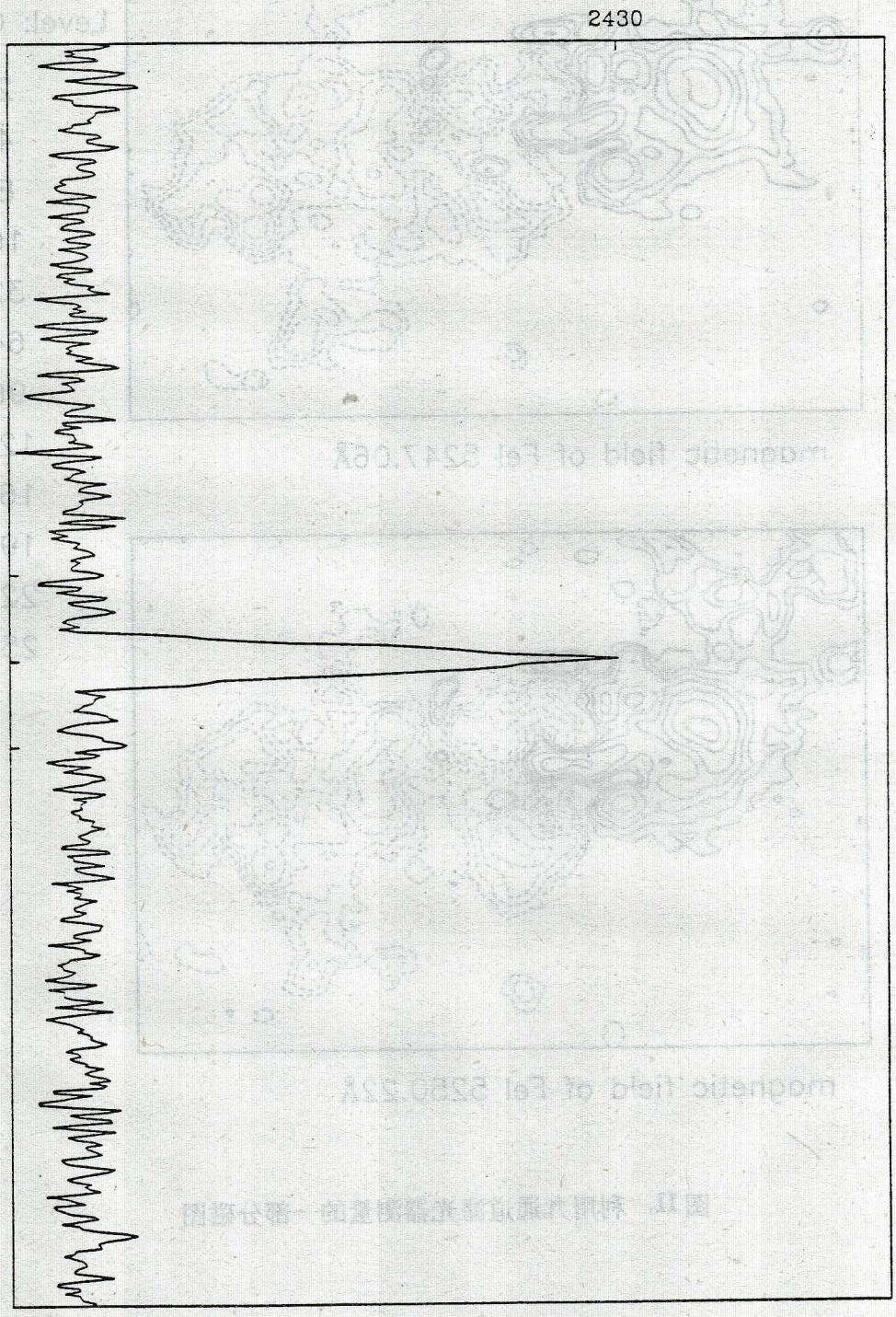


Fig. 9h

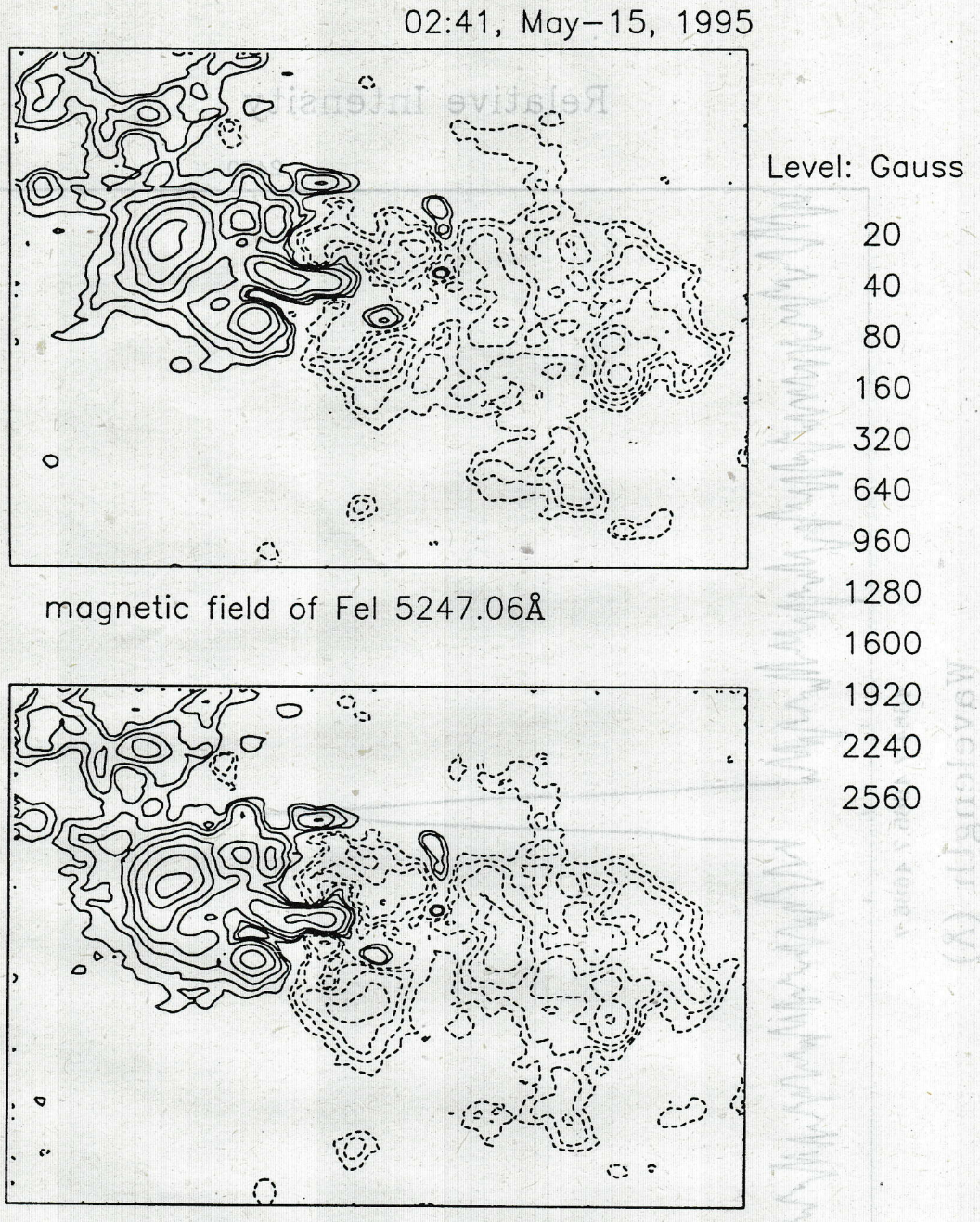


图 11. 利用九通道滤光器测量的一部分磁图

光被通过，CCD接收的光强度为I_A；当KD*P上的电压为负时，只有右旋光通过，CCD接收的光强度为I_B（如图10），那么光强差为：

$$\Delta I = I_B - I_A$$

当$\Delta\lambda_H = 0$时，$\Delta I = 0$

当$\Delta\lambda_H \neq 0$时，$\Delta I \propto \Delta\lambda_H \propto H$

因而可得到磁场强度$H(x,y)$。如图11，是利用九通道双折射滤光器得到的纵向磁图。

当KD*P调制器前加上光轴为0°或45°的消色差1/4波片时，可以测得磁场的横向分量Q或U。

三. 全日面双折射滤光器

3.1 光学设计

太阳多通道双折射滤光器另一个重要部分是用于测量全日面磁场和速度场的双折射滤光器，它是一台单通道万能可调滤光器。它的设计采用新双带方案（艾国祥等，1990），这种设计方案和Ramsey双带方案一样能够提高近一倍光亮，大大提高了灵敏度；另一方面，次极大比Ramsey小得多，并且把次厚级放在最前面，最厚级放在中间部分，使其受温度变化的影响减小，这也是新双带方案优于Ramsey双带方案的特点之一。

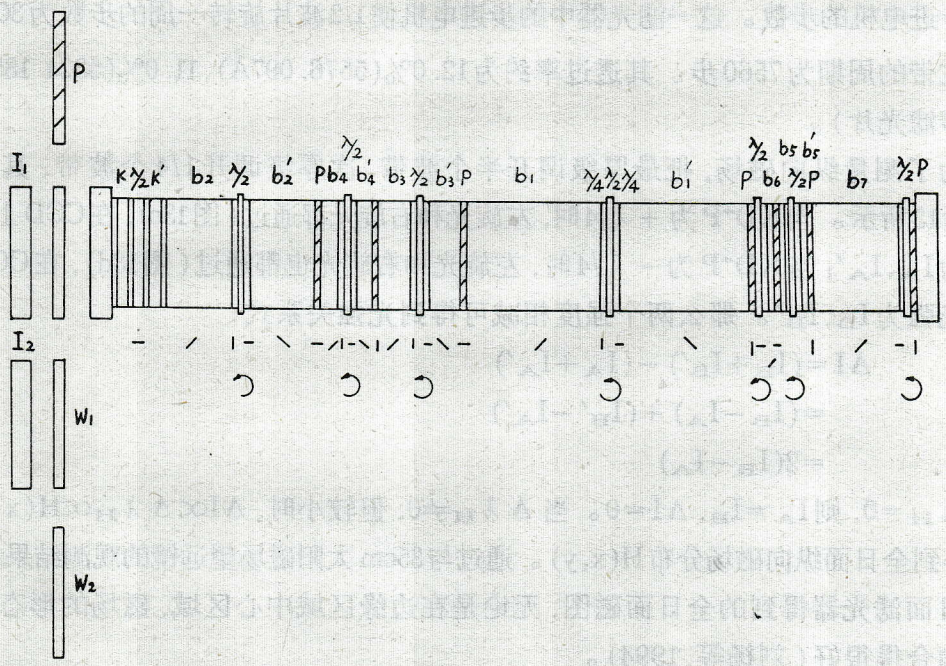


图12. 全日面双折射滤光器光学示意图

该滤光器共有七级晶体级，前五级（$b_1 \sim b_5$）是由冰洲石做的，并且全是宽视场，b_6是冰洲石做的，b_7是天然水晶做的，这两级是窄视场的。每一级都用了消色差波长调节装置，因此滤光器是万能可调的，其光学示意图如图12所示。每一级晶体的设计参数列于表6中。

该滤光器的透过率公式为：

$$T(\lambda)=\prod_{i=1}^{7}\cos^2\left(\frac{\mu_i(\lambda)d_i}{\lambda}\pi+2\psi_i\right) \tag{3.1}$$

其中 ψ_i 是每个旋转1/2波片的旋转角度。

表6. 全日面滤光器晶体元件的设计参数

	材料	晶体厚度(mm)	视场状况
第1级	冰洲石	25.8352×2	宽视场
第2级	冰洲石	17.9176×2	宽视场
第3级	冰洲石	8.9588×2	宽视场
第4级	冰洲石	4.4794×2	宽视场
第5级	冰洲石	2.2393×2	宽视场
第6级	冰洲石	2.9393	窄视场
第7级	石英	21.940	窄视场

3.2 光谱调试方法及磁场、速度场的测量原理

和2.2中讨论的方法相同，把该滤光器调到5324.185Å及5576.097Å的线心，记下七个步进电机的步数。这一滤光器中的步进电机使1/2波片旋转一周的步数为30240步，但透过带的周期为7560步。其透过率约为12.0%(5576.097Å)，11.0%(5324.185Å)(未加干涉滤光片)。

为了测量纵向磁场，把最厚级调开半个波带，次厚级调开1/4个波带，其波带状况如图13所示。当KD*P为 $+\lambda/4$ 时，左旋光和右旋光都通过(图13c)，在CCD上得到的光强为 I_A、I_A'；当KD*P为 $-\lambda/4$ 时，左旋光和右旋光也都通过(图13d)，在CCD上得到的光强为 I_B、I_B'。那么两个强度相减可得到光强关系式：

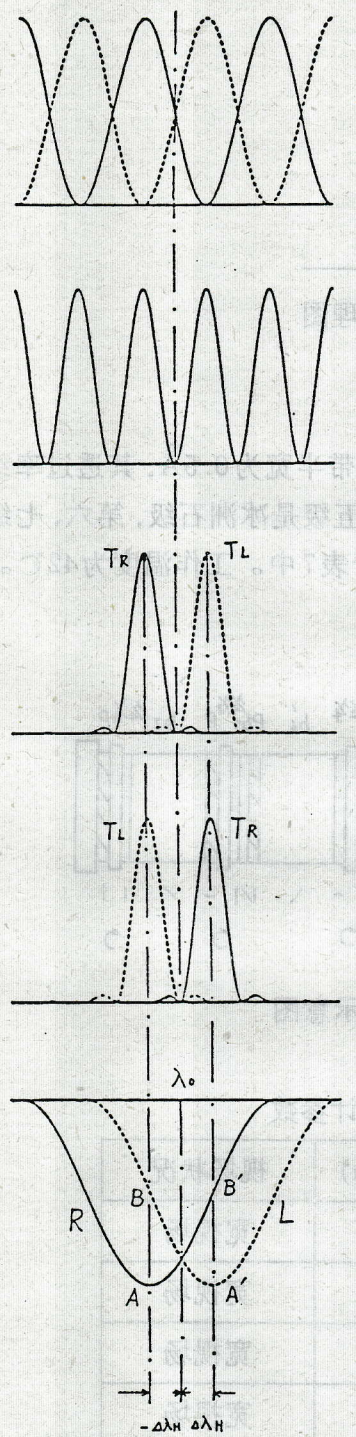
$$\begin{aligned}\Delta I&=(I_B+I_B')-(I_A+I_A')\\&=(I_B-I_A)+(I_B'-I_A')\\&=2(I_B-I_A)\end{aligned}$$

当 $\Delta\lambda_H=0$，则 $I_A=I_B$，$\Delta I=0$。当 $\Delta\lambda_H\neq0$，但较小时，$\Delta I\propto\Delta\lambda_H\propto H(x,y)$，因而可得到全日面纵向磁场分布H(x,y)。通过与35cm太阳磁场望远镜的观测结果相比较，用全日面滤光器得到的全日面磁图，无论是在边缘区域中心区域，磁场的形态和强度彼此吻合得很好(刘扬等，1994)。

为了测量太阳视向速度场，需把最厚级调开半个波带，而次厚级不动，KD*P前加一偏振片。当KD*P加电压后，成为 $\pm\lambda/4$，相当于次厚级的位相延迟加上1/4或减去1/4，滤光器透过带左右跳动(图14)。当KD*P加正电压时，测得光强度为 I_A，当KD*P为负电压时，测得光强度为 I_B，光强差为 $\Delta I=I_A-I_B$。

若 $\Delta\lambda_V=0$，则 $\Delta I=0$

若 $\Delta\lambda_V\neq0$，但很小时，$\Delta I\propto\Delta\lambda_V\propto V$ 可以得到速度图V(x,y)。



a. KD*P为 $\pm \lambda/4$时，次厚级波带轮廓

b. 最厚级波带轮廓

c. KD*P为 $+\lambda/4$时，滤光器透过带轮廓

d. KD*P为 $-\lambda/4$时，滤光器透过带轮廓

e. 当塞曼分裂为 $\Delta\lambda_H$时，滤光器测量的光强差

图13. 全日面磁场测量原理示意图

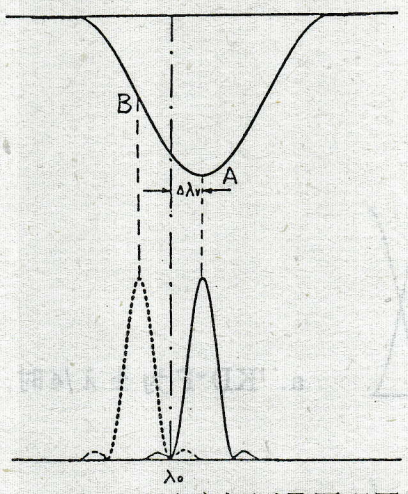


图14. 全日面速度场测量原理图

四. Hα精细结构滤光器

该滤光器是用于观察太阳Hα精细结构的，其透过带半宽为0.5Å，其透过率约为9.0%。共有七个晶体级，都是消色差可调级。其中前五级是冰洲石级，第六、七级是水晶级。其光学示意图如图15所示，晶体设计参数列于表7中。工作温度为42℃。其透过波带在±32Å范围内是可调的。

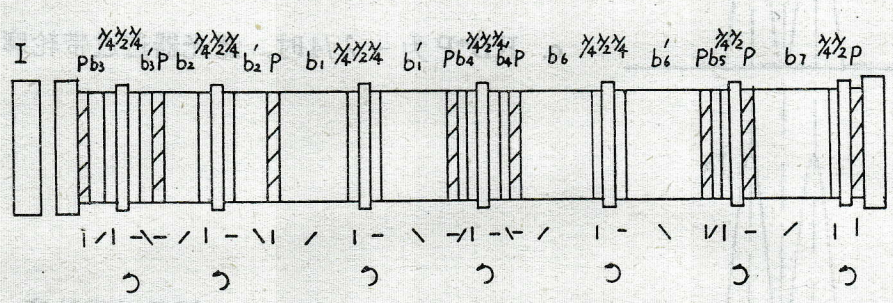


图15. Hα双折射滤光器光学示意图

表7. Hα滤光器晶体元件设计参数

	材料	晶体厚度(mm)	视场状况
第1级	冰洲石	11.456×2	宽视场
第2级	冰洲石	5.728×2	宽视场
第3级	冰洲石	2.864×2	宽视场
第4级	冰洲石	1.432×2	宽视场
第5级	冰洲石	1.434	窄视场
第6级	石英	13.480×2	宽视场
第7级	石英	13.480	窄视场

此滤光器的光谱调试也是按照2.2节中的方法，先用CCD在光谱仪下将滤光器的透过带调到Hα线上，再在望远镜上用光电倍增管将其透过带调至线心。因为每一级中的波长调节装置都是消色差的（光谱使用范围4500Å～7000Å），滤光器轮廓可以在很大的光谱范围内移动。

太阳多通道双折射滤光器是一台规模庞大、结构极为复杂的天文光学仪器，研制过程历时四年之久。南京天文仪器研制中心光学车间晶体组的师傅们，长期加班加点，付出了艰辛劳动；北京长城光学仪器厂的黄善书高级工程师，为该仪器提供了低折射率光敏胶，在光学件的胶合方面取得很好的效果。作者对他（她）们及所有为该仪器的研制成功付出劳动的人们，表示诚挚的谢意。

参考文献

艾国祥，胡岳风，中国科学A，8（1986a）889

艾国祥，胡岳风，中国科学A，9（1986b）987

艾国祥，胡岳风，天体物理学报，7（1987）305

艾国祥，Fear，R. J.，汲培文，天体物理学报，10（1990）180

邓元勇，艾国祥，王敬山，天体物理学报，13（1993）283

刘扬，宋国峰，王敬山，汪景秀，天体物理学报，14（1994）191

宋国峰，邓元勇，王敬山，艾国祥，张斌，多通道滤光器的光量测量及CCD的选配，1995，本文集

Title，A. M.，Applied Optics，1975，14，229

王敬山，艾国祥，邓元勇，天体物理学报，11（1991）383

Wang Jingshan，Ai Guoxiang，Proceedings of Chongqing Solar Physics Workshop，Chongqing，China（1993a）225

Wang Jingshan，Ai Guoxiang，Song Guofeng，Proceedings of Chongqing Solar Physics Workshop，Chongqing，China（1993b）220

王敬山，毛伟军，邓元勇，艾国祥，九通道双折射滤光器中组合晶体级的检测方法，1995，本文集

Solar Multichannel Birefringent Filter

Jingshan Wang[1]，Guoxiang Ai[1]，Fengbao He[2]，Yuanyong Deng[1]

Weijun Mao[2]，Guofeng Song[1]，Houkun Ni[2]，Haiying Zhang[2]，Bin Zhang[1]，Xiangming Ye[1]

1. Beijing Astro. Obs.，Beijing 100080

2. Nanjing Astro. Insitute Center，Nanjing 210042

Abstract. Solar Multichannel Birefringent Filter (SMBF) is the first instrument in the world which can observe solar chromatic images, and measure vector magnetic fieldsand/or line-of-sight velocity fields simultaneously. It indudes 9-channel birefringent filter, full-disc solar magnetic filter and H α birefringent filter. This article will describe the optical design, spectral test method and the measuring principles of magnetic field and line-of-sight field.

分裂级滤光器的亮度分布不均匀性

邓元勇　艾国祥　王敬山

中国科学院北京天文台，100080

关键词：

分裂级滤光器——离轴效应——亮度不均匀性

摘要

本文讨论分裂级滤光器的亮度分布不均匀性。这种不均匀性是由于双折射晶体的离轴效应引起的，特别是当视场较大时，它会严重影响天文观测。例如，在一个最大视场角约为70′ 的全日面太阳望远镜中，亮度涨落可高达9.44%。

一、引言

四十年代末，J. Evans提出了一种与Lyot滤光器不同的称之为分裂级滤光器的新的双折射滤光器的设计方案[1]。在这种设计中，一个单级的分裂级滤光器等效于两级Lyot级，但却少用一片偏振片。由于在双折射滤光器中偏振片的透过率较其它光学元件的透过率都低，因此这种改进是很有实际意义的。

另一方面，这种设计也存在一些不利之处。例如，其中最严重的一种就是由于离轴效应而引起的亮度不均匀性。最初，Evans认为一个分裂级滤光器单元等效于如此一个Lyot级滤光器，它的较薄的一级是简单级，而较厚的一级是宽场级，也就是说它具有宽视场特性。事实上，这一观点是不恰当的，而Evans本人随后也发现了这一误解[2]。Title和Rosenberg于1979年给出了有关视场效应的详尽知识[3]。但是，他们中没有任何人对如下问题作过详细的讨论：离轴效应是怎样影响分裂级滤光器的积分透过率的？这种影响对天文观测的影响有多严重？

在本文中我们可以看到，由于分裂级滤光器的积分透过率不守恒，因此它的亮度分布是不均匀的。当视场较大时这种不均匀性尤其严重。例如，在北京天文台怀柔太阳观测站使用的全日面太阳磁场望远镜中，亮度差别最大可达9.44%。

二、分裂级滤光器的亮度分布不均匀性

2.1 分裂级滤光器的结构

分裂级滤光器的基本结构示于图1a中。它是由具有元件m和q的分裂级和夹于m、q之间的简单级p组成的。这里，我们将m和q称为分裂级，而将p称为中间级。n_m、n_q和n_p分别表示它们的延迟量，P_1和P_2是偏振片。该单元的透过率为：

$$\tau = \sin^2\pi(n_m - n_q) + \sin 2\pi n_m \sin 2\pi n_q \sin^2\pi n_p \qquad (1)$$

分裂级滤光器的设计要求：

$$n_j = 2n_m = 2n_q = 2^{j-1}n + 1/2 \tag{2}$$

$$n_p = 2^{k-1}n + 1/2 \tag{3}$$

此处，n是一个整数，j和k则分别对应于分裂级和中间级在滤光器中所处在级次。在这种情况下，(1) 式可变为：

$$\tau = \sin^2 \pi n_j \sin^2 \pi n_p \tag{4}$$

可见一个分裂级单元是与图1b所示的两级Lyot级等效的。

2.2 分裂级滤光器中的离轴效应

遗憾的是，由于离轴效应和加工带来的误差，实际上很难保证(4) 式严格成立。我们发现，在分裂级滤光器中，这些误差产生的后果较在Lyot滤光器中产生的后果严重得多。本文仅讨论分裂级滤光器中离轴效应的后果。为了简化讨论，我们假设滤光器仅由一个分裂级单元组成，且其中间级是宽场级，并且

$$n_j = n + 1/2 \tag{5}$$

$$n_p = 2n + 1/2 \tag{6}$$

如果入射光以相对于仪器轴的角度 (ψ, θ) 透过该滤光器，那么：

$$n_m = \frac{n_j}{2}\left[1 + \psi^2 k\left(\frac{\cos^2\theta}{\gamma} - \frac{\sin^2\theta}{\alpha}\right)\right] \tag{7}$$

$$n_q = \frac{n_j}{2}\left[1 + \psi^2 k\left(\frac{\sin^2\theta}{\gamma} - \frac{\cos^2\theta}{\alpha}\right)\right] \tag{8}$$

$$k = \frac{\alpha\gamma - \beta^2}{2(\gamma - \alpha)\beta^2} \tag{9}$$

此处n_j是当$\psi = 0$时分裂级的延迟量，α、β 和 γ 表征构成滤光器的晶体的双折射性质。式(7) 和(8) 可推出：

$$n_m + n_q = n_j\left[1 + \frac{\psi^2 k}{2}\left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{\alpha}\right)\right] \tag{10}$$

$$n_m - n_q = \frac{n_j}{2}\psi^2 k\left(\frac{1}{\gamma} + \frac{1}{\alpha}\right)\cos 2\theta \tag{11}$$

(10) 式等价于一个简单的宽视场Lyot级，因此

$$n_m + n_q \approx n_j \tag{12}$$

在我们的讨论中还假设滤光器由水晶组成。对于水晶：

$$k = \frac{1}{2\alpha} \tag{13}$$

$$\mu = \gamma - \alpha << 1 \tag{14}$$

由于 α 和 γ 都大于1，所以可得：

$$1/\alpha \approx 1/\gamma \tag{15}$$

因此由(11) 式可得：

$$\delta = n_m - n_q = n_j \psi^2 \frac{\cos 2\theta}{2\gamma^2} \tag{16}$$

2.3 积分透过率性质

将(5)、(6)和(12)式代入(1)式，可得：

$$\tau = \sin^2 2\pi n \sin^2 \pi\delta + \cos^2 2\pi n \cos^2 \pi n \tag{17}$$

从而，积分透过率为：

$$T = \int_{n_o-1/2}^{n_o+1/2} \tau \, dn = 1/4 + \sin^2 \pi\delta/2 \tag{18}$$

此处，n_o是分裂级的设计延迟量。值得注意的是，在(18)式中我们忽略了δ随波长的变化。这一假设的合理性在于：一方面，δ是一个非常小的量，例如，对于一个以水晶制成的，设计延迟量为800的分裂级而言，当它以方向(60′，0)入射时，δ仅约为0.0152；另一方面，n的变化在滤光器的一个积分周期中仅为$\pm 1/1600$。因此，δ的变化是极小的，可以不予考虑。这一假设也被表1所给的定量计算所证明。

从18式可知：分裂级滤光器的积分透过率在其视场中是不守恒的。当ψ不变时，亮度依赖于θ呈周期性变化。

$$T_{min} = 0.25 \qquad \text{当 } \theta = k\pi/2 + \pi/4 \text{时，} \tag{19}$$

$$T_{max} = 0.25 + \sin^2 \pi\delta/2 \qquad \text{当 } \theta = k\pi/2 \text{时，} \tag{20}$$

式中δ由(16)式定义。当θ不变时，亮度分布则呈临边增亮：

$$T_{min} = 0.25 \qquad \text{当 } \psi = 0 \text{时，} \tag{21}$$

$$T_{max} = 0.25 + \sin \pi\delta/2 \qquad \text{当 } \psi \text{ 最大时，} \tag{22}$$

所有这些现象都可从图2中显示出来。

最后，为了比较，我们简单讨论Lyot滤光器的积分透过率。我们假设该Lyot滤光器与上面讨论的分裂级滤光器等效。考虑离轴效应，较薄一级的延迟量为：

$$n_j = n\left(1 + \psi^2 \frac{\cos 2\theta}{2r^2}\right) = n + \delta \tag{23}$$

其积分透过率为：

$$T = \int_{n_o-1/2}^{n_o+1/2} \cos^2 \pi(n+\delta) \cos^2 2\pi n \, dn = 0.25 \tag{24}$$

因此，Lyot滤光器的积分透过率是守恒的，视场中不会出现亮度不均匀性。

2.4 定量计算

在北京天文台怀柔太阳观测站的10cm全日面太阳磁场望远镜中使用了一个分裂级结构。它由水晶制成，其分裂级和中间级的延迟分别为800和1600。图2显示了它的亮度形态。表2是当$\theta = k\pi/2$而ψ从0－100′时的定量计算结果。在该表中，Column 1由(18)式算得，而Column 2由(17)式直接积分得到。两组数据间的差别是很小的，因此(18)式的假设是成立的。

2.5 亮度不均匀分布对天文观测的影响

分裂级滤光器的亮度不均匀分布的事实促使我们对它的性质进行详细的研究。在我们的10cm太阳磁场望远镜中，最大视角约为70′，于是从表1中可以发现亮度涨落达到9.44%。这种不均匀非常大，足以歪曲被观测目标的真实形态，影响磁场测量的准确性，以及增加散射光等等。因此，当我们使用分裂级滤光器时，离轴效应是一个必须考虑的因素。

三、讨论

以上我们已经发现，当视场较大时，分裂级滤光器存在一些缺陷。自然，如果将分裂级也做成宽场的，是可以避免这些不利之处的。图3a和3b给出的就是一个宽场分裂级滤光器单元和与之等效的Lyot滤光器。从图中我们看到，分裂级滤光器以增加5片消色差波片的代价获得了一片偏振片的减少。如今的情况和Evans发明分裂级滤光器时的情况有一些不同，例如，如果入射光是偏振光且没有反射损失的话，偏振片的透过率在可见光波段可高达90%以上，而且它比消色差波片便宜得多。在这种情形下，使用分裂级滤光器是不合算的。

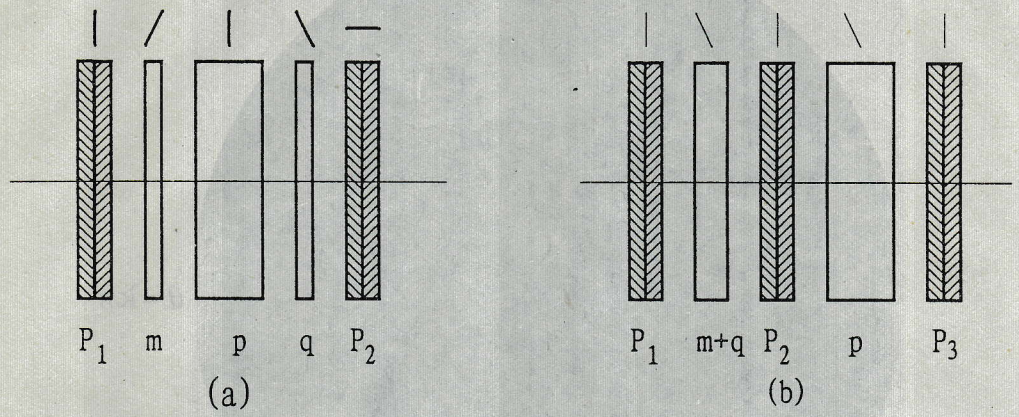
但是，我们并不否定分裂级滤光器的用途，因为在紫外、红外和别的波段上，偏振片的透过率仍然很低。在这些波段，分裂级滤光器仍具有其优势。因此我们的结论是：当使用分裂级滤光器时，必须小心。

参考文献

Evans, J., 1949, J. Opt. Soc. Am., 39, 229

Evans, J., 1949, J. Opt. Soc. Am., 39, 412

Title, A. M. & Rosenberg, W. J., 1979, Appllied Optics, 18, A1



图一. 分裂级滤光器的基本结构

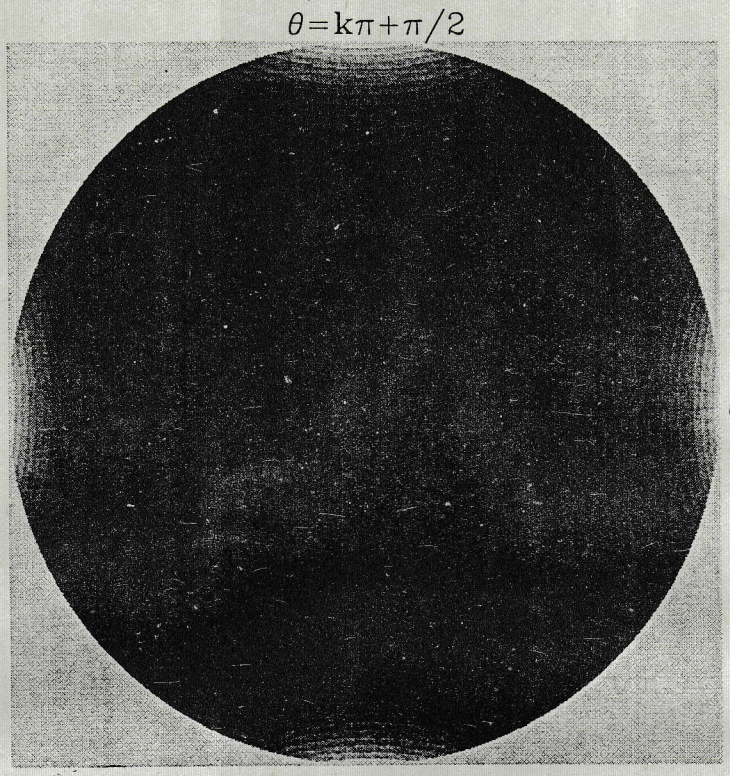
(a). 分裂级滤光器的一个基本单元

(b). 等效于(a)的Lyot滤光器结构

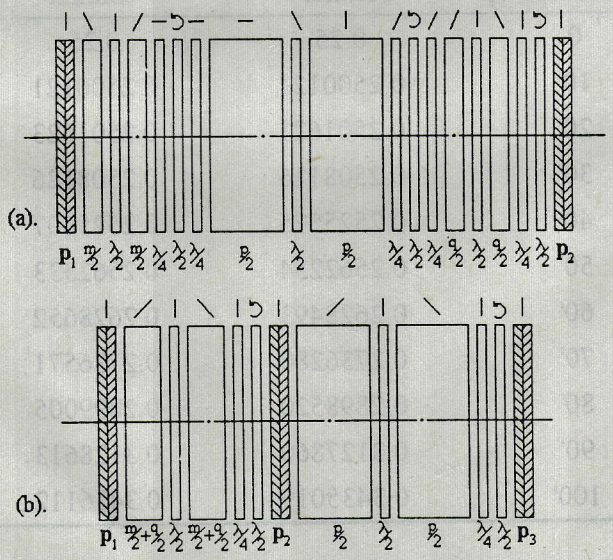
Field of view φ	Column 1	column
0	0.25	0.25
10'	0.2500121	0.2500121
20'	0.2501621	0.2501623
30'	0.2508116	0.2508126
40'	0.2525575	0.2525607
50'	0.2562254	0.2562333
60'	0.2628493	0.2628652
70'	0.2736280	0.2736571
80'	0.2898520	0.2899005
90'	0.3127860	0.3128613
100'	0.3435019	0.3436112

表一. 一个分裂级单元的积分透过率

n_j=800, r≈1.55, θ=±kπ/2



图二. 分裂级滤光器的亮度形态



图三。两种类型的宽视场滤光器

λ/2: 二分一消色差波片

λ/4: 四分一消色差波片

(a). 分裂级滤光器　　(b). Lyot滤光器

高质量PVA塑料消色差波片*

王敬山，艾国祥，宋国峰
中国科学院北京天文台，100080

摘要

本文概述了三片型消色差波片（二分之一波片和四分之一波片）的原理，并讨论了用PVA塑料膜组成的高质量组合消色差波片的性能及测试结果。

一、引言

消色差波片是万能双折射滤光器中非常重要的光学元件之一。一般来讲，消色差波片的设计制作有以下两种方法：

(i) 用不同种双折射材料组成消色差波片。这是根据双折射率随波长 λ 变化的原理设计的。设由几种双折射率材料的晶片，每种材料的双折射率为 $\mu_i(\lambda, t)$，厚度为 $d_i, i=1, 2\cdots\cdots n$，则可由几个方程决定每种材料的厚度，

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{\mu_i(\lambda, t)d_i}{\lambda} = \delta(\lambda), \quad i=1, \ 2, \ \cdots\cdots, \ n \qquad (1)$$

其中t为温度，δ 为延迟量。用两种材料(quartz and MgF_2)制作的消色差波片，我们已经讨论过（邓元勇等，1993），并用在了多通道双折射滤光器中。

(ii) 用多片同种双折射材料组成的消色差波片。这种方法是通过选择每单片的延迟大小、光轴方向来组成消色差波片的(Pancharatnam, 1995; Title, 1975)。材料可选用双折射晶体（如水晶、云母等），也可用PVA塑料延迟膜。

本文主要讨论用PVA塑料膜制作的组合消色差波片的原理及性能。和双折射晶体材料制成的消色差波片相比较，PVA消色差波片有以下几个优点：

(a) 视场角很大；

(b) 随温度的变化不大；

(c) 可以做得很薄，有利于在空间科学和技术中使用；

(d) 造价低，而双折射晶体消色差波片成本高，而且难于加工。

二、三片型1/2和1/4消色差波片的设计原理

对于同种材料组成的组合延迟片，成为真正的双折射延迟片的条件是：

(i) 具有稳定的光轴。在Poincare球上，组合片光轴是从球心到赤道上某点的连线

(ii) 具有稳定的延迟。在Poincare球上，任何形式的偏振光通过它后，都表现为一个绕球心与赤道上某一点的连线（代表光轴）的一个纯正的转动。

对于三片型组合延迟片，只要第一片和第三片的光轴平行，延迟相等，那么该组

* 国家自然科学基金资助项目

合延迟片就是一个真正的双折射延迟片(Pancharatnam,1955)。由Poincare球上的转动并利用球面三角公式可求得如下两式：

$$\cos\delta = \cos 2\delta_1 \cos\delta_2 - \sin 2\delta_1 \sin\delta_2 \cos 2c_2 \tag{2}$$

$$\cos 2c = \operatorname{cosec} 2c_2 (\sin 2\delta_1 \operatorname{ctg}\delta_2 + \cos 2\delta_1 \cos 2c_2) \tag{3}$$

其中$2\delta_1$为第一片和第三片的延迟，光轴方位角为零；$2\delta_2$、c_2分别为中间片的延迟和光轴方位角；2δ和c分别为组合延迟片的延迟和光轴方位角。

为了找到在有限波长范围内组合延迟片是消色差的条件，设对于波长为λ_0的光，每单片的延迟是δ_1、δ_2、δ_1，波长为λ'、λ''的光对应的延迟为$\delta_i' = (1-f)\delta_i$和$\delta_i'' = (1+f)\delta_i$，$i=1,2$。并令组合片的延迟为$\delta = \delta' = \delta''$，那么有

$$\cos\delta = \cos 2\delta_1' \cos\delta_2' - \sin 2\delta_1' \sin\delta_2' \cos 2c_2 \tag{4}$$

$$\cos\delta = \cos 2\delta_1'' \cos\delta_2'' - \sin 2\delta_1'' \sin\delta_2'' \cos 2c_2 \tag{5}$$

$$\sin 2\delta_1' \operatorname{ctg}\delta_2' - \sin 2\delta_1'' \operatorname{ctg}\delta_2'' = (\cos 2\delta_1'' - \cos 2\delta_1') \cos 2c_2 \tag{6}$$

我们令中间片的延迟$2\delta_2$在设计的中心波长处为π(即为1/2波片)，把$\delta_2' = (1-f)\cdot\pi/2$和$\delta_2'' = (1+f)\pi/2$代入(4)和(5)，并消去$\delta$，则有

$$\cos 2c_2 = \frac{\cos 2\delta_1' \cos\delta_2' - \cos 2\delta_1'' \cos\delta_2''}{\sin 2\delta_1' \sin\delta_2' - \sin 2\delta_1'' \sin\delta_2''} = \frac{\cos 2\delta_1' + \cos 2\delta_1''}{\sin 2\delta_1' - \sin 2\delta_1''} \cdot \operatorname{tg}\left(f \cdot \frac{\pi}{2}\right) \tag{7}$$

把(7)代入(6)

$$\sin 2\delta_1' + \sin 2\delta_1'' \operatorname{tg}\left(f \cdot \frac{\pi}{2}\right) = \frac{\cos^2 2\delta_1'' - \cos^2 2\delta_1'}{\sin 2\delta_1' - \sin 2\delta_1''} \cdot \operatorname{tg}\left(f \cdot \frac{\pi}{2}\right)$$

此式是成立的。

对于组合1/2消色差波片，$2\delta = \pi$，那么$\cos\delta = \cos\pi/2 = 0$。代入(4)和(5)，并消去$c_2$，则有

$$\sin 2(\delta_1' + \delta_1'') = 0 \tag{8}$$

把$\delta_1' = (1-f)\delta_1$和$\delta_1'' = (1+f)\delta_1$代入(8)，则有

$$\sin 4\delta_1 = 0 \tag{9}$$

满足(9)成立的解有两个

$$4\delta_1 = \pi \text{ 或 } 2\pi,$$

$4\delta_1 = \pi$并不能使(4)、(5)、(6)同时成立，因此只有$4\delta_1 = 2\pi$才是有意义的，即

$$2\delta_1 = \pi, \tag{10}$$

c_2可由

$$\cos 2c_2 = -\frac{\operatorname{tg}(f \cdot \pi/2)}{\operatorname{tg}(f \cdot \pi)} \tag{11}$$

求得。

组合1/2消色差波片的光轴方位角c可由下式得到

$$\mathrm{ctg}2c=-\frac{\mathrm{tg}(f\cdot\pi/2)}{\sin(f\pi)\cdot\sin2c_2} \tag{12}$$

对于组合1/4消色差波片，$2\delta=\pi/2$，把$2\delta_2=\pi$，及

$\delta_1'=(1-f)\,\delta_1$和$\delta_1''=(1+f)\,\delta_1$

代入(4)(5)，并消去c_2，可得到

$$\sin(f\cdot2\delta_1)=\frac{\sin(f\cdot\pi/2)}{\cos\delta}\cdot\sin2\delta_1 \tag{13}$$

由(7)，得到

$$\mathrm{ctg}2c_2=-\frac{\mathrm{tg}(f\cdot\pi/2)}{\mathrm{tg}(f\cdot2\delta_1)} \tag{14}$$

组合1/4消色差波片的光轴方位角c可由下式得到

$$\cos2c=-\frac{\cos(2\delta_1)\cdot\tan(f\cdot\pi/2)}{\cos(f\cdot2\delta_1)\cdot\sin2c_2} \tag{15}$$

根据数值计算，当取f=0.1414，组合1/2消色差波片的参量各为：

$2\delta_1=\pi$

$2\delta_2=\pi$

$c_1=0°$

$c_2=59°\ 10'$

$c=30°\ 50'$

组合1/4消色差波片的参量为：

$2\delta_1=115°\ 30'$

$2\delta_2=\pi$

$c_1=0°$

$c_2=70°\ 13'$

$c=30°\ 45'$

三、组合消色差波片的制作及延迟、光轴的测试

设计的中心波长为$\lambda_0=5600$A，若取f=0.1414，那么组合消色差波片的适用范围为4000A～7000A。为了使组合光轴c为零度，c_1和c_2都要转动一个角度c。

对于1/2组合消色差波片

$2\delta_1(\lambda_0)=180°$

$2\delta_2(\lambda_0)=180°$

$c_1=-30°\ 50'$

$c_2=28°\ 20'$

对于1/4组合消色差波片

$2\delta_1(\lambda_0)=115°\ 50'$

$2\delta_2(\lambda_0)=180°$

$c_1=-30°\ 45'$

$c_2=39°\ 28'$

每单片延迟片都裁好后，用两片K9玻璃胶合起来，就作成了组合消色差波片。经高精度晶体厚度及光轴检测仪测试，位相延迟的最大相对误差小于3%，组合光轴误差小于±20′，如表1a和1b所示。

表1a. 1/2 PVA塑料消色差波片的部分测试结果

样品	位相延迟				位相延迟的最大相对误差
	4861A	5461A	5893A	6563A	
1#	0.5081	0.5016	0.5031	0.5016	1.62%
2#	0.5090	0.4984	0.5024	0.5056	1.80%
3#	0.5059	0.5031	0.5052	0.5021	1.18%
4#	0.5040	0.4938	0.4991	0.4977	-1.24%
5#	0.5003	0.4941	0.4955	0.5010	-1.18%
6#	0.4997	0.4923	0.4930	0.4961	-1.54%

表1b. 1/4 PVA塑料消色差波片的部分测试结果

样品	位相延迟				位相延迟的最大相对误差
	4861A	5461A	5893A	6563A	
1#	0.2449	0.2507	0.2520	0.2469	-2.24%
2#	0.2465	0.2502	0.2491	0.2436	-2.56%
3#	0.2452	0.2499	0.2498	0.2442	-2.32%
4#	0.2522	0.2554	0.2573	0.2486	2.92%
5#	0.2481	0.2540	0.2552	0.2502	2.08%
6#	0.2511	0.2518	0.2535	0.2438	-2.60%

四、组合消色差波片的温度效应及视场

晶体材料制作的消色差波片的温度系数约为1.2×10^{-3}/℃(邓元勇等,1993)。PVA塑料消色差波片的延迟随温度的变化不大,其温度系数约为1.0×10^{-4}/℃。这在滤光器,特别是磁分析器的应用中,提供了非常便利的条件。

另一方面,晶体材料的偏轴视场效应很严重,这由晶体延迟片的视场公式可以看出,

$$\delta=\delta_{\circ}\left[1+\Phi^{2}k\left(\frac{\cos^{2}\theta}{\gamma}-\frac{\sin^{2}\theta}{\alpha}\right)\right] \tag{16}$$

其中$k=\frac{\alpha\gamma-\beta^{2}}{2(\gamma-\alpha)\beta^{2}}$,$\alpha$、$\beta$、$\gamma$分别是晶体的最小、中间大小、最大的主折射率,$\Phi$是入射角,$\theta$是相对$\alpha$轴的入射面的方位角。这种离轴视场效应可由下面一种简单的方法检验出来:在两交叉的偏振片之间,放入一晶体消色差波片,将一白光光源放在偏振片前方,那么可以看到彩色的双曲线条纹。放入一PVA消色差波片,则看不到这种彩色条纹。这就证明PVA塑料消色差波片的视场角比较大,这在物理光学领域的应用中,是一较大优势。

五、结论

消色差波片是物理光学中的一个重要元件,PVA塑料消色差波片具有延迟误差小、易加工、成本低的特点,能够成批量生产。高质量PVA塑料消色差波片的研制成功,不仅解决了双折射滤光器中的一个重要问题,也在物理光学领域里拓展了消色差波片应用。

参考文献

邓元勇,艾国祥,王敬山,1993, 天体物理学报, 13, 283

Evans, J. W., 1949, J. Opt. Soc. Amer., 39, 229

Pancharatnam, S., 1955, Proc. Indian Acad. Sci. A, 41, 130, 137

Shurcliff, W. A., 1962, Polarized Light, Harward University

Title, A. M., Rosenberg, W. J., 1981, SPIE, 307, 120

High Quality PVA Plastic Achromatic Waveplate

Wang, Jingshan, Ai Guoxiang, Song Guofeng

Beijing Astro. Obs., Chinese Acad. of Sci., Beijing 100080, China

Abstract. In this article we described the principle of three-plate half and quarter achromatic waveplate and discussed the qualities and theteste results of the high quality achromatic waveplates which are made of PVA plastic retardation film.

等付里叶系数滤光器中的调节波长装置*

王敬山　艾国祥
中国科学院北京天文台，100080

摘要

在现代双折射滤光器中，无论在滤光器透过带的调节或移动，还是在滤光器的调试中，调节波长装置(Wavelength-Tunable Apparatus，简称WTA)都有着广泛的应用。本文讨论几种调节波长的方法，主要是适用于等付里叶系数滤光器 (Equal Fourier Coefficient Filter，简称EFCF)(艾国祥等，1982)(或Solc型滤光器)的调节波长装置，并指出不适合等付里叶系数滤光器调节波长的设计方法。

一. 引言

双折射滤光器在太阳磁场、速度场的测量研究中， 起着十分重要的作用。调节波长装置的使用，使得滤光器可以在多条Fraunhofer线上得到太阳磁场、速度场资料。调节波长装置所起的作用，就是在不改变滤光器透过带轮廓的情况下，能使滤光器透过不同的波长。这种调节波长的方法主要有以下几种:

(i) 改变每一级晶体的温度。利用晶体厚度随温度的变化，从而使透过带变化。这种方法一方面调整恒温温度很慢；另一方面，滤光器作为一个整体处于恒温状态，如果分别改变各级晶体的温度，几乎是不可能的。所以这种方法在滤光器的设计中，几乎从未用过。

(ii) 在每一晶体级增加不同厚度(延迟)的晶体，通过调整整体延迟量可以改变透过带的位置。例如：索列尔补偿器或电光调制器。这种方法也不是很方便，尽管电光调制器有时也使用(艾国祥等，1981)。

(iii) 在靠近晶体处放置一与晶体光轴成45° 的1／4波片，其后跟着一旋转偏振片或1/2波片。当旋转偏振片或1/2波片时，可以调节每一级透过带的通过波长。此方法比较实用，在双折射滤光器的设计中被广泛使用。通常适合于双折射滤光器的调节波长装置有四种类型(如图1所示)。类型A中，所用光学件少，但偏振片需要旋转，它牵涉到后面各晶体级的同步旋转，很不方便，一般不采用。类型B比C少用一片1／4波片，既简便又实用，被许多双折射滤光器 (如Lyot型，Evans型，多通道滤光器和二维光谱仪等)所采用。然而，对于等付里叶系数滤光器，B 型调节波长装置并不适用。本文以二片型等付里叶系数滤光器为例，说明B型为什么不能用，并给出正确的设计方案。

* 国家自然科学基金资助项目

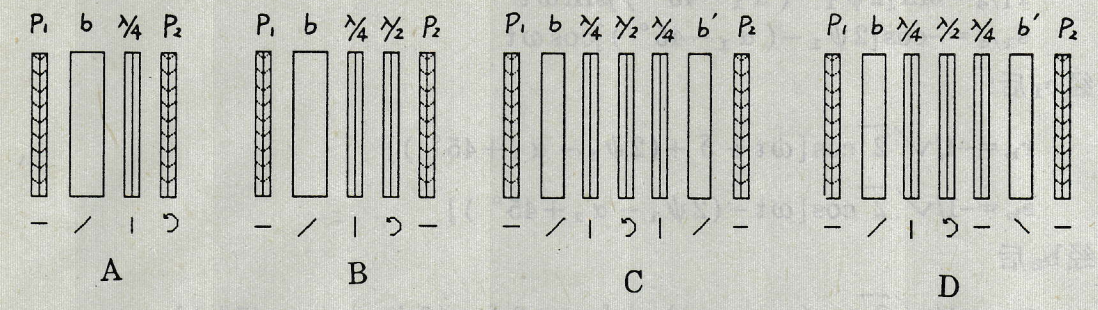


图1. 四种类型波长调节装置

二. 等付里叶系数滤光器的透过率

等付里叶系数滤光器是由两偏振片中间，放置数片(设为m片)等厚晶片组成(如图2所示)，其晶轴间按一定规律的相对方位角设计。设晶片的延迟都为 δ，各片晶体轴与第一片偏振片偏振轴成 α_1，α_2，$\cdots\alpha_m$ 的角度，则其透过率为:

$P_1 \parallel P_2$ 时，

$$\tau_{\parallel}=1/(m+1)^2[(m+1)+\Sigma\ 2(m+1-k)\cos k\delta] \qquad (1)$$

$P_1 \perp P_2$ 时，

$$\tau_{\perp}=1/(m+1)^2[(m+1)+\Sigma\ (-1)^k\cdot 2(m+1-k)\cos k\delta] \qquad (2)$$

对于两片型等付里叶系数滤光器(图3)，两偏振片平行，晶体与第一片偏振片偏振轴间的夹角分别为 $\alpha_1=62^\circ\ 38'$，$\alpha_2=27^\circ\ 22'$，则其透过率为:

$$\tau=[\sin^2 2\alpha_1\cos\delta+\cos^2 2\alpha_2]^2 \qquad (3)$$

透过带轮廓如图4所示。

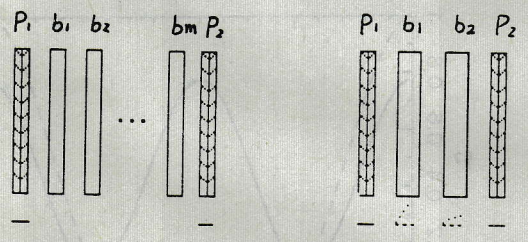


图2. EFCF的光学设计

图3. 二片型EFCF

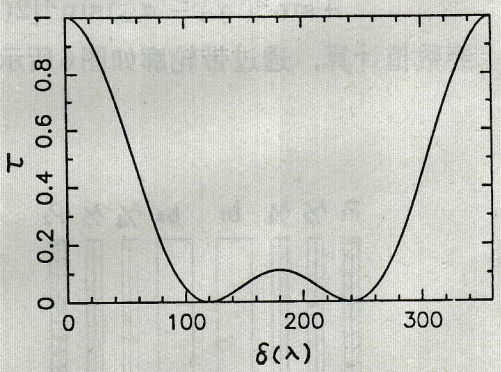


图4. 二片型EFCF的透过带轮廓

三. B型调节波长装置用于二片型等付里叶系数滤光器

如图5所示，设 b_1，b_2 的方位角 $\alpha_1=62^\circ\ 38'$，$\alpha_2=27^\circ\ 22'$，第一片1/2波片旋转角度为 ψ_1，第二片1/2波长旋转角度为 ψ_2，b_1，b_2 的延迟都为 δ。下面我们通过推导证明这种设计并不能起到调节波长的作用。

设经偏振片 P_1 后，光的振动为:

$$p_1=\cos\omega t$$

经第一片1/2、1/4波片(r为快轴，s为慢轴):

$$r_{1/4}=\sin[2\psi_1-(\alpha_1-45^\circ)]\sin\omega t$$
$$s_{1/4}=-\cos[2\psi_1-(\alpha_1-45^\circ)]\cos\omega t$$

经b_1后:

$$r_b=-1/\sqrt{2}\cos[\omega t+\delta+(2\psi_1-\alpha_1+45^\circ)]$$
$$s_b=-1/\sqrt{2}\cos[\omega t-(2\psi_1-\alpha_1+45^\circ)]$$

经b_2后

$$r_b=-1/\sqrt{2}\cos(\alpha_1-\alpha_2)\cos[\omega t+2\delta+(2\psi_1-\alpha_1+45^\circ)]$$
$$-1/\sqrt{2}\sin(\alpha_1-\alpha_2)\cos[\omega t+\delta-(2\psi_1-\alpha_1+45^\circ)]$$
$$s_b=1/\sqrt{2}\sin(\alpha_1-\alpha_2)\cos[\omega t+\delta+(2\psi_1-\alpha_1+45^\circ)]$$
$$-1/\sqrt{2}\cos(\alpha_1-\alpha_2)\cos[\omega t-(2\psi_1-\alpha_1+45^\circ)]$$

经第二片1/4、1/2波片后,

$$r_{1/2}=\sin(\alpha_1-\alpha_2)\sin(2\psi_1-\psi_2+\alpha_2-\alpha_1)\sin(\omega t+\delta)$$
$$-\cos(\alpha_1-\alpha_2)\cos(2\psi_1+\psi_2+\delta)\cos(\omega t+\delta)$$
$$s_{1/2}=-\sin(\alpha_1-\alpha_2)\cos(2\psi_1-\psi_2+\alpha_2-\alpha_1)\sin(\omega t+\delta)$$
$$+\cos(\alpha_1-\alpha_2)\sin(2\psi_1+\psi_2+\delta)\cos(\omega t+\delta)$$

经P_2后,

$$s_{1/2}=-\sin(\alpha_1-\alpha_2)\sin(2\psi_1-2\psi_2+\alpha_2-\alpha_1)\sin(\omega t+\delta)$$
$$-\cos(\alpha_1-\alpha_2)\cos(2\psi_1+2\psi_2+\delta)\cos(\omega t+\delta)$$

那么，透过率为:

$$\tau=\cos^2(\alpha_1-\alpha_2)\cos^2[\delta+2(\psi_1+\psi_2)]$$
$$+\sin^2(\alpha_1-\alpha_2)\sin^2[2(\psi_1-\psi_2)+\alpha_2-\alpha_1]$$

经数值计算，透过带轮廓如图6所示。

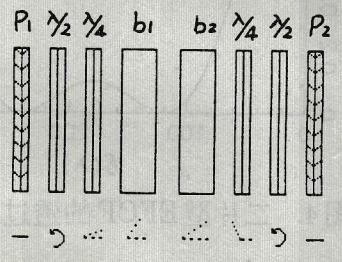


图5. B型WTA用于二片型EFCF

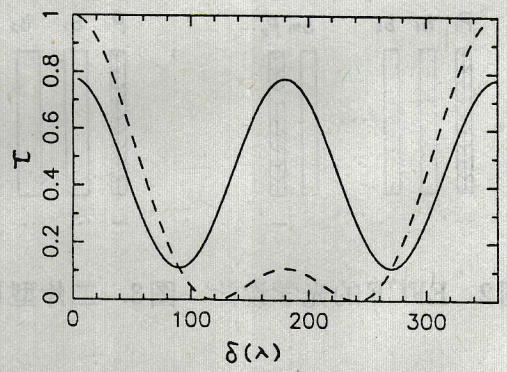


图6. 采用B型WTA后的EFCF透过带轮廓

从图6中可以看出，B型调节波长装置已经改变了二片型等付里叶系数滤光器的透过带波形，起不到调节波长的作用。

四. 等付里叶系数滤光器中的调节波长装置

在上一节，证明了 B型调节波长装置不能用在等付里叶系数滤光器中。但可以采用C型调节波长装置，把图2中的每一晶片劈开成两部分 b和b′，两部分的厚度不一定

相等，中间插入1/4波片＋旋转1/2波片＋1/4波片的设计结构，在满足一定的条件时，就能起到调节波长的作用（如图7所示）。下面以二片型等付里叶滤光器为例，推导这种设计的透过带。因为b和b′的厚度是任意的，只要b与b′的延迟之和为 δ 就行。我们可以令b1，b2′的厚度为0，那么可调二片型等付里叶系数滤光器如图7所示。

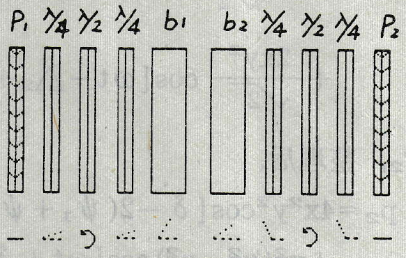


图7. 适用于EFCF的WTA

设 $x=\cos\alpha_1=\sin\alpha_2$，$y=\sin\alpha_1=\cos\alpha_2$

经P_1后，光的振动为：

$$p_1=\cos\omega t$$

经第一片1/4波片，

$$r_{1/4}=-x/\sqrt{2}\sin\omega t-y/\sqrt{2}\sin\omega t$$

$$s_{1/4}=-x/\sqrt{2}\cos\omega t+y/\sqrt{2}\cos\omega t$$

经第一片1/2波片，

$$r_{1/2}=x/\sqrt{2}\sin[\omega t-(\psi_1-\alpha_1+45^\circ)]+y/\sqrt{2}\sin[\omega t+(\psi_1-\alpha_1+45^\circ)]$$

$$s_{1/2}=-x/\sqrt{2}\cos[\omega t-(\psi_1-\alpha_1+45^\circ)]+y/\sqrt{2}\cos[\omega t+(\psi_1-\alpha_1+45^\circ)]$$

经第二片1/4波片，

$$r_{1/4}=x/\sqrt{2}\cos[\omega t-2(\psi_1-\alpha_1+45^\circ)]+y/\sqrt{2}\cos[\omega t+2(\psi_1-\alpha_1+45^\circ)]$$

$$s_{1/4}=-x/\sqrt{2}\cos[\omega t-2(\psi_1-\alpha_1+45^\circ)]+y/\sqrt{2}\cos[\omega t+2(\psi_1-\alpha_1+45^\circ)]$$

经b_1后，

$$r_b=x\cos[\omega t+\delta_1-2(\psi_1-\alpha_1+45^\circ)]=x\cos(\omega t+\triangle_1)$$

$$s_b=y\cos[\omega t+2(\psi_1-\alpha_1+45^\circ)]=y\cos(\omega t+\triangle_2)$$

其中 $\Delta_1=\delta_1-2(\psi_1-\alpha_1+45^\circ)$

$$\Delta_1=2(\psi_1-\alpha_1+45^\circ)$$

经b_2后，

$$r_b=2x^2y\cos(\omega t+\triangle_1+\delta_2)+y(y^2-x^2)\cos(\omega t+\triangle_2+\delta_2)$$

$$s_b=-x(y^2-x^2)\cos(\omega t+\triangle_1)+2xy^2\cos(\omega t+\triangle_2)$$

经第三片1/4波片，第二片1/2波片，第四片1/4波片后，

$$r_{1/4}=\frac{2x^2y}{\sqrt{2}}\cos[\omega t+\triangle_1+\delta_2-2(\psi_2-\alpha_2+45^\circ)]$$

$$+\frac{y(y^2-x^2)}{\sqrt{2}}\cos[\omega t+\triangle_2+\delta_2+2(\psi_2-\alpha_2+45^\circ)]$$

$$-\frac{x(y^2-x^2)}{\sqrt{2}}\cos[\omega t+\triangle_1+2(\psi_2-\alpha_2+45^\circ)]$$

$$+\frac{2xy^2}{\sqrt{2}}\cos[\omega t+\triangle_2+2(\psi_2-\alpha_2+45^\circ)]$$

$$S_{1/4}=-\frac{2x^2y}{\sqrt{2}}\cos[\omega t+\triangle_1+\delta_2-2(\psi_2-\alpha_2+45^\circ)]$$

$$-\frac{y(y^2-x^2)}{\sqrt{2}}\cos[\omega t+\triangle_2+\delta_2-2(\psi_2-\beta_2+45^\circ)]$$

$$-\frac{x(y^2-x^2)}{\sqrt{2}}\cos[\omega t+\triangle_1+2(\psi_2-\alpha_2+45^\circ)]$$

$$+\frac{2xy^2}{\sqrt{2}}\cos[\omega t+\triangle_2+2(\psi_2-\alpha_2+45^\circ)]$$

经P_2，整理后，

$$p_2=4x^2y^2\cos[\delta-2(\psi_1+\psi_2)]\cos(\omega t+\delta)$$
$$+y^2(y^2-x^2)\cos[\omega t+\delta+2(\psi_1-\alpha_1+45^\circ)-2(\psi_2-\alpha_2+45^\circ)]$$
$$-x^2(y^2-x^2)\cos[\omega t+\delta-2(\psi_1-\alpha_1+45^\circ)+2(\psi_2-\alpha_2+45^\circ)]$$

当$\psi_1-\alpha_1+45^\circ=\psi_2-\alpha_2+45^\circ$，即$\psi_1-\alpha_1=\psi_2-\alpha_2$时，有：

$$P_2=[4x^2y^2\cos[\delta-2(\psi_1+\psi_2)]+(y^2-x^2)^2]\cos(\omega t+\delta)$$
$$=[\sin^2 2\alpha_1\cos[\delta-2(\psi_1+\psi_2)]+\cos^2 2\alpha_2]\cos(\omega t+\delta)$$

那么，透过率为：

$$\tau=\{\sin^2 2\alpha_1\cos[\delta-2(\psi_1+\psi_2)]+\cos^2 2\alpha_2\}^2 \qquad (4)$$

和第二节中(3)相比，波形没有改变，因为$\delta-2(\psi_1+\psi_2)=(\mu d)/\lambda-2(\psi_1+\psi_2)$，$\psi_1$，$\psi_2$的变化能使透过带随波长变化，因而能起到调节波长的作用。

五. 结论

最常用的B型调节波长装置，虽然具有少用一片1/4波片的优点，但并不适用于等付里叶系数滤光器，在满足一定的条件下，C型调波长装置可以用在等付里叶系数滤光器中。这样，等付里叶系数滤光器的透过带轮廓也是能够波长调节的。

参考文献：

艾国祥，温惠馨，胡岳风，1982，光学学报，2，217

艾国祥，胡岳风，1981，天体物理学报，1，273

Wavelength-tunable Apparatus in Equal Fourier Coefficient Birefringent Filter

Jingshan Wang, Guoxiang Ai

Beijing Astr. Obs., Chinese Acad. Sci., Beijing 100080, China

Abstract. In the birefringent filter, wavelength-tunable apparatuses (WTA) is widely used either on tuning and shifting of the passband or on testing of the birefringent filter. Some wavelength-tunable methods, especially suitable to the equal Fourier coefficient (EFC) birefringent filter (Ai, et al., 1982) (or Solc filter), are described in this article. We especially indicate the wrong way and give the correct design of wavelength-tunable design in EFC filter.

全反射棱镜在多通道双折射滤光器中的应用

王敬山，艾国祥，邓元勇
中国科学院北京天文台，100080

提要

本文讨论了全反射棱镜产生的相移（即位相变化）及其与入射光的波长、入射角度的关系和它的偏振特性。在多通道双折射滤光器中使用全反射棱镜时，我们对该相移及其消色差性加以利用，从而消除了它对滤光器性能带来的不利影响。

一、引言

多通道双折射滤光器的发明使太阳仪器及太阳物理的研究进入了一个新的阶段。多通道双折射滤光器的设计可分为垂直式和平行式两种类型（艾国祥等，1986）。考虑到滤光器的恒温和接收的要求，我国自行研制的多通道太阳磁场望远镜中的滤光器，采用的是平行式设计，这种设计方案必然要用到全反射棱镜（简称AR），以使光路调整到同一方向（王敬山等，1995，见本文集）。全反射棱镜在滤光器中的位置一般如图 1 所示，PB是偏振光束分离器，从它出射的光都是偏振光（如果其偏振度不够高，通常在其后加一个补偿偏振片）。PB、旋转1/2波片、1/4波片、双折射晶体b_2及偏振片P_2构成一可调级，全反射棱镜AR夹在中间，起到改变光线传播方向的作用。在多通道双折射滤光器的调试过程中，发现b_2级的凹槽光谱几乎没有，旋转1/2波片时，也几乎看不到有凹槽光谱的任何变化。经过分析，断定可能是全反射棱镜产生了附加相移，从而导致了以上现象的发生。在本文中，我们先从一般的光学理论角度讨论全反射棱镜产生的位相差及其特性，再讨论多通道双折射滤光器中出现的异常现象的两种解决办法。

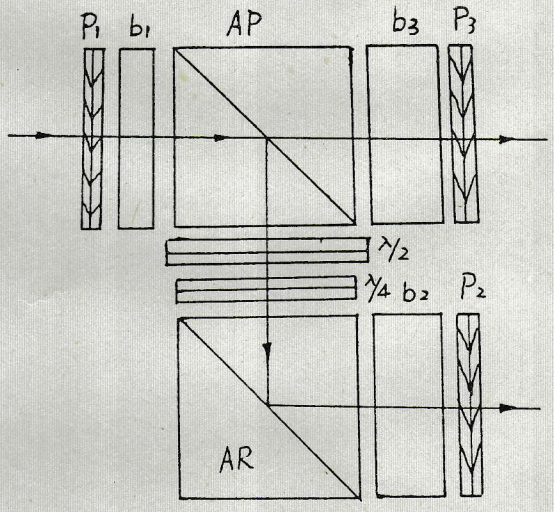


图1. 多通道滤光器中的全反射棱镜

二、光在全反射时产生的附加位相差

我们知道，当光从光密介质入射到光疏介质时，入射角如果大于临界角，便会产生全反射现象。我们用的全反射棱镜由两块三角棱镜组成（材料是K9玻璃），光线入射的那块棱镜的斜面已经抛光成镜面，另一块三角棱镜的斜面的中间挖出一个椭圆槽（以作空气槽），把两块

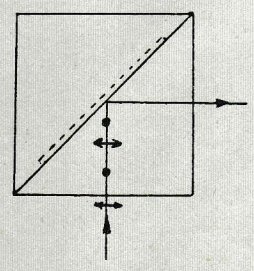


图2. 全反射棱镜结构图

三角棱镜光胶起来，便制成了全反射棱镜（如图2所示）。

光线在两三角棱镜的斜面处是从玻璃进入空气（槽），设入射光的波长为 λ，该光在K9玻璃中的折射率为 n_λ，入射角i大于临界角i_c，其中i_c满足公式

$$\sin i_c = \frac{n_{空气}}{n_\lambda} = \frac{1}{n_\lambda}$$

光的电矢量$\bar{E}$可分为垂直入射面的s分量E_S和平行于入射面的p分量E_P，用 δ_S表示反射光s分量对入射光s分量的位相变化，δ_P表示反射光p分量对入射光p分量的位相变化，那么 δ_S和 δ_P满足下列两式（赵凯华等，1984）：

$$\tan\frac{\delta_s}{2} = -\frac{\sqrt{n_\lambda^2 \sin^2 i - 1}}{n_\lambda \cos i} \tag{2.1}$$

$$\tan\frac{\delta_p}{2} = -\frac{n_\lambda \sqrt{n_\lambda^2 \sin^2 i - 1}}{\cos i} \tag{2.2}$$

若设全反射后，两个分量之间的位相差为 $\delta = \delta_p - \delta_s$，则有：

$$\tan\frac{\delta}{2} = \frac{\cos i \sqrt{n_\lambda^2 \sin^2 i - 1}}{n_\lambda \sin^2 i} \tag{2.3}$$

顺便说一下，以上公式中有无正负号很重要，它影响到两个分量的位相哪一个超前，哪一个落后的问题。某些教科书（如梁铨廷，19）中在（2.1）、（2.2）、（2.3）中都有一负号，这会导致错误的结论。

下面我们根据各种光在K9玻璃中的折射率，计算反射光s、p两分量的位相差。某些单色光的折射率及临界角列于表1中。

表1. K9玻璃的折射率与临界角

波长（A）	折射率	临界角ic
6562.8	1.51389	40° 20′
5892.9	1.51630	41° 16′
5460.7	1.51829	41° 12′
4861.3	1.52195	41° 05′
4358.3	1.52626	40° 56′
4046.6	1.52982	40° 49′

根据（2.3）式，可以得到 δ 随波长、入射角的变化（如图3所示）。

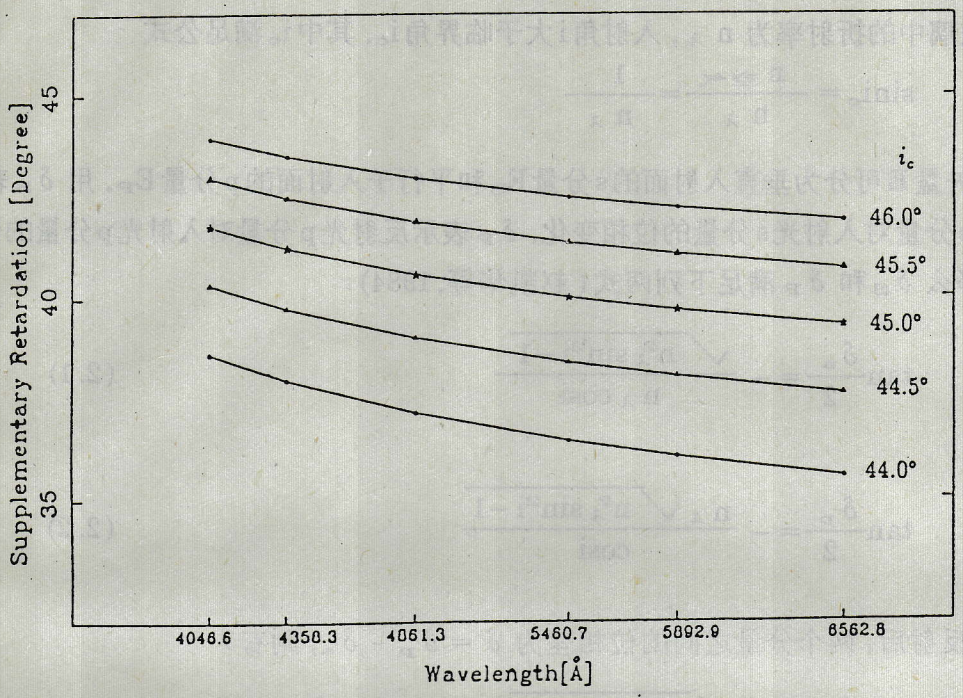


图3. 附加位相差随波长、入射角的变化

从图3中可以明显看出，在同一入射角度下，δ 随波长的增大而减小；在同一波长下，δ 随入射角度的增大而增大。另外一个很重要的特性就是 δ 具有较好的消色差性，对于同一个入射角，波长在4000Å至6600Å的范围内，位相差的相对误差$\leqslant$4%。因为多通道滤光器中的很多级都是消色差的，所以我们可以利用这一特性，消除 δ 对滤光器的影响。

三、多通道滤光器中附加相移的消除及应用

消除全反射棱镜的附加位相差，一般来说有两种办法。其一，就是把全反射棱镜排除在干涉级之外，也就是说可把旋转1/2波片和1/4波片放在全反射棱镜之后。同时在旋转1/2波片之前放置一偏振片，这样全反射棱镜对滤光器的干涉级的影响就完全消除了。但是，这种方法需要加偏振片，会降低滤光器的透过率。

第二种办法就是把1/4波片变成位相差为50° 左右的延迟片，和全反射棱镜合起来，可以成为一个消色差1/4波片，这样即消除了附加位相差的不利影响，又把 δ 的消色差特性利用了起来。实践证明，这种方法效果很好！

在这里再强调一下，寻常光(o光)和非寻常光(e光)的位相超前问题。因消色差1/4波片是由正晶体水晶和MgF2组成，在其里面寻常光比非寻常光传播得快。而全反射棱镜中的p分量的振动方向与1/4波片中的寻常光相同，s分量对应于1/4波片中的非寻常光，因此40° 左右的附加位相差加上一50° 左右的延迟片，就可组成一波长调节

装置中的1/4波片。

参考文献

艾国祥，胡岳风，中国科学A辑，8 (1986) 889.
Evans, J. W., J. Opt. Soc. Amer., 39 (1949) 229.
梁铨廷，《物理光学》
王敬山，艾国祥，邓元勇，天体物理学报，11 (1991) 388.
王敬山，艾国祥，何凤宝等，(1995) 见本文集.
赵凯华，《光学》上册，北京大学出版社，1984，254.

Application of Total Reflection Prism in Multichannel Birefringent Filter

Wang Jingshan, Ai Guoxiang, Deng Yuanyong
Beijing Astronomical Observatory
Chinese Academy of Sciences
Beijing 100080

Abstract

This paper discuss the characters of the supplementary retardation δ (i.e. phase shift) of the total reflection prism (TRP) in the multichannel filter (MBF) and the relation among the δ, the wavelength λ and the angle of incidence of the light. In the multichannel birefringent filter, we use the supplementary retardation as part of the 1/4 wavelength in the wavelength-adjusting apparatus to eliminate the influence of it.

九通道双折射滤光器中组合晶体级的检测方法*

王敬山[1]，毛伟军[2]，邓元勇[1]，艾国祥[1]

1. 中国科学院北京天文台，100080

2. 中国科学院南京天文仪器研制中心，210014

提要

九通道双折射滤光器是世界上第一台能够同时观测太阳上不同层次的物理光学仪器。它能同时得到九种不同谱线的太阳单色像。这就要求有些晶体级能够使几种波长的光同时极大地通过。本文就是要讨论这些晶体级的理论设计，以及在研制中的检测方法。

一、引言

在太阳上发生的许多物理现象和过程，诸如太阳耀斑爆发、日珥爆发、太阳黑子及暗条的演变等等，几乎都是在很短时间内发生的瞬变现象，所以同时得到多层次的太阳单色像、太阳矢量磁场和速度场对于太阳物理研究是极为重要的。以往的太阳仪器都做不到这一点。即使是功能强大的万能滤光器，因为它是单通道的，要做到同时观测太阳不同层次的物理现象也是不可能的。多通道双折射滤光器（艾国祥等，1986）的发明解决了这一难题。九通道双折射滤光器是有九通道头和九通道体的多通道滤光器（艾国祥等，1987），其特点就是在九通道头中设置较初级次的晶体滤光级，分出五个通道，然后在九通道体中的各通道上配置高级次的晶体滤光级，得到九个不同波长的光。九通道双折射滤光器中的绝大部分晶体级都是由两个或多个波长的谱线公用的，也就是说能使两个或多个波长的光同时极大地通过，这就要求晶体的厚度使每个波长的光的延迟为整数或半整数。在下面几节中，分别讨论九通道双折射滤光器中组合晶体级的理论设计和检测理论方法。

二、九通道滤光器组合晶体级的理论设计

设一晶体级中的双折射晶体b的厚度为d，光轴躺在通光表面上，那么有

$$\delta=\frac{\mu(\lambda,\ t)d}{\lambda} \tag{2.1}$$

其中 $\mu(\lambda,t)$ 为波长为 λ 的光在该双折射晶体中的双折射率，则其透过率为

$$\tau=\sin^2(\pi\frac{\mu d}{\lambda}) \tag{2.2}$$

当 $\frac{\mu d}{\lambda}=n+\frac{1}{2}$，n为整数时，透过率为极大。

* 国家自然科学基金资助项目。

由于晶体的双折射率不能精确地确定，这些组合级只能按照以一种双折射晶体为主，再用另一种薄的双折射晶体（两片薄晶片相减）来补偿的原理来设计，薄晶体的延迟级数很小，通过改变其厚度，就能使整个晶体级的延迟级数成为整数或半整数。九通道滤光器中组合晶体级的设计参数列于表1中。

表1 组合晶体级的设计参数

	No.	材料	厚度 (mm)	延迟级数(Wavelength A)
九通道头	S_1	$Q+M_gF_2$	3.901−0.259	86.03(3968), 71.00(4686), 63.52(5173), 62.52(5247), 62.48(5250)
	S_2^s	$Q+M_gF_2$	8.8−1.3	127.0(5173), 125.0(5247, 5250)
	S_2^4	$Q+M_gF_2$	1.86−0.13	43.0(3968), 35.5(4686)
	L_1	$Q+M_gF_2$	−4.593+6.856	70.0(5576), 66.5(5876), 62.0(6303), 59.5(6563)
	L_2^s	$Q+M_gF_2$	17.414−0.137	288.0(5576), 252.0(6303)
	L_3^s	$Q+M_gF_2$	10.089−1.047	144.0(5576), 126.0(6303)
	L_2^e	$Q+M_gF_2$	17.563−0.272	266.0(5876), 236.0(6563)
	L_3^e	$Q+M_gF_2$	8.781−0.136	133.0(5876), 118.0(6563)
九通道体	S_3^s	C+Q	−4.314+0.228	1462.5(5173), 1438.5(5247), 1437.5(5250)
	S_4^s	C+Q	−8.656−0.197	2924.5(5173), 2876.5(5247), 2874.5(5250)
	S_6^s	C+Q	−17.282+0.259	5849.5(5173), 5753.5(5247), 5749.5(5250)
	S_8^s	C+Q	−34.592−0.135	11698.5(5173), 11506.5(5247), 11498.5(5250)
	S_7^s	C+Q	−69.184−0.270	23397.0(5173), 23013.0(5247), 22997.0(5250)
	$S_8^{s''}$	C+Q	−138.336+0.1146	46026.5(5247), 45994.5(5250)
	L_4^e	$Q+M_gF_2$	35.126−0.544	532.0(5876), 472.0(6563)
	L_5^e	$Q+M_gF_2$	68.304+0.462	1065.0(5876), 945.0(6563)
	L_6^e	C+Q	−14.016−0.118	4095.5(5876), 3619.5(6563)
	L_7^e	C+Q	−112.069+0.265	32764.5(5876), 28956.5(6563)
	L_8^e	C+Q	−56.066−0.473	16382.0(5876), 14478.0(6563)
	L_9^e	C+Q	−28.033−0.236	8191.0(5876), 7239.0(6563)
	L_{10}^e	C+Q	−6.977+0.546	2048.0(5876), 1810.0(6563)
	L_{11}^e	$Q+M_gF_2$	−3.164+4.106	33.5(5876), 30.0(6563)
	L_4^s	$Q+M_gF_2$	34.828+0.274	576.0(5576), 504.0(6303)
	L_5^s	C+Q	−3.592+0.104	1116.0(5576), 972.0(6303)
	L_6^s	C+Q	−7.182+0.208	2231.5(5576), 1943.5(6303)
	L_7^s	C+Q	−57.518+0.534	17851.5(5576), 15547.5(6303)
	L_8^s	C+Q	−115.093−0.062	35702.5(5576), 31094.5(6303)
	L_9^s	C+Q	−57.518+0.534	17851.5(5576), 15547.5(6303)
	L_{10}^s	C+Q	−28.788−0.298	8925.5(5576), 7773.5(6303)
	L_{11}^s	C+Q	−14.365+0.416	4463.0(5576), 3887.0(6303)
	L_{12}^s	$Q+M_gF_2$	2.177+0.017	36.0(5576), 31.5(6303)

三、组合晶体级的检测方法

九通道双折射滤光器中的双折射晶体级分为两个部分，一部分是短波通道，包括3968.468Å，4685.750Å，5173.699Å，5247.063Å和5250.211Å五个谱线通道；另一部分为长波通道，包括5576.106Å，5875.989Å，6302.511Å和6562.828Å四个谱线通道。其中的晶体级分别用S或L来表示（如表1）。晶体厚度的测量是用“高精度晶体测厚仪”（杨还等，1981）实现的。其中有一可调一个波数的索列尔补偿器，测量时可以得到晶体波数的尾数（小数）部分。由于在九通道双折射滤光器的每一个晶体级中都采用了消

色差调节波长装置(王敬山等,1991),只要调整晶体的厚度使得所通过的每条谱线的波数的尾数相等,就可以用调节波长装置把所有波数调到整数或半整数。因为实验室中很难完全找到所需谱线的灯,只能采取多种谱线的灯源检测,然后用插值方法得到在所需谱线下的波数。

组合晶体级厚度的检测方法如下面所述:先将已经抛光好的双折射晶体在选用的谱线灯下测量出各组合级的波数,插值出九通道滤光器中谱线上的波数。对下列两种情况分别处理:

(1) 对于通过两条谱线的组合级,得到这两条谱线的波数后,改变薄晶体的厚度,让这两个波数的尾数相等。

(2) 对于通过多条谱线的组合级(如S_1,L_1等),改变薄晶体的厚度,使得各个谱线的波数尾数相近(在一定误差的范围内)。

组合晶体级有两类,一类是水晶(厚)+MgF_2(薄),另一类是冰洲石(厚)+水晶(薄)。我们以冰洲石+水晶类型的组合级为例,说明怎样改变薄晶体的厚度来确定组合级的厚度。设一个组合级的冰洲石厚度为d_c,在λ_1,λ_2的双折射率为$\mu_c(\lambda_1)$和$\mu_c(\lambda_2)$,水晶(两个薄片相减)的厚度d_Q,在λ_1,λ_2的双折射率为$\mu_Q(\lambda_1)$和$\mu_Q(\lambda_2)$,在λ_1下检测的波数$N_1+\Delta N_1$,在λ_2检测的波数为$N_2+\Delta N_2$,其中N_1、N_2为整数,如果$\Delta N_1 \neq \Delta N_2$,那么改变薄晶体(水晶)的厚度$\Delta d_Q$,产生$\Delta n_1$和$\Delta n_2$的波数变化,则有

$$\frac{\mu_c(\lambda_1)d_c+\mu_Q(\lambda_1)(d_Q-\Delta d_Q)}{\lambda_1}=N_1+\Delta N_1-\Delta n_1 \tag{3.1}$$

$$\frac{\mu_c(\lambda_2)d_c+\mu_Q(\lambda_2)(d_Q-\Delta d_Q)}{\lambda_2}=N_2+\Delta N_2-\Delta n_2 \tag{3.2}$$

其中

$$\Delta n_i=\frac{\mu_Q(\lambda_i)\Delta d_Q}{\lambda_i},\quad i=1,2 \tag{3.3}$$

根据上面分析,要求两条谱线波数的尾数相同,即$\Delta N_1-\Delta n_1=\Delta N_2-\Delta n_2$。把(3.3)代进此式,有

$$\Delta N_1-\frac{\mu_Q(\lambda_1)\Delta d_Q}{\lambda_1}=\Delta N_2-\frac{\mu_Q(\lambda_2)\Delta d_Q}{\lambda_2} \tag{3.4}$$

由(3.4)得到

$$\Delta d_Q=\frac{\Delta N_1-\Delta N_2}{\mu_Q(\lambda_1)/\lambda_1-\mu_Q(\lambda_2)/\lambda_2} \tag{3.5}$$

当Δd_Q的符号与d_Q的符号相同时,为减薄(减薄厚水晶片),当Δd_Q的符号与d_Q的符号相反时,便为增厚(减薄薄水晶)。

下面以L_8^5为例，说明上述方法的运用。L_8^5的d_c=-3.592mm，d_Q=0.104mm，实测在λ_1=6302.511A下的波数尾数为ΔN_1=0.0161，在λ_2=5576.106A下的波数尾数为ΔN_2=0.0367，而$\mu_Q(\lambda_1)/\lambda_1$=0.0143292465，$\mu_Q(\lambda_2)/\lambda_2$=0.0163800225，根据(3.5)式得到$\Delta d_Q$=10.07$\mu$m。因为$\Delta d_Q$与$d_Q$符号相同，所以应减薄厚水晶10.07$\mu$m。

四、讨论

九通道双折射滤光器规模非常庞大，结构非常复杂，仅组合晶体级就有31级。利用本文所讨论的方法，检测了31级中的绝大部分，都得到很好的结果。对于一些非常厚的冰洲石级（如S_7^5, S_8^5, L_7^6, L_8^6, L_8^5, L_9^5, L_7^5），其透过波长轮廓非常窄，而在实验室中得不到单色性非常好的光，按照本文方法会有较大误差，我们利用太阳光谱仪，测量其透过带与太阳谱线之间距离的方法，得到了较好的效果。

参考文献

艾国祥，胡岳风，1986，中国科学A辑，7，889

艾国祥，胡岳风，1987，天体物理学报，7，305

Beckers, J. M., Dickson, L., Joyce, R. S., 1975, AFCRL-TR-75-0090, Instrumentation Papers, No. 227

王敬山，艾国祥，邓元勇，1991，天体物理学报，11，383

杨还，胡岳风，艾国祥，1984，仪器仪表学报，5，420

The Test theory of Combined Crystal Elements in the 9-channel Birefringent Filter

Jingshan Wang[1], Weijun Mao[2], Yuanyong Deng[1], Guoxiang Ai[1]

1. Beijing Astro. Obs., Chinese Acad. of Sci., Beijing 100080

2. Nanjing Astro. Instr. Center, Nanjing 210014

Abstract. The 9-channel birefringent filter is the first instrument in the world which can observe the multilayer of solar atmosphere simultaneously. This needs the srystal elements to be passed maximally with a few of spectral line with different wavelengths. In this article, the theoretical design and the test method of the combined crystal elements will be disscussed.

窄带干涉滤光片在双折射滤光器中的使用和处理方法

宋国峰，艾国祥

中科院　北京天文台 100080

摘要

应用双折射滤光器测量太阳磁场和速度场。由于技术上的原因，晶体级数不可能做得很多，通常都使用前置干涉滤光片。目前我们设计的带宽0.1Å的用于全日面磁场测量的万能滤光器于1991年8月在北京天文台怀柔太阳观测站投入使用。这台滤光器使用的是带宽只有5Å的前置干涉滤光片。1993年同类的滤光片亦应用于台湾中央大学使用的滤光器中。本文讨论磁场测量中窄带干涉滤光片的使用问题。

一. 引言

窄带干涉滤光片具有体积小，成本低等优点。但由于窄带干涉滤光片中心波长随温度的变化产生漂移，因而温度不均匀还会使整个通光口径内透过波长不一致。这是窄带干涉滤光片固有性质带来的一些使用问题。解决这一问题必须采用恒温的办法。

恒温并没有多少技术可言，只是因为恒温后带来了磁场测量的致命问题——附加偏振。它本身不是由于温度的变化产生的，而是来源于为补偿升温导致的干涉滤光片中心波长漂移而采取的使干涉滤光片倾斜的措施。倾斜产生的附加偏振的大小，对磁场测量结果的影响的估计，是我们应用干涉滤光片时要讨论的中心问题，如何尽量减小附加偏振的影响，才是本文讨论的关键问题之所在。

二. 前置干涉滤光片通过带的温度漂移与恒温处理

干涉滤光片的中心波长随环境温度线性变化，温度升高向长波方向移动，温度降低向短波方向移动，尽管对任意一个给定的滤光片来说都是线性的，温度漂移也同原始设计的中心波长有关，变化范围是400nm时为0.015nm/℃到1000nm时为0.03nm/℃。这一数据是在 −50℃到 +70℃范围内工作的情况，超出这一温度范围会对滤光片产生破坏性影响，而且温度变化超过5℃/minute的骤冷或骤热也可能损坏滤光片。

我们选用的干涉滤光片中心波长是为工作在23℃时设计的，下面是 $\lambda_{0_1}=5324$Å，$\lambda_{0_2}=5576$Å的两块干涉滤光片中心波长随温度变化的计算。

首先假定在400nm至1000nm之间函数的变化为线性，则

$$K=(K_2-K_1)/(\lambda_2-\lambda_1)\times(\lambda-\lambda_1)+K_1$$

其中 $K_2=0.03$nm/℃，　$\lambda_2=1000$nm

$K_1=0.015$nm/℃，　$\lambda_1=400$nm

λ 为所选滤光片的中心波长，K为该波长的滤光片的温度变化系数。

$\lambda=5324$Å时

$$K=0.015/6000\times(5324\text{Å}-4000\text{Å})+0.015=0.0183\text{nm}/℃$$

$$\lambda=5576\text{Å}$$

$$K=0.015/6000\times(5576\text{Å}-4000\text{Å})+0.015=0.019\text{nm}/℃$$

用于全日面太阳磁场观测研究的滤光器，由于放在10cm望远镜的准直光路中，周围的环境温度在无太阳照射时全年可能约为 −20℃到 +40℃之间，在太阳照射下，温度可能要在 +10℃到 +50℃之间变化，所以它工作在 +23℃的时侯并不很多。温度超过40℃时引起的干涉滤光片中心波长的改变将会很严重，而且没有恒温的话，中心波长将随日照的时间长短和位置变化，从而使所选谱线透过率产生随机的起伏，这样就很难用于实际观测。

考虑到恒温的必要，加之致冷又更复杂，所以恒温温度应订的略高一些，才能保证只采用简单的加温电路即可完成恒温功效。根据温度变化的情况：我们将恒温温度订在 +42℃。这样如果选 +23℃时，中心波长5324Å的干涉滤光片，则42℃时其中心波长向长波方向移动量 $\Delta\lambda$ 为

$$\Delta\lambda=(42℃-23℃)\times0.0183\text{nm}/℃$$
$$=19℃\times0.0183\text{nm}/℃$$
$$=3.477\text{Å}$$

同样中心波长5576Å的干涉滤光片，其 $\Delta\lambda$ 为

$$\Delta\lambda=(42℃-23℃)\times0.019\text{nm}/℃$$
$$=19℃\times0.019\text{nm}/℃$$
$$=3.61\text{Å}$$

干涉滤光片中心波长向长波方向移动，将改变观测谱线的透过率，严重时可能压掉所需观测的谱线，为了使干涉滤光片的中心波长与观测谱线相匹配获得良好的单色通光能力，我们需要利用干涉滤光片的下面的性质，对其温度变化予以补偿。

三. 干涉滤光片中心波长紫移的获得

前面讲了干涉滤光片随温度的线性变化，由于恒温温度选择的原因使干涉滤光片中心波长发生了红移。干涉滤光片又一个重要性质是干涉滤光片与光轴的夹角会使滤光片的中心波长产生紫移。

在我们的系统中，滤光片和滤光器都放在准直光路中，滤光片与光轴的夹角即为入射光束对滤光片的入射角，在很小角度的情况下，这种紫移对获得预期的峰值波长很有用，但因随入射角的增大，最大透过率减小而背景则增大，所以当入射角很大时可能导致没有峰值透过率和光谱曲线畸变。

中心波长在入射角小于10° 时，紫移的函数由下式给出：

$$\lambda_\alpha=\lambda_0\left[1-\left(\frac{N_e}{N_*}\right)\sin^2\alpha\right]^{1/2}$$

其中：λ_α 为在 α 入射角下的中心波长；

λ_o为正入射时的中心波长；

N_e为前后面的介质折射率；

N_*为干涉滤光片折射率，等于1.8；

α为入射角。

如果在会聚光和发散光中使用干涉滤光片，其结果也于前述的这种离轴平行光束的结论有区别，使用中还必须认真计算，前面已计算过由于温度的改变，导致中心波长向长波方向移动3.477Å和3.61Å，因此我们可以计算在入射角等于多少时，可以使中心波长向短波方向移动大约3.477Å和3.61Å。

表3. 给定入射角的波长变化结果

α	λ_o	λ_α	$\Delta\lambda$
1°	5324.1	5323.847	0.25Å
2°	5324.1	5323.0883	1.021Å
	5576	5574.95	1.048Å
3°	5324.1	5321.823	2.28Å
	5576	5573.642565	2.357Å
4°	5324.1	5320.05	4.05Å
	5576	5571.81	4.1887Å

假定中心波长已偏移3.477Å和3.61Å，则可以计算得到：

$\Delta\lambda$	λ_o	λ_α	α
3.477Å	5327.5Å	5324.1Å	3.74°
3.61Å	5579.6Å	5576Å	3.65°

四. 斯托克斯矢量的改变与补偿

由于恒温温度高于干涉滤光片的设计温度，而采用小角度入射光束补偿了中心波长和透过带随温度的变化。这样我们可以认为透过的波长是我们原来希望得到的理论设计中的中心波长λ_o，而且我们假定原设计中干涉滤光片通过的为完全非偏振光，即$E_s=E_p$，即它不产生多余的偏振，但由于为补偿温度位移而使干涉滤光片的入射表面倾斜，因而产生了附加偏振。由菲涅尔公式给出这一附加偏振的计算如下：

$$t_s=\frac{A_{2s}}{A_{1s}}=\frac{2\sin\theta_2\sin\theta_1}{\sin(\theta_1+\theta_2)}$$

$$t_p=\frac{A_{2p}}{A_{1p}}=\frac{2\sin\theta_2\sin\theta_1}{\sin(\theta_1+\theta_2)\cos(\theta_1-\theta_2)}$$

$$\theta_2=\arcsin\frac{\sin\theta_1}{n}$$

由前述知：

$$A_{1s}=A_{1p}=A$$

$$I=2A^2$$

$$M=0$$

$$C=0$$

$$S=0$$

通过第一表面：

$$A_{1s}'=A_{1s}t_s=A\frac{2\sin\theta_2\cos\theta_1}{\sin(\theta_1+\theta_2)}$$

$$A_{1p}'=A_{1p}t_p$$

$$=A\frac{2\sin\theta_2\cos\theta_1}{\sin(\theta_1+\theta_2)\cos(\theta_1-\theta_2)}$$

通过第二表面，入射角变为 θ_2，出射角变为 θ_1，即

$$t_s'=\frac{2\sin\theta_1\cos\theta_2}{\sin(\theta_1+\theta_2)}$$

$$t_p'=\frac{2\sin\theta_1\cos\theta_2}{\sin(\theta_1+\theta_2)\cos(\theta_2-\theta_1)}$$

则

$$A_{2s}'=A_{1s}'t_s'=A\frac{2\sin\theta_2\cos\theta_1}{\sin(\theta_1+\theta_2)}\cdot\frac{2\sin\theta_1\cos\theta_2}{\sin(\theta_1+\theta_2)}$$

$$A_{2p}'=A_{1p}'t_p'$$

$$=A\frac{2\sin\theta_2\cos\theta_1}{\sin(\theta_1+\theta_2)\cos(\theta_1-\theta_2)}\cdot\frac{2\sin\theta_1\cos\theta_2}{\sin(\theta_1+\theta_2)\cos(\theta_2-\theta_1)}$$

由于没有双折射晶体，视s、p位相相同，即 $\gamma=0$

$$I=A_{2s}'^2+A_{2p}'^2$$

$$=A^2\left(\frac{\sin2\theta_1\cdot\sin2\theta_2}{\sin^2(\theta_1+\theta_2)}\right)^2+\left(\frac{\sin2\theta_1\cdot\sin2\theta_2}{\sin^2(\theta_1+\theta_2)\cos^2(\theta_1-\theta_2)}\right)^2$$

$$M=A_{2s}'^2-A_{2p}'^2$$

$$=A^2\left(\frac{\sin2\theta_1\cdot\sin2\theta_2}{\sin^2(\theta_1+\theta_2)}\right)^2-\left(\frac{\sin2\theta_1\cdot\sin2\theta_2}{\sin^2(\theta_1+\theta_2)\cos^2(\theta_1-\theta_2)}\right)^2$$

$$C=2A_{2s}'\cdot A_{2p}'$$

$$=A^2\frac{\sin2\theta_1\cdot\sin2\theta_2}{\sin^2(\theta_1+\theta_2)}\cdot\frac{\sin2\theta_1\cdot\sin2\theta_2}{\sin^2(\theta_1+\theta_2)\cos^2(\theta_1-\theta_2)}$$

$$S=0$$

此向量为

$$1,\ \frac{\cos^2(\theta_1-\theta_2)-1}{\cos^2(\theta_1-\theta_2)+1},\ \frac{\cos^2(\theta_1-\theta_2)}{1+\cos^2(\theta_1-\theta_2)},\ 0$$

如果在滤光片的后面加入一块平行平板玻璃取折射率值为 η，则在y、z平面上倾斜角度 θ_1，由于正交关系，对y、z平面来说的S、P分量即为x、z平面的P、S分量，那么加入平板玻璃将产生附加偏振，其值大小与前面的向量的模相同，但是S、P分量相互含义不同，则对I分量不会发生影响，对M则结果刚好符号相反。

而对于两块非正入射的平板来说，其合成作用的斯托克斯参数有：

$$I_o=I$$

$$M_o=M_1+M_2$$

$$C_o=C_1+C_2$$

$$S_o=S_1+S_2$$

可是加平板玻璃且在垂直方向使其倾斜一角度可以补偿掉附加偏振的M项。然而对C项，由于C项本身是S、P量的振幅乘积的结果，它不能由S、P分量的正交和yx、zy平面的正交而得到补偿。但是有一个令人高兴的因素可以影响斯托克斯参数的这一项，那就是两振动方向垂直的偏振光的位相差的余弦要影响45° 方向上的附加偏振，而1/2波片将产生 ±180° 的位相差，这时恰好使得C项变号。所以只要在补偿片上或者是在滤光片上加上一片1/2波片，则45° 方向上的附加偏振即可补偿掉。

The Problem of Using Interfere Filter in Telescope

Guofeng Song, Guoxiang Ai
Beijing Astronomical Observatory
Chinese Academy of Sciences
Beijing 100080

Almost the instrument that measure the solar magnetic field and velocity field with birefringent filter most using the interfere prefilter.

In 1991, we designed a universal birefringent filter with 0.1 Angstrom passband, in front of the filter we use a interface filter with 5 Angstrom passband.

Some problem we most faced when using the interfere filter. In this paper, we discuss some of the question.

多通道望远镜中光学零件的镀膜技术

李开寿

南京天文仪器研制中心，210042

摘要：本文主要介绍了为研制多通道望远镜，在光学薄膜方面做的一些工作。具体有多层增透膜，夹层银反射膜，棱镜偏振分束膜的设计和镀制。

多通道望远镜是用于对太阳表面进行观测。为了获得更多的太阳表面信息，它采用了在太阳光谱的九个不同波长处，同时对太阳进行观测。这要求多通道望远镜能把入射光束按波长分成九束光，以实现在九个波长位置同时对太阳进行观测。为了做到这一点，无疑要使用相当多的光学零件。这就使得投射到接收器上的光能量大大地降低。想保证有足够的光能量投射在接收器上，只有两个途径：一是增加望远镜的口径；二是提高望远镜中光学零件透过或反射的光通量。光学镀膜技术是实现后一途径的有效方法。把入射光束按波长分成九束光，可以用光学镀膜技术来实现。因此，研制多通道望远镜的主持人，对光学镀膜技术提出了较高要求。具体指标如下：

1. 对于透镜，要求每一面的透过率在九个波长处（相当于波长在3900埃至6800埃区）达到99.5%以上。
2. 对于反射镜，要求其反射率在九个波长处达到95%以上。
3. 对于偏振分束器，要求偏振透过率达90%，偏振度达99%。

光学薄膜的特性是由光波射入到薄膜中产生光的干涉决定的。为了预先了解怎样的光学薄膜结构才能满足要求，我选用了导纳矩阵方法，编制了计算机程序，进行了光学薄膜结构的设计和计算。有关这方面的具体内容，另文详细介绍。

对于抛光的光学零件表面，由于其固有特性决定，对入射光总有一定的反射。反射率的大小，与光学零件的折射率有关。折射率为1.52的冕牌玻璃，其表面反射约为4.25%左右。提高光学零件的透过率，实质是用镀膜技术减少表面的反射率。使用单

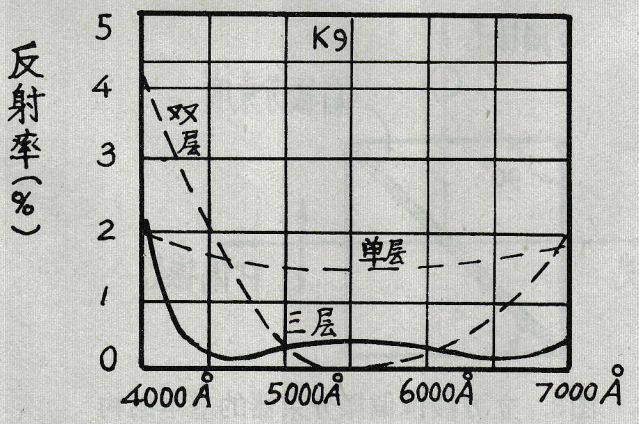


图1. K9玻璃上镀以单层减反射膜、双层减反射膜、三层减反射膜的表面反射光谱特性曲线。同时，还给出没有镀膜的K9玻璃的表面反射。

层膜，可以使K9玻璃的表面反射下降到1.5%。使用双层膜，可以使K9玻璃的表面反射在一定的波长范围下降到几乎近于0。使用三层膜，可以使K9玻璃的表面反射在2300埃左右宽的波长范围下降到0.5%。有关的实验结果，在图一中给出。从图中看出，对于三层膜，从4400埃开始，表面反射上升，比K9玻璃的固有反射还高。另外，在制作三层膜过程中，对每一层膜厚度的控制精度要求极高，我们使用的仪器设备难以保证。对于无备用件的望远镜主光路系统，要求制作的重复性是百分之百，我们根本没法实现。对于双层膜，主光路系统中的光学零件是没法使用的。因此，主光路系统中的透射光学零件，全采用单层减反射膜。对于单波长的九束分光路中的透射光学零件，使用双层减反射膜有极大的优越性，而被采用。

对于3900埃至6800埃波长范围使用的反射镜，铝反射膜是有一系列的优点，但是其反射率不高于90%。在使用范围内，银反射膜的反射率达到了95%，但它易受空气中的硫化物的影响而降低反射或发黑，且与玻璃的粘附性差。但文献介绍，用S_iO_2膜做

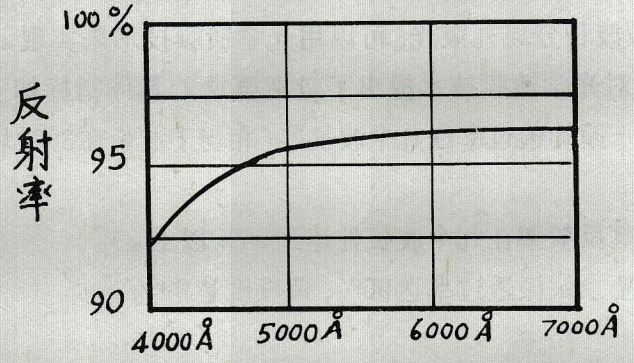


图2. 加粘结层和保护层的银反射膜的光谱反射特性曲线

保护层，在银膜与镜面、银膜与保护层之间镀以粘结的Al_2O_3膜，可以得到良好的效果。通过大量的试验，掌握了有关工艺方法，并用于多通道望远镜中的反射镜。后来还用于其它单位的反射镜上。图2给出了所得的反射特性曲线。

多通道望远镜中使用的偏振分束器，是立方棱镜的形式。它是由两个45度的直角

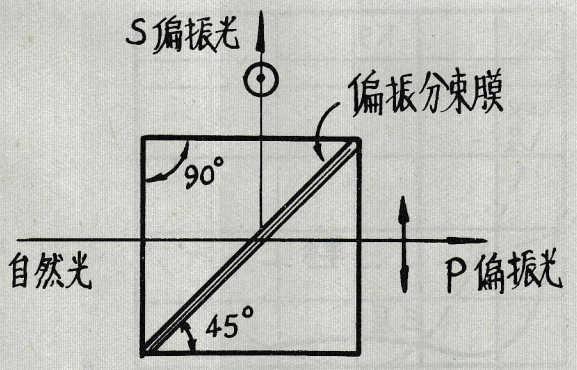


图3. 立方棱镜偏振分束器的基本结构

棱镜在斜面胶合而成。在直角棱镜的斜面上镀有偏振分束膜。当入射光垂直立方棱镜

分束器的一个侧面射入时，在斜面上经偏振分束膜把入射光分成两束（如图3所示）。一束光沿入射光方向射出棱镜。一束光经偏振膜反射，与入射光成90度射出棱镜。透射光束是P偏振光，反射光束是S偏振光。棱镜的材料，是据偏振分束膜的设计而选定的。偏振分束器的偏振度达99%，偏振光的透过率达到90%。分束器胶合的精度，虽为加工的棱镜精度所限，但也在1分以内。

Plating Techanique in Multichannel Solar Telescope

Kaishou Li
Nanjing Astronomical Instrument Center
Chinese Academy of Sciences
Nanjing 210042
China

Abstract

This paper briefly describes for mult-channel telescope in optical film. Multilayers anti-reflective film, Ag film coated with thin layer of Al_2O_3 plus deposited silicon oxide.

望远镜的机械结构设计

胡企千，邱敏华，尤田
南京天文仪器研制中心，210042

摘要

本文介绍多通道太阳望远镜的总体结构设计，包括精度分配、力学性能和结构布局。此望远镜结构的特点在于它有二组镜筒分别用于太阳整体象和局部象的观测。本文还介绍了一种用于太阳望远镜纬轴平衡的方法。

一、概述

太阳多通道望远镜是在原磁场望远镜（镜筒、滤光器）及其观测室（园顶、天窗）的基础上进一步发展而研制的仪器，因而具有一定的继承性，并在设计中受到其外界条件的限制。

就机械结构而言，太阳多通道望远镜分为基座（极轴）、叉臂（纬轴）和镜筒三个部分，其中镜筒部分包括：

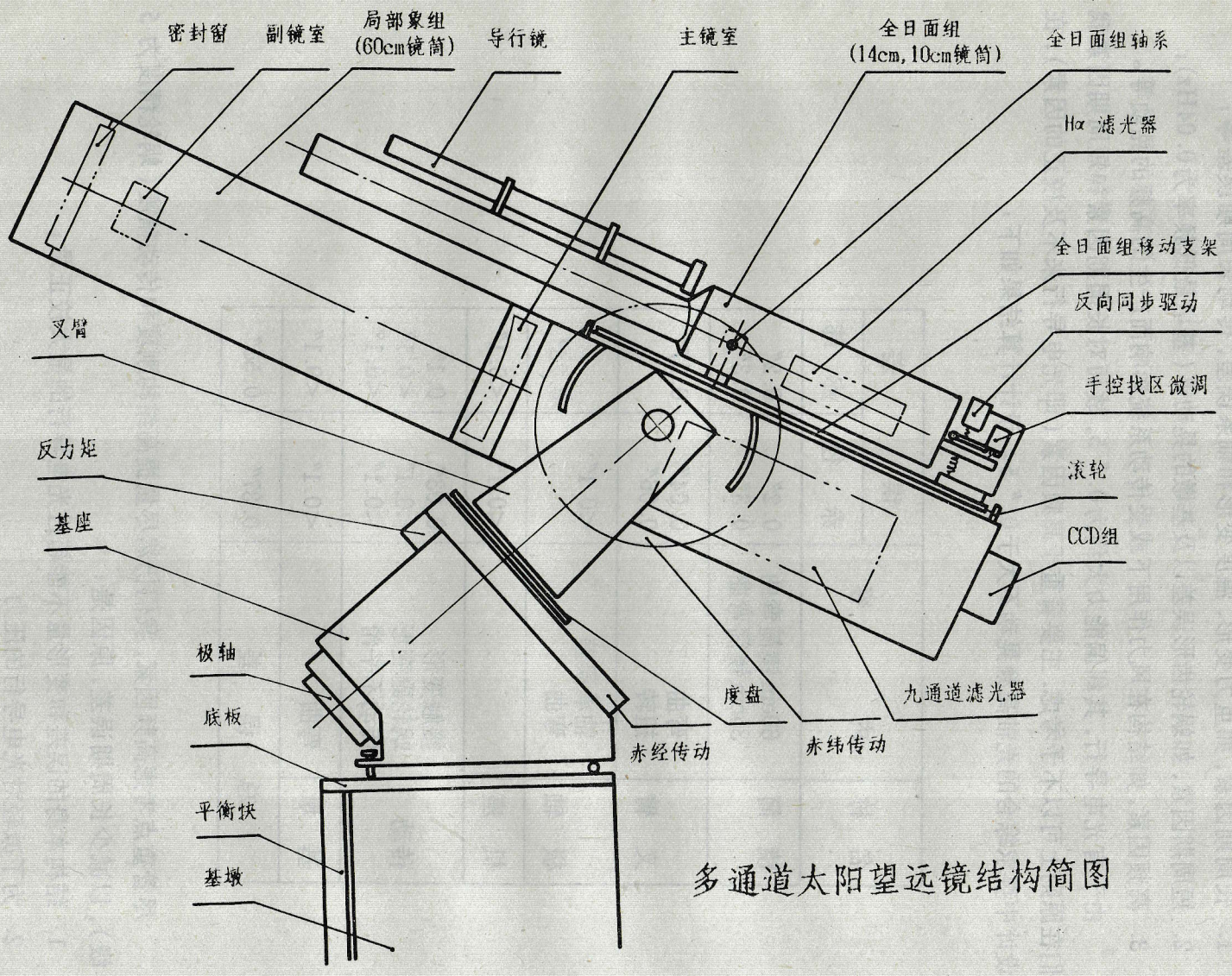
1. 局部象部分（由赤径、赤纬轴系直接控制）：
   (1) 35cm磁场望远镜镜筒；
   (2) 60cm反射式真空镜筒；
2. 全日面象部分（由全日面镜筒组轴系控制，该轴系固定于局部象镜筒组上）：
   (1) 14cm折射式真空镜筒；
   (2) 10cm折射式真空镜筒；
   (3) 8cm光电导行镜筒。

结构设计面临的任务主要是：

1. 要有足够的刚度和自振频率以保证各路光轴的稳定性；
2. 要有较好的跟踪，特别是光电导行精度；
3. 其尺寸不能超过现有观测室的范围，特别是其宽度必须小于天窗宽度；
4. 最大部件的重量不能超过2吨，以保证可利用现有设备安全起吊。

具体参数指标如下（设计任务书规定）：

1. 园顶内半径3.7米，球心高3米；
2. 基墩面积1.2米×1.2米，高1.6米；
3. 地理纬度40°；
4. 5级风力下能正常工作；
5. 赤经快动每分钟（以下同）90°，慢动6°，找区（见下）0.5°，恒动15′，微动1.5′～2′，赤纬快动15°～30°，慢动和找区1°，微动1′。
6. 两组镜筒“拉偏”角度范围±20′。
7. 光电导行精度±1″。



多通道太阳望远镜结构简图

8. 在镜筒任意位置，60cm镜筒与35cm镜筒光轴不平行<0.2′。

二、望远镜跟踪精度设计结果

影响望远镜跟踪精度的主要因素有：

1. 长周期因素，如重力变形，温度变形和轴系误差，传动长周期误差等；
2. 短周期因素，如蜗轮齿形误差以及基墩的晃动等（基墩最低频率为0.04Hz）；
3. 高频因素，如结构在风力作用下或受传动系统影响而产生的高频的晃动等。

由于有光电导行，其纠偏能力大约为0.″5，故而对长周期因素和短周期因素我们在原则上可以不予考虑，主要着重于高频因素（即光电导行来不及校正的因素），在设计中要求综合的光轴高频晃动不大于0.″5。设计计算结果如下：

名称	内容	误差	
		赤径	赤纬
镜筒	60cm镜筒弯曲 35cm镜筒弯曲	0.2″ 0.3″	0.2″ 0.3″
叉臂	弯曲 扭转	0.04″ 0.06″	0.27″
极轴	轴承误差 弯曲	<0.1″	0.23″
机座		<0.1″	<0.1″
传动	接触变形 蜗轮副变形 传动不平滑	0.03″ <0.1″ <0.1″	0.1″ <0.1″ <0.1″
基墩	弯曲	<0.1″	<0.1″
总误差		0.37″	0.55″

尽管重点考虑高频因素，我们仍然尽量提高结构刚度和传动精度（蜗轮精度为5级），以减少长周期误差，原因是：

1. 结构本身的误差和变形量不能超过光电导行的最大校正量；
2. 为了减轻对光电导行的压力
3. 精度高，传动系统必然有较小的高频误差。

三、望远镜结构的力学性能

1、各部分质量和转动惯量

名称		质量(kg)	转动惯量(10kg.cm)	
			绕极轴	绕纬轴
镜筒	60cm 35cm 全日面组	1460 550 550	25 11 11	25 11 11
	小　计	2560	47	47
叉臂极轴	叉　臂	1000	1.2	
	极　轴	600	0.4	
	小　计	1600	1.6	
赤经传动	蜗轮等	100	0.4	
基座		1600		
总　计		5860	49	47

2、结构静态刚度(归算成最不利情况下的60cm镜筒光轴转角)

	绕极轴	绕纬轴
自重变形	34″	26″
5级风作用	0.5″	0.2″

3、自振频率

最低频率(绕极轴):8.4HZ

四、结构设计特点简介

1、总体布局

如前所说,望远镜结构必须按照已有园顶、基墩设计,因此:

(1) 基座底面尺寸不大于1.2米×1.2米;

(2) 镜筒最长处在园顶内侧以内,0.3米间隔

(3) 转动中心(极、纬轴交点)接近园顶球心;

(4) 望远镜处于子午面内时,最大宽度应小于天窗宽度1.76米,实际设计为1.66米。

最困难的是最后一条。为了满足此要求,我们在设计上一则利用60cm镜筒光轴与其滤光器中心偏离的关系,将叉臂的一个臂设置于主镜室的宽度范围之内;同时尽量压缩其他结构(如赤纬传动机构)的横向尺寸,最后达到了目的。

望远镜总体布局如下:

①60cm镜筒和35cm镜筒合起来作为镜筒主体(称为局部象镜筒组)。为了使其内滤光

器等部件可以装卸，其箱体上方都开有窗口。

②全日面组镜筒具有独立的正交轴系自成一体，安装在局部象镜筒组的箱体的上方，并可以移开以便于后者装卸滤光器等部件。

③上述镜筒装在叉臂上，叉臂通过刚性较好的极轴装入基座内。

④为了便于装调，赤径赤纬蜗轮分别设置在箱体和叉臂之外，另用罩壳罩起来。为了尽可能提高赤纬蜗轮的侧向刚度，它与镜筒箱体的连接除了纬轴外还用二个弧形支架加以固定（绕开叉臂的活动范围）。

⑤叉臂和镜筒内控制用电缆经极轴中孔引入控制室。

2、机架

(1) 叉臂采用整体浇铸的铸钢件，基座为钢板焊接件，二者都有较高的刚度。

(2) 纬轴轴承座为剖分形式，带轴承的镜筒部件可以垂直下落就位。纬轴轴承采用二端经向推力轴承加止推轴承形式。通过调整垫片厚度施加轴向预紧力P=350kgf。预紧力施加的原则是：

(A) 消除轴承径向间隙，并尽量提高接触刚度；

(B) 当镜筒指平（纬轴处于子午面内）时，叉臂的两个臂都仍然承担轴向力。

极轴轴承采用一大一小两个径向轴承，大的（靠近叉臂）为园锥滚子轴承，具有较好的刚度。利用极轴倾角造成的望远镜转动部分的重力分量可以很好地消除园锥滚子轴承的间隙；另一只向心轴承的间隙由二块埋入轴承座内的月牙块的径向压紧力而消除。为了调整望远镜转动部分重力引起的轴承压紧力，在极轴尾部另置一个浮动止推轴承，可用6个螺丝进行微调。

(3) 极轴方向调整，根据最大宽度小于天窗宽度的要求，我们将方位调整的转动点（球面接角）设置在基座底部的前沿，即靠近整个望远镜的纵向中间位置，这样在调整极轴方位时横向尺寸最小，同时又接近望远镜的重心故而在调整时用力较小。

(4) 望远镜重心位于基墩平面内，但比较靠近前沿。为安全起见，在基座底板后端悬挂一平衡块使得重心向基墩中心移动。

3、赤径赤纬传动

赤径赤纬传动采用多电机差动机构，实行快、慢、恒、微动分速驱动，末级为5级精度蜗轮副。

采用力矩电机－齿轮反力矩系统消除传动间隙。

4、全日面镜筒组

全日面镜筒组和局部象镜筒组之间角度变化仅±20′，故而采用“内藏式”正交轴系而大大减小镜筒组尺寸和重量。该轴系固定在三角形框架上，后者二端装有滚轮可在局部象镜筒组的箱体上左右移动及固定。

当局部象组由日面中心转向某一观测点（即“找区”）时，全日面组必须在赤径、

赤纬方向上反向转过同一角度才能维持其象面位置，称为“反向同步”运动。此运动是通过两对自整角机来实现的，每一对的两只电机分别装在赤径（赤纬）传动箱上和全日面组驱动机构上，后者通过丝杆来改变二组镜筒之间的角度。

在实际使用时发现利用自整角机的反向同步运动的灵敏度嫌低（即局部象找区精度不够），后来进行了改进：

在全日面组赤径赤纬驱动机构上各串入一组可以手控的电机－丝杆机构，当需要局部象微小移动时，可用手控方式稍微改变两组镜筒之间的角度，同时配合导星系统的校正功能，可以使局部象镜筒平稳地指向任一需要观测的区域。

5、60cm真空镜筒

(1) 真空镜筒：从副镜前的密封玻璃到主镜室为止为真空镜筒。

(2) 主镜及支承：主镜材料为微晶玻璃。底支承为九点机械浮动支承，侧支承为水银带支承，中心孔有殷钢环定位。

(3) 副镜调焦：有手控电动调焦机构。

(4) 反射光栏：主焦面有反射光栏，将非观测区光线反射出镜筒。

(5) 焦面冷却：焦面上有水循环冷却装置

(6) 消杂散光：镜筒壁装有一系列消杂光筋片

6、望远镜安全保护

1. 赤径有机械绥冲及限位块。
2. 赤径赤纬均装有限位开关。
3. 局部象镜筒上装有水银开关，以防止镜筒朝下（最低高度为地平上5°，保持反射镜始终靠于底支承上）。
4. 电控有限流保护。

五、轴系平衡调整方法

赤道叉式望远镜在一般地理纬度点其镜筒不能指向天顶（否则在结构设计上将削弱刚度），这就给纬轴平衡测试和调整造成困难。在太阳多通道望远镜调试过程中，我们提出了一种特殊的方法：即在镜筒二极限位置（赤纬 ±23.5°）测出不平衡力矩，而后通过坐标转换求出用镜筒“自然坐标”系表示的镜筒重心坐标，再实施平衡调整，收到了很好的效果，重心偏离纬轴仅0.3mm，不平衡力矩仅1kgm，详见附录“赤道叉式太阳望远镜的纬轴平衡方法”。

极轴平衡可按常规方法进行。

赤道叉式太阳望远镜的纬轴平衡方法

胡企千

摘要

本文针对一般赤道叉式太阳望远镜不能使镜筒指向天顶的特点提出一种纬轴平衡的方法，该方法已被有效地用于最近安装成功的太阳多通道望远镜。

众所周知，天文望远镜一般要在全部装配完成后在现场进行最后的轴系平衡，特别是大型望远镜，不经过精细的平衡调整就不可能获得满意的伺服驱动性能。

这次，在北京天文台怀柔观测站最后调整太阳多通道望远镜（该仪器相当于一台一米口径的望远镜）的纬轴平衡时，我们采用了一种简单而有效的方法，现介绍如下，并希望在今后的类似仪器上推广应用。

如图，O为望远镜纬轴，x-O-y为固定于镜筒上的自然座标系，x轴即为光轴。显然x与铅垂线OB之夹角，对太阳望远镜而言，通常被设计在 $\phi-23.5°$ 到 $\phi+23.5°$，ϕ 为观测点地理纬度。现设镜筒重心在C处，座标值为 x_o, y_o，镜筒重量为G（清单，随着加平衡重此重量将发生变化，但由于它与所加的平衡重相比要大得多，因此可视为常量）。易于得出重力G的力臂如下：

$$AO=-x_o\sin(\phi\pm23°)-y_o\cos(\phi\pm23°)$$

现若用弹簧测力器在力臂 $\overline{X}$ 处测得所需的平衡力为 P_{12}，则平衡方程式为

$$G\cdot AO=P_{1,2}\overline{X}$$

式中 P_1 为镜筒光轴Ox处于角度 $\phi-23.5°$ 时的平衡力，P_2 为角度 $\phi+23.5°$ 时的平衡力，本文规定 $P_{1,2}$ 沿-y方向为正。

由上述方程式可得出二元一次方程组：

$$\begin{cases}-\dfrac{G}{\overline{X}}[x_o\cdot\sin(\phi-23.5°)+y_o\cdot\cos(\phi-23.5°)]=P_1\\[2ex]-\dfrac{G}{\overline{X}}[x_o\cdot\sin(\phi+23.5°)+y_o\cdot\cos(\phi-23.5°)]=P_2\end{cases}$$

作为例子，现将太阳多通道望远镜的有关数据代入：

$\phi=40°$（北京）

$G=3500kgf$

$\overline{X}=1600mm$

$$\begin{cases} -0.621x_o-2.907y_o=P_1; \\ 1.957x_o-0.976y_o=P_2; \end{cases}$$

从而解得

$$\begin{cases} x_o=0.279P_1-0.600P_2; \\ y_o=-0.56P_1+0.178P_2; \end{cases}$$

我们只须在镜筒两个极限位置上（ϕ-23.5°和ϕ+23.5°）分别测出所需之平衡力P_1、P_2，就可用上式求出镜筒重心位置X、Yo。

两点注意：

1. 上述测试时镜筒轴线应处于子午面内（即赤经度盘应处于正午位置）
2. P_1、P_2必须为纯平衡力。弹簧测力器的读数为平衡力和摩擦力的找数和，为了剔除摩擦力，须同时测出正反两个方向刚好能使镜转筒转动的力P_1'、P_1''以及P_2'、P_2''

因为

$P_1'=f_1+P_1$　　（逆着不平衡力矩方向拉）

$P_1''=f_1-P_1$　　（顺着不平衡力矩方向拉）

故而

$P_1=1/2(P_1'-P_1'')$

同样

$P_2=1/2(P_2'-P_2'')$

测出镜筒重心位置（x_o、y_o）后就可以按其自然座标系进行静力平衡。当然由于结构上的限制仍须仔细推敲在何处加多大的平衡重，但毕竟不再处于盲目尝试状态了。一般而言这时要确定的量有硅个：平衡重量g以及它的座标值x_o、y_o，这时可以根据实际清闲先确定其中之一，例如X，然后再算出g和y_o。平衡方程式为

$g \cdot x=G \cdot x_o$

$g \cdot y=G \cdot y_o$

由此得

$$g=\frac{Gx_o}{x};$$

$$y=\frac{Gy_o}{g};$$

至于太阳望远镜的赤经平衡调整，由于没有那样的限制，故而不存在上述问题。

最后将太阳多通道望远镜实际调整时的测试数据列出如下。由以下结果可见，仅经五次平衡整，镜筒重心对纬轴在x、y方向上的偏离已分别小于0.15mm和0.28mm，相应的残余不平调力矩分别小于0.5kgm和0.98kgm

P_1 (kgf)	P_2 (kgf)	$x0=-0.6p_1+0.279p_2$ (mmm)	$y0=0.178p_1-0.560p_2$ (mmm)
-13.5	5.5	-7.1	8.5
-3.5	2.5	-2.5	2.4
0	4.5	-2.7	0.80
-0.3	1.5	-1.0	0.44
-0.5	-2.5	1.4	-0.17
-0.5	0	-0.14	0.28

多通道太阳望远镜60公分真空主镜筒的设计

杨还

南京天文仪器研制中心，210014

一、太阳多通道望远镜主镜筒概述

主镜筒光路采用葛利高里反射式望远镜系统，主镜为抛物面反射镜，有效口径Φ600，主焦距F＝1500，材料：零膨胀玻璃。付镜为椭球面反射镜，口径Φ154，主付镜间距为1861.7，组合焦距F＝10000，主光路的垂轴放大率β_1=10000／1500=6.66，轴向放大率$\alpha_1=\beta_1^2$=4.44，准直成象系统的垂轴放大率β_2=1.2，故整个光路系统的轴向放大率为$\alpha=(\beta_1\cdot\beta_2)^2$=64。即当付镜轴向上移0.1时，第二焦面象前移4.4mm，第三焦面象前移6.4mm。整个光路共有三个焦点，F_1为主焦点，在F_1处设置4′ ×5′小方孔光阑，用以限制视场。F_2为葛利高里焦点，在主镜面之后550mm处。F_2焦点落在滤光器头内部，其后为准直镜组，九通道滤光器体，干涉滤光器片组，成象镜组以及可移进或移出光路的缩焦镜组。F_3为工作焦面，放置CCD接收器。当太阳象通过波片——KD*P调制——滤光器头——准直镜组——九通道滤光器体——成象镜组——焦面时，变为九种太阳磁场图（纵场、横场、速度场）。F_3处装有九组接收器的调节装置，每组均可作X，Y，Z三维调节，九组固定在一个园盘上，整体作ψ微量转动，以调节CCD接收器方阵边沿与小方孔光阑的直角边相对应。九个CCD可接收到太阳同一区域，不同透过波长的太阳磁图，并同时在九个视屏上显象。

由于滤光器透过率很低（≈3%），透过带很窄（0.05Å～0.5Å）故对整个光路系统，应采取有效措施减少杂散光，接收器CCD灵敏度很高，前方应加密闭的遮光罩，这一点十分重要，否则磁图将被淹没在杂散光之中，一无所获。

主镜筒由真空镜筒与长方箱组成，真空镜筒又由主镜室，付镜调节装置，光阑及焦面散热器，真空入射窗，筒体等五部分组成。见图1，2准直成象光路及多通道滤光器部分置于长方箱之中。真空镜筒的光轴位于长方箱中心面偏左30mm，九通道滤光器的4686A的光轴与主光轴重合。九通道滤光器各通道排列成方阵，间距为60mm，各路光分解由图2箭头所示。滤光器的中心位于方箱偏右30mm，接收器装置中心与滤光器同轴。对镜筒筒体的要求其一要满足必要的刚度条件下，尽量减轻重量，其二尽力减小内部的杂散光。为了提高望远镜的分辨力，除了精心选台址外，还要对园顶，平台作慎重考虑，作为望远镜本身，为了消除热湍流的影响，应将主光路置于真空镜筒之中，即在主光路的前方放置Φ640入射密封窗，主镜后放置Φ200的出射密封窗，抽真空度要求高于－0.096Mpa，真空度至少保持1～2天。望远镜的主焦点处有小孔光阑，由于太阳聚焦在光阑上，温度相当高，必须设法降温。根据太阳观测者的使用经验发现上午9－10点钟太阳成象质量好，下午象质变差，分析认为与望远镜长时间观测，镜筒壳体受热有关，故在镜筒前方，镜罩之外又增加环形水冷管，中间挡光部分，也增加平面反射镜，实际使用收到较好效果。镜罩由4块直角形扇形板组成，分别由4组

电机，蜗轮付带动，由8个限位开关来控制罩板的启闭。

真空镜筒重600kg，方箱重1000kg，内部物重400kg。

由于采用反射系统，故要求镜筒轴线高于地平3°－5°。因此设置了地平高度保护。

二、主镜室

2.1、主镜：　图3

主镜坯 Φ620×80，中心孔 Φ100，有效口径 Φ600，焦距F＝1500，抛物面，微晶玻璃。主镜重量：

$$G=V\cdot\rho=[R^2H-r_o^2(H-h_o)-r^2\cdot h_o/2]\cdot\pi\cdot\rho \qquad (1)$$

式中：V——体积(cm^3)，ρ——比重=0.00258Kg/cm^3

R＝31cm，H=3cm，r_o=5cm，r=30cm，$h_o=r^2/4F$=1.5cm

G＝55.5Kg，$G_{计}$＝60Kg

2.2、主镜的温度变形计算：

2.2.1、$dR=R\cdot k\triangle T$，$dF=dR/2=R\cdot K\cdot\triangle T/2$ (2)

2.2.2、镜面温度变形引入的光程差 δ：

$$\delta=2df=\frac{r^2}{R^2}dR=\frac{r^2}{R^2}RK\Delta T=\frac{r^2}{R}K\Delta T \qquad (3)$$

式中r—镜面的半径，R—曲率半径，f —镜面矢高 $=r^2/2R$，k—热胀系数，k9玻璃的 $k=7.2\times10^{-6}$，微晶玻璃 $K<1.5\times10^{-7}$，两者相差48倍，故太阳仪器主镜应选微晶玻璃材料。设主镜前后面温差为10℃，则r=300，R=3000，$K=1.5\times10^{-7}$，△T=10，

$\delta=0.45\times10^{-4}mm=0.045\mu\approx\lambda/12$

与镜面加工误差基本一致。若用普通玻璃则要求温差＜1／5℃。

2.2.3、根据文献资料介绍（法国90厘米太阳塔），由于镜面材料不均匀性也会产生光程差，不均匀性为1%时，则产生 $\lambda/20$ 的光程差，故我们对主镜材料的均匀性要求在1%左右为宜。

2.3、底支承：

图4，主镜底支承为9点自位球垫支承。每三点为一组，分别搁在三角形摇板的三个顶点位置，在其三点合力处用球头螺杆支顶在摇板球穴内，主镜放在九个球面垫上，主镜与垫全部接触。调节三螺杆即可改变主光轴的方向，调毕应锁紧，并旋紧密封罩，以防真空泄漏。由图可见：$P_{内}\times60=2P_{外}\times15$，$P_{内}+2P_{外}=1/30G=20kg$

∴ $P_{内}=4kg$，$P_{外}=8kg$

2.4、主镜侧支承

在主镜与镜室之间插入环形水银胶带，再灌入水银，主镜即完全浮起。优点：结构紧凑，主镜受力均匀，变形小。浮力计算；图 5

设将园柱体放入静止的液体中，在曲壁AB上单位宽度受到上压力，AC上受到下压力，其值分别为

$$P_{z1}=-rR\ [H(1-\cos\beta)+R(2\beta-\sin2\beta)/4] \quad (4)$$

$$P_{z2}=rR\ [H(1-\cos\alpha)+R(2\alpha-\sin2\alpha)/4] \quad (5)$$

式中r—液体比重，R—园柱体半径。将(4)式展开

$$P_{z1}=-r[R\cdot H-R\cdot H\cos\beta+R^2\cdot\beta/2-R^2\sin\beta\cos\beta/2] \quad (6)$$

即在AB上单位宽度上的上压力$P=-r\cdot$ABDEA所包围的面积。同样将(5)式展开

$$P_{z2}=r[R\cdot H-R\cdot H\cos\alpha-R^2\cdot\alpha/2+R^2\sin\alpha\cos\alpha/2] \quad (7)$$

即在AC上单位宽度上的下压力$=r\cdot$ACEA所包围面积

故浮力$\Delta P_{浮力}=P_{z1}-P_{z2}=$ABDCA面积$\times$比重

对环形水银带而言，浮力$\Delta P=r\cdot S\cdot$ABC面积

$r=13.55g/cm3$，S－水银带的接触宽度$S=1.6cm$

由图可见ABC面积大小，取决于主镜的尺寸R，及水银面和高度H，或者说取决于水银带的出口位置α角的大小。

α	40°	50°	60°	70°
ABC面积	2654cm²	2821.4cm²	2932cm²	2992cm²
ΔP浮力	57.5kg	61.17kg	63.56kg	64.88kg

主镜估计重60kg，故将水银带出口管置放在$\alpha=60°$的位置。当灌满水银时，液面高度正好达到设计要求，即上浮力等于主镜重。主镜完全浮起。

2.5、水银带支承的测试

将主镜室用耳轴支撑在两个平台的V形铁块上，将代主镜放在底支承上，周围放入水银胶带，灌满水银。在镜室上固定两个磁形表座，使两个千分表头分别指在代主镜的外园上，当两表头均受压时，将表针指示校正的零位。然后转动镜室至垂直位置。千分表1指示25μ，千分表2指示为31μ，即发现两表头指针均向同一方向转动。经分析认为这是镜室自重变形而引起的。镜室在水平位置时重力变形成椭圆形(图6虚线所示)，当镜室转至垂直位置时，由于刚度加大，镜框恢复成圆形(实线)。设镜室变形为δ，代主镜的位置变动为e，则$\delta-e=25\mu$，$\delta+e=31\mu$

$\therefore\delta=28\mu$　　$e=3\mu$

$e=+3\mu$代表主镜中心上移3μ。反复测试，重复性很好。第二次，将水银倒出0.2kg，即降低了水银面高度，重复上述过程，测得表1为40μ，表2为31μ。

$\delta=35.5\mu$，$e=-4.5\mu$，表示主镜中心下沉4.5μ，结论：水银灌满时，浮力略大于主镜重量。主镜中心上移一点，水银面高度H会下降一点，浮力下降，当浮力大小与主镜重量相等时，主镜位于新的平衡位置。反之若浮力小于主镜重量，主镜即会下沉一点，水银面高度H增大，浮力上身，当浮力重新等于主镜重量时，即达到新的平衡。实测结果表明，水银量多少对主镜中心位置有一定的影响，在设计理论位置上下变动量很小。实测情况与设计计算完全一致。为保证主镜位置不受水银多少的影

响，我们主镜中心定位，实际上是由球面定心轴与主镜中孔的轴套，采用D/d1研配，变化＜3μ－5μ，球心尽可能接近抛物面面心。如此，调整主镜光轴时，抛物面中心位置不变。球面中心孔内置放一个十字丝，它即代表主镜面的中心。

2.6、出射窗

出射窗置于主镜中孔之后，Φ160×20，材料K9与入射窗一样，要考虑抽真空时的应力和变形及温度效应对成像质量的影响。加工要求：平面平行度＜1″，平面误差＜λ/8。

2.7、主镜前方边缘，均匀放置6点弹性压点，目的是起保护主镜的作用。弹簧力量应当适量，以保证正常位置时不引起主镜变形。

2.8、主镜中孔内，插入Φ80×480的黑色薄壁园筒，其目的为挡去杂散光。

2.9、主镜内孔装轴套，其目的：(1) 定心作用；(2) 主镜的起吊

2.10、主镜室四周有许多小窗孔，都具有多种用途。如耳轴孔即作测试用，也作起吊用最后还作抽真空接口。其他侧孔，作照明观察小孔，最后作充气孔，或装真空表。主镜室前端有密封槽环，深度要严格控制，以确保真空密封性。后面留有支口环，给吊装带来极大方便。

主镜室总重210kg。

三、副镜机构

副镜为椭球面反射镜，尺寸Φ154×20，内孔Φ40，材料：微晶玻璃，组合焦距F＝10000，与主镜间距1861.7。副镜相对主镜要求做多维调节，整个副镜机构支承在十字形支承环上，注意机构的对称性，挡光量＜10%。

3.1、X、Y向位移调节并锁紧。——实现副镜的中心落在主镜光轴上。

3.2、ψ_X，ψ_Y倾斜调节并锁紧。——实现副镜光轴与主镜光轴的同轴性。

3.3、副镜的Z向运动，即沿光轴方向运动，是通过步进电机，减速蜗轮付，滚珠丝杆螺母来实现。要求摩擦力小，精度高，运动平稳，无隙。以保证副镜在不同位置，望远镜在不同方位时，副镜光轴的不变。副镜轴向运动范围为20mm，两头均有限位。副镜调至设计位置时，装上位移传感器，使输出为零。以后调焦即由四位半数字电压表来读数显示。当接收器的屏幕上出现清晰太阳像时，调焦结束，并记下数字表上的读数。

3.4、采用差动变压器式位移传感器，型号100DC－D。并用四位半数字电压表表示位置。线性范围 ±2.5mm，灵敏度0.11V/mm，最小显示值为1μ（小数点第四位有效），步进电机步距角1.5°；传动比1:50；丝杆螺距S＝6mm，最小调焦量为1.5/360×1/50×6＝0.5μ/步。

3.5、调焦量与温度的关系

设一年的温度变化为 －30～50℃，则由于温度变化，镜筒体的热胀冷缩，主副镜间距变化量为 ΔL

$$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta T$$
$$= 1861 \times 0.113 \times 10^{-4} \times 80$$
$$= 1.68\text{mm}$$

式中L＝主副镜间距 ＝1861

$\alpha_{\text{热胀系数}} = 0.113 \times 10^{-4}$

$dL/dt = L \cdot \alpha = 0.021 = 21\mu$/度

温度升高，副镜应下行0.021·ΔT

温度下降，副镜应上行0.021·ΔT

多通道望远镜主镜筒现在调焦值为 ＋0.085V（92年6月由李德培、杨还、艾国祥调焦值），调焦范围 ±3mm。

上行极限读数为 －0.02V，下行极限读数为 ＋0.60V。

3.6、调焦机构的关键件

1）滚珠丝杆螺母：丝杆轴长235mm，其中丝杆为Φ39×147，螺距S＝6；滚珠Φ3.969，分布园Φ40。

内通孔Φ18－作光学系统检测之用。丝杆精度为C级（高精度），材料40Cr，中频淬火HR58－62。配套螺母Φ60×Φ92×40，材料：黄铜，中间有隔套筒，Φ60×Φ92×70，磨套筒端面，使双螺母夹紧以达消除轴向间隙之目的。套筒兼作滚珠直线导轨的内环，所以取材40Cr，淬硬HR58－62，外表面0.4，其表面有导向槽，要求与轴线方向平行。不平行度＜0.005。

2）园柱形直线滚珠导轨

导轨的内环——即滚珠螺母，其外环用十字固定在支撑环的中央，要求滚珠导轨外环轴线与支撑环同心，轴线垂直支撑环平面，孔径$D_2 = D_1 + 2d$—过盈量。

大中D_2－外环内径，D_1－内环外径，d－钢珠直径，径向过盈量2μ，即每粒钢珠单边压缩量0.5μ。

外环内孔必须用正确的研磨方法才能保证其尺寸精度和形位精度。这里还要特别强调，十字支撑板应加预紧力，预紧力的大小取决于副镜机构的重量，以保证望远镜

在不同位置时，各支撑板均处于拉紧状态。实践已证明副镜机构稳定性、重复性极好。即不论望远镜处在何种位置，副镜在光轴方向如何运行，副镜的光轴都保持不变。

四、光阑部套及焦面散热器

4.1、在60公分真空镜筒的第一焦点上，放置视场光阑小方孔4′ ×5′；线尺寸1.75×2.18mm，小方孔光阑与副镜距离不变，当副镜作温度调焦运动时，光阑随之一起运动。用薄壁光阑筒与副镜室相连，此筒也起挡杂散光的作用。光阑孔座在光阑筒内的十字支撑环中用弹性锥套夹紧，松开螺母，可以转动光阑孔座，以调节光阑直角边与赤径，赤径方向一致。由于弹性锥套有止转键，故拼紧螺母时不会导致已调好的光阑转动。

光阑孔中心位置的调节是采用光阑筒底部4个球头螺丝来调节光阑筒的倾斜而实现的，调整完毕，光阑筒与副镜室夹紧为一体。

小孔光阑置于主镜焦点，当望远镜对准太阳，只需几分钟，光阑温升数百度，焦面的散热是十分必要的。措施之一，在光阑前加一个中央有孔的45° 平面反射镜，以期将大部分视场外的太阳光反射出镜筒的侧窗孔。措施之二，在光阑座外围加水；冷装置，将余热带走。

4.2、焦面散热器

夏日太阳辐射热　2卡/平方厘米·分钟

主镜面积　$A=\pi R^2=3.14\times30^2=2840cm^2$

太阳能　$W=2\times2840/(60\times1000)=0.1$千卡/秒$=0.4$千瓦

设45° 反射镜中央孔径为7′，太阳视经32′，设反射率为0.7，则反射出镜筒的能量为

$$[1-(7'/32')^2]\times0.7\times0.4=0.266\text{千瓦}$$

有效透过光能为

$$[4'\times5'/3.14\times16^2]\times0.4=0.01\text{千瓦}$$

剩余的光能为$0.4-0.266-0.01=0.124$千瓦，这部分热能通过焦面散热器带走。

焦面散热器头部是将$\Phi20\times\Phi34\times47$的厚壁园筒，斜切45°，然后设法中心挖空，再用园盖封口，焊接成一空心体，其侧面钻两孔与进出软管焊接，另一端与园盖板上两根铜管焊接而成。其盖板即为焦面散热器与真空镜筒接口板。要求很好的密封性。将焦面散热器与45° 反射镜一起装入散热器套内，体套在光阑座上。稍稍转动焦面散热器，使反射光对准镜筒的侧窗。螺钉锁紧。热管式焦面散热器，焊好后经压力试验后，酸洗，抽真空，灌入工质（丙酮）封口。铜管的外面有许多散热片。水冷式散热器将未封口两铜管与水管连接即可，两个方案分别在望远镜上试验，均达到良好效果。用镍铬－考铜EA－Z热电耦在焦面上测得结果如下：无水冷时，数字电压表26.5mV查表温差$\Delta t=380$℃，焦面$t=420$℃

热管式焦面散热器　3.3mV　$\Delta t=47.5$℃　$t=90$℃

水冷式散热器　　3.1mV　　$\Delta t=45℃$　　$t=87℃$

(室温35℃，镜筒表面温度42℃)

五、入射真空密封窗，镜罩，镜前冷却

5.1、入射窗玻璃尺寸 Φ640×40，材料K9，平行度＜1″，平面度＜$\lambda/8$，重40kg，$E=7\times10^5 kg/cm^2$，$R=32$，$h=4$

抽真空时的最大应力

$$S_{max}=\frac{1.2R^2}{h^2}P=76.8Kg/cm^2 \qquad (8)$$

中心变形量

$$\Delta=\frac{0.6R^4}{Eh^3}P=0.014cm=0.014mm \qquad (9)$$

5.2、与世界各太阳望远镜真空密封窗比较列表如下：

	D cm	H cm	Δcm	应力巴
SPO 美	81	10	0.002	20
SPO THIN	81	5	0.015	80
HIDA 日本	60	4	0.011	73
VTT	70	7	0.005	31
THEMIS 法	110	6.5	0.025	88
LEST 欧洲	250	15.4	0.083	80
多通道　中	64	4	0.014	76

由表可见，我们的取值与世界上先进仪器相一致的。

(1) 由LEST报告中可见，密封窗的厚度不同，温度梯度曲线不同，厚度大有明显的温度效应。由于温度效应将引入光程差

$$\Delta\lambda=\Delta Tt[(n-1)\alpha+dn/dt]/\lambda=\Delta TtG \qquad (10)$$

式中G——温度效应系数(与材料有关)

ΔT—温差(C)

t——厚度(cm)

K9与K7相类似，$G=0.107272(\mu/度\cdot cm)$

若要求光程差 $\Delta\lambda<\lambda/10$ 时，LEST：要求 $\Delta T=1/30℃$

多通道：　$\Delta T=1/8℃$

可见，多通道望远镜中，温度效应引入象差较小

(2) 应力引入的光程差

$\Delta\lambda$ = 应力系数 · 应力 · 厚度

应力系数 $2.74\times10^{-6}mm^2/N$，应力 $=76.8kg/cm^2=7.5N/mm^2$

$\Delta\lambda_p=2.74\times10^{-6}\times7.5=0.2\mu=0.4\lambda$

LEST: $\Delta\lambda_p=0.46\lambda$

(3) 由于温度效应引入的偏振量

$$\rho=\frac{720E\cdot\alpha\cdot\beta\cdot t\cdot\Delta T}{\lambda}\cdot\frac{\sum_{n=1}^{\alpha}\frac{n}{(2n-1)(n!)^2}\cdot\left(\frac{R^2\cdot K}{4\cdot t\cdot\Lambda}\right)^n\cdot\rho^{2n}}{\sum_{n=1}^{\alpha}\frac{1}{(n!)^2}\cdot\left(\frac{R^2\cdot K}{4\cdot t\cdot\Lambda}\right)\cdot\rho^{2n}}$$

式中，E－弹性模量，Λ－热导系数，α－膨胀系数。β－应力光学系数，t－厚度，ΔT－中心与边沿温度差。

因子 $K=\frac{720E\cdot\alpha\cdot\beta}{\lambda}$

对于K9玻璃: $E=8.277\times10^5$, $\alpha=7.1\times10^{-6}$, $\beta=2.74\times10^{-7}$, $K=19.32$

熔石英: $E=7.45\times10^5$, $\alpha=0.52\times10^{-6}$, $\beta=3.45\times10^{-7}$, $K=1.604$

由此可见，熔石英材料比BK7引入的偏振量要小12倍(19.32／1.604＝12)，如果仪器作偏振测量，应优选熔石英材料，但世界上极大多数太阳望远镜真空封窗仍选用普通的冕玻璃，如BK7(我国K9)，这是因为熔石英材料太昂贵。

(4) 由于真空负荷引入的仪器径向偏振

$$\Phi=\frac{360}{2\pi}\cdot\frac{B}{\lambda}\cdot d\cdot\frac{R}{1+[(R-r)/t]^2}$$

式中: B－应力系数　　BK7: $B=2.74\times10^{-7}cm^2/kg$

d－密度　　$d=0.000251kg/cm^3$

t－厚度

多通道望远镜与LEST比较$\frac{1}{1+[(R-r)/t]^2}$，两者几乎相同。

但由于密封窗直径小，(多通道，R＝32，LEST：R＝125)，故总的径向偏振量仅为LEST的四分之一。

5.3、密封窗采用双重端面O型密封圈，真空密封效果很好。

5.4、镜罩分为4块扇形板，分别用4组电机和蜗轮付驱动，用8个限位开关定位，开闭时间约为2分钟。工作可靠。

5.5、在镜罩前方，密封窗的外围装有附设螺选式环形水冷管的挡光环形板，中央挡

光板也装有平面反射镜。预计对望远镜长时间观测，减少镜前热气流影响有良好效果。

六、镜筒体

真空主镜筒是用4mm钢板卷焊而成，两端有接口法兰盘，端面有环形密封槽。焊缝要求平整，无虚焊。两端面要求平行，不得有伤痕。筒体直径Φ690，筒长1800，属薄壁筒。筒体内装栅格状筒，内壁为黑色，以减少筒内的杂散光。镜筒侧面有两个小窗孔，一个为出射密封窗，另一个为焦面散热器的进出口密封窗。为放置真空泄漏，对窗孔的密封结构应仔细考虑。镜内电机及信号输出线均应采用真空插座。下面就镜筒体的刚度与抽真空时薄壁镜筒的稳定性进行计算。

6.1、镜筒自身重引入的变形

按悬臂梁计算(一端固定)，顶端的位移f，及转角 ψ 为：

$$f_1=\frac{(P_1+P_2)L^3}{3EJ}=0.0011\text{cm}=11\mu \tag{13}$$

$$\psi_1=\frac{(P_1+P_2)L^3}{6EJ}=1.7'' \tag{14}$$

式中 P_1 = 筒体重120kg

P_2 = 消光筒重50kg

$E=2.1\times10^6\text{kg/cm}^2$ （钢的弹性模量）

J－截面惯性矩 =51400cm⁴

L－计算长度 =180cm

6.2、由于密封窗及副镜机构等集中载荷引入的变形 f_2，ψ_2

$$f_2=\frac{QL^3}{3EJ}=27\mu \tag{15}$$

$$\psi_2=\frac{QL^2}{2EJ}=4.5'' \tag{16}$$

式中Q=150kg，它在副镜相对主镜位置变化的允许范围之内。

6.3、圆柱薄壳在受均匀径向力的轴向力作用下稳定计算

按公式临界力 $P_k(\text{kg/cm}^2)$ 的理论值为

$$P_k=\frac{Eh}{R}\cdot\frac{\lambda}{(Z-\lambda/2)}\cdot\left(\frac{1}{Z^2}+\varepsilon Z^2\right) \tag{17}$$

式中，h=厚度=4，R=半径=345，L=长度=1800，n=丧失稳定时半波数，查表n=3－4，$\lambda=\pi R/1=0.6$

$$Z=\frac{\lambda^2+n^2}{\lambda}=21 \tag{18}$$

$$\varepsilon = \frac{h^2}{12R^2 \cdot (1-\mu^2)} = 1.2 \times 10^{-5} \qquad (19)$$

求得临界力：P_k计 $=5.334 kg/cm^2$

根据工程力学书上介绍，实验值只为理论计算值的一半。即产生不稳定的临界力，为$P_k=2.6 kg/cm^2$真空气压，故镜筒在抽真空时是稳定的。

七、方箱

外形尺寸为700×700×2250，由10mm钢板焊接而成。

前端与真空镜筒相接，其定位孔位于方箱中心偏左30mm，尾端园盖板上固定接收器调节装置。中心孔位于方箱中心偏右30mm，赤纬轴孔距前端面645mm，中心面上方100mm。顶面有两个窗孔，几乎占顶面积的2/3。为加强方箱的钢度，在纬轴孔前后增加两块隔板。

选择方箱底平面为基准面，前后端平面及侧平面均应与底平面垂直，顶面要作为小镜筒的移动导轨面，故要求与基面平行，及内部支承平面应平行于基准面。为保证箱体各项精度要求，其工艺加工过程分别为板件加工－焊接整体－消应力处理－划线－粗刨－清砂－防锈漆－粗镗－消应力热处理－划线－精刨－精镗－铣支口面－钳工打孔攻丝－酸洗－油漆等约近二十道工序。方箱重1000kg。

八、真空镜筒的泄漏及改进措施

序号	测试时间	真空表初值P1	时间间隔Δt	真空表终值P2	真空压力变化ΔP	泄漏率ΔP/ΔT	泄漏原因	改进措施
1	厂内初装	700mm Hg	14小时	560mm Hg	140	100mmHg 小时	出射窗漏气	改进侧窗密封结构
1	出厂时	700	18小时	560	140	8mmHg 小时	水银带出及镜室焊焊缝	补焊，改进水银带接口密封结构
2	总装时	720	12小时	710	10	1mmHg 小时	密封圈厚度不均匀	更换大密封圈
3	第一次光路调整	720	12小时	680	40	3.5mmHg 小时	焦面散热器的出口窗孔螺孔拧通	用密封胶堵漏解决
4		720	3天	708	12	4mmHg 天		
5	第二次光路调整时	720	1天	695	25	10mmHg 天	大密封圈材料老化	改用硅胶材料的自制密封圈
	增加抽真空系统	0.095 MPa	30天	0.080 MPa	0.015MPa =114mmHg	3.8mmHg 天		
6	增设镜前冷却系统重装密封圈	0.090 MPa	10天	0.085 MPa	0.005MPa =38mmHg	3.8mmHg 天		

有关检漏的测试手段、仪器、灵敏度、采用内探头还是外探头、充何种气体、浓度等，由于内容较多，将在其他文章中探讨，这里不再叙述了。本节仅用表格列出检测结果和改进措施。

九、主镜筒光路调节过程

1、建立基线AB

2、调主镜光轴并锁紧

3、调副镜中心并锁紧

4、调副镜光轴并锁紧

5、调光阑中心及方位并锁紧

6、副镜电动调焦（即主、副镜间距）

7、装焦面散热器，固紧

8、装密封窗

9、装CCD调节装置，并仔细调节各CCD的中心、方位及焦面并锁紧

10、抽真空，观察镜筒的真空泄漏情况是否正常

11、试观察前转动望远镜对准太阳，启动冷却水泵，观察水路系统是否正常；再打开镜罩

12、通过接收屏微调望远镜，将观测目标调在视场中心

十、九通道CCD接收器的调整装置

九通道的间距为60mm，排列成方阵。接收器尺寸为32×46×200

要求：1）X方向位移量 ±2mm

2）Y方向位移量 ±2mm

3）Z方向位移量47 ±5mm

4）CCD方阵与小方孔边沿一致。要求整体方位调节 $\psi = \pm 1^{\circ} - 2^{\circ}$

5）由于CCD灵敏度极高，在每个CCD前都必须有遮光罩，它必须具备伸缩性及两端头的平移性，以适应CCD在X、Y、Z三方向的调节。

结构：1）X位移，Y位移，采用十字形园柱导轨。

框式结构：内框固定，中框作一个方向位移，外框作X－Y两方向位移。

2）X－X轴孔同心；Y－Y轴孔同心

3）X－Y轴孔相互垂直

4）X－Y轴孔与滑移平面必须平行

5）导轴与孔的配合为D1/d1

6）Z向导轨，要求与X－Y平面垂直。燕尾导轨研配

7）要求CCD方阵中心与内框孔中心对中性，以保证调整量在正负方向的对称性

8) 九个三维调节装置的相对位置的准确性，即底板9个孔位置应准确分布，然后各调节装置内框孔应与其对中

9) 各调节装置的X方向（或Y方向）应一致

10) 方位调节好以后，方可固定各调节装置内框，并要求X、Y、Z三维调节自如，无隙

11) 将整体装至望远镜尾端大板上，用手动旋纽转动偏心小轴，使园盘略有转动，以调节X方向与方箱底面平行。即使CCD方阵与赤经、赤纬方向一致

12) 将CCD插入Z向导轴中，调Z使像清晰，再调X－Y使视场位置在屏幕内，然后固紧之。调整九个通道，应首调中央位置，再调中心十字线上的四个CCD，最后调四个角位置的CCD

十一、抽真空系统及水冷系统

将两根有金属丝网保护的密封性很好的金属波软管（必须经充压试验无泄漏），穿过望远镜的极轴，将其法兰接口与真空镜筒的抽气真空喋阀连接一体，另一端与带有真空表及真空球阀的管路旋紧，注意各接口的密封，最后经过三通接口，真空橡胶管与真空泵相连。抽空时，先打开真空泵再打开球阀、喋阀（当然在给一个镜筒抽空时，要关闭另一个球阀）。当抽至所需的真空度时，例如抽到 $-0.096\sim-0.098$MPa时，先关球阀，再切断真空泵电源，再关闭喋阀。分别用两个真空表观察镜筒本体及管路系统的泄漏情况，并设法堵漏。当管道系统无泄漏时，可以不再关闭喋阀，直接用下面管路的球阀和真空表来控制与观察，如此不再需要登上望远镜去关阀和看真空表，方便多了。如望远镜需要检修时，在卸窗封窗之前，必须解除镜筒的真空状态，这时首先要将真空橡皮管从三通接口拔出，用清洁多层细布封口，再打开球阀，以防外部空气连同灰尘一起吸入镜筒，附在镜面上。

望远镜的焦面散热器及镜前盘形水冷管进水管由微型水泵提供，扬程必须超过6.5米，才能压至望远镜前端。回水管直接通入水箱，水箱放在望远镜基座的北面，以防直接被太阳光照射。微型水泵应安装在水箱的下方，注满水后方能启动。为了水冷管路冬季不结冰，堵塞，冷却液为水与防冻液按1:1混合液。望远镜对准太阳，在打开镜罩前，必须先使微型水泵工作，观察循环水是否流动，水冷系统工作正常后，才能打开镜罩，这一点十分重要，不得马虎，以防光阑烧坏。

十二、结束语

多通道太阳望远镜共有5个镜筒组成，可以同时接收14个通道的信息。60公分主镜筒就占有9个通道。由此可见它在该望远镜的重要地位。

在主镜筒的设计中着重分析考虑了以下诸因素：

1、分析受力状况、温度效应、光学应力效应，正确地选择主镜、大密封窗的材料及厚度。

2、为减小主镜自重变形，对主镜底支承点数和分布经过计算，保证成像质量。

3、分析薄壁筒的受力状况，进行刚度计算和稳定性计算。保证了副镜相对主镜位置的稳定性要求。

4、在设计、加工、装调中，确保了滚珠导轨丝杆机构高精度、无隙及十字支撑环的预紧，保证了副镜在运动过程中的位置稳定性，副镜位置显示的可靠性。

5、在设计中充分注意到各调节件，如主镜、副镜、光阑等装调的方便性、可靠性、稳定性。

6、由于滤光器透过带很窄，透过率很低，而接收器的灵敏度很高，在镜筒设计中，对消除杂散光，挡住杂光给予了充分的注意，所以在调试中很快获得良好的太阳精细结构象。

7、真空对太阳望远镜来说，是获得高分辨率的必要条件。为保证真空度，寻找泄漏原因，采取有效堵漏方法，做了大量工作，最终获得满意结果。

8、采用了焦面散热器，从而保证了主镜筒的正常工作。将热管引用在太阳望远镜上，取得了很好效果，也可说是首创。

9、镜筒前方增设水冷管和中央挡光反射镜，对改善镜前热气流，提高象质将带来好处。

总之，本设计从方案上、结构设计上、工艺保证、装调的方便等方面，以及测试方法等工作，作得较为深入、细致，确保了主镜筒取得完全成功。

参考文献

1. LEST FOUNDATION TECHNICAL REPORT, NO3.84

2. 法国THEMIS 90厘米真空望远镜资料

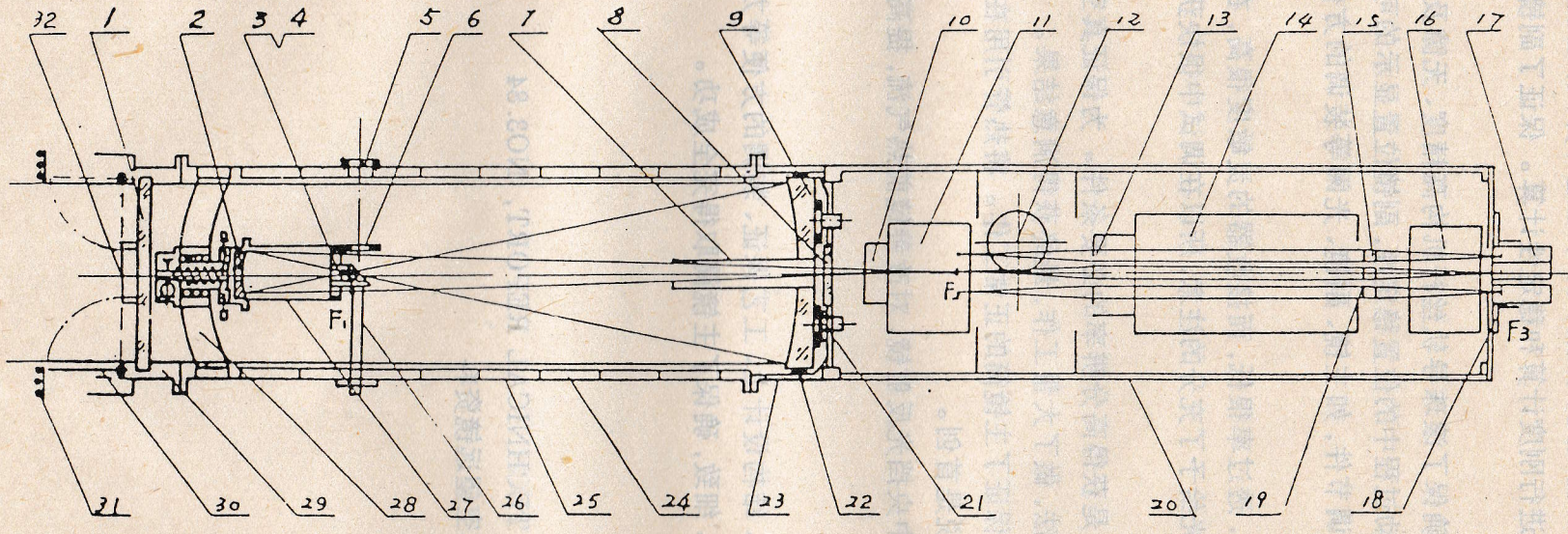


图1 真空主镜筒示意图

1.入射窗 2.付镜 3.光栏 4.45° 反射镜 5.出射窗 6.准直镜 7.遮光筒 8.出射窗 9.主镜
10.KDP及波片转盘 11.滤光器 12.纬轴 13.准直镜组 14.九通道滤光期 15.成象镜组 16.缩焦镜组
17.CCD 18.接收器调装置 19.滤光片 20.方箱 21.底支承 22.侧支承 23.主镜室 24.消光筒
25.镜筒体 26.焦面散热器 27.光栏筒 28.付镜部套 29.密封窗体 30.镜罩板 31.水冷环形管
32.中心挡光镜

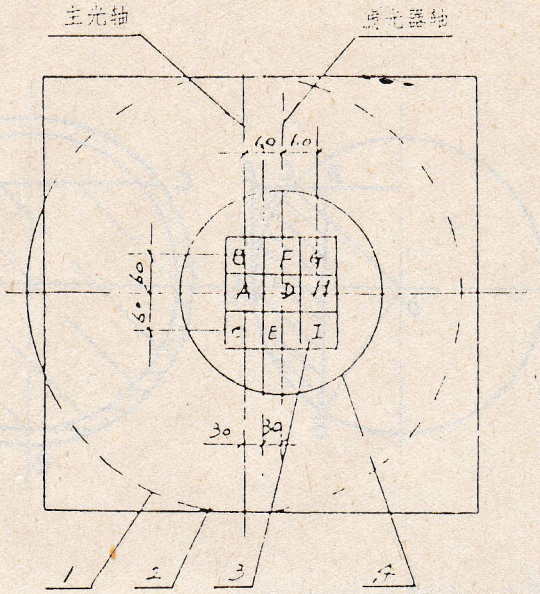


图2. 主光路系统与滤光器接收器的分布

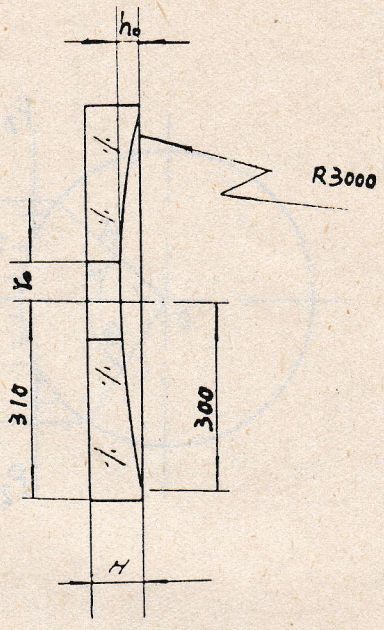


图1. 主镜

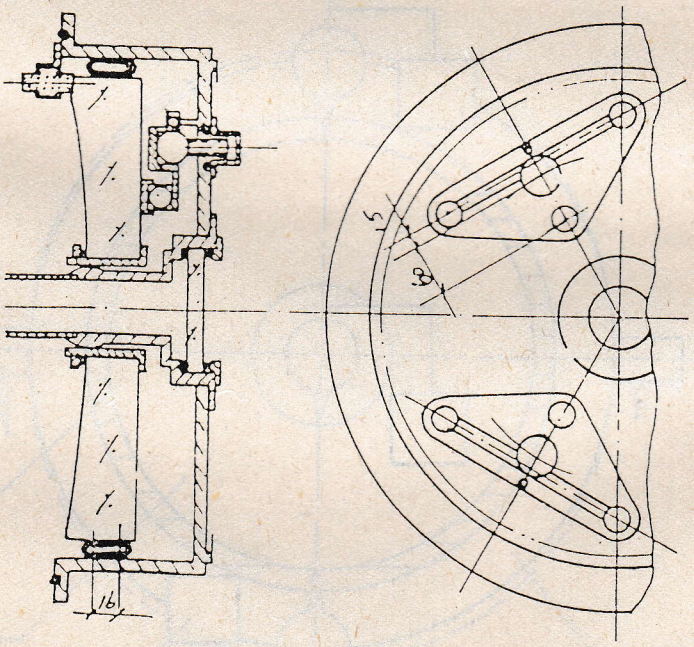


图4. 主镜室示意图

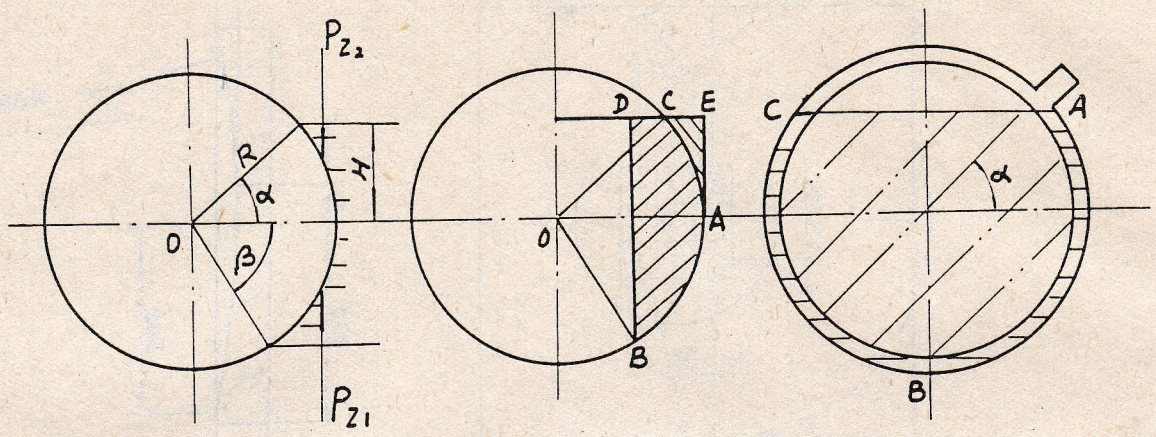


图 5. 水银支承的浮力

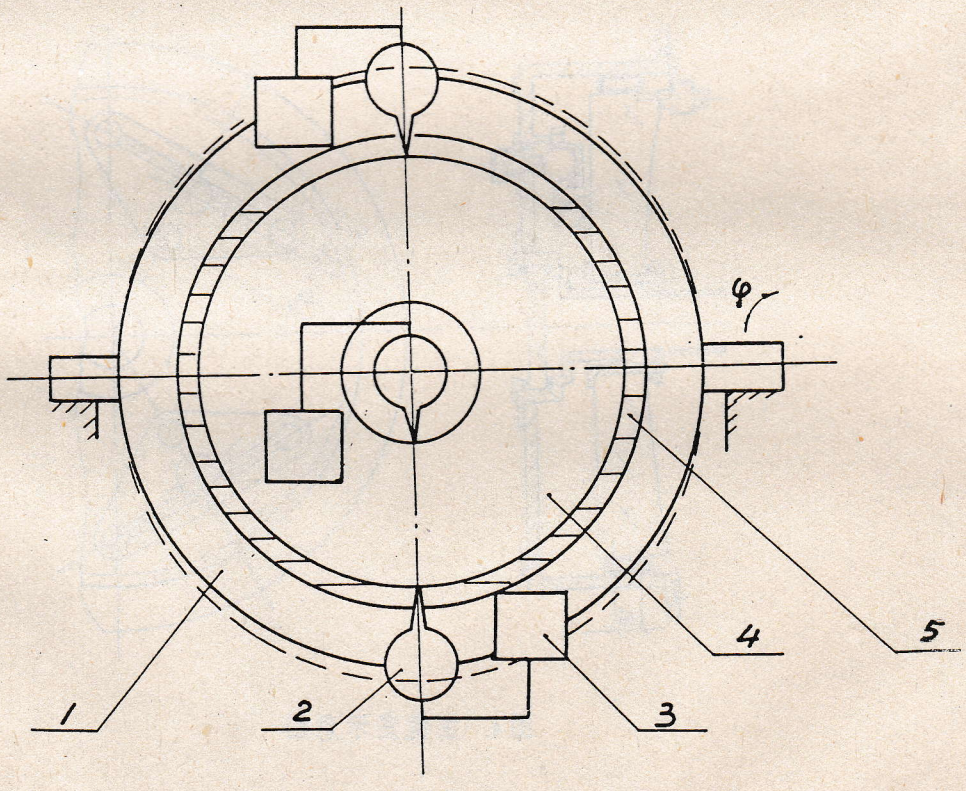


图 6. 水银支承的测试

1. 主镜室 2. 千分表 3. 磁性表架 4. 代主镜 5. 水银带

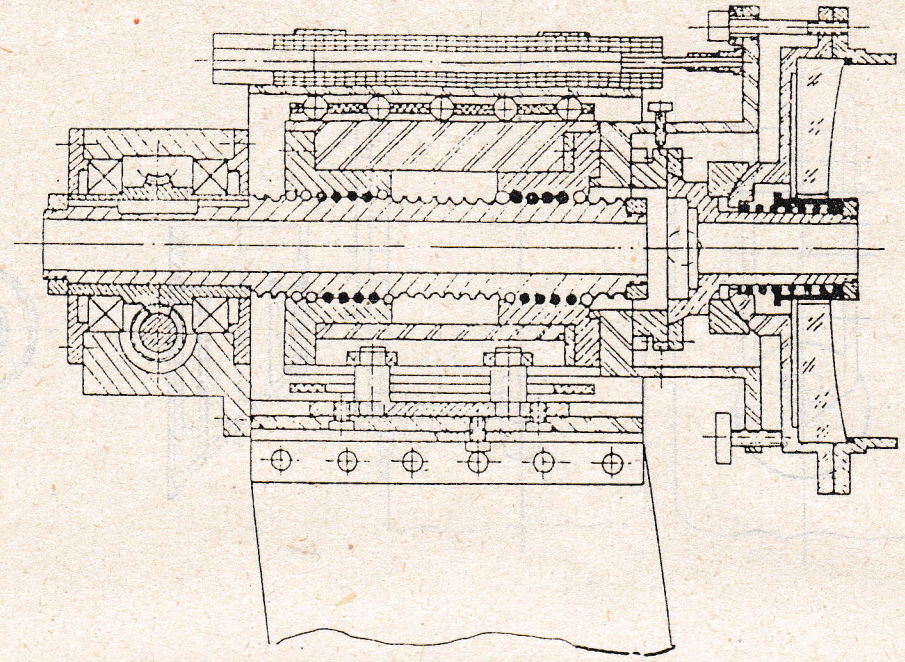


图 7. 付镜机构

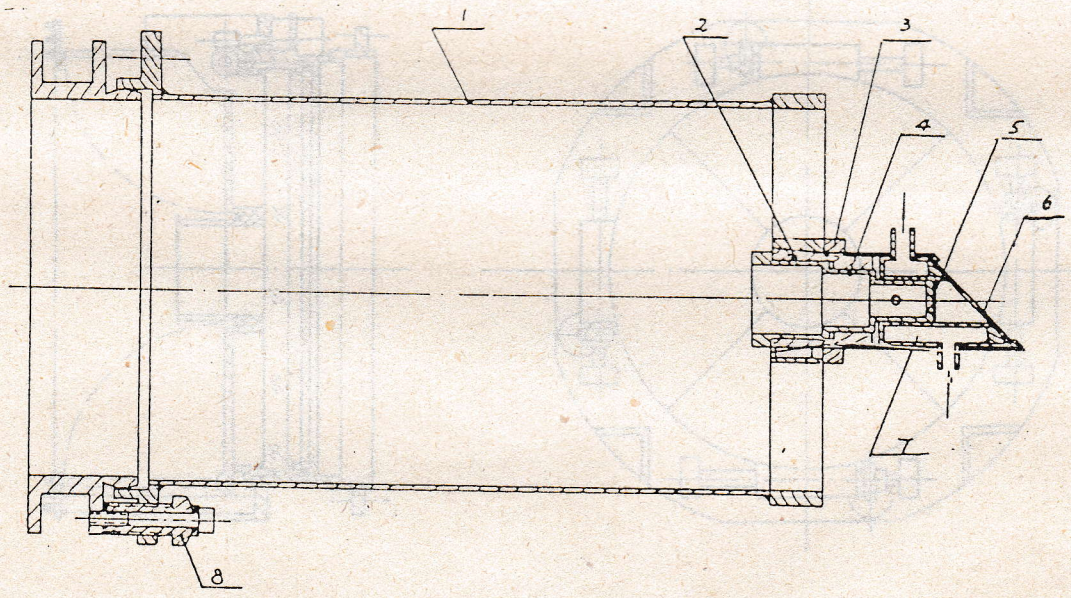


图 8. 光阑部套

1. 光阑筒体 2. 锤形弹性夹头 3. 螺母 4. 光阑座 5. 4′ ×5′ 光阑 6. 反射镜
7. 焦面散热器 8. 光阑孔中心调节螺丝

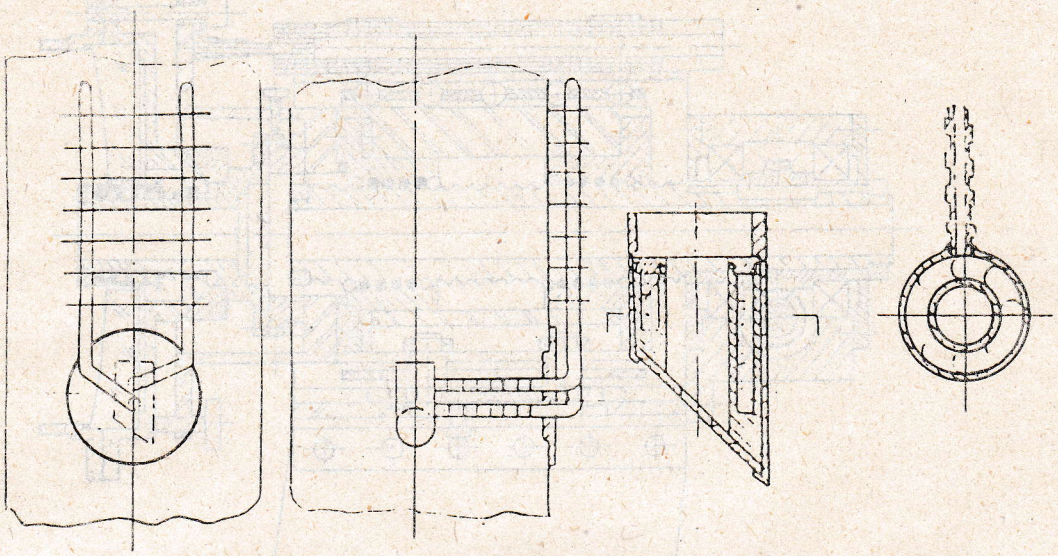


图 9. 焦面散热器

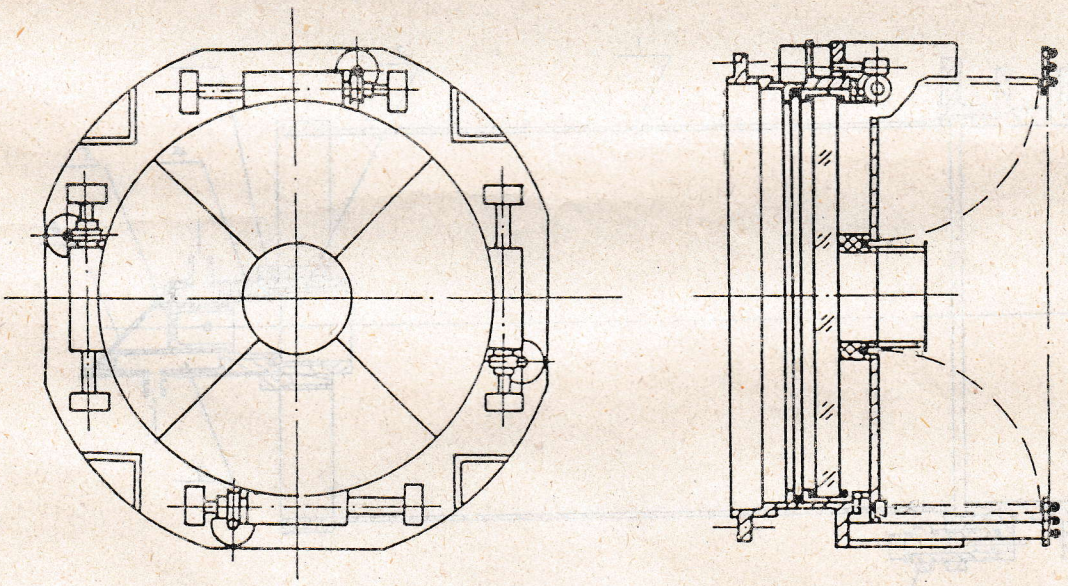


图 10. 密封窗

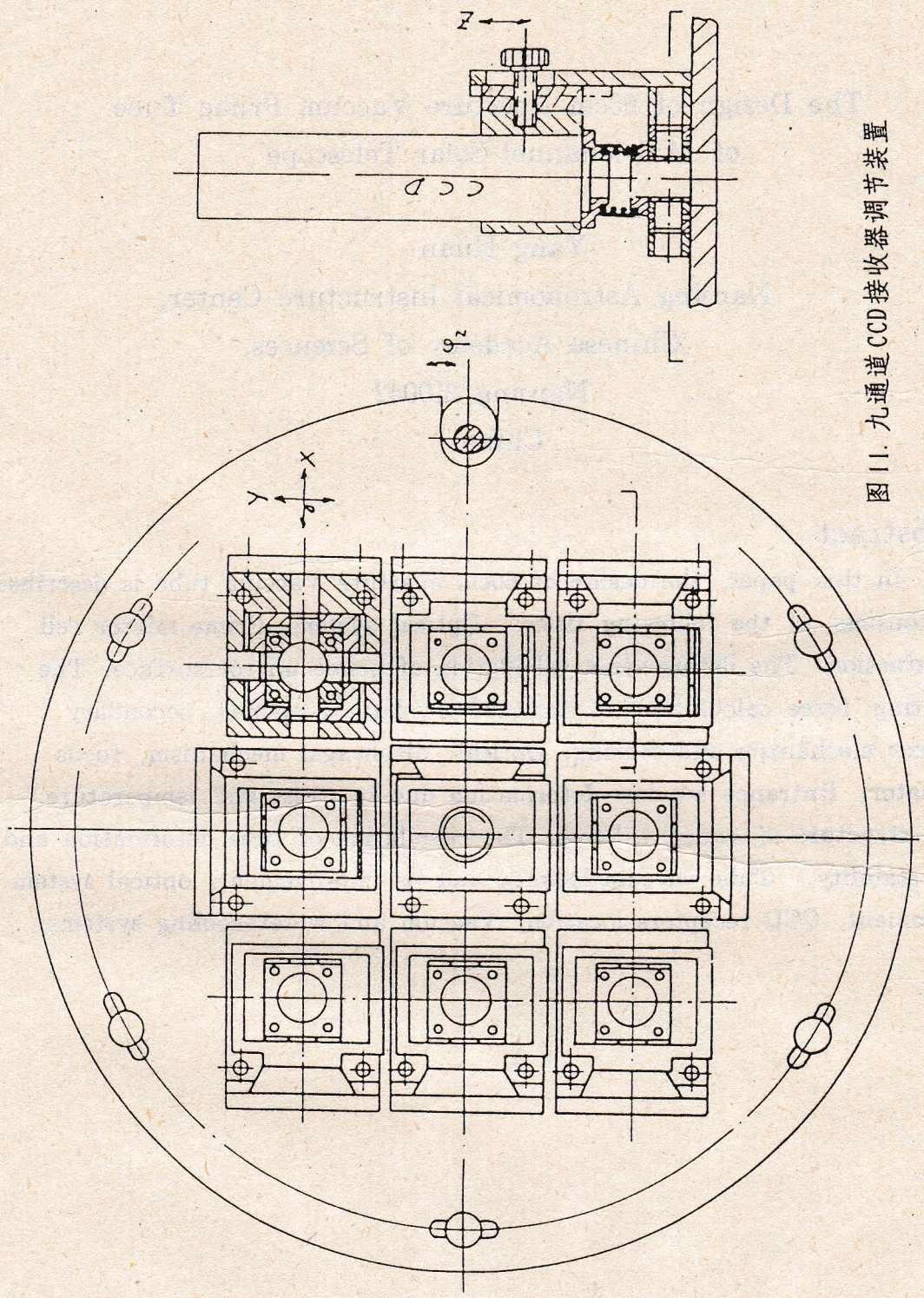


图11. 九通道CCD接收器调节装置

The Design of 60cm Aperture Vaccum Prime Tube of Multichannel Solar Telescope

Yang Huan
Nanjing Astronomical Instructure Center,
Chinese Academy of Sciences,
Nanjing 210042
China

Abstract

In this paper, the design of 60cm aperture Vaccum tube is described. It consists of the following titles: Optical system, Prime mirror cell constuction. The deformation calculation of prime mirror surface. The floating force calculation of the mercury lateral support, secondary mirror mechanism andfocusing. Optical disphragm mechanism, focus radiator, Rntrance window deformation due to stress and temperature. The structure of sealed window, The calculation of tube deformation and its stability, Tube vaccum leakage and its improvement, optical system alignment, CCD receptors location, Vaccum and water-cooling systems.

望远镜传动系统设计

薛俊荪

南京天文仪器研制中心，210042

概述

多通道太阳望远镜是一台多功能的太阳望远镜。其主镜筒的通光口径为60厘米，原磁场望远镜的镜筒为35厘米。另配备数只大小不一的镜筒，组合起来则相当于一台口径为1米的望远镜。

对传动系统的基本要求是：传动平稳，工作可靠，结构稳定。其要求参数如下：

1、赤经驱动	快动:	100° /分
	微动:	2′ /分
	恒动:	15′ /分
	慢动1:	0.5° /分
	慢动2:	6° /分
2、赤纬驱动	快动:	30° /分
	微动:	2′ /分
	慢动1:	0.5° /分
	慢动2:	1° /分

3、镜筒与导行镜的反向同步运动

当光电导行镜工作时，其主镜筒必须与赤经、赤纬的慢动做反向同步运动。以便于在望远镜观测日面上不同的区域时，光电导行镜始终对准太阳中心。

一、传动系统的设计

1、驱动系统机构的布局及安排

根据总体方案设计的要求（望远镜的特点，机架选型，初步概算，各结构的布局）现将驱动系统机构的布局及安排见图1。

2、赤经传动

按设计任务书要求，赤经传动系统采用经典式的多电机驱动。即用多只电机串级减速，并叠加差动机构的原理，来满足不同驱动速度的要求，且互不干涉。赤经系统的传动链如图2。

恒动电机M4采用90TZ5C磁滞同步电机，功率为45W，转速n＝3000r·P·m，额定同步转矩1470g·cm。

慢微动电机M2采用110／70S－CZ2，直流伺服—测速机组，功率为85W，转速n＝3600r·p·m，负载转矩2300g·cm，额定电压24V。

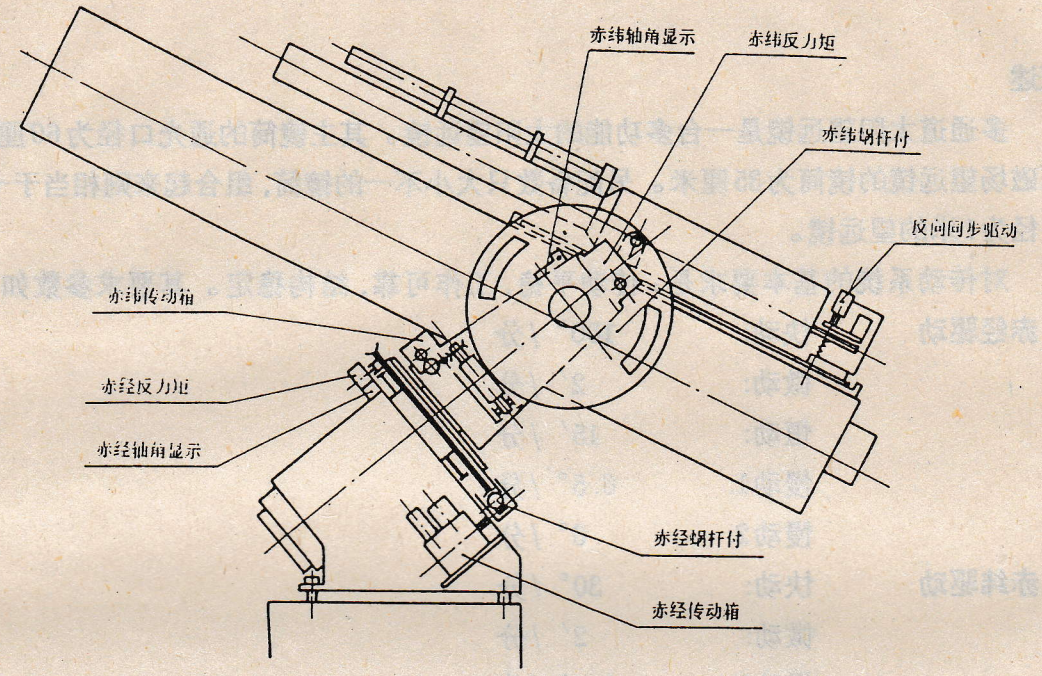


图1 望远镜驱动系统的布局

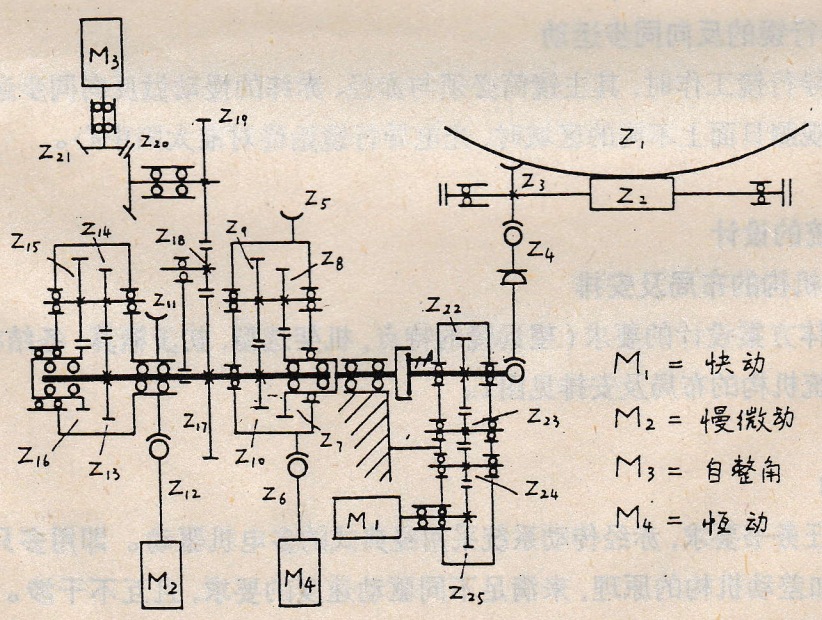


图2 赤经传动系链

快动电机M1采用110SZ03直流伺服电机，功率为200W，转速n＝3000r·p·m，负载转矩6500g·cm，额定电压110V。在慢微动速度中，有三档速率，慢动1＝0.5°/分，慢动2＝6°/分，微动＝2′/分。设计传动链的速比i＝216000，即达$n_{慢}$2＝6°/分。然采用的电机为直流伺服—测速机组，额定电压为24V。这样，就可便于分档控制。慢动1的0.5°/分正好是6°/分的1/12，即$n_{电机}$＝300r·p·m，电压2V。微动的2′/分正好是6°/分的1/180，即$n_{电机}$＝20r·p·m，电压为133mV。

其快动传动链的速比i=10800，即达$n_{快}$=100°/分。恒动传动链的速比i=4320000，即达$n_{恒}$＝15′/分。自整角发送机M3采用90ZLF003力矩式自整角发送机，整步比力矩85g·cm/1°，速比i=19000。

鉴于望远镜的口径相当于1.2米，因此，赤经大蜗轮的直径亦按1.2米考虑。安放在叉臂与机座之间，联接在极轴上，采用浮动蜗杆架结构，以保证啮合性能。浮动蜗杆架借用机座的极轴孔四周的平面，实现经向、侧向定位。在蜗杆架的端面利用弹簧、球头杆机构，进行侧向定位。当外负载荷超过额定荷值时，蜗杆可做轴向位移（且沿着蜗轮缘边做周边运动），以保护精密蜗轮。为确保安全，并设有限位装置，采用微动行程开关实现。赤经传动箱体安排在机座内。出轴使用万向连轴节与末级蜗杆架的小蜗杆付蜗杆连接，以保证上述运动之要求。

3、赤纬传动

赤纬传动为保证工艺上的同一性，机构基本上与赤径传动系统大致相同。其赤纬系统传动链如图3。

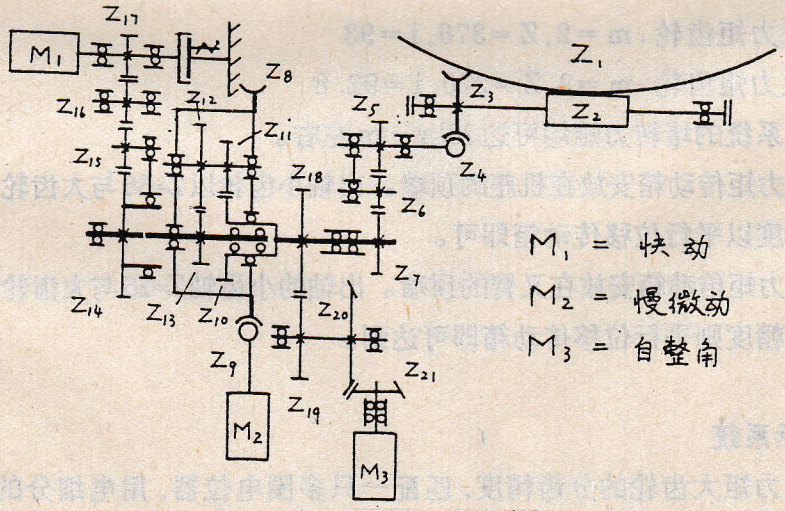


图 3 赤纬传动系链

快动电机M1采用905Z53直流伺服电机，功率为150W，转速n＝3000r·p·m，负载转矩4900g·cm，额定电压110V。

慢微动电机M2采用110/70S－CZ2直流伺服—测速机组，功率为85W，转速n=3600r

·p·m，负载转矩2300g·cm，额定电压24V。

在慢微动速度中，有三档速率：慢动1＝0.5°/分，慢动2＝1°/分，微动＝2′/分。设计传动链的速比i＝1296000。即达$n_{慢}2$＝1°/分，然直流伺服—测速机组的额定电压为24V。这样，便于分档控制。慢动1的0.5°/分正好是1°/分的1/2，即$n_{电机}$＝1800r·p·m，电压12V。微动的2′/分正好是1°/分的1/30，即$n_{电机}$＝120r·p·m，电压800mv。

其快动传动链的速比i＝36000，即达n快＝30°/分。

自整角发送机M3采用90ZLF003力矩式自整角发送机，整步比力矩85g·cm/1°，速比i＝19810.7527。

赤纬大蜗轮亦采用赤经大蜗轮的同等参数。按太阳望远镜的工作原理，在赤纬的工作范围只要满足±23°5的转动就可以。这样，从刚性考虑，叉臂就可做短些。然镜筒还是较庞大的，为使驱动刚度增强，赤纬大蜗轮采取以中心孔与赤纬轴定位，以接近蜗轮的轮缘处设计两只定位过桥架，跨过叉臂直接与镜筒连接。这样就大大的增加了赤纬驱动刚度。驱动蜗杆仍采用浮动蜗杆架结构。传动箱直接固定在叉臂的前下端（即东南端），蜗杆架在调整好啮合后与叉臂为刚性连接。经过实践证明，即使叉臂有些微变形，也不影响其传动精度。

4、反力矩系统

为使传动平稳、消除蜗轮付间隙、增加仪器的扭转刚度，赤经、赤纬驱动都备有反力矩系统。其结构是在赤经、赤纬大蜗轮的背面叠放一只大齿轮，以反力矩传动箱驱动。反力矩电机为SYL－30永磁式直流力矩电机。其峰值堵转转矩为30kg·cm。

赤经反力矩齿轮：m＝2，Z＝376，i＝93

赤纬反力矩齿轮：m＝2，Z＝270，i＝92.8

反力矩系统的堵转力矩均可达28kg·m左右。

赤经反力矩传动箱安放在机座的顶端。出轴小齿轮以Z=36与大齿轮Z＝376啮合。调整啮合精度以平行位移传动箱即可。

赤纬反力矩传动箱安放在叉臂的顶端。出轴的小齿轴Z=26与大齿轮Z＝270啮合。其调整啮合精度则平行位移传动箱即可达到。

5、轴角显示系统

利用反力矩大齿轮的分齿精度，匹配一只多圈电位器，用电细分的办法，在控制台上亦可显示赤经、赤纬轴的轴角位置。其精度为角分级。对于太阳望远镜的粗定位来说是完全足够的了。选用电位器为W×5－11多圈线绕电位器（10转）12K±5%。

赤经显示之电位器出轴小齿轮Z＝25，亦得到电位器一转＝24°的轴角转角。赤纬显示的电位器出轴小齿轮Z＝18，亦可得到电位器一转＝24°的轴角转角。这样，在电控上可采用同一性的细分法，则可完全满足望远镜的要求。

6、镜筒与导行镜的反向同步

为达到反向的同步转动，导行镜安放在主镜筒上，并有一小叉臂基座。于是，镜筒可作赤纬方向反平行于天赤道方向的两维运动。它们的驱动是利用一对同望远镜的赤经和赤纬慢动相耦合的自整角机实现。当光电导行系统工作时，揿动慢动的按钮，导行镜筒便作反向的同步转动，导行镜光轴相对主镜筒光轴偏移，然仍保证其对中于太阳像。在这样装置中，赤纬方向的速度值是完全对应相同的，但在赤经方向，由于导行镜是相对于主镜筒转动，一般情况下，在天球上画出一个与赤道面平行的小园。这只有当春分和秋分时才对应相同，在夏至和冬至日相差最大。运转动速度的速比差1/2(1+COS23° 27′)。$\omega_{。}$ =0.958704。即 $\omega_{。赤纬}$ =1，则 $\omega_{。赤经}$ =0.958704。

按以上原理之要求，在赤经、赤纬的传动箱内，各设计配置一只自整角发送机90ZLF003，通过适当的速比与慢动级相连。达到在慢动1=0.5°/分时同步工作。其赤经用自整角发送机的速比i=19000。赤纬用自整角发送机的速比i=19810.7527。并在导行镜的基座上，即光电导行镜尾端设置一套装有自整角接收机90ZLJ002的驱动箱。自整角发送机与自整角接收机完全耦合。其驱动箱输出为直线运动。传动系统的设计，与丝杆作力点与小叉臂的中心距有关，并要考虑输出力矩。其自整角机的输出比力矩为85g·cm/1°，因此，必须进行机械放大，增大速比来满足力矩要求。

二、传动系统的计算

一）赤经系统:

1、传动链计算

$$n_{恒}=120\pi\cdot n\left(1-\frac{z_{10}}{z_9}\cdot\frac{z_8}{z_7}\right)\cdot\frac{z_6}{z_5}\cdot\frac{z_4}{z_3}\cdot\frac{z_2}{z_1}=15'/分$$

$$n_{微慢}=2\pi\cdot n\left(1-\frac{z_{16}}{z_{15}}\cdot\frac{z_{14}}{z_{13}}\right)\cdot\frac{z_{12}}{z_{11}}\cdot\frac{z_{10}}{z_9}\cdot\frac{z_8}{z_7}\cdot\frac{z_6}{z_5}\cdot\frac{z_4}{z_3}\cdot\frac{z_2}{z_1}=6°/分$$

$$n_{快}=2\pi\cdot n\cdot\frac{z_{25}}{z_{24}}\cdot\frac{z_4}{z_3}\cdot\frac{z_2}{z_1}=100°/分$$

慢动1=0.5°/分与6°/分差12倍，微动=2′/分与6°/分差180倍，用电控细分档可达到。

2、末级蜗杆付

大蜗杆付参数:

大蜗轮：M=3，Z_1=360，α=20°，df_1=1080

大蜗杆：M=3，Z_2=1，q=24，α=20°

λ=2° 23′ 9.4″，df_2=72

小蜗杆付参数:

小蜗轮：M=1.75，Z_3=40，α=20°，df_3=70

小蜗杆：M=1.75，Z_4=2，q=14，α=20°

λ=8° 7′ 48.37″，df_4=24.5

3、自整角发送机速比：i=19000

按与慢动0.5°/分速率匹配，反算自整角机的速度为$n_{自}$=26.38r·p·m

（二）赤纬系统

1、传动链计算

$$n_{快}=2\pi\cdot n\cdot\frac{z_{17}}{z_{14}}\cdot\frac{z_{13}}{z_{12}}\cdot\frac{z_{11}}{z_{10}}\cdot\frac{z_4}{z_3}\cdot\frac{z_2}{z_1}=30°/分$$

$$n_{微慢}=2\pi\cdot n\cdot(1-\frac{z_{13}}{z_{12}}\cdot\frac{z_{11}}{z_{10}})\cdot\frac{z_9}{z_8}\cdot\frac{z_4}{z_3}\cdot\frac{z_2}{z_1}=1°/分$$

慢动1=0.5°/分与1°/分差2倍，微动=2′/分与1°/分差30倍，用电控细分档即可达到。

2、末级蜗杆付

其参数与赤经传动之末级蜗杆付参数相同。

3、自整角发送机速比：i=19810.75269

按与慢动0.5°/分速率匹配，反算自整角机的速度为$n_{自}$=27.41r·p·m

（三）末级传动付的有关计算

根据总体方案的设计考虑，提供的望远镜载荷力矩如下：

赤经：M风荷=6.2kgm

M摩擦=4.2kgm

M惯性=8.7kgm（2秒钟达快动120°/分）

M反力矩=14kgm

赤纬：M风荷=23.5kgm

M摩擦=1.3kgm

M惯性=5.3kgm（0.2秒钟达慢动7.5°/分）

M反力矩=30kgm

其总阻力矩　M总阻力矩=M风荷+M摩擦+M惯性+M反力矩

M总极轴=33.1kgm

M总纬轴=60.1kgm

1、蜗轮付的强度计算：

现蜗轮付的参数为：m=3, Z2=360, Z1=1, df1=72

df2=1080, q=24, λ=2° 23′ 9.4″

蜗轮的材料：QT60－2球墨铸铁，E=1.6×10^6kg/cm^2

蜗杆的材料：40Cr　E2=2.1×10⁶kg/cm²

其综合弹性模量

$$E=\frac{2E_1E_2}{E_1+E_2}=1.8\times10^6 kg/cm^2$$

其强度计算过程从略，计算结果见蜗轮强度计算总表。

2、赤经大蜗轮付的精度考虑

因太阳自身运动的不均匀性及蒙气差影响，将机械传动精度做的太高是没有多大的意义。只要取得相应的精度就可以了。不必要进行苛求。

按一年中太阳运动不均匀性，引入的平均误差为

$\overline{\triangle}t=8''.2$／小时，　　$\overline{\triangle}\delta=37''$／小时

所以 $\triangle_1=\sqrt{\overline{\triangle}t^2+\overline{\triangle}\delta^2}=37''\ 89$/小时 $=3''\ 16/5$分钟。

而蒙气差造成的运动偏差平均值（从蒙气差影响表中查出）

$$\Delta t'=\frac{d(\overline{\Delta}t)}{dT}=2''\ 89/5\text{分钟}$$

$$\Delta\delta'=\frac{d(\overline{\Delta}\delta)}{dT}=1''\ 32/5\text{分钟}$$

所以：$\triangle_2=\sqrt{(\triangle t')^2+(\triangle\delta')^2}=3''\ 17/5$分钟

综合均方根误差

$$\triangle_1'=\sqrt{\triangle_1^2+\triangle_2^2}=4''\ 48/5\text{分钟}$$

设大蜗轮付传动误差引入的跟踪误差为4″/5分钟。

小蜗轮付累积误差引入的跟踪误差为2″/5分钟。

则传动误差为

$$\triangle_2'=\sqrt{4_1^2+4_2^2}=4''\ 47/5\text{分钟}$$

即与太阳运动的不均匀性和蒙气差的影响所引起的误差 $\triangle_1'=4''\ 48/5$分钟几乎一致。

而总的对于太阳的精确跟踪精度1″则依靠光电导行来解决，是完全可以的

现取大蜗轮的参数为：

$M=3, Z_2=360$　$Z_1=1$

则蜗轮每转过一齿所需的时间为

$$t=\frac{24\times36}{360}=4\text{分钟/每齿}$$

而4″/5分钟对应的传动误差（即传动周期误差的公差）

$$\delta_t=\frac{4''\times360}{206265}\times1000=6.98\mu$$

根据机械工业部标准（JB162－60）规定，大蜗轮付的精度接近于4级精度，（4级精

度的传动周期误差 $\delta_T=6\mu$），因此，我们将赤经蜗轮付的短周期误差的精度定为4级精度，（或可稍低些）而累积误差定为5级精度就可以满足了。

对于赤纬蜗轮付的精度可低些，但是考虑到两套传动付的工艺同一性，精度就取得与赤经相同。小蜗轮付的精度，经分析采用5级精度就可以了。其它各种齿轮、蜗轮的精度，因在前级，考虑到传动系统的误差，刚度及装配等诸种因素的影响，将分别定为6－7级精度，这样基本上可以满足驱动精度的总要求。

三、结论

本望远镜于1990年10月安装在北京天文台怀柔太阳物理观测站，经过调试，望远镜运转正常。

其赤经传动箱、赤纬传动箱，运转基本无噪声，电机电流在0.3－0.6A。在平衡调试过程中，赤经、赤纬蜗杆脱开方便、迅速，复位可靠。

经过几年的试观测，本驱动系统已满足设计要求，机械传动平稳，工作可靠，精度达设计要求。

蜗轮强度计算总表

项目名称		符号	单　位	赤　径	赤　纬
风荷力矩		M风荷	kgM	6.2	23.5
摩擦力矩		M摩擦		4.2	1.3
惯性力矩		M惯性		8.7	5.3
反力矩		M反力矩		14	30
总阻力矩		M总		33.1	60.1
接触点上曲率半径		ρ	cm	10.8	10.8
接触线长度		Lp		7.78	7.78
园　周　力		P	kg	61.29	111.29
单位接触载荷		q	kg／cm	7.87	14.7
接触应力		σ	kg/cm^2	166	223.85
有风荷时园周力		$P_{风}$	kg	11.48	43.5
无风荷时园周力		$P_{无风}$		25.9	55.5
风荷与反力矩同向力		$P_{同向荷}$		37.4	99
接触变形	有风荷时	$\delta_{。风}$	cm	9×10^{-6}	3.21×10^{-5}
	无风荷时	$\delta_{。无风}$		1.96×10^{-5}	4×10^{-5}
	同向荷时	$\delta_{。同向荷}$		2.78×10^{-5}	6.99×10^{-5}
变形角	有风荷时	$Q_{风}$	〃 角　秒	0″.03	0″.12
	无风荷时	$Q_{无风}$		0″.07	0″.15
	同向荷时	$Q_{风向荷}$		0″.103	0″.26

注：1、载荷力矩（风荷、摩擦、惯性、反力）均由胡企千提供计算数据。

2、惯性力矩　赤径：8.7kgm（2秒钟达快动120°/分）

赤纬：5.3kgm（0.2秒钟达快动7.5°/分）。

0.1Å和Hα滤光器的结构设计

杨世模

南京天文仪器研制中心，210042

一. 概述

太阳多通道望远镜共有三台滤光器，60厘米主镜筒中的九通道滤光器，10厘米镜筒中的0.1Å滤光器和14厘米镜筒中的Hα滤光器。后两台同属于单通道可调双折射滤光器，基本结构大致相同。0.1Å滤光器用作全日面速度场和磁场的巡视观测；Hα滤光器用于全日面单色像监测。这两台滤光器的基本指标如下：

	0.1Å	Hα
工作波长	5324Å，5576Å	6563Å
带宽	0.1Å	0.5Å
通光口径	36 mm	31 mm
晶体尺寸	37×37 mm	32×32 mm
工作温度	42℃	42℃
温控精度	0.01℃	0.05℃
旋转波片级数	7	7
波片旋转精度	0.1°	0.3°

这两台滤光器结构设计的主要特点是实现了波长调节全部自动化；应用光电耦和器作为波片零位指示器；滤光器本体采用了轴向分块结构；密封结构有较大改进。

自一九九一年按装以后，这两台滤光器经过较长时期的实用观测考验，性能正常稳定，达到设计任务书的要求，为太阳多通道望远镜的日常观测作出了贡献。

二. 波片调节驱动系统

根据设计要求，两台滤光器选择了用七台小型步进电机分别驱动七块波片的驱动方式。具体传动路线如下：

步进电机(BF36)—蜗杆(K=1)—斜齿轮(Z=18)—连轴节—直齿轮(Z=18)—齿圈(Z=126)

总传动比为126。步进电机步角距为1.5度，电机每一步对应波片转角0.012度。由此可知，对于0.1A滤光器，波片旋转0.1度需电机驱动8步；对于Hα滤光器，波片旋转0.3度需电机驱动24步。这样的设计使得步进电机运行中的偶然失步对转角精度影响很小。

设步进电机驱动脉冲频率为1KH，波片转动45度需要时间约3.75秒。实际工作时

脉冲频率可能略有不同，但是肯定可以在半分钟之内将七块波片调整到所需位置，满足观察者的要求。

BF36步进电机功率较小，需进行传动功率估算。根据一般规范和实验结果设定各参量值：

步进电机输出力矩400g.cm，取计算值200g.cm.

蜗杆传动效率 0.75

齿轮传动效率 0.90

滚动轴承效率 0.95

滑动轴承效率 0.95

连轴节效率 0.98

密封圈阻力矩 300g.cm

由以上数据可算得电机驱动力矩传递到齿圈上为15,044g.cm，而阻力矩为2,100g.cm，说明完全可以带动波片。

三. 波片零位指示器

为了正确地控制波片转角，需要确定波片的零点位置。仪器工作时，先由计算机发出指令，各波片回到各自的零点，然后按照观察者的要求再驱动各波片转动到给定的角位置。有了零点就可避免累积误差，也防止了误操作和误动作后系统瘫痪的危险。

经过多次试验，这两台滤光器采用了光电耦合器作为定位元件。电机输出轴经过1:126的蜗杆与斜齿轮传动将运动传递到指示盘，使指示盘的转速等于波片转速。指示盘上有一狭缝，当此狭缝转动到与光电耦和器的发射极开口重叠时，输出极输出高电位。这样就可将零点精确地确定在狭缝的起始点上。由于步进电机步角距相当于指示盘的0.012度转角，所以很容易将定位精度控制在0.1度以内。狭缝的宽度并不要求十分精确。

这种方法虽然不如使用光栅码盘精度高，但是完全满足精度要求，且成本极低。经过数年的使用，证明此指示器简单可靠，维护方便。

四. 轴向分块晶体座

过去国内制造的同类型双折射滤光器晶体座结构都是上下从中间破分开的哈夫式结构，在哈夫中间的方槽内放置同样上下破分开的晶体座和晶体座盖。这种结构是行之有效的，但也存在一个困难，即如果滤光器本体比较长，则两个破分体就会在加工中出现翘曲，装配之前要经过校正。

考虑到这两台滤光器轴向尺寸较长，传动轴较多的特点，参考国外仪器结构，采用了轴向分块式结构。这种结构把本体和晶体座及晶体座盖合为一体，沿轴向分割成数块形状一致（只是长度不等）的硬铝圆柱体，中间的方孔放置晶体，每两块之间夹持一个装有波片的不锈钢齿圈。加工时首先车出外圆，插出方孔，再以心轴为基准，把各级晶体座连接后组装在心轴上加工侧面各槽。这种结构的特点是零件刚度和长期稳

定性好，加工和装配中变形小，便于提高加工精度和简化工艺。

从加工、装配和使用的维护情况可以看出这种结构确实具有明显的优越性。

五. 油封结构

为了消除滤光器内部众多光学元件之间的界面反射光，全部光学元件都浸没在硅油之中。这就提出了一个重要问题，即防止漏油。对此设计中主要采取了以下几项措施：

1. 全部采用端面密封结构，增加密封可靠性。在晶体座组件外边套上一个密封筒与前、后端盖形成密闭的圆柱体，这种结构的密封件线长度短，更容易维护。

2. 密封件全部采用标准产品，传动轴的连轴节利用轴承滚针制成。这些零件的表面光洁度和形状尺寸都可得到保证。

3. 采取有效的温度补偿机构，即无压力的空气室，以消除升温时的泄漏和降温时的空气逸入。

此外，凡是油腔内外的零件一律选用硬铝、黄铜和不锈钢材料，防止硅油污染变色。

由于以上措施，这两台滤光器从八九年组装使用至今尚未发现有漏油现象。

六. 致谢

0.1Å 滤光器的光学设计者是北京天文台艾国祥研究员，Hα 滤光器的光学设计是毛伟军，结构设计是杨世模，波片旋转控制是初瑛仪，恒温控制是陆海天，装配和安装是汪贵林。

在设计和研制过程中一直得到艾国祥研究员、李挺研究员、胡企千研究员的指导和关心；得到华家俊、陈海元、薛俊荪等同志的热情帮助，在此一并表示衷心地感谢。

多通道太阳望远镜图像接收处理系统总体设计

张斌 艾国祥 叶祥明 王敬山 宋国锋 邓元勇 刘杨
中国科学院北京天文台
100080

摘要

多通道太阳磁场望远镜是目前世界上规模最庞大、结构最复杂、功能最强大的太阳观测仪器。它包括60cm九通道真空望远镜、全日面矢量磁场系统、全日面与局部Hα系统、3933A全日面像、以及原35cm太阳磁场望远镜系统，共计有14个通道可以提供太阳观测,也就是说具有14个可以同时观测的CCD，即具有14个信号源。如此复杂庞大的系统需要一个与之相配合的磁场图像采集接收处理系统，该系统经过几年的安装调试各项指标已基本达到要求，运行情况良好，本文介绍了这一系统的基本设计思想和系统构成。

一、多通道望远镜图像系统的要求

多通道太阳磁场望远镜与以往的太阳磁场望远镜有很大的区别，以往的太阳磁场望远镜只有一个观测通道，也就是只有一套后端图像接收系统。而多通道太阳磁场望远镜本身具有可同时观测的多个通道，每个通道又具有不同的观测谱线，不同的观测层次，不同的观测特点，比如九通道望远镜的设计工作谱线为:CaII3968,HeII4686,MgI5173,FeI5247,He5876,FeI5576,FeI6302及Hα6563九条。多通道的观测基于多个通道的同时观测，即多个通道磁场的同时观测，使得天文工作者可以不同的层次直接去观测研究太阳上的活动，可以完成许多以前单通道望远镜观

测难以完成的研究课题，例如太阳小尺度研究，太阳三维磁结构，耀斑的空间结构等等。

因此，多通道太阳磁场望远镜图像接收的关键在于实时的多层次测量接收，而实现这一目标的方法在于多通道的实时同步观测技术。实时观测需要大量的实时图像接收装置，同步观测要求将这些实时图像接收装置用同步体系连接起来，使各个观测装置不仅可以单独工作而且可以在一个同步系统控制下完全同步地采集图像。

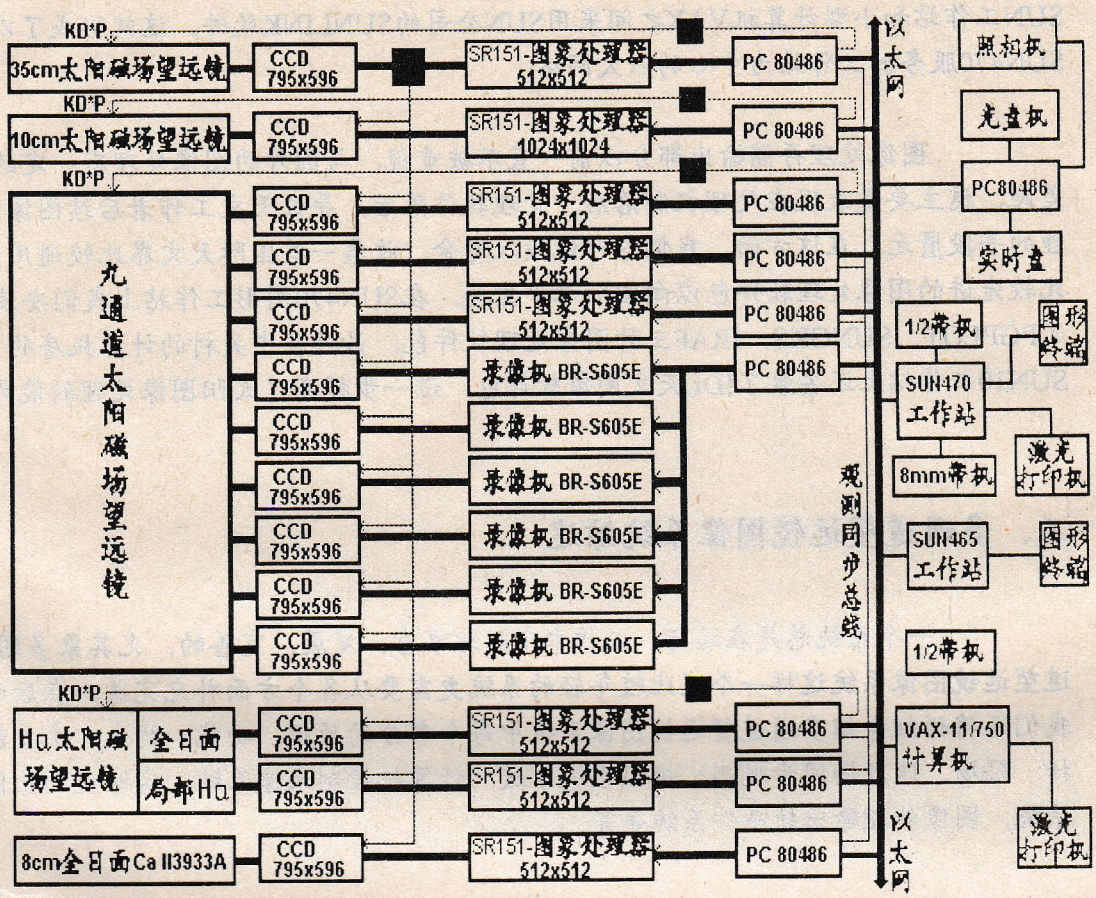
太阳磁场图像的接收采集只是后端系统的一部分工作，还必须对接收到的磁场图像作处理，如图像变换、磁场、速度场的显示、硬拷贝等等，以统一的格式并按观测的时间分类加以保存。为了加强怀柔站数据的国际通用性，我们采用世界天文界比较通用的数据格式FITS格式来存储；为了提高数据的存储有效年限，我们将原先的数据磁带顺序存取介质改为光盘随机存取介质，不仅提高了可靠性，同时也方便了资料的查询和提取，加强了数据的管理。

二、多通道望远镜图像系统的整体设计

要使多通道图像接收处理成为一个完整的系统体系，不仅要求每个小部分准确地完成自己的功能，而且要求每个部分之间要有机地结合起来，互相通讯联系，使一个系统的整体功能得以实现。

下面是多通道图像接收处理系统的总体框图。

多通道太阳望远镜图像采集处理系统总体框图



上图中黑色的方块是KD*P高压电源（在第一个CCD后部的是CCD同步信号分离器）。

从上图可以清楚地看到整个系统以以太网为分界线被分成实时测量控制部分和图像处理存储输出部分两大块，测量部分以14个CCD作为图像探测采集器，而且每个CCD都处于外同步状态，保证了被采集的图像的建立在时间上具有一一对应的关系，为图像的同步采集奠定了基础。图像采集采用美国IMAGE PROCESSING公司的SERIE 151系列图像处理器，它具有多种图像实时采集模式，可以完成图像的多种实时运算，如图像的加、减、乘、卷积等等；录像系统采用日本JVC公司生产的BR－S605E专用可控录像机，它具有RS－232串行计算机接口，具有计算机遥控操纵的功能，为计算机自动控制录像资料采集提供了条件。

我们采用的以太网络的传输速率为10MB/S，以一幅磁场图为0.5MB为例，则每秒可以传输20幅磁图，基本可以满足图像转存的需要。在以太网上我们主要采用SUN公司的PC－NFS软件作为PC微机与SUN图形工作站之间的通讯软件，在

SUN工作站和小型计算机VAX之间采用SUN公司的SUNLINK软件，这就形成了以SUN470服务器工作站为中心的以太网络。

图像处理存储输出部分以前一直不被重视，与国外的图像处理有一定的差距，这主要是表现在处理机制落后，处理软件落后，导致天文工作者后续图像处理的手段匮乏。在这方面，我们尽可能投入资金，收集一些国际天文界比较通用、比较先进的图像处理软件包以向国际水平靠拢。在SUN470图形工作站上我们安装了PGPLOT、SUNGKS、IRAF三种图像处理软件包，另外在中关村的计算机房的SUN10工作站上还安装了IDL天文图像软件包，进一步提高了太阳图像处理的能力。

三、多通道望远镜图像系统综述

一个系统总是在运行、工作中不断地丰富、发展、完善的，尤其象多通道望远镜图像系统这样一个还比较年轻的系统更需要从各个方面补充完善，在后面我们还将详细介绍多通道望远镜图像系统中每个部分的原理、功能、构成，主要包括：磁场、速度场同步观测，恒温系统改进，计算机控制录像系统，实时观测软件系统，图像处理输出软硬件系统等等。

四、致谢

本设计是一项历时甚长，理论和技术系统极其复杂的工程，有众多的科学技术人员参与工作，给予了积极的帮助和有力的支持，在此特表示衷心的感谢。

参考文献

〖1〗《多通道太阳望远镜研制报告》1994.12. 研制小组（中科院，北京天文台，南京天仪中心）

〖2〗《多通道太阳望远镜电控设计研制介绍》1994.12. 朱立卿（南京天仪中心）

〖3〗 《多通道太阳磁场望远镜试观测报告》 1994.12. 邓元勇，艾国祥，王敬山，宋国锋，叶祥明，张斌（中国科学院北京天文台）

Multi-Channel Telescope Image Receiving And Processing System Overall Design

Bin Zhang Guoxiang Ai Xiangming Ye Jingshan Wang Guofeng Song Yang Liu Yingping Nie Xuejun Liu

Beijing Astronomical Observatory Academia of Science

100080

Abstract

Multi-Channel Telescope is the most complicated Solar observing instrument with the most functions in the world, there are 14 CCD cameras in the whole system. So the data receiving system must be very large to suit it. In this paper, the overall design of the whole telescope system is introduced and the relation between every branch systems.

The branch systems include : solar magnetic field synchronism observing system, constant temperature control system, computer control recording images system, real time observing software and image processing software and hardware system.

多通道太阳望远镜同步接收系统设计

张斌 艾国祥 叶祥明 宋国锋 邓元勇
中国科学院北京天文台
100080

摘要

怀柔太阳观测站的多通道太阳磁场望远镜是一个具有多个通道，多谱线观测的太阳磁场测量仪器，其复杂的程度是以往的单通道磁场望远镜难以相比的，在国内国际上都是第一流的，然而仅仅有一套望远镜滤光器系统并不能构成一个完整的观测体系，它只是一个先决的条件，只有配上一套与之相对应的图象接收采集系统才能充分发挥它的优势，也才能构成完整的观测系统。

多通道太阳磁场望远镜的优势在于可以同时观测不同的谱线，也就是可以同时观测太阳上的不同层次的信息，为研究太阳磁场的三维结构提供了必要条件，所以如何同步观测采集太阳磁场信号就成为本系统的核心。

一、CCD 图象接收器的同步

首先，望远镜上每个通道都是采用CCD摄像机作为图象接收设备的，而我们要求多个通道的图象能够在同一时刻被每个CCD摄像机接收下来，这样就保证了每个通道所采集的图象是在时间上一一对应的，也就使得每个通道的太阳磁场是在同一段时间内观测的，而且磁场的每一幅叠加象都是在相同时刻采集到的，这种CCD摄像机的同步是整个图象接收采集系统实现同步的基础。

为了实现上述的同步操作，一个先决的条件就是CCD摄像机是可以被外同步的，也就是每个CCD摄像机都可以被外同步源同步控制，这样我们就可以用一

个视频同步源来控制所有通道的CCD摄像机，使它们以一个同步源的时钟为基准进行曝光、接收、传输，其总体结构的示意图如下所示:

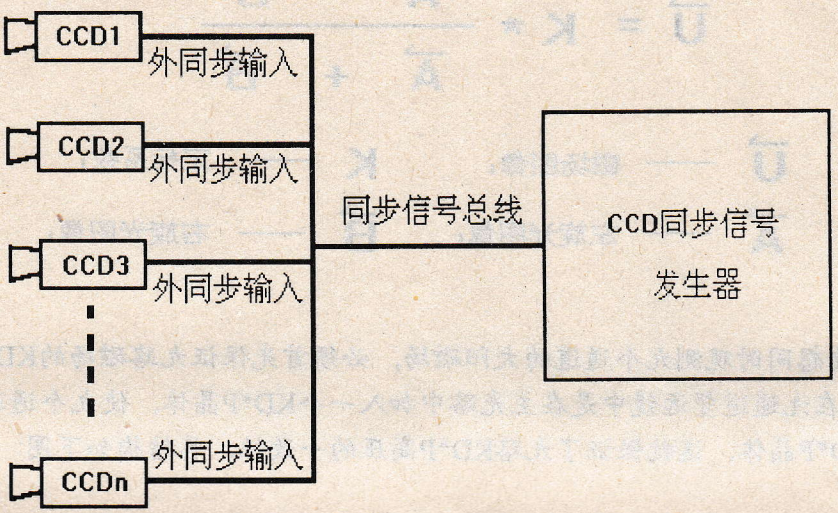


图　　1

二、CCD的选择

基于以上的要求，我们一定要采用具有外同步控制功能的CCD，同时还要考虑到对不同CCD的光谱响应特性，我们主要选用台湾敏通公司生产的1802CCD，它的特点是具有外同步功能，光谱响应范围较宽，CAMERA值可调，具有多档电子快门控制曝光时间，体积较小。同时我们还保留了一些美国生产的TM-860CCD，它们是美国80年代末的商业产品，它也具有外同步的功能，但试验证明其效果相对差一些。

我们将九只1802CCD用于九通道磁场望远镜，以保证九通道每通道状态的一致性，这样在图象采集处理器的前端九通道的状态是完全一致的，为后部图像处理的系统一致性打下了基础。

三、磁场测量KD*P高压的同步控制

太阳磁场的测量是依靠施加在KD*P晶体上高压的翻转使通过KD*P晶体的太阳光产生于线心左右的偏转，从而得到左旋光和右旋光图像，通过对接收的左旋

光和右旋光图像的处理得到太阳磁场，其计算过程如下：

$$\vec{U} = K * \frac{\vec{A} - \vec{B}}{\vec{A} + \vec{B}}$$

$\vec{U}$ —— 磁场图像；　　K —— 定标系数；

$\vec{A}$ —— 左旋光图像；　　$\vec{B}$ —— 右旋光图像；

要想同时观测九个通道的太阳磁场，必须首先保证九路磁场的KD*P高压翻转一致，在九通道望远镜中是在主光路中加入一个KD*P晶体，使九个通道共同使用一块KD*P晶体，这就保证了九路KD*P高压的一致性，其结构如下图：

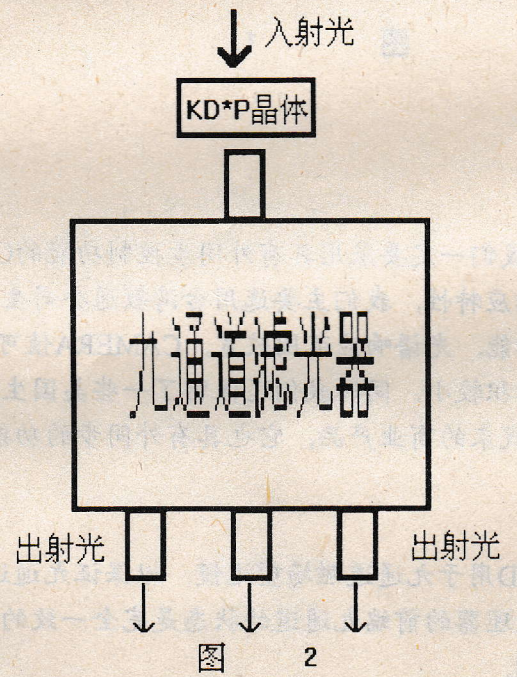


图　2

由于SM望远镜和HALFA望远镜的KD*P是分别独立的，所以我们还必须在图象采集中作出相应的处理，使其与九通道望远镜的KD*P晶体高压同步工作，这项工作将在后面详细说明。

四、图象采集系统的同步设计

多通道望远镜图象采集系统的理想方案是针对每一个通道采用一套图象采集器，这样需要九通道，SM，HALFA，共计十一套图象采集器，目前由于费用上的问题还不能实现，但其实现的基本原理与我们实际使用的两套同步图象采集器是完全一样的，下面以两套同步图象采集器为例说明。

太阳磁场测量一直采用美国的151图象处理器，所以我们也以此为基础来构成双路同步图象采集系统。一台151图象处理器可以选择三路视频信号，但在一个时间范围内，只能处理一路视频信号，所以我们采用两台151图象处理器以及与之配套的两台PC计算机，并将两台计算机用同步机制联起来，其中一台为主控机，另一台为从机，由主控机控制从机的动作以达到同步采集图象的目的。双路同步图象采集系统的结构图如下：

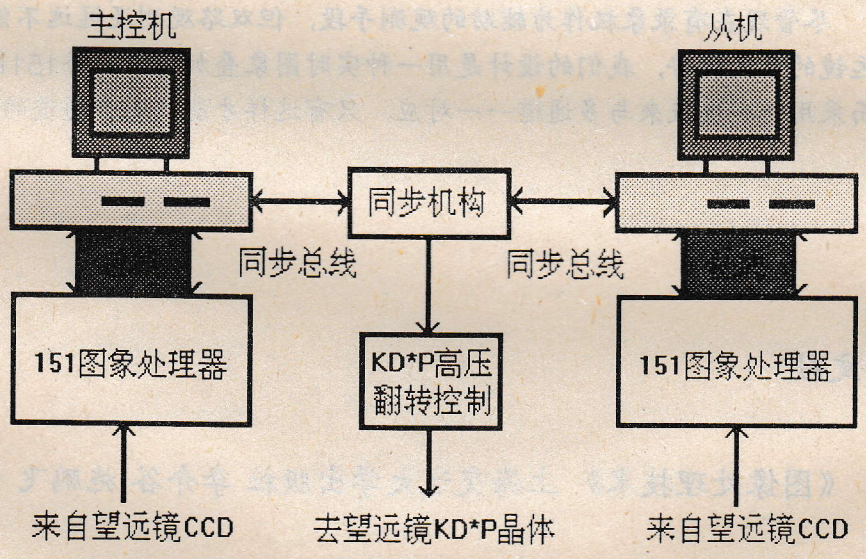


图 3

从以上框图可以看出，同步机构是此系统的关键所在，它联络两台计算机并使主控机与从机同步工作。

我们设计的同步总线包括串行总线和并行总线。串行总线用于主控机与从机之间的命令和少量数据通信，命令包括：指示从机进行何种观测，指示从机测量

光亮强度，指示从机返回状态等等；数据包括：观测的所有参数，从机的状态参数等等。

并行总线有两个功能，一是主控机指示从机开始观测，二是控制所有KD*P高压的加载和翻转。为了达到主从机的精确同步，开始观测的信号必须由并行总线提供，否则有可能导致从机延迟开始观测。KD*P高压加载和翻转的控制是一种状态控制，所以也必须采取并行总线，而且还要求状态的保持。

具体的硬件我们采用异步通讯口COM2和并行接口板8255分别作为串行和并行总线，经过实际的调试观测，已经取得了双路的磁图，获得了令人满意的效果。

五、图象采集系统的完善

尽管现在有录象机作为辅助的观测手段，但双路观测还远远不能发挥多通道望远镜的巨大优势，我们的设计是用一种实时图象叠加板来代替151图象处理器，进而采用十一块板来与多通道一一对应，只有这样才能达到多通道的并行实时观测。

参考文献

〔1〕《图像处理技术》 上海交通大学出版社 李介谷 施鹏飞 刘重庆 谢式旬

〔2〕《386/486技术精粹》清华大学出版社〔美〕Peter Norton

〔3〕《微型计算机接口电路及应用》 清华大学出版社 周明德

Multi-Channel Telescope Synchronism Observing System Design

Bin Zhang Guoxiang Ai Xiangming Ye
Beijing Astronomical Observatory Academia of Science
100080

In this paper, the principal and structure of synchronism observing system are discussed. Without this structure, the whole Multi-Channel Telescope couldn't give free rein to its special function and just like the old solar megnetic filed telescope. The synchronism structure makes every image which is been observed in more than two channels exposed at the same time, so images are corresponding one by one. With this conduction the solar magnetic fields we get are corresponding one by one. For every channel is observing at different line we get the magnetic fields at different height on the solar surface. The result is very useful to research the three-dimensional magnetic fields structure.

The synchronism observing system is based on the communication technology between computers. When main control computer is ready, it will send a message to the client computer and check the answer from it. If the answer is also ready, the main computer start working and at the same time send a message to client to let it working. This is the basic control principal of communication technology between computer.

多通道太阳望远镜后端数据处理系统

张斌 叶祥明 邓元勇 刘扬 王同江 刘学军
中国科学院北京天文台
100080

摘要

多通道太阳磁场望远镜是目前世界上结构最复杂、功能最强大的太阳磁场望远镜，多通道望远镜本身是一个硬件系统，它需要一个与之相适应的软件系统来协同工作，只有这样才能充分发挥多通道望远镜这个硬件系统的各种功能，同时也为天文工作者创建了一个科研工作的基础平台，从这个平台天文工作者可以发展出自己感兴趣的各种研究领域，这个软件系统就是多通道望远镜的后端数据处理系统。多通道望远镜的后端数据处理系统由太阳磁场数据的接收系统和数据的存储、处理系统的硬件和软件构成，并且整个系统由以太网络联系起来而成为一个整体。

一、磁场采集系统硬件构成

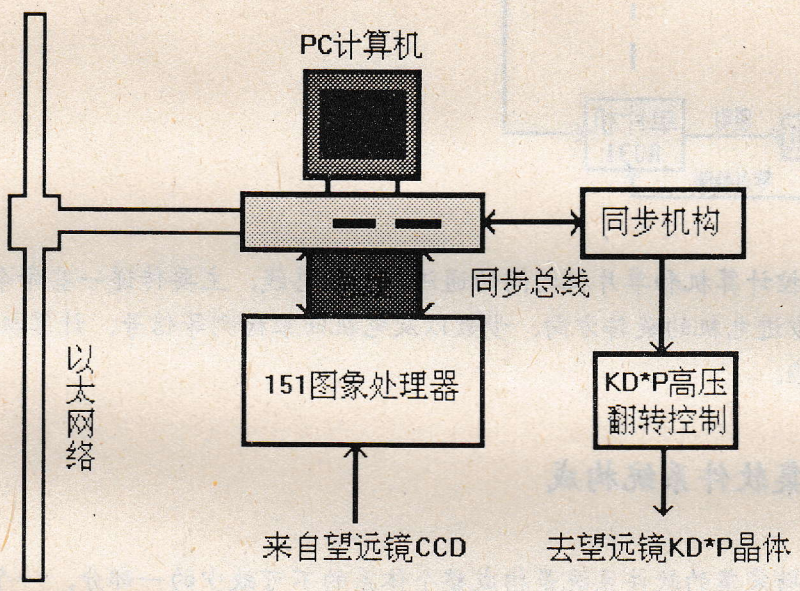
多通道太阳磁场望远镜是以磁场测量为核心的，包括：35CM太阳磁场速度场、60CM九通道太阳磁场速度场、全日面太阳磁场速度场、HALFA太阳磁场速度场。现在怀柔太阳观测站的磁场测量是以美国产的151图像采集处理器为核心的，其工作的原理是分别累加采集来自望远镜滤光器的太阳左旋光和右旋光，再对左旋光和右旋光的累加结果按下面的公式加以处理而得到磁场信号。

$$\vec{U} = K * \frac{\vec{A} - \vec{B}}{\vec{A} + \vec{B}}$$

$\vec{U}$ —— 磁场图像；　　K —— 定标系数；

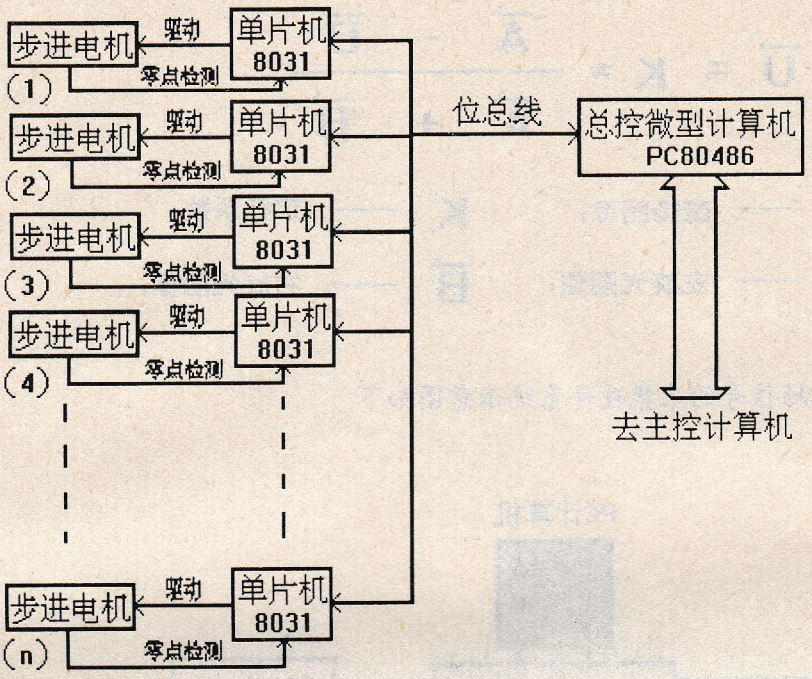
$\vec{A}$ —— 左旋光图像；　　$\vec{B}$ —— 右旋光图像；

磁场信号的采集硬件系统示意图如下：



磁场采集硬件主要由151图像采集处理器、微型PC计算机、采集同步机构、KD*P高压控制机构、以太网络体系以及滤光器波带调节机构。关于同步控制机构的结构和工作原理已经在《多通道太阳磁场望远镜同步接收系统设计》中详细介绍，这里就不再重复。下面简要介绍一下滤光器波带调节机构的构成及工作原理，这一部分工作主要由叶祥明完成。

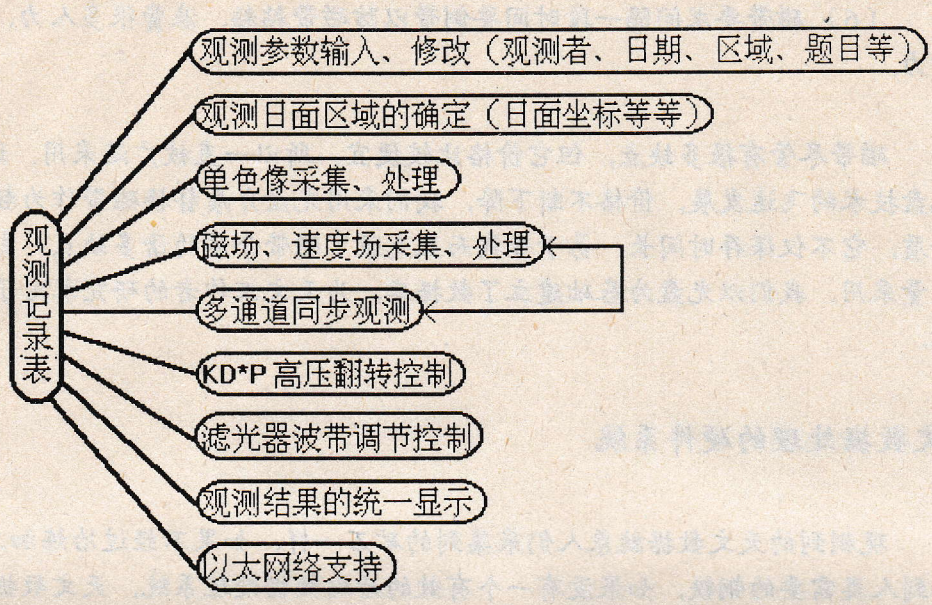
滤光器的工作波带是可以任意调节的，所以也称作万能调节滤光器。波带调节是通过旋转滤光器中的波片来实现的，而波片的运动是靠计算机控制的步进电机驱动的，每个步进电机由一个单片机控制，所有的单片机又由一台微机总体控制，其体系结构如下图示。



主控计算机和单片机之间的通讯采用位总线，主要传递一些命令和少量的数据，如步进电机的旋转方向、步数以及电机回零检测等信号，计算机采用中断控制方式响应。

二、磁场采集软件系统构成

磁场采集的软件系统是构成整个体系的不可缺少的一部分，一个设计合理的软件系统可以充分发挥硬件的功能，进而延长硬件的有效寿命。磁场采集软件系统以天文研究为服务对象，要求既方便使用又有利于以后的数据处理、存储，本系统以每天观测的记录表为中心，使数据按观测日期、观测种类、观测时间等分类，便于以后天文工作人员查阅、调用、研究。软件结构示意图如下：



软件系统是在实践中不断丰富发展的，如今的观测软件是经过了五、六年的使用，不断地完善，随着多通道望远镜的投入使用，软件体系一定会更进一步地发展。

三、天文图像数据的存储

天文图像数据是很有研究价值的科学成果，随着科学技术的进步，尤其是图像处理领域的飞速发展，以前的观测结果可以得到更进一步的处理，取得新的科研成果，而且天文研究是一个长期的工作，需要几年甚至几十年的观测结果，这就要求天文数据要妥善地长期存储起来。

数据的存储一直是天文界一个比较大的问题，因为不仅要求数据要有效地保存还要便于查询、调用，这就涉及到数据的管理问题。以前我们一直采用数据流磁带来存储，其主要问题是：

（1）磁带介质容量较小；
（2）磁带保存条件要求高；
（3）磁带易于损坏、磁化引起数据丢失；
（4）磁带属于顺序流介质，数据查找、提取费时困难；
（5）磁带体积、重量较大；

（6）磁带要求间隔一段时间要倒带以防磁带粘粘，浪费很多人力、物力、财力。

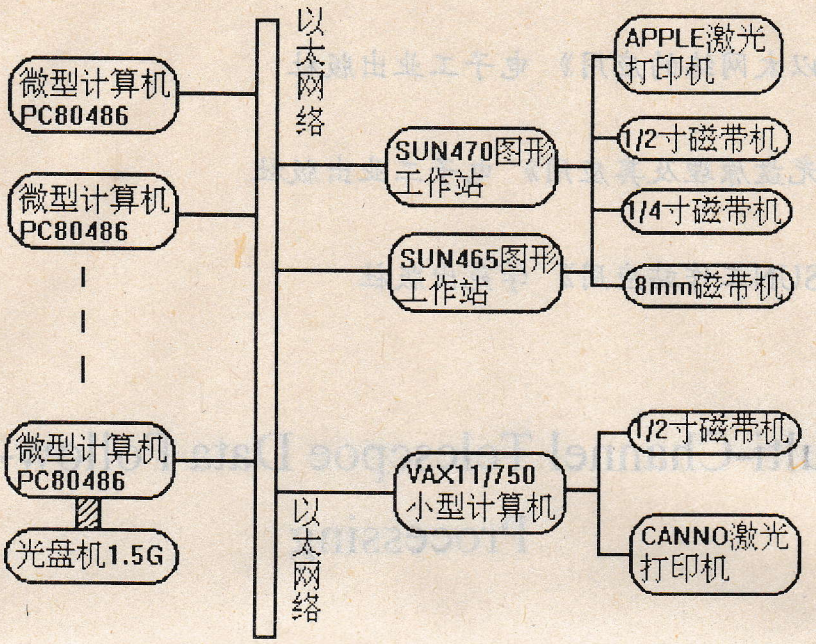
磁带尽管有很多缺点，但它价格比较便宜，所以一直被广泛采用。近年随着光盘技术的飞速发展，价格不断下降，我们采用光盘介质替换磁带作为数据的存储介质，它不仅保存时间长、易于查找而且克服了磁带介质的诸多缺点。由于光盘的大量采用，我们以光盘为基础建立了数据库，为天文工作者的研究奠定了数据的基础。

四、天文数据处理的硬件系统

观测到的天文数据就象人们采集到的矿石一样，如果不经过冶炼加工就不会得到人类需要的钢铁，如果没有一个有效的后端数据处理系统，天文数据就得不到有效利用，当然也得不到什么科研成果。这样无论仪器多么先进也不能获得领先的成果。近年世界各国的数据处理、图像处理工作都在飞速发展，这是与计算机技术的发展分不开的，计算机在天文领域中的应用也日益广泛。

怀柔太阳观测站的计算机数据处理系统主要由SUN图形工作站为核心构成，SUN470工作站作为核心服务器，SUN465工作站作为客户服务器，VAX11/750小型计算机与SUN470联网交换数据，而作为观测用的微型PC计算机挂在以SUN470服务器为核心的以太网络上，通过以太网络将观测的天文数据传输到SUN470服务器中以备后续处理和数据存储。

下面是系统硬件的结构示意图。



五、天文数据处理的软件系统

计算机系统不仅要有完善的硬件，而且还要有丰富的软件资源作为后盾。在怀柔站数据处理系统中我们经过几年的积累搜集在系统核心的SUN470工作站上配置了多种的图像处理软件，并在此基础上开发了一套适合于太阳磁场图像处理的软件包。

我们目前配备的基础软件包是：PGPLOT，IRAF，SUNGKS，SUNLINK，PC－NFS，以及IDL天文图像处理软件，随着天文研究的进展软件也将不断丰富发展。

参考文献

〔1〕《151系列图像处理器应用》〔美〕IMAGE Co.

〔2〕《计算机通讯与网络》清华大学出版社

〔3〕《以太网络的应用》 电子工业出版社

〔4〕《光盘原理及其应用》 电子工业出版社

〔5〕《SUN工作站应用》 学苑出版社

Multi-Channel Telescpoe Data Follow-up Processing

Bin Zhang Xiangming Ye Yang Liu Tongjiang Wang Xuejun Liu
Beijing Astronomical Observatory Academia of Science
100080

Abstract

Data follow-up processing is very important in astronomical field. The data observed are raw material, they need to be processed. In this paper we intruded the basic method in Huai Rou Solar Observatory, just like the hardware and software. Computer software is the most important method that observer always used, for example, IRAF, PGPLOT, SUN-GKS, IRAF, and so on. Base on these software, we built our own image processing software.

Another way, we have to link the data receiving part and data processing part together well by computer net communication.

多通道太阳望远镜滤光器恒温控制改进

张斌 艾国祥 王敬山
中国科学院北京天文台
100080

摘要

滤光器温度的稳定度是滤光器正常工作的极其重要的因素，温度的漂移会使已经调到某一谱线的滤光器偏离正确的谱线，从而导致我们观测不到期望的太阳结构，甚至测量不到磁场信号，从而导致错误的结论。恒温对于滤光器如此重要，但温度的控制却依赖于很多因素，诸如恒温控制器的灵敏度，温度传感器件的灵敏度，恒温对象的保温状况热量流动情况以及体积等等，在滤光器的恒温控制已经定型的状况下，滤光器本身的保温状况热量流动情况以及体积成为重要的因素。

一、九通道滤光器的恒温改进

在多通道太阳磁场望远镜中，九通道滤光器是最重要的核心部件，它长0.8米，宽0.45米，高0.45米，是现今世界上使用的最大的滤光器系统，体积的庞大使得恒温控制难度增加数倍。因为我们要保证它在一年中始终温度恒定保持在0.01度的变化范围内，而北京夏季高温达38度，冬季低温到零下15度，环境温度差可以达到53度之多，可见一年中热量的交换差别相当大。就滤光器本身而言，其温度分布也是相当不均匀的，这种不均匀性又因其体积的增大而趋于严重，温度分布不均匀导致热量传递不均匀，最终使得滤光器整体恒温性能变差。九通道滤光器本身温度沿与光路平行方向的分布的示意图如下图示:

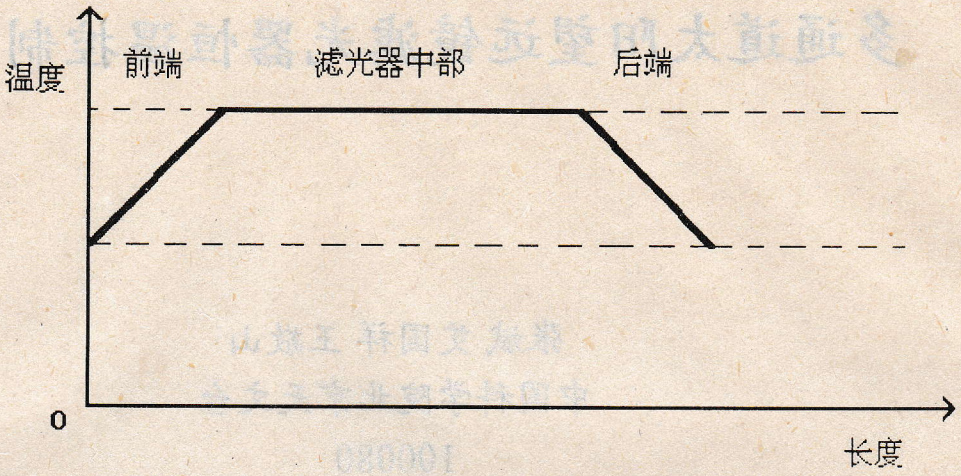


图 1

从图1可以看出，九通道滤光器的温度分布是中部高而前后两端较低，两端的热量散失是相当大的，其根本原因在于九通道滤光器的截面积过大，如果缺乏两端面的保温措施就难以保证滤光器整体的温度恒定。针对以上情况，我们对九通道滤光器端面采取了保温措施，即主动的控温保温法。如果仅仅采取被动的保温法，就无法保证滤光器在大温差环境中正常工作，因为一旦环境温度降低，两端的热量损失就会加大，则图1中的两端斜线的斜率就会变大，使滤光器中部的热量从两端流失导致整体温度降低，从而导致滤光器整体温度分布改变。

九通道滤光器前后端面的具体热量流动情况又不相同，前端为五条入射光路，而后端为九条出射光路。在光路上的保温措施是采用保温密封玻璃，而在通光孔四周是胶木板和泡沫保温材料，显而易见两种情况的散热状况是不一样的，所以要采取分别独立的温度控制器，九通道滤光器两端面的情况示意如下图2。

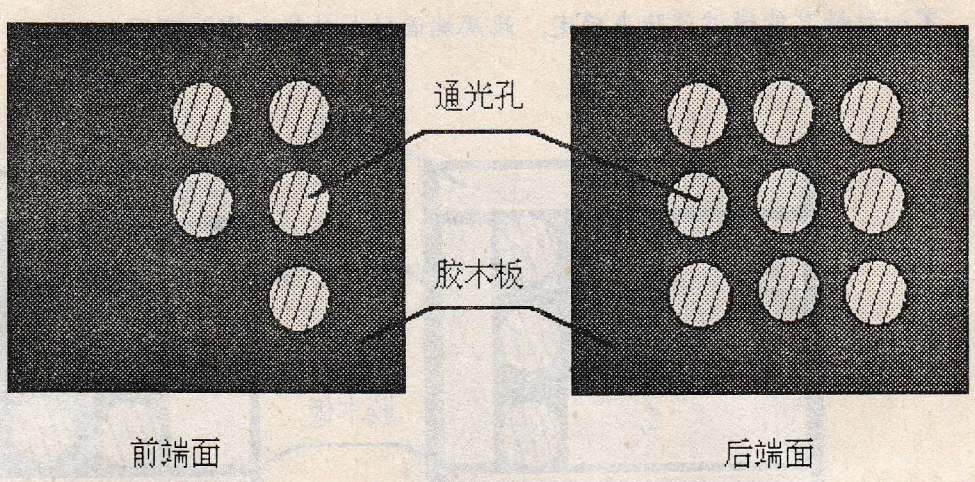


图　　2

下面我们分中央和四周两种情况来讨论。中央的控温要求不能遮挡光路，所以我们采用胶木材料外绕加热丝的方法，然后在外层包上保温层，控温探头深埋在胶木中以达到最佳的温控效果，截面示意图如下：

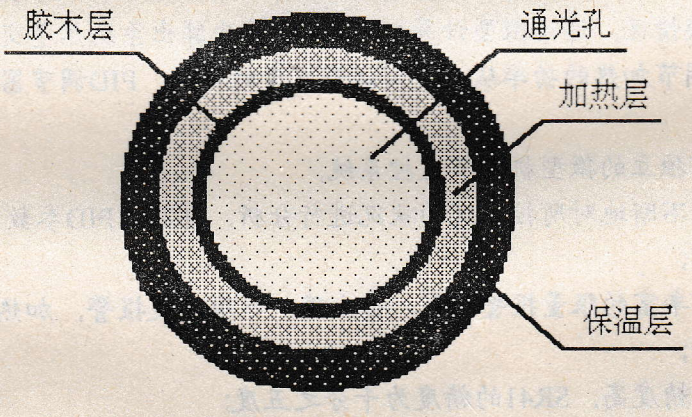


图　　3

对于两端面的温控，针对滤光器对尺寸的严格要求以及保温面积过大的特点，我们采用平板式的加热结构，就是将加热丝绕在形状不同的板上，这些板的形状是依据滤光器两端面通光孔四周的形状而定的，经过适当的组合就可以基本上把滤光器两端面覆盖，然后再在其上加一层泡沫保温材料就可以保证热量的散失。但

仅此并不能保证端面的温度均匀，所以每一块加热板的加热功率又各不相同，这种不一致性只能通过试验来确定，此两端面的加热板分布如下图所示：

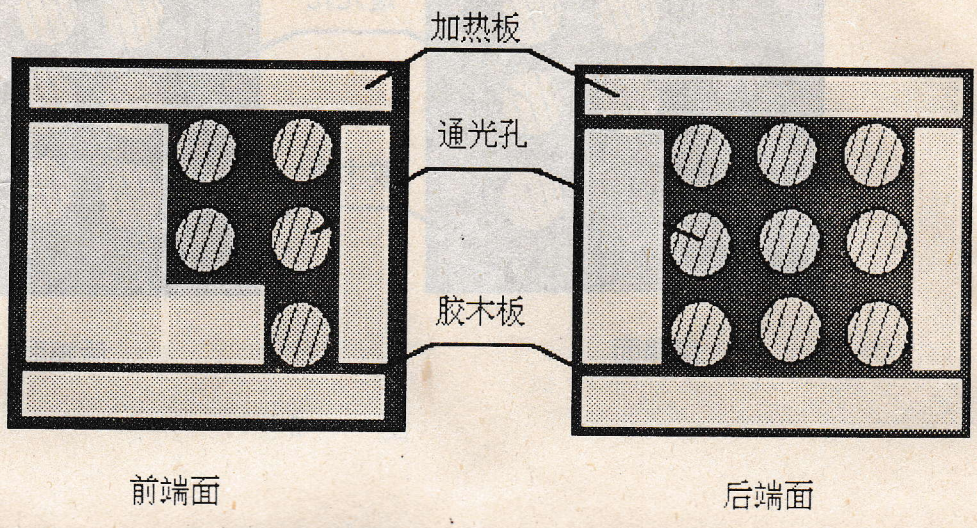


图 4

对于温度控制器的选择，我们采用了目前流行的PID温度调节器，具体是日本SHIMADEN公司生产的PID温度调节器系列中的SR41。PID调节器可以根据系统的整体热量交换情况，通过微型计算机采用PID算法算出系统热量交换的参数，并用这个参数去调节加热的功率从而达到调节温度的目的。PID调节器的特点是：

1. 具有独立的微型机调节监控系统；
2. 可以不断地对所控系统的状况进行分析，并得出PID参数以供进一步调节；
3. 具有丰富的限量报警功能，如上限，下限温度报警，加热器断线报警等等；
4. 控温精度高，SR41的精度为千分之五度；
5. 控温探头采用国际标准，精度高，易于更新；
6. 工作电压范围宽，一般从50伏到240伏；
7. 采用直观的数字显示方式，易于监测；
8. 温度调节简便，并且所有参数均可以保存以备断电；

温度传感器采用国际标准的铂电阻PT100，它具有反应灵敏，精度高，重复性好，不易破损的特点。在九通道滤光器上我们用了四套SR41控温器，即前端中央

，四周，后端中央，四周。为了监视端面的温度极其均匀性，我们在前后端面的上下左右各放置了一个PT100探头。除了增加控温部分之外，我们还加进了一定厚度的泡沫保温板，板的形状依据端面的孔径分布形成，在孔之间加入了小块的保温块，以达到良好保温的目的。

二、其它滤光器的恒温改进

对于SM，HALFA滤光器我们也采取了类似的端面保温措施，但依据其具体情况，加热板的形状采用圆形，加热丝按螺旋状固定在表面，使加热板能被均匀加热，然后在将其嵌入特定形状的保温材料中，其形状示意如下图：

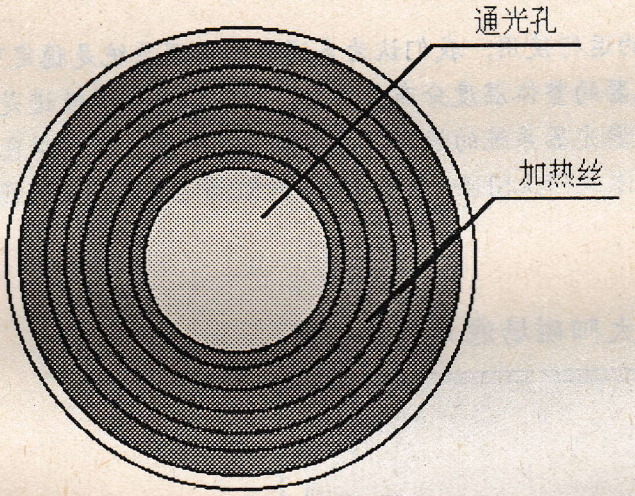


图　　5

三、滤光器温度监视的改进

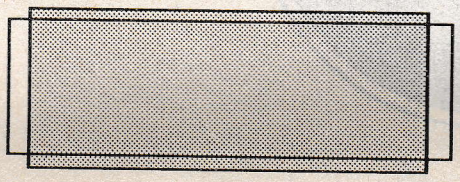
温度的显示一直是一个令观测人员比较头疼的问题，以前一直采用高精度温度计的方法，但温度计要占用滤光器的一部分体积，而且容易破碎，观察困难，对于多通道望远镜这样具有十几个测温点的庞大系统来讲，采用温度计已经不可能。现在我们采用高精度的数字温度显示器，将温度的显示从望远镜上移到观测室，即便于观察又直观。

采用的温度显示器是日本SHIMADEN公司的SD20四位数字温度显示器，其精度为百分之五，作为温度显示已经是足够了，测温探头采用PT100。我们制作一个多键互锁的选择开关来选择不同的检测对象，检测对象是：九通道滤光器体1，九通道滤光器体2，九通道滤光器头，九通道滤光器前端面上下左右，九通道滤光器后端面上下左右，SM滤光器，HALFA滤光器，共计十三个测温点。

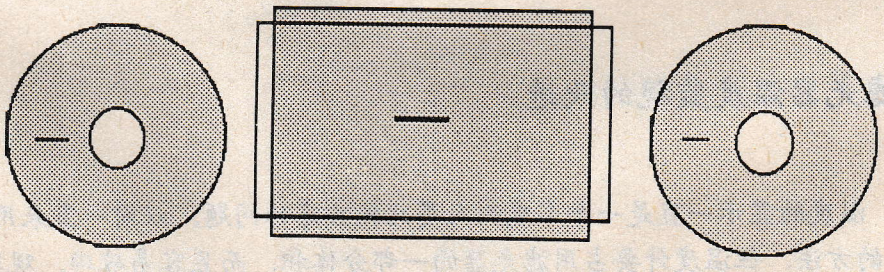
在多通道望远镜上的控温器有：九通道滤光器体外，九通道滤光器体内，九通道滤光器头，九通道滤光器前端面中央，九通道滤光器前端面四周，九通道滤光器后端面中央，九通道滤光器后端面四周，九通道KD*P，HALFA滤光器，HALFA滤光器端面，SM滤光器，SM滤光器前端面，SM滤光器后端面，SM干涉滤光片5576，SM干涉滤光片5324，共计十五个恒温系统。

经过长时间的运行使用，我们认为多通道的恒温系统是稳定可靠的，SR41控温器的加入使滤光器的整体温度分布更均匀，对恒温系统的改进是很有成效的，以下是多通道望远镜滤光器系统的恒温及测温点的示意图（图中黑色横线为PT100铂电阻放置处）。随本文附上SHIMADEN公司的SR40系列PID控制器的功能及操做说明一份以供参考。

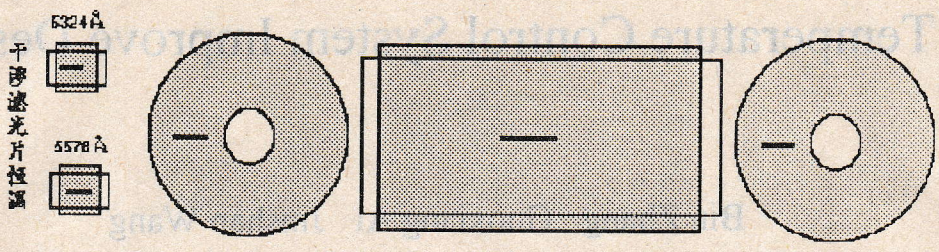
35CM太阳磁场滤光器体恒温



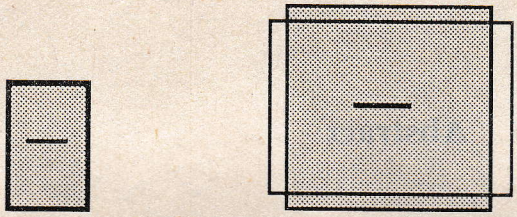
前端面恒温　HALFA滤光器体恒温　后端面恒温



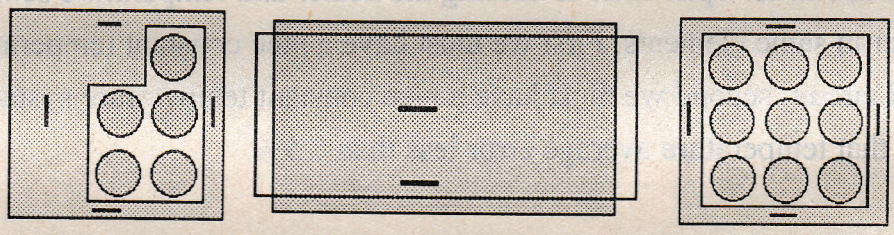
前端面恒温　SM滤光器体恒温　后端面恒温



九通道KD*P恒温　　九通道滤光器头部恒温



前端面恒温　九通道滤光器体恒温　后端面恒温



参考文献

〔1〕《恒温器的设计》电子工业出版社

〔2〕《SR40系列恒温控制器的应用》北京先锋电子公司

〔3〕《PT100铂电阻技术手册》电子工业出版社

Multi-Channel Telescope Optic Filter Constant

Temperature Control System Improve Design

Bin Zhang Guoxiang Ai Jinshan Wang
Beijing Astronomical Observatory Academia of Science
100080

Abstract

Working temperature of optic filter is very important, optic filter can not work normally in wrong temperature, it requires the constant temperature accuracy measured practically within 1/200°C. The constant temperature control circuit for optic filter is holding the heater and temperature sensor together in same elements. First we must have a nice constant temperature control circuit, second we must have a nice constant temperature system. It means that temperature average error less than 0.5%.

We added several mini constant temperature control units to the old optic filter system, especially at the both ends. It is usually noticed that a good constant temperature system must have constant swooping heat, so we must make sure that optic filter is in a constant swooping heat environment, but we did not notice the both ends. Heat always loose from here. After the improvement, optic filters work better than before.

多通道太阳组合望远镜驱动电控系统设计报告

陈新知

南京天文仪器研制中心，210042

概述

多通道望远镜采用赤道装置，多电机输入各差动传动机构，通过蜗轮付驱动望远镜。根据使用要求，除设置恒动运动外，赤经、赤纬还分别设置了快动、慢动、拉偏运动（无级调速），导行运动；用电磁离合器将恒动与主传动轴联系起来。为了消除蜗轮付的啮合间隙，使用了反力矩电机机构。

控制功能键分设置在手控盒，操作盒以及控制柜抽屉面板上，以满足使用方便的要求。图1示出望远镜驱动控制框图。

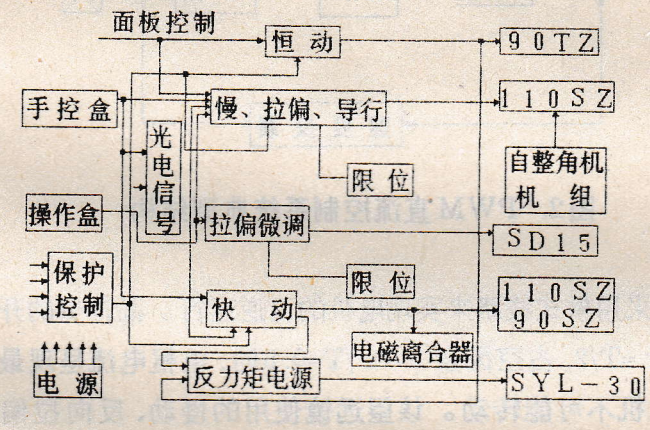


图1. 驱动控制框图

在控制系统电路设计时，力求简单、实用、可靠。尽量采用先进技术。下面作四个问题叙述。

一、最简单的恒动电路

传统的恒动电路，大多采用恒频电源来驱动磁滞同步电机，取得恒定速度。恒频电源一般具有高精度晶振——→分频——→逆变电路，得到频率精度较高的50HZ交流电源。这样做，不仅使用了大量的元器件，增加成本和工作量，而且由于元器件的数量增加，故障率也增加。实际上太阳的运动也并非十分规则，即使恒频电源精度做得很高，对望远镜的跟踪精度产生的作用也不大，实际跟踪精度还是靠高的导行精度来保证。鉴于此，在该望远镜的恒动驱动设计中，直接采用市电来驱动磁滞同步电机，即使市电频率有些变化，影响望远镜运行，但由于导行系统质量高，可以克服这个缺陷，而完全达到要求的跟踪精度。这种方案可以说是最简单的恒动电路了。

二、PWM直流控制系统的成功应用

脉冲宽度调制晶体管功率放大器作伺服系统的驱动，是八十年代较为先进的技术。

PWM放大器的元件工作在开关状态，因而其功耗小，通常脉宽调制信号的频率选为1～2.5KHZ，由这样的信号控制的放大器输出矩形电压脉冲给直流伺服电机，电枢电路的电感将电流滤平，形成直流电流，驱动电机运行，电压脉冲的宽度的改变相当于改变电机电枢上的平均电压，从而改变电机速度。它具有许多优越性，它降低电机运行温升，由于开关频率比电机及其拖动部件谐振频率小得多，可使脉宽调制系统的频带大大展宽，而具有优异的动静态特性。

鉴于上述这些优越性，在设计慢动，拉偏运动和导行运动所用的电机的驱动电路时，选用了PWM直流控制系统，以期提高控制和跟踪精度。

典型的脉宽调制的直流控制系统的结构如图2。

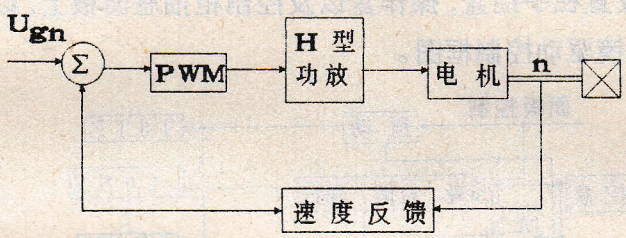


图2. PWM直流控制系统典型结构

双向PWM放大器是采用桥式线路来实现电机的可逆运行。晶体管的开关是按一定的控制逻辑进行的。当 τ=T/2，占空因素 $\sigma=\tau$/T=0.5时，电枢电流呈现最大的交变分量，且正负半波相等，电机不可能转动。该望远镜使用的慢动、反向拉偏以及导行运动，因使用频率较低，故放大器和电机大多处在这种不利状态。（因为慢动及反向拉偏，只有在找区域时才用得到，而导行运动，只有在跟踪产生误差时才用得上。所以这个系统不管是使用频率，还是使用时间，都很少）。因此，如想利用PWM的优越性，必须克服这种不利因素，否则已达到不能采用这种控制方式的地步。

为了解决这一问题，专门设计了一个门电路，来有效地控制H型放大电路的工作：需要工作就工作，不需要工作时就封闭，不加电，这样就使PWM直流控制系统完全适应于该望远镜的使用要求。见图3。

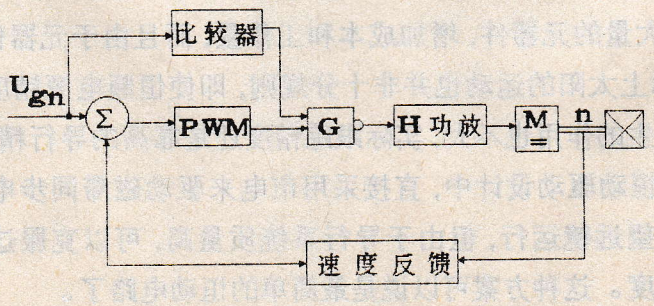


图3. 多通道望远镜用PWM直流控制框图

门电路G（图4）的引入，使得PWM在Ugn=0时，对称的方波不能进入H型放大电路，

使得放大器不工作，电机两端不加电，反之，当需要作慢动，拉偏或导行功能作用时，Ugn≠0，比较器输出“1”电平，PWM调制信号可以通过门G，经过延迟电路后进入H型放大器，产生电枢上电压，使电机运转，波型如图5所示。

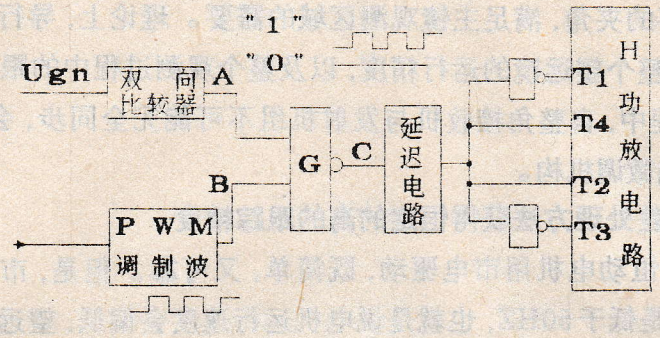


图4. G门的作用示意图

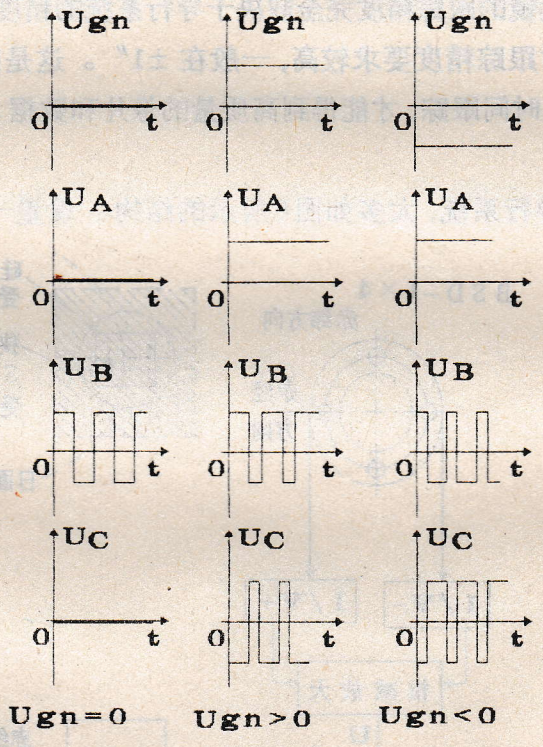


图5. Ugn诸种状态下PWM输出波形

从图5可以看出，当Ugn=0时，比较器输出为“0”电平门G将占空比为0.5的方波封住，不能通过G门，因此，无信号可使H型放大器工作，电机两端电压为0，等于不加电。反之，当Ugn≠0，双向比较器输出为“1”电平，G门被打开，被调制的PWM矩形波可以通过G门而进入延迟电路，再去控制H型放大器，产生电压加到电枢上，让其按给定方向和转速作功能运行。这样就很好地解决了在不需要使用时，电机处在大的交变电流的不合适的状态，使PWM直流调速系统适用于该望远镜部分功能驱动，以取得好的动静态品质和性能。

三、反向拉偏功能的特点

望远镜在更换观测区域时，我们采用自整角机组来完成。自整角发射机以作为反向拉偏功能的直流调速电机为主动力，随着直流电机的运动而运动，自整角接收机受发射机的控制而运动，进而带动导行镜作与主镜运动方向相反的运行，从而使主镜与导行镜产生一需要的夹角，满足主镜观测区域的需要。理论上，导行镜是始终保持对准太阳像，以确保整个望远镜的运行精度，以及整个观测过程中的跟踪精度。但由于反向拉偏运行过程中，自整角接收机与发射机组不可能完全同步，会产生一些误差，故为此设置了拉偏微调机构。

四、全新的导行误差处理方法获得恒定的高的跟踪精度

上文已提及，恒动电机用市电驱动，既简单，又可靠。但是，市电的频率的稳定性毕竟较低，大多是低于50HZ，也就是说电机运行速度会偏低，望远镜的跟踪往往会因速度底而落后；再者，太阳的运行也不十分规则，故望远镜的导行系统对跟踪精度影响相当大。望远镜的跟踪精度完全取决于导行系统的精度。

太阳望远镜对跟踪精度要求较高，一般在 ±1″ 。这是因为在对日面观测时要求平稳地准确地较长时间跟踪，才能得到高质量的像片和数据。所以导行的高精度是非常重要的。

以往的日光导行系统，大多如图6所示的结构。设置一导行镜，在太阳象赤经、

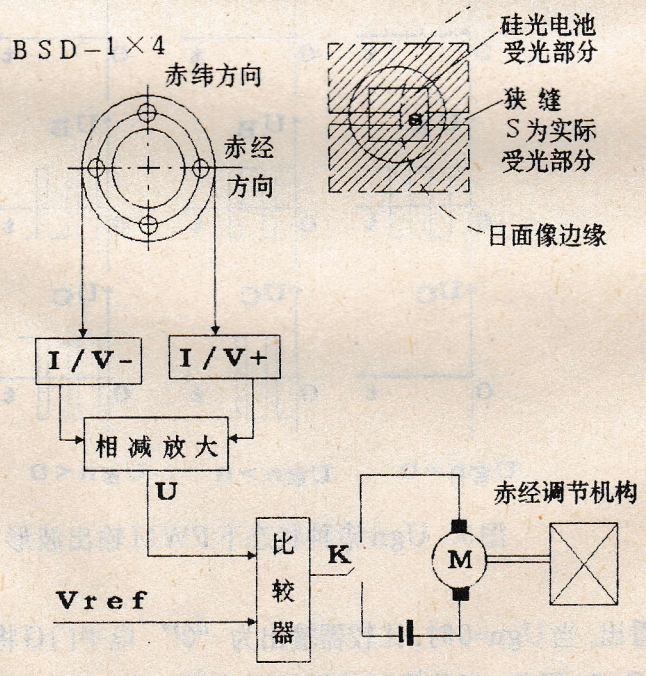


图6 传统日光导行系统误差处理示意框图

赤纬方向的四个边缘上，分别放置狭缝和光电传感器。光电传感器的光电流I ∝ ES，这里E为日光照度，S为光电传感器受光面积。经过I/V转换后，可得电压V=KI，其中K1为转换系数。V的大小即可反映望远镜的位置。如果正、反方向上V相等或相差甚微，则说明望远镜跟踪得好。

根据导行原理，当

$$K_2 \cdot (V^+ - V^-) > V_{ref} \quad (1)$$

时，比较器输出高电平，驱动电机作纠正望远镜已出现的偏差的调节运动，直到偏差在设定的精度要求以内。即

$$K_2 \cdot (V^+ - V^-) < V_{ref} \quad (2)$$

也就是说，当差值一旦满足(1)时，电机即作调节运动，而满足(2)条件时，即停止调整，如此周而复始地进行，以确保跟踪精度的要求。

参考电平，即决定电机运动与否的门槛电平的确定主要靠实验，它的值对应跟踪所需要的精度。

但在实际观测时，太阳的照度在不断变化。 从1992年8月22日太阳照度的实测值来看。

9：00	32,600lux
12：00	34,400lux
17：00	28,100lux

由此可见中午时间与早、晚时间，太阳的照度的变化约为 ±3,000lux。在同一时间，有云与无云，云层的厚薄，照度的变化更有随机性。还从实测数据来看，同是上午9时，照度在

无云时	32,600lux
薄云时	30,000—32,600lux
有浓云但仍可以进行观测的情况下	26,000lux

有资料介绍，由于天气及太阳高度引起的大气吸收，照度变化约4倍。这种变化，势必引起硅光电池光电流的变化。它对导行精度的影响，下面作详细的理论分析。当然，照度的变化产生的原因很多，如一年中四季太阳的象有直径30′—32′的变化；冬日正午与夏日正午的阳光照度的差值更大；云层的厚薄等等，使照度值变化也很大。照度变化引起的导行精度的变化，一般也采取了一些措施加以消除，象采用机械调节方法，使日面像边缘落在硅光电池中间；改变Vref的值以适应导行精度的要求。但是，机械调节是相当麻烦的，所以一般在相当一段时间内，上述调整是不进行的。至于云层有无与厚薄的影响，随机性大，简直无法克服。故一直是个问题而存在。

下面来分析照度变化对导行精度的影响。

综上所述，在同样的受光面积S时，亦即在跟踪的某一位置时，所对应的受光面积S是一定的时候，如果照度变化，硅光电池的光电流亦要变化，进而引起V的变化。由(1)式可以推导出

$$\begin{aligned} & K_2 \cdot (V^+ - V^-) - V_{ref} \\ &= K_2 \cdot (K_1 \cdot ES^+ - K_1 ES^-) - V_{ref} \\ &= K_2 K_1 E(S^+ - S^-) - V_{ref} \\ &= KE\Delta S - V_{ref} > 0 \end{aligned}$$

即 $KE\Delta S > V_{ref}$

由此式可以看出，决定导行系统是否作调整运动有二个因素。其一是△S=S－S，是望远镜的跟踪误差而造成的光电传感器受光面积的变化量，是真实反映误差大小的量。其二是E即照度，它是与日光的变化及大气折射等因素有关的量。从上式中可以看出，由于V_{ref}为定值（当然随着季节变化，也应作适当调节，但对于某一段时间来说，是定值），所以△S与E成反比。照度大时，△S较小时其乘积已达门槛电平，一旦超过该值，导行系统就作调节运动，使其积小于门槛电平，满足跟踪精度要求。这时因△S小，即跟踪偏差小，精度就高；反之，照度小时，△S相比较而言要较大时，E·△S的积才能达到门槛电平，故偏差就大，其精度就低。图7较形象地说明了导行

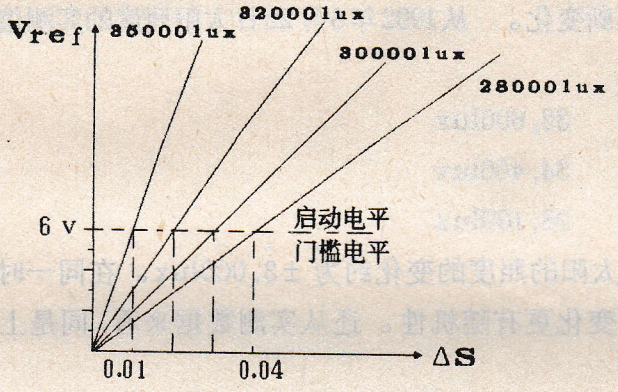


图7. 照度对导行精度影响示意图

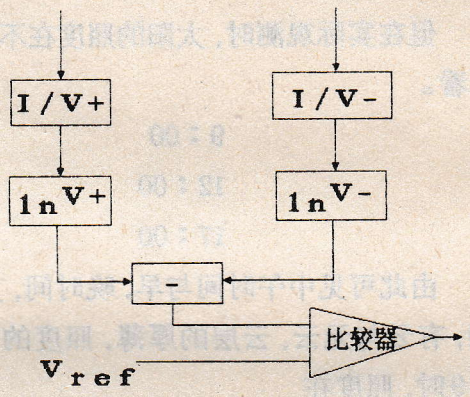


图8. 用对数处理误差的框图

精度受照度影响的情况。假定E=32,000lux，△S=0.02mm²，对应的跟踪精度为 ±1″，那么当E=35,000lux，△S只要为0.016mm²，即可达门槛电平，此时精度就优于 ±1″，而当E=30,000lux，△S要到0.03mm²时，才能达到门槛电平，此时精度就低于 ±1″。由此可见，照度变化对跟踪精度的影响是不容忽视的。

针对上述问题，多通道望远镜的导行系统采用了新的误差处理方法，在常规的I/V转换之后，不是直接对两个方向上的电压相减，而是先对其电压用对数放大器进行对数变换，然后再相减。此时比较器输出为“1”的条件为

$$K_2(\ln V^+ - \ln V^-) - V_{ref} > 0$$

即

$$K_2\left(\ln \frac{V^+}{V^-}\right) - V_{ref}$$

$$= K_2\left(\ln \frac{K_1 E S^+}{K_1 E S^-}\right) - V_{ref}$$

$$= K_2\left(\ln \frac{S^+}{S^-}\right) - V_{ref} > 0$$

所以

$$\ln \frac{S^+}{S^-} > \frac{1}{K} V_{ref}$$

可改写成 $\frac{S^+}{S^-} > K_3 V_{ref}$

由上式可以看出，用对数放大器处理之后，照度的因素被消除，决定导行系统是

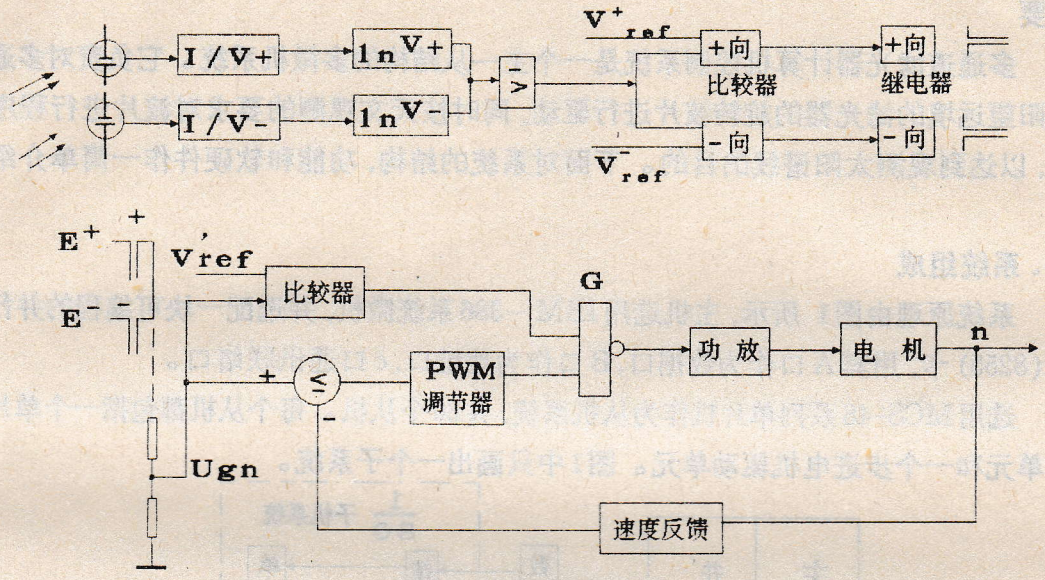


图9. 日光导行系统原理框图

否作调节运动的因素只有S^+/S^-，也就是就只与真实反映跟踪误差状态的硅光电池受光面积的变化有关。受光面积变化到一定程度时，比较器即输出“1”控制继电器将Ugn信号加至调节系统以作调节运动。假定S变化0.1mm²，即△S=0.11－0.09mm²，S^+/S^-=0.11／0.09=1.22时，比较器输出为“1”，只要这个比＞1.22时，就会使调节机构作调节运动，而不论此时的照度大小。这样，就提高了跟踪精度的恒定性，从而保证了望远镜跟踪的高精度，提高了观测所取得的数据质量。

从实际观测结果来看，理论分析是正确的。应用对数处理的方法，克服了太阳照度变化而引起的跟踪精度的变化，达到望远镜跟踪的高精度。

参考书目：

1、《电气自动化》92.2.16

脉宽调制的直流控制　　朱而光

2、PWM放大器入其在控制系统中的应用　　訾世铭

多通道滤光器计算机控制系统

初瑛仪

南京天文仪器研制中心，210042

摘要

多通道滤光器计算机控制系统是一个主—从结构的多微机系统。它负责对多通道太阳望远境的滤光器的旋转波片进行驱动，同时按天文观测的要求对波片进行程序控制，以达到观测太阳谱线的目的。下面对系统的结构，功能和软硬件作一简单介绍。

一、系统组成

系统原理由图1 所示，主机选用IBM－386系统微机，并选配一块可编程的并行数据(8255)卡，用其A口作为数据口，B口作为地址口，c口通讯联络口。

选用MCS-48系列单片机作为从机系统，共80个从机。每个从机都包括一个单片微机单元和一个步进电机驱动单元。图1中只画出一个子系统。

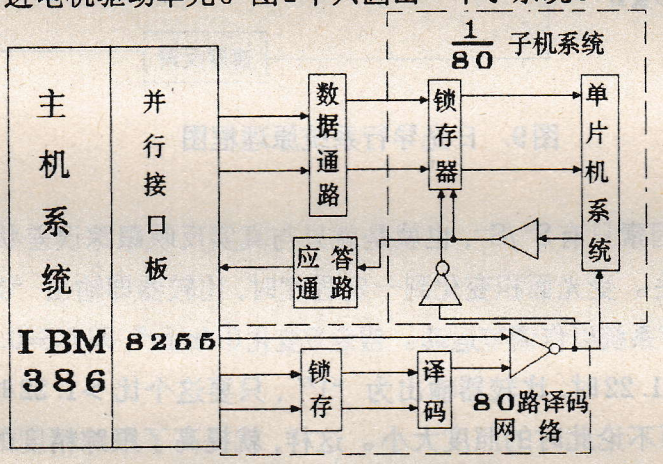


图1. 微机控制系统框图

主机和从机之间有一套接口电路，它包括光电隔离、通道号显示、数据通路、应答通路、译码网络。

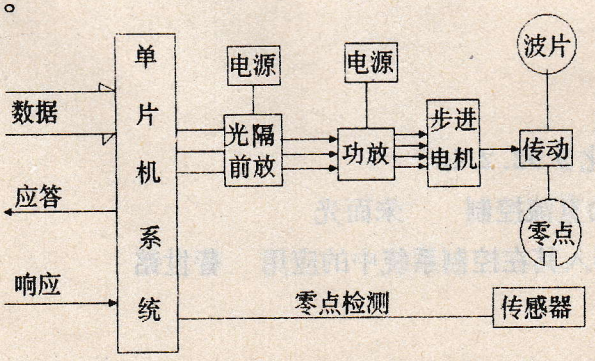


图2. 从机系统框图

数据通路又称八十路分配器，由二级驱动电路组成。使得一个八位数据总线能同

时挂上八十个从机，只要其中的一个从机被选中，总线上的数据就被该从机取走。

应答通路又称八十路转换器，它能把八十个从机的回答信号集中于一个逻辑门传送给主机，通知主机可以进行新的操作。两个通路的原理框图由图2所示。

译码网络主要用来对主机发来的预选地址进行译码，以选中相应的子机。该电路的特点是先锁存后译码，数据稳定可靠。

二、主机功能

在滤光器计算机控制系统中，主机是一台实时控制指挥仪。它不仅能选通八十个从机中的任意一个，而且对该机发送控制命令和数据。控制命令包括滤光器波片正反方向旋转及其旋转度数，波片正反方向回零等。

主机对多通道滤光器波片实行并行控制，从机系统一共有八十个通道，编码为0-79。主机先给出地址号，预选相应的子机，然后发出命令和数据，同时再发一个联络信号，通知从机，数据准备好，可以读取数据。子机接到联络信号，执行读操作，同时发一个回答信号给主机，可以执行下面的操作。这里，从机是中断方式响应主机命令，而主机则以查询方式了解从机完成工作情况。

三、从机功能

从机第一个功能是完成与主机的通讯，接收相应的命令。

第二个功能是对命令判断，确定命令的内容是运行还是回零，是正向还是反向等。

第三个功能是按命令去执行相应的程序，如步走程序，回零程序等。

从机原理框图如图3所示。单片从机系统实际是一个步进电机驱动系统，步进电机不论是正转，反转，还是回零，都是由单片机按命令执行相应的程序来完成的。单片机选用8039、2732、373等电路组成的最小单片机系统。功放单元中的光隔离提高了系统的抗干扰能力，功放电路采用单管电流斩波方法，功耗低，功率大，体积小，由5－8伏电源供电就可驱动步进电机正常运行。该电路可以作为28BF、36BF、45BF等步进电机驱动电源使用。

为了使滤光器旋转波片准确定位，单片机对波片进行零位检测，并由软件进行处理，选用带施密特电路的红外光电开关作检测元件，它由5伏电源供电，输出为TTL电平。有光通过输出为高电平，光被阻断时输出为低电平，低电平到高电平的定位精度为0.01毫米，远远超过滤光器波片0.1度的定位精度指标。

四、程序流程

主机控制程序有两个部分，一是观测程序，它由北京天文台提供。另一部分是驱动程序，它把主机的命令和数据传送给从机。驱动程序以菜单方式给出供观测人员选用。另外还有一个检测程序，供检测维护控制系统用。程序流程图由图4所示，程序用C语言编写。

从机控制程序流程图由图5所示。它由步走程序、回零程序、符号处理程序、消

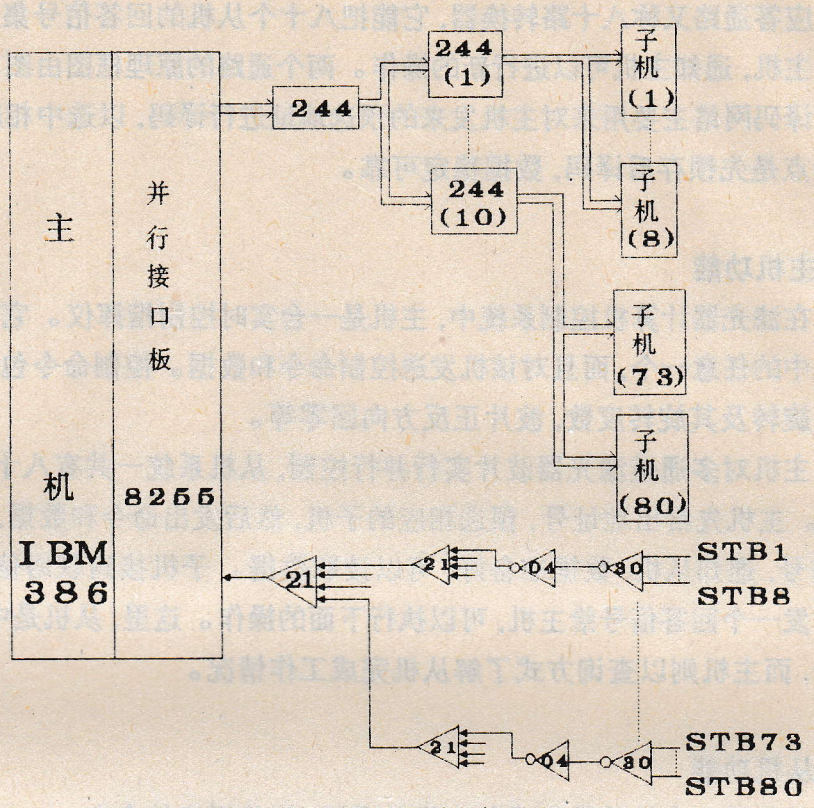


图3. 数据通路、应答通路原理图

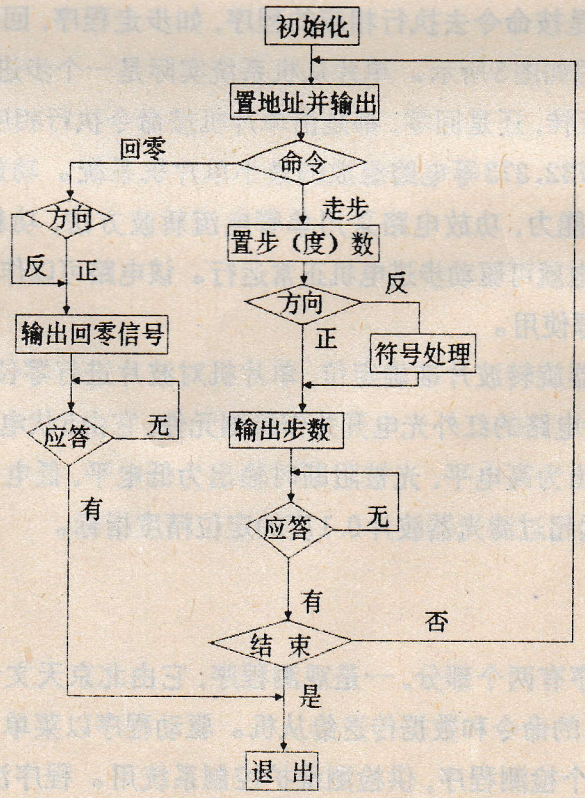


图4. 主机驱动程序框图

间歇程序等子程序组成。程序用汇编语言编写。

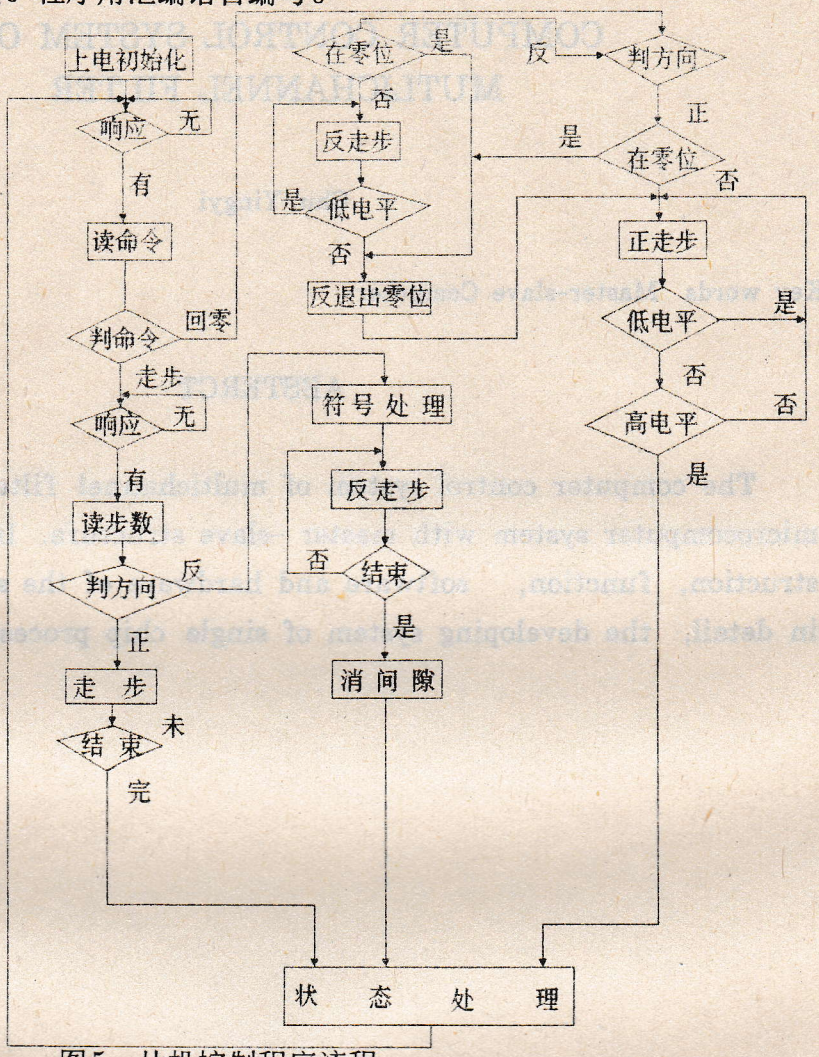


图5. 从机控制程序流程

五、系统结构特点

1. 结构紧凑：系统由一台IBM386微机和一个控制柜组成。控制柜共九个抽屉，接口占用一个电源占用三个，从机系统占用五个。

2. 采用“树型结构”方案布线，并用计算机管理。具体介绍如下：每个从机控制抽屉有4 根32芯输出电缆，共20根，编号为J1-J20，称其为根电缆，每一根电缆有四组控制信号线，共80组（实际用72组），编号为T1-T72，称其为子电缆。每一组子电缆有七根信号线分别为V，A，B，C，V0，G0，T0，共504根，编号为B1－B504，称其为枝电缆。如果要查找某滤光器的某块波片是由哪个电机控制，及所对应的信号线，电缆线及控制抽屉，只要打开计算机查其目录表即可知道。

3. 输出电缆分段对接：每根电缆从根到枝共分五段，四次转接。从控制柜到望远镜基座为一段，从基座到望远镜筒底部为一段，从镜筒到各滤光器方箱为一段，从方箱到滤光器接线板为一段，从接线板到各步进电机和光电开关为一段。各段之间都通过32芯和10芯航空接插件连接，每段电缆两头都标有相同号码标板牌，装拆时只要对号入座即可。

COMPUTER CONTROL SYSTEM OF MUTLICHANNEL FILTER

Chu Yingyi

Key words Master-slave Computer

ABSTERCT

The computer control system of multichannel filter is a multi - microcomputer system with master -slave structure. In this paper, the struction, function, software and hardware of the system are introduced in detail, the developing system of single chip processor is alsodiscribed.

多通道太阳望远镜波带调节的电控系统

叶祥明，艾国祥，张斌，宋国峰，王敬山
中科院　北京天文台

摘要

本文探讨了如何快速地实现多通道滤光器的波带调节。提出了采用集中管理分布控制的方案，并指出在这种分布控制中，其关键在通讯。对如何提高通讯的安全性，在硬件和软件上作了一些特殊的处理，并在实际使用中得到了验证。

一、前言

多通道太阳望远镜其波带调节分几个部分：通道头，Hα，SM及九通道体。其每一波片的位置由一步进电机来驱动，共72个步进电机系统。驱动每一波片的步进电机有正转、反转、回零等，都要被实时检测和控制。本文所报告的就是如何实现用一台微机来控制和管理72个步进电机系统的方案。

二、方案的设计

对多通道滤光器而言，观测波段要经常地改变，相应的滤光器的波片也总是不断地转换位置，为保证快速转换，这就要求各个电机能同时转动。每个电机的正转计数、反转计数及回零检测等都要被实时控制，故对每个电机用一个微处理器实时控制，则72个步进电机需72个微处理器。这些微处理器统一由一台PC机来集中管理，使得仅在PC机上的人机对话就能实现对各步进电机的实时控制和管理，这就是现代工业控制中广泛采用的分布式主从机控制系统（如下图示）。

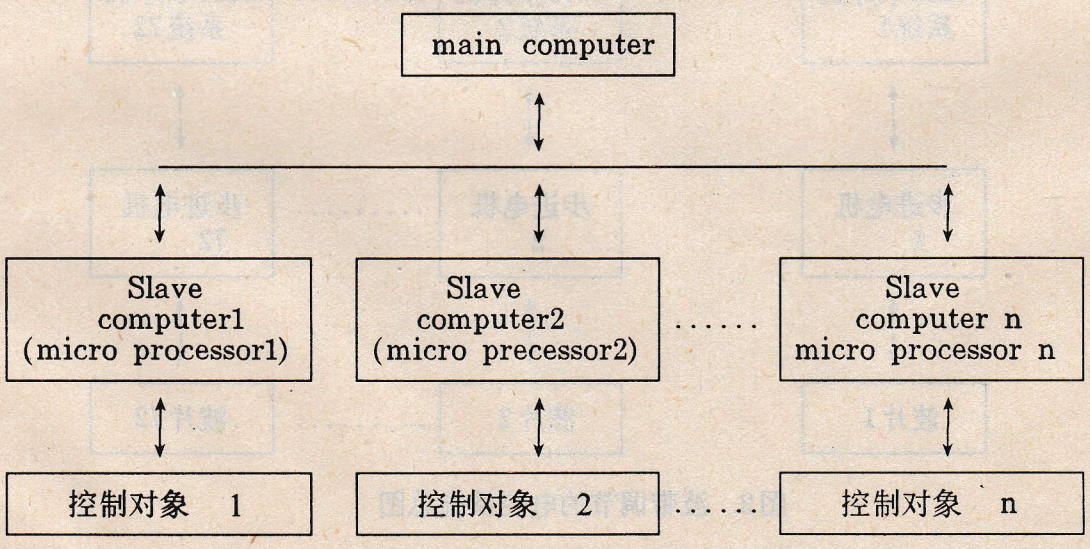


图1. 分布式主从机控制系统框图

在图1. 中，各子机对控制对象的检测控制一般是通过I／O数字接口或A／D、D／A

数模转换来进行，这些都是易于实现的。对主机和从机的信息交换才是集中控制的关键，为此，曾设计了几种方案。1. 网络连接。每个微控制器附加一块Bitbus网络板，这样硬件要附加20－30万元的投资，且控制设备庞杂，又考虑到对信息和数据的传输速度要求不高，信息和数据交换量不大，舍弃该方案。2. 微机同各控制器采用并口连接。即在微机中设一并行接口板，在各子系统中（即微控制器）也采用并口交换数据，而这又带来72个从机的地址译码问题，及双向传输的握手信号设计等等，也会造成硬件繁琐和性能不稳定。更主要的，并行传输的距离不可太长（一般短于1.5m）。综合以上分析，我们自行设计了方案3，建立了主从机的控制方案。

在方案3中，从机的连接采用RS－422的位总线接口方式，仅4根接口线。RS-422的接口方式适合于一点对多点的通讯模式，而这种通讯模式完全对应于我们的一台微机（一点）对72台微处理器（多点）的控制系统。这种接口线路能抑制共模噪声干扰，其连接距离可达1200m。除此以外，诸如附加的短路保护等使其接口安全可靠。

三、硬件设计

波带调节的电控系统如图2

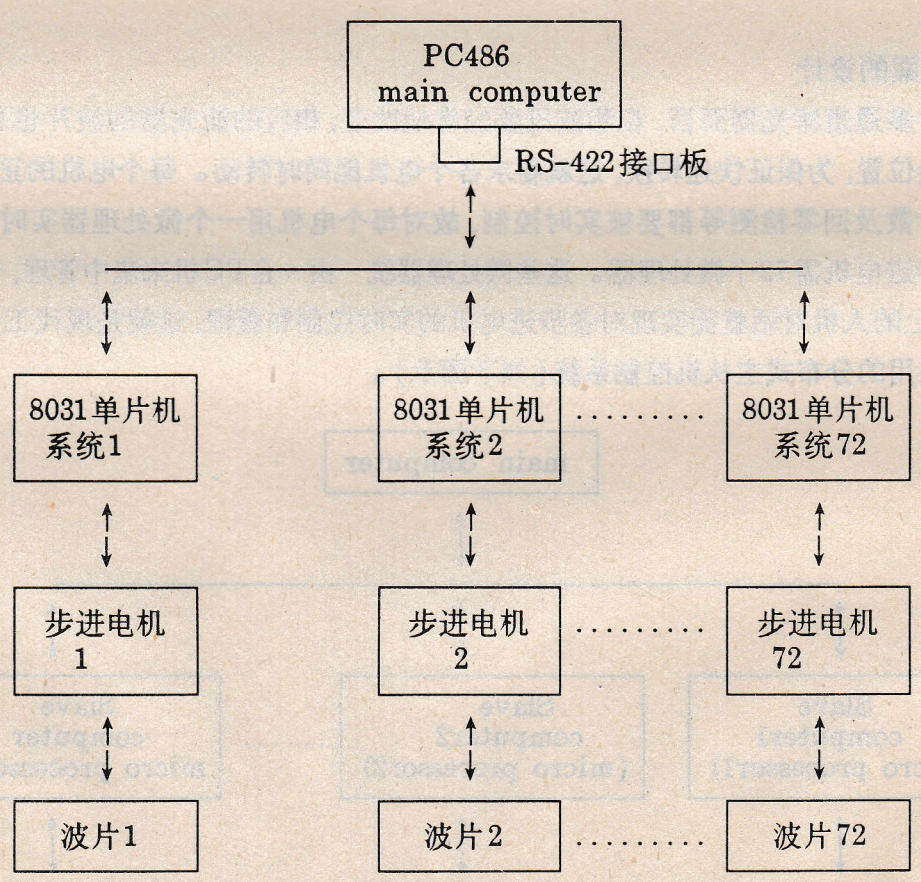


图2. 波带调节的电控系统总图

对每一8031单片机系统，我们称为一子系统，其硬件设计如图3。共包括微处理器、脉冲分配器、RS－422接口单元、步进电机放大驱动电路、看门狗等。脉冲分配

器将定时脉冲分配成步进电机所需的三相六拍的时序脉冲。看门狗的设计使系统能自我监视，保护微处理器程序的正确运行和可靠复位。

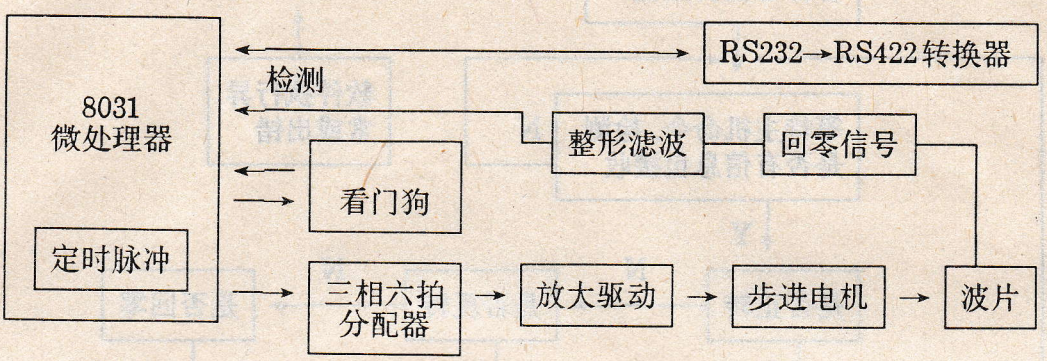
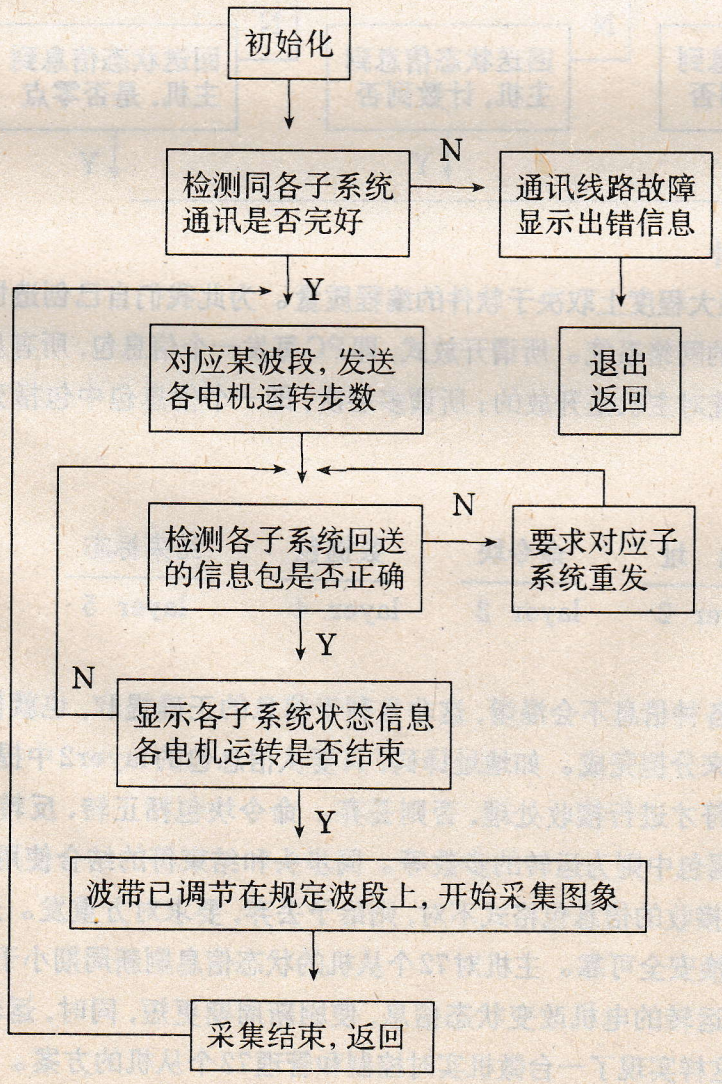


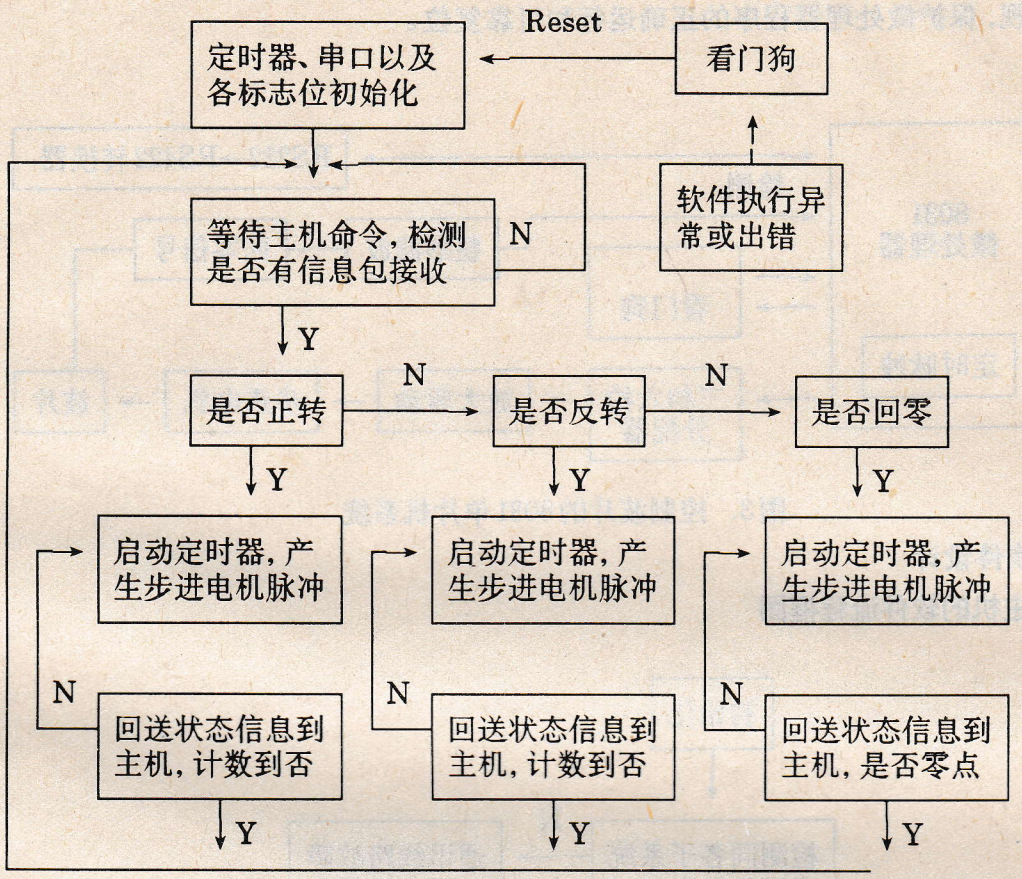
图3. 控制波片的8031单片机系统

四、软件设计

4.1 主机的软件流程框图



4.2 各子系统的流程框图



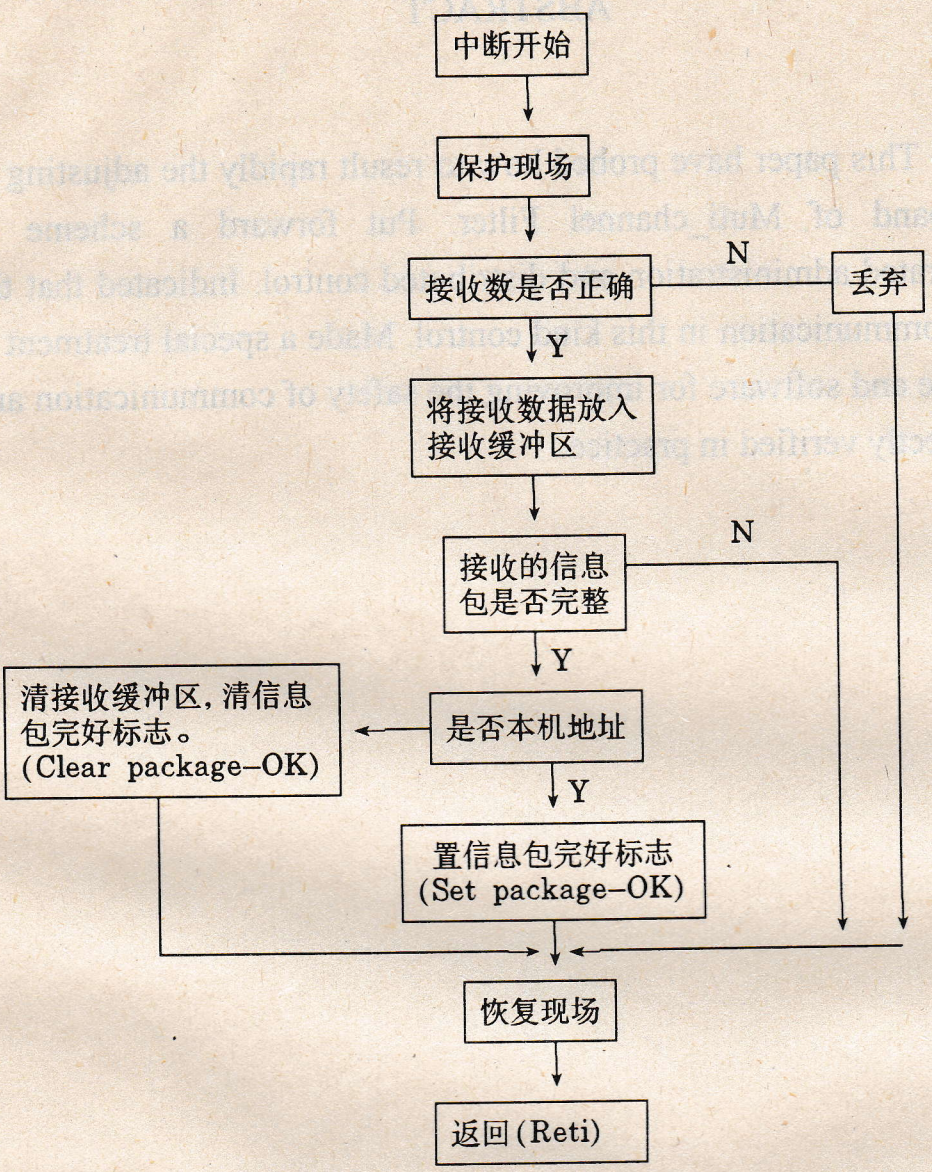
4.3 通讯系统软件的设计

信息的正确传递，很大程度上取决于软件的编程质量。为此我们自己创造性地建立了一个多层次开放式的网络系统。所谓开放式，即PC每发一个信息包，所有从机系统均接收，72个从机系统对主机是开放的；所谓多层次，即一个信息包中包括五个层次，如下所示：

同步头	地　址	命令块	数据包	结束标志
layer 1	layer 2	layer 3	layer 4	layer 5

其各层次非常分明，使各种信息不会混淆，这非常利于信息的正确提取，也就使得很多硬件上的工作由软件来分担完成。如地址译码，只要从信息包的layer2中提取，同自身比较，若同自己相符才进行接收处理，否则丢弃。命令块包括正转、反转、停止及回零复位等信息，数据包中则为运转的步数等。同步头和结束符的结合使用，使信息包格式规范化。一旦接收的信息包格式不对，则给予丢弃，要求对方重发。这种软件结构的设计使信息交换安全可靠。主机对72个从机的状态信息刷新周期小于1s，而且在软件上，我们仅对运转的电机改变状态信息，使刷新周期更短，同时，运转的电机越少刷新周期越小，这样实现了一台微机实时控制和管理72个从机的方案。

4.4 串口通讯中断服务流程图



4.5 电机控制的软件设计

电机控制的软件设计，主要要求产生精密的定时脉冲，此定时脉冲的频率选取为电机运行的最佳频率。我们利用8031的定时器产生精密的定时脉冲，并在定时中断服务程序中进行计数。对每一电机的控制采用变频方式，即开始启动时采用低频，其起动转矩大，然后逐渐增大频率，最后采用电机最佳运转频率运行，这样噪声小，运转平稳，使丢步大大减少。另外，在软件设计中对回零信号进行了数字滤波处理，这是因为步进电机的驱动线路长、电流大，其回零线的杂波干扰也较大。通过软件滤波，避免错误回零信号的检测。

五、结束语

该系统的设计关键在通讯，其开放式多层次网络结构确保通讯准确无误，这对命令准确接收和正确反应提供了保障，使太阳望远镜的波带调节既快又准地对应在观测所需的波段上。

ABSTRACT

This paper have probed how to result rapidly the adjusting of wave band of Muti_channel Filter. Put forward a scheme of concentrated administration and distributed control. Indicated that the key is communication in this kind control. Made a special treatment at hardware and software for improving the safety of communication and got correctly verified in practice.

太阳多通道望远镜滤光器恒温电控设计

陆海天

南京天文仪器研制中心，210042

摘要

本文介绍太阳多通道望远镜滤光器的恒温电控的研制过程。重点介绍使滤光器恒温精度达到长期稳定的设计方案。

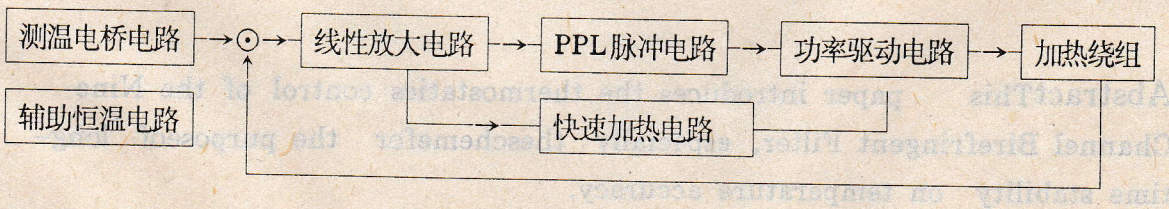
太阳多通道滤光器是一台多镜筒组合式望远镜，它一共配备有四套滤光器：Hα、0.1Å、九通道头和九通道体滤光器，四套滤光器中以九通体滤光器的结构最为复杂，为长方形结构，滤光器侧面不均匀分布了四十多只步进电机，体积为50×50×80CM，重量为250多公斤。由于这种复杂结构的滤光器以前没有人做过，因此，在正规产品之前，在中间实验装置做了大量的实验工作，并在此实验的基础上总结出经验，九通道体滤光器设计采用双层、两级恒温和端面辅助加温的控制方案。这样，就比较好的保证滤光器体内的恒温精度。由于滤光器是方形结构，温控电路共有八块长方形加热板和两个端面加热绕组构成。因为体积大，结构复杂，又需要拆卸，所以对电路的绝缘可靠性与控制可靠性有更高的要求，所以在电路和工艺设计方面作了仔细考虑。

由于共有四套滤光器，而且九通道体滤光器又是双层两级恒温，所以电控加热不采用以往以采用的可控硅作为加热驱动电路，而采用大功率三极管作为加热驱动，并使用直流电源，这样可以避免各个分系统之间的互相干扰，而且晶体管的线性度比可控硅好，从而大大提高温度控制的精度。

另外，电控电路采取测温电桥和加热绕组分开的方法，可以获得较好的控制效果。测温电桥的阻值设计为100Ω左右，可大大提高测温电桥的灵敏度，并减小检测电流引起的静态功率的增加，还可以使加热绕组的阻值设计减小为10Ω左右，这样可以减少预热和系统过渡过程的时间。

以下对滤光器的恒温电控设计作一介绍.

本恒温控制电路由：测温电桥、线性放大电路，PPM脉冲位置发生器，快加温，加热绕组及功率驱动三极管组成。原理方框图如下所示：



测温电桥的四个桥臂中的两个测温桥臂采用漆包铜线双线并绕而成，是因为铜的温度复现性好。另两个固定桥臂采用锗锰铜线绕制，锗锰铜的电阻温度系数$a = \pm 3 \times 10^{-6}$，因此它的温度稳定性大大优于普通锰铜线。

关于电桥的阻值和检测电压的取值是这样设计的。

因为电桥的误差信号 $\Delta V=\frac{a\times\Delta T}{2-a\Delta T\times V}$（V为检测电压）

又因为电桥的检测功率 $P_{检}=\frac{V^2}{R}$

由于滤光器的机械结构设计不断完善，至使保温性能也大大提高。夏季时加热功率为0.07瓦，如果检测功率过大，特别是外界温度较高时，则会引起 $P_{检}>P_{加热}$，造成温度失控。另因本级电桥测温性能有较好的稳定性和复现性，所以设计时考虑本级应有较高的灵敏度，也就是本级输出信号大些，后级线性放大器的放大倍数就可以小些，因为运算放大器的失调温漂是与温度成正比的。因此电桥的阻值设计为120Ω左右，检测电压为2V，$P_{检}$约0.03瓦，这样整个电控系统的温度稳定性就能够提高。由于滤光器与控制器之间的联线较长，分布电容杂散，所以测温电桥的检测电源采用直流电源。

电桥的误差信号经差动放大器和反相放大器放大，这一级运算放大器采用第三代运放OP-77，其温度漂移优于0.2μV/℃，时漂为0.2μV/月。放大电路中的阻性元件采用精密电阻，以降低电路的温度失调漂移。

放大后的信号分为两路：其中一路连至电压比较器，用于初开机时的快速加温，滤光器冷态时，由于误差信号大，经电压比较器输出一正电压，直接驱动功率三极管。使恒温器得到全电压加热，接近温度平衡点后，电压比较器输出一负电压，使本支路退出全电压加热。放大信号的另一路连到由555时基电路组成的PPL脉冲位置调制器中的控制端(5脚)，其工作原理是这样的：555的触发端(2脚)和阈值端(6脚)的电平一方面随电容的充放电变化，另一方面也随控制端的电位变化，即电桥的误差信号大，控制端电位就高，输出的脉冲波宽而密；控制端电位低，输出的脉冲波窄而疏。这种电路与PWM类似。

对滤光器的整机联调自出厂后历时两年，从中总结较多的经验，如仪器的整机温控性能的好坏与仪器外层设计的保温性能有关，保温措施好，电控平衡时的加势功率就小，温度控制精度就高，而且受外部环境温度变化的影响小；反之温控精度就差。所以仪器的保温措施设计是一个比较重要的课题。

AbstractThis paper introduces the thermostatics control of the Nine Channel Birefringent Filter, especially theschemefor the purposeof long-time stability on temperature accuracy.

多通道望远镜的光量测定及CCD的选配

宋国峰，艾国祥

中科院北京天文台 100080

提要

多通道太阳磁场望远镜是我国自行设计的一台综合性的太阳物理观测设备。主镜Φ600mm为格里高里反射系统，配备有目前世界上独一无二的多通道滤光器，通过此望远镜可以同时观测九条太阳谱线，反映九个不同层次的太阳物理现象。由于望远镜系统对不同的谱线的透过率、透过带宽均不相同，所以对不同谱线透过的光量的测定就非常必要。此望远镜系统的光谱分辨率很高，所以对不同的CCD在各谱线上的接收光量则不同，需要选择适合不同谱线的CCD，以获得最佳观测效果。本文根据实测的情况讨论这一问题。

一. 引言

从我国古代人们用肉眼观测太阳并最早发现太阳黑子，到近代太阳磁场的发现，太阳物理借助科学技术的发展，揭示了许多奇妙的物理现象和过程。从观测手段来讲，从眼睛到照相机，又发展的光电管，这些探测器件的发展，使得太阳的观测分辨率大大提高。无论是空间分辨率、时间分辨率，还是光谱分辨率。但是这些观测设备很难实现光学信号的量化，直到有了CCD这样的两维阵列器件，太阳物理的发展才更为迅速。

目前我国的天文学界已广泛应用CCD探测器，并已取得了令世人瞩目的成就。

1987年由北京天文台研制成功的CCD两维实时观测及处理系统[1]，开创了视频CCD(TV CCD)图象系统在我国天文界使用的先河。自此以后，全国各兄弟台站先后建起了多套视频CCD太阳观测及处理系统，见表1。这些系统大大提高了观测效率和空间分辨率，以及资料的信噪比和信号灵敏度，增强了观测设备的整体性能。

近两年，北京天文台又发展了新一代的太阳磁场测量仪器，即多通道太阳磁场望远镜[2]，还进一步提出了球载和流动太阳望远镜计划，空间太阳望远镜计划[3]，红外太阳磁象仪计划[4]等一系列建造具有国际水平的太阳观测设备的计划。无疑这些设备都需要配备满足仪器性能指标的CCD探测器。

CCD的技术的发展，提供了各种型号、各种性能参数不一的可供选择的产品类型。在满足灵敏度、信噪比等性能指标的前提下，价格因素也是应用选择的一个不可忽视的方面。下面各节详细介绍我们为多通道太阳磁场望远镜选配CCD的一些考虑。

二. 多通道太阳磁场望远镜的特点及对CCD要求

多通道太阳磁场望远镜包括五台不同口径的望远镜系统，其中以配置九通道滤光器的反射真空望远镜为主。仪器的主要性能见表2，望远镜结构如图1示。

表 1. CCD 视频图象处理系统在我国太阳仪器中的应用

单位	系统名称	CCD型号	CCD像元数(H×V)	配用图像处理器型号	主控计算机	工作方式	配用望远镜或系统	开始投入使用时间
北京天文台	VMG System of SMFT	PULNIX TM-560C	500×582	ITI SR151 Image processor	AST/P386C	多帧叠加帧加，帧减相除	太阳磁场望远镜	1987年
	VMG System of SMCT	PULNIX TM-860N×3	800×590	ITI SR151 Image processor	AST/P486	1. 同上 2. 视频录相	太阳多通道望远镜	1994年
	VMG System of SFDMFT	VIDEK MEGAPLUS	1320×1035	ITI SR151 High resu. Image processor	AST/P386	多帧叠加帧加，帧减相除	太阳全日面磁场望远镜	1991年
	太阳白光耀斑观测系统	PULNIX TM-46	384×491	ITI SR151 Image processor	IBM/AT	多帧叠加多波段交替	太阳白光望远镜	1990年
	VMG System of SMCT	MTV 1802	796×590	ITI SR151 Image processor	AST/P486	多帧叠加帧加，帧减归算	太阳多通道磁场望远镜	1994年
	VMG System of SMCT	MTV1881EX	796×590	ITI SR151 Image processor	AST/P486	多帧叠加帧加，帧减归算	太阳多通道磁场望远镜	1994年
	VMG System of SMCT	LZ 2122	512×582	ITI SR151 Image processor	AST/P486	多帧叠加帧加，帧减归算	太阳多通道磁场望远镜	1994年
云南天文台	太阳精细结构终端系统	PULNIX TM-560C TM-765	500×582 756×581	ITI SR151 Image processor	AST/P386	多帧叠加	太阳精细结构望远镜	1990年
	太阳两维光谱观测系统	PULNIX TM-760 TM-765	756×581	ITI SR151 Image processor	AST/P386	开窗处理多波段交替	太阳光谱望远镜	1991年
紫金山天文台	太阳近红外波段观测系统	PULNIX TM-860N	800×590	ITI SR151 Image processor	AST/P386	多帧叠加	太阳望远镜	1991年
	太阳精细结构终端系统	PULNIX TM-860N	800×590	ITI SR151 Image processor	AST/P386	多帧叠加	太阳精细结构望远镜	1994年
新疆	太阳白光耀斑观测系统	PULNIX TM-46	384×491	ITI SR151 Image processor	IBM/AT	多帧叠加多波段交替	太阳白光望远镜	1990年
南大	太阳两维光谱观测系统	PULNIX TM-560C TM-765	500×582 700×581	ITI SR151 Image processor	AST/P386C	开窗处理多波段交替	太阳塔	1991年

表2. 多通道太阳磁场望远镜性能参数

主镜口径：Φ600mm

反射系统等值焦距：10000mm

系统焦距：12000mm，6000mm，400mm可选

付镜放大率：20/3

主镜焦距：1500mm

主镜相对孔径：1:2.5

优选谱线：3968Å，4686Å，5173Å，5247Å，5250Å，5576Å，6302Å，5876Å，6563Å

采样视场：4′ ×5′，3′ ×2′ 或8′ ×6′

滤光器半宽：0.047Å～0.5Å

电光调制器：一组宽场全色KD*P调制器，九个通道共用

有效接收器象元数：512×512

光电导行精度：＜2″

光电导行速度：＜2″/s

望远镜理论分辨率：0.17″（4000A）～0.27″（6600A）

几何分辨率：0.52″

可观测磁场温度：±2高斯～3000高斯

多通道太阳磁场望远镜由上表可以看出：

①它可以同时观测太阳上同一活动区的九条谱线所反映的不同的物理内容，且滤光器万能可调，可见光区其它磁敏线同样可以用此系统进行观测。在整个可见光区虽是离散分布，但几乎包含了整个可见光区的范围。由于CCD成象器件的光谱响应是由光敏面的材料决定的，本征硅的光谱响应大约在0.4～1.1μm之间，但光谱响应曲线的形状，受多方面的影响。光敏面的结构，各层介质的折射率和消光系数，各层介质的厚度，入射光的入射角等，都可影响光谱响应曲线的形状。在整个可见光区，不同的CCD其光谱响应曲线形状各异，对特定的谱线的响应率有高有低。对可见光区的几乎所有谱线来说，在这么宽的光谱范围内找出都有良好的响应率的同一类型的CCD是很困难的，因此需要选择峰值响应与测量波长相应的CCD。

②太阳是一个非常强的辐射源。望远镜口径，镜面反射率，滤光器的透过率等参数都还比较高，但由于磁场测量的需要[5]，滤光器的透过带宽非常窄（0.047Å～0.5Å），照度实测在0.5lus～3lux左右，实测光量太小则要求采用灵敏度高的CCD。同时由于有效信号比较弱，则杂散光等噪声相对就比较强，因此要求选用量子效率高、读出噪声小的CCD器件。

③九个CCD同时观测，共用一组电光调制单元，则要求九个CCD与电光调制器同步工作，要求所选用CCD具有外同步功能。

④要观测太阳的能量爆发和其它太阳物理现象，这些现象源于磁场的强烈变化，约为

几十至几千高斯，表现为几百倍的光度变化，要测量这一光度变化，则要求CCD的动态范围至少50db，且光敏元要有良好线性响应。

在实际工作中我们调查了几十种不同型号CCD在上述要求的基础上进行判断，计算和实测，确定了几种目前较为实用的CCD。

三. 几种CCD的特性及选配

我们试用过的几种CCD性能如表3所示。

表3. 几种CCD的性能参数

CCD型号	像元数	像元尺寸	灵敏度	信噪比	光谱响应	峰值波长	生产厂家
PULNIX TM-560	500×582	17×11 μm^2	2 Lux	60db	400-1000	560nm	美国PULNIX公司 1300$
PULNIX TM-760	756×581	11×11 μm^2	2 Lux	50db	400-1000	760nm	美国PULNIX公司 2350$
PULNIX TM-860N	800×590	11.5×11 μm^2	2 Lux	50db	400-1100	860nm	美国PULNIX公司 2350$
VIDEK MEGAPLUS	1320×1035	6.8×6.8 μm^2	0.2 $\mu J/cm^2$ 饱和曝光	>48db	400-700	630nm	Kodark 14,000$
MTV1881EX	796×590	10×11 μm^2	0.02 Lux	50db	320-1100	680nm	台湾敏通公司 ￥3000
MTV1802CB	796×590	10×11 μm^2	0.02 Lux	50db	320-1100	680nm	台湾敏通公司 ￥3000
LZ-2122	512×512	11×10 μm^2	0.02 Lux	60db	400-1100	500nm	日本￥9000（含图象板）
Fairchild CAM3500F	488×380	30×18 μm^2	10^{-3} Lux	50db	500-1100	800nm	美国仙童公司 3000$

由表3和图2到图6，我们可以判断在短波的3968Å，4686Å等谱线使用对蓝光比较敏感的LZ2122似乎比较合适，对长波方向的红光区，如6563Å以及6302Å，5876Å等光谱区，似乎使用TM860更合适，而对5500A附近的绿光区的几条谱线，几乎所有的CCD都有可能应用。而从灵敏度和信噪比两项指标分析，TM560、MTV1881EX和1802CB更有竞争力，具有高的性能价格比。而仙童公司的CAM3500灵敏度较高，但解析度较差，价格较上述两种又偏高，只有在十分需要时才可选用。实际使用中我们第一步先选择TMTM560，TM860，MTV1881EX和1802CB，LZ2122等供观测使用。计划购买几只性能更高些的CCD。目前还在进一步的调研中。下面表4列出的几种CCD是可供选择的部分类型。

表4. 几种高灵敏度或高解析度的CCD

CCD型号	象元数	象元尺寸	灵敏度	信噪比	光谱响应范围	峰值波长	厂 家
512TKB	512×512	27μ×27μ 13.8×13.82mm	20e	25000 : 1	260~1080nm	650nm	美国普林斯顿公司
1024TKB	1024×1024	24μ×24μ 24.58×24.58mm	8e	25000 : 1	260~1080nm	650nm	美国普林斯顿公司
CCD412	512×512	15μ×15μ 7.68×7.68mm	25PA /cm²	10000 : 1	400~1000nm	680nm	美国仙童公司
CCD422	1024×1024	15μ×15μ 15.30×15.36mm	25PA /cm²	10000 : 1	400~1000nm	700nm	美国仙童公司
CA-D9 0512	512×512	10μ×10μ 5.12×5.12mm	100PS /cm²	3000 : 1	420~880nm	780nm	加拿大达格斯公司
CA-D9 1024	1024×1024	24μ×24μ 24.58×24.58mm	0.4LSB	6000 : 1	420~880nm	780nm	加拿大达格斯公司
CA-D2 1024	1024×1024	10μ×10μ 10.24×10.24mm	100PS /cm²	3000 : 1	420~880nm	780nm	加拿大达格斯公司

四. 几种CCD的初步观测结果

经过调研、调试和测试，在系统焦距6M时使用几种CCD进行观测，分别得到单色象、磁图等资料，我们对这些资料进行了比较。

同样波长、同一观测条件下，TM560，TM860，MTV1802/1881的比较表明：TM860型CCD灵敏度较低，特别是蓝光区响应度很低。MTV1802和1881型CCD，其灵敏度较高，但信噪比还不够理想，在紫光区其响应度也不高，3968Å谱线上无法观测。

MTV1802型CCD增益、反差、同步等，全部采用外部控制，控制上考虑是比较理想的机型。目前正式观测使用的以此型号为主。

附图为用此CCD观测的各波长单色像的照片和部分磁图。

五. 结果与讨论

虽然利用此系统已能达到多层磁场观测的目标，但CCD的选择仍然不能满足保障不降低望远镜光学分辨率的目标。因为实际使用的望远镜由于CCD灵敏度不够和望远镜光量太弱的原因，系统焦距较短，太阳像比较小。所以CCD靶面所对应的视场较大，而CCD的解析度又受到实际工艺的限制，几何分辨率只能达到0.6″，远远低于望远镜的极限分辨率。这样就限制了用图象处理方法以消除大气干扰而获得望远镜极限分辨率观测的可行性。这一问题可以从两个方面解决，一方面如果现有解析度的CCD其灵敏度能大幅度提高，则可增大系统焦距，减小靶面对应视场，使几何分辨率满足极限分辨率观测要求；另一方面在象元灵敏度不能大幅提高的前提下，提高系统单位面积

象元数，也可以满足几何分辨率的要求。随着CCD设计水平、制作工艺水平的提高定能满足我们的需要，目前进一步的工作正在进行。

参考文献

[1] 明长荣，天文学报，Vol. 29，No. 4，P346，1988

[2] Ai Guoxiang，A Brief Introduction to the Multichannel Solar Magnetic Field Telescope，(Press print)

[3] 艾国祥，张和祺，张柏荣，空间太阳望远镜，(Press print)

[4] 宋国峰，重庆会议文集

[5] 北京天文台台刊，8

The CCD Detector of the Multi-channel Solar Magnetic Field Telescope

Guofeng Song, Guoxiang Ai,

Beijing Astronomical Observatory

Chinese Academy of Sciences

Beijing 100080

Abstract. There are thirteen CCD camera in multi-channel solar magnetic field telescope. These CCD camera are all video cameras used in different environment, different telescope diameter, different solar image size, different spectral line. When we decided which camera can use in one of the conditions, we must master the parameter of the it. In this paper, we discussed the determination of the MCST's cameras.

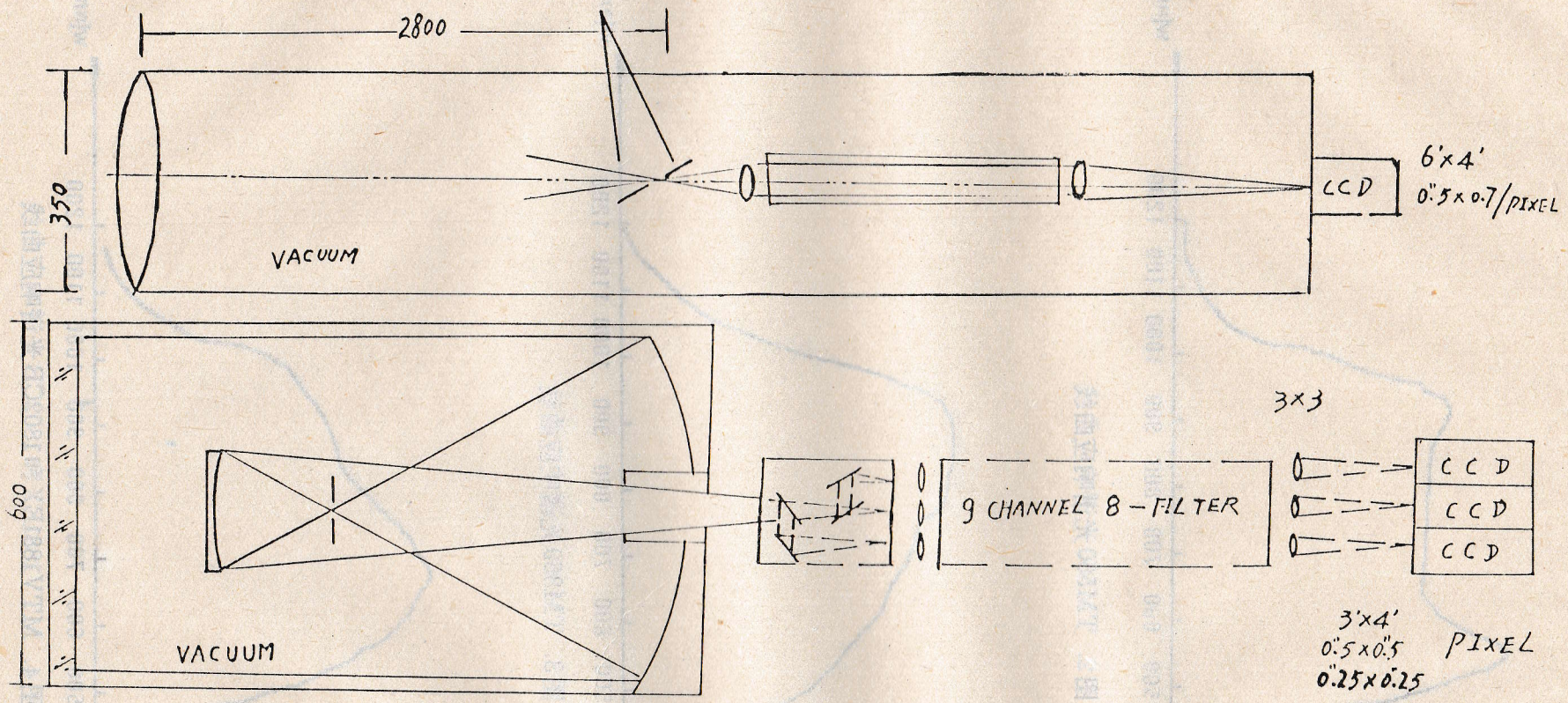


图1. 多通道太阳望远镜示意图

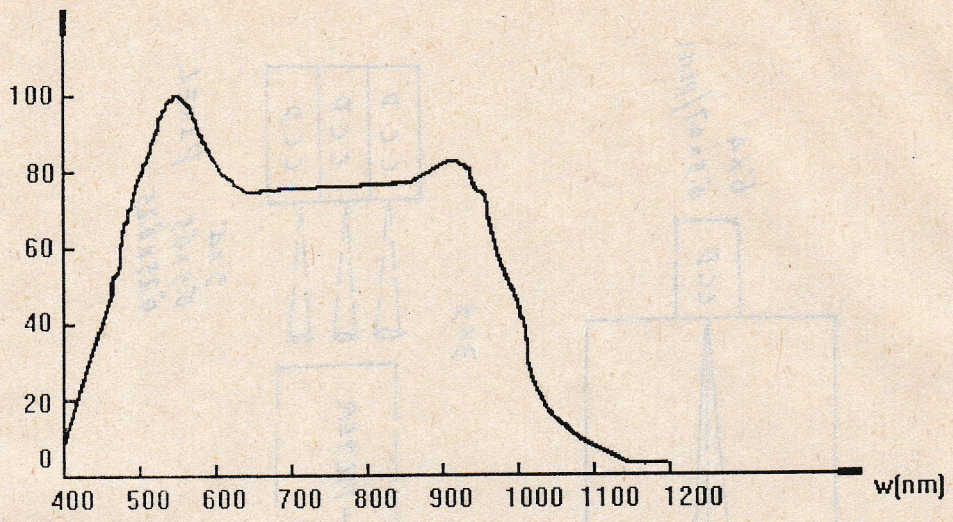


图2. TM560光谱响应曲线

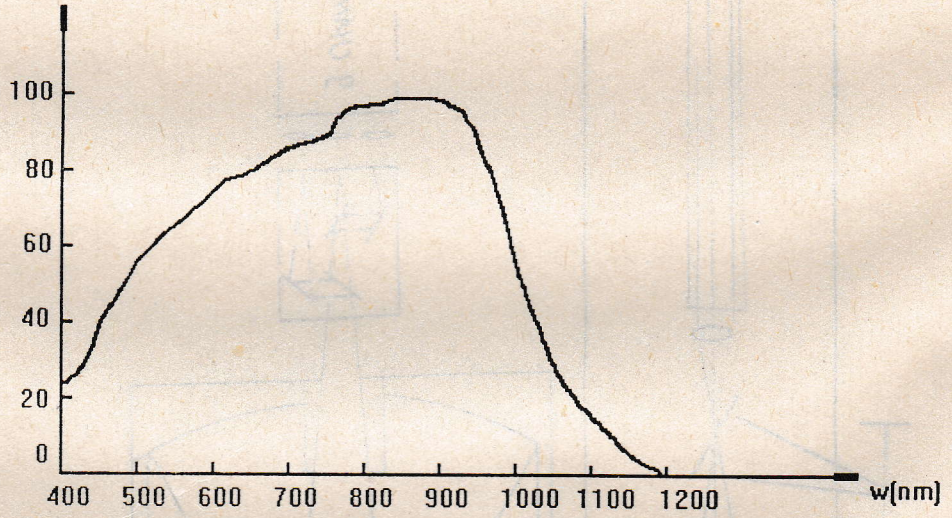


图3. TM860光谱响应曲线

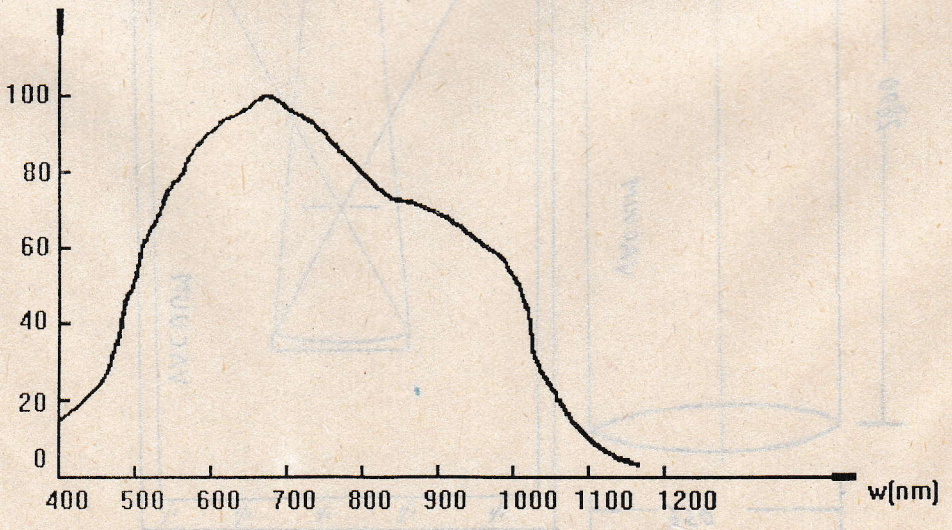


图4. MTV1881EX和1802CB光谱响应曲线

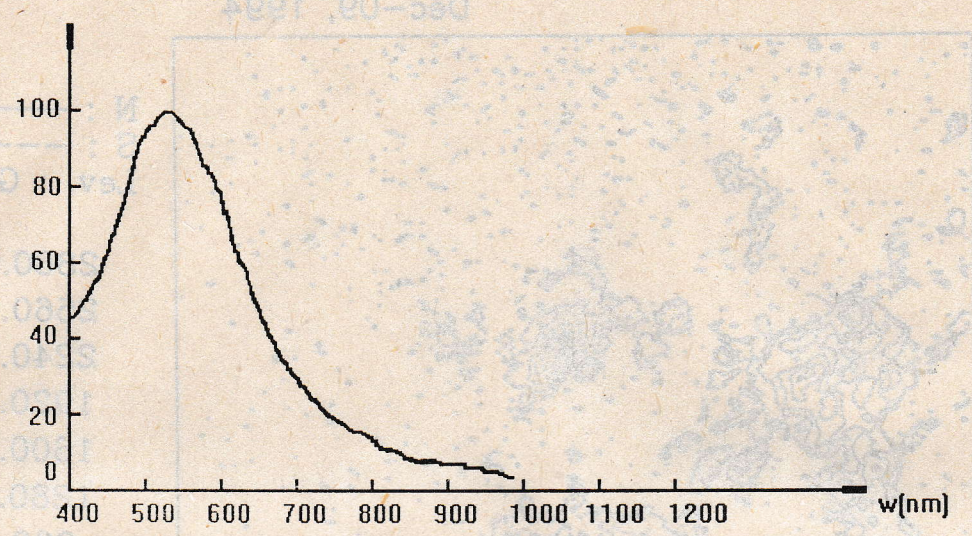


图5. LZ2122光谱响应曲线

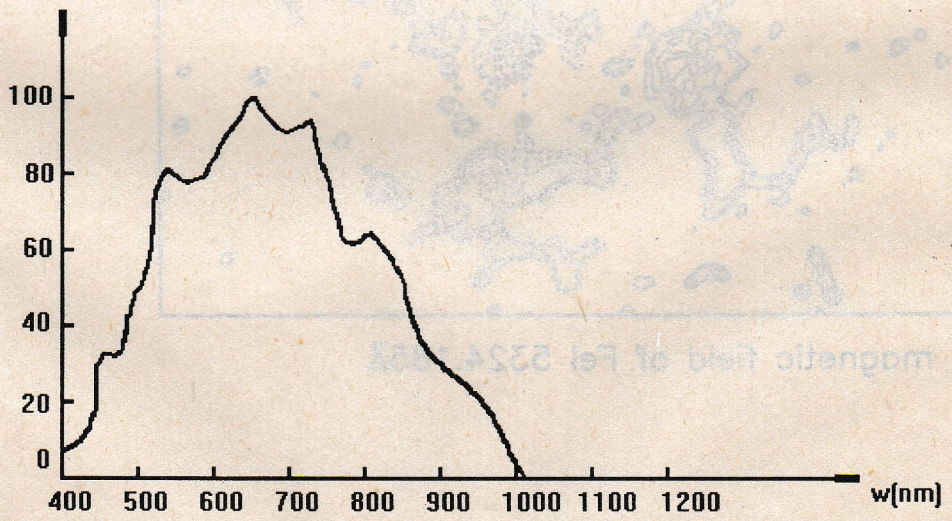
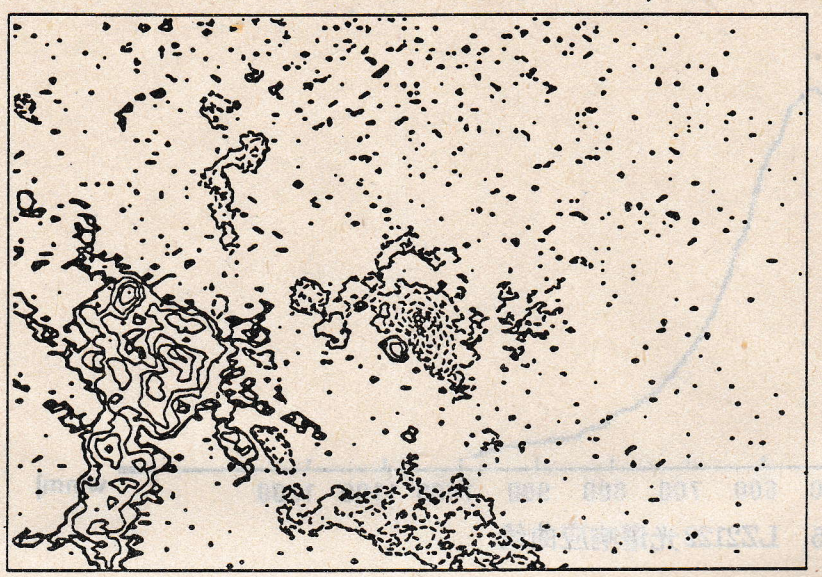


图6. VIDFK MEGAPlus光谱响应曲线

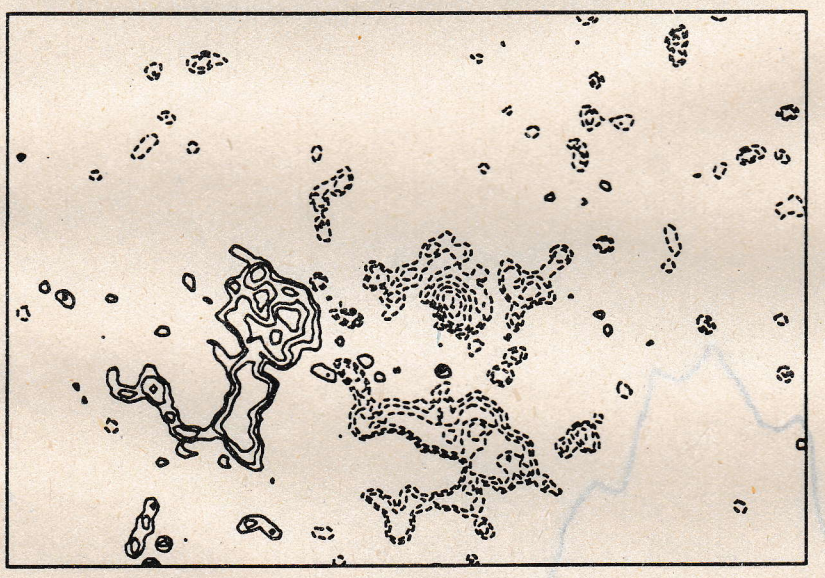
Dec–09, 1994



N : ————
S : – – – – – –
Lev. : Gauss

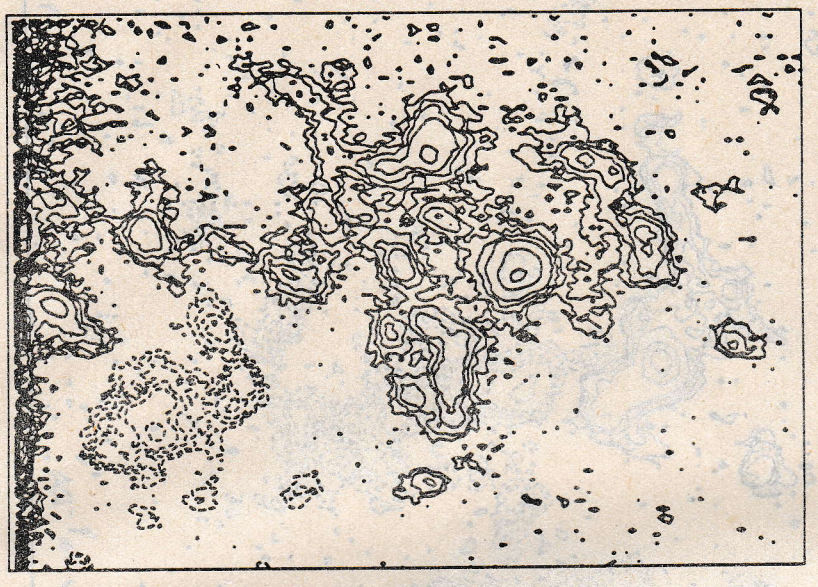
2880.0
2560.0
2240.0
1920.0
1600.0
1280.0
960.0
640.0
320.0
160.0
80.0
40.0

magnetic field of FeI 6302.507Å

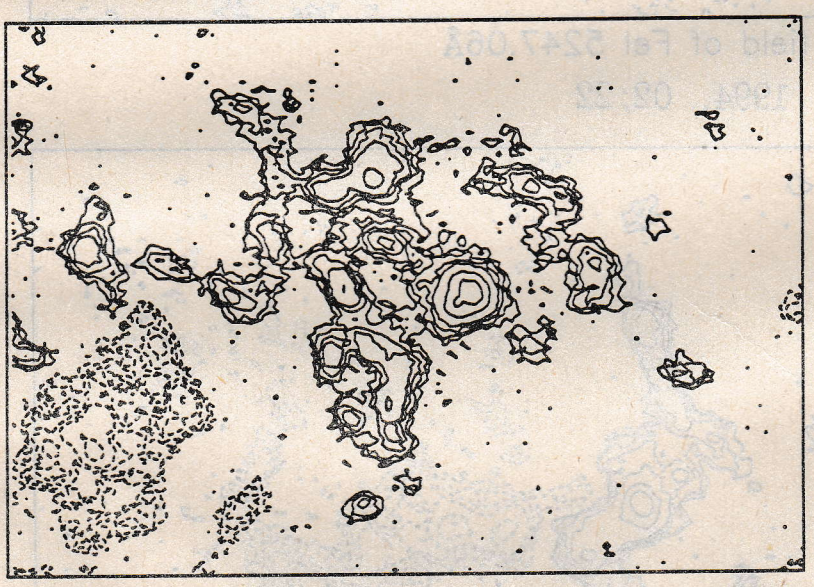


magnetic field of FeI 5324.185Å

07:50, Dec-09, 1994



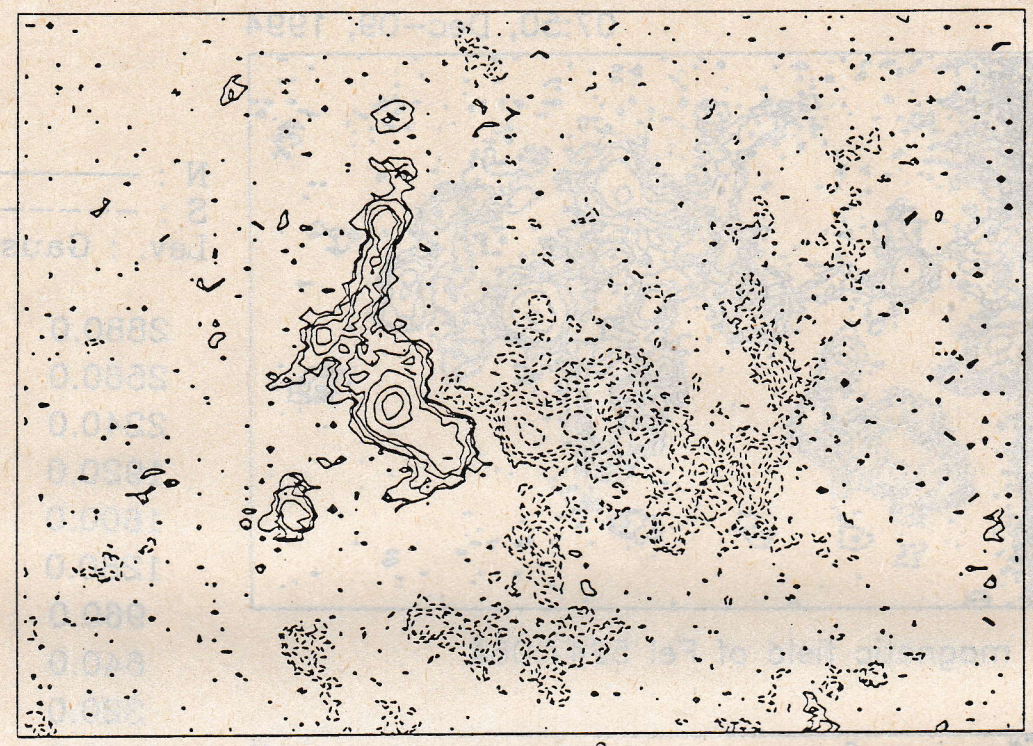
magnetic field of FeI 5247.06Å



magnetic field of FeI 5250.22Å

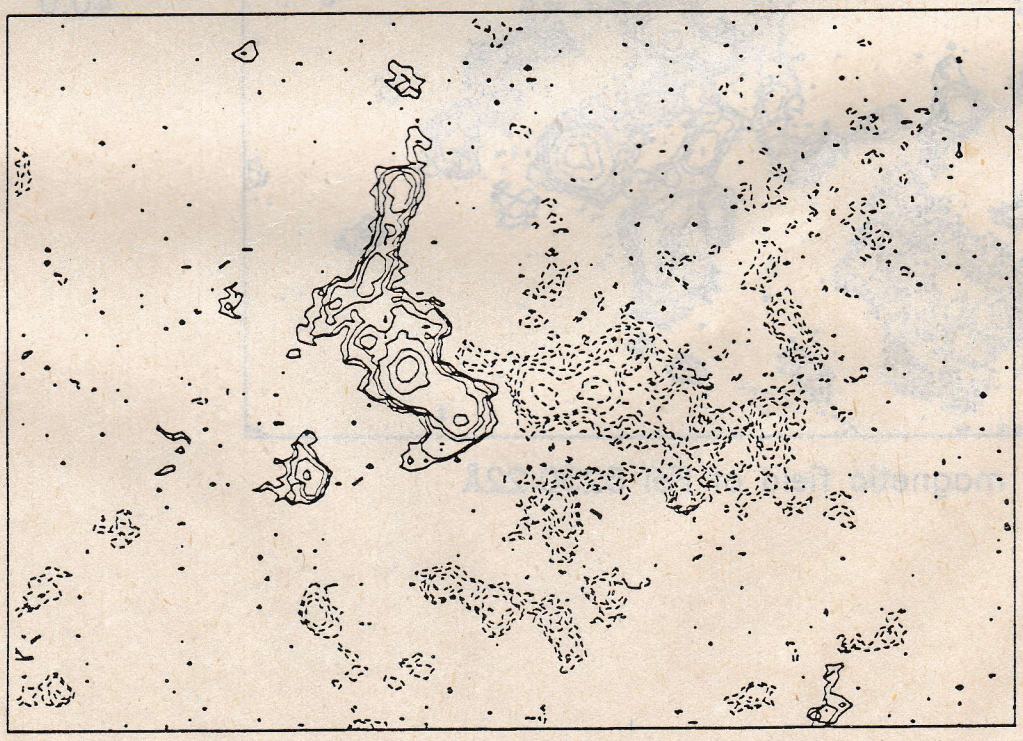
N : ————
S : - - - - - -
Lev. : Gauss

2880.0
2560.0
2240.0
1920.0
1600.0
1280.0
960.0
640.0
320.0
160.0
80.0
40.0



magnetic field of FeI 5247.06Å

Aug. 28, 1994, 02:22

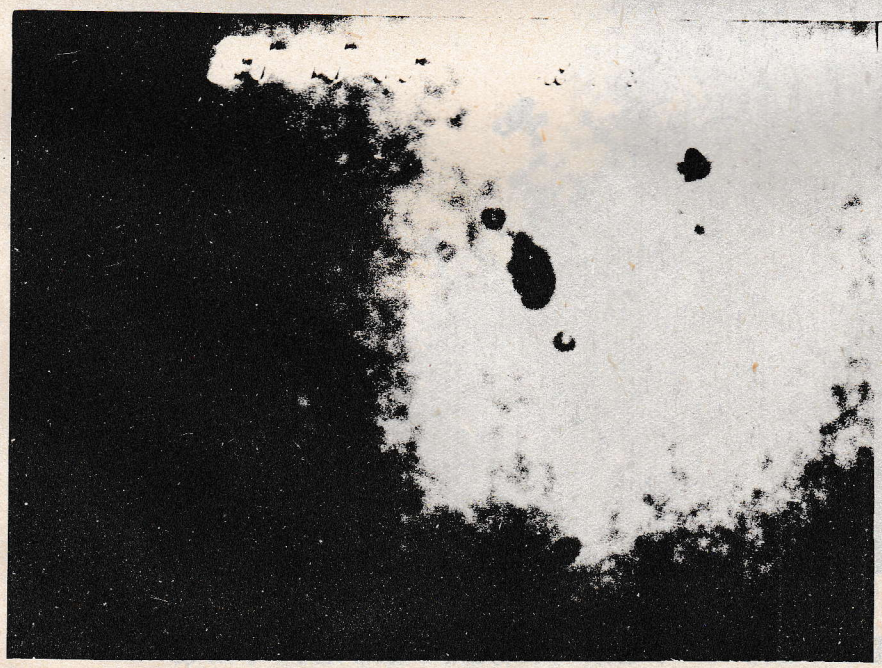


magnetic field of FeI 5250.22Å

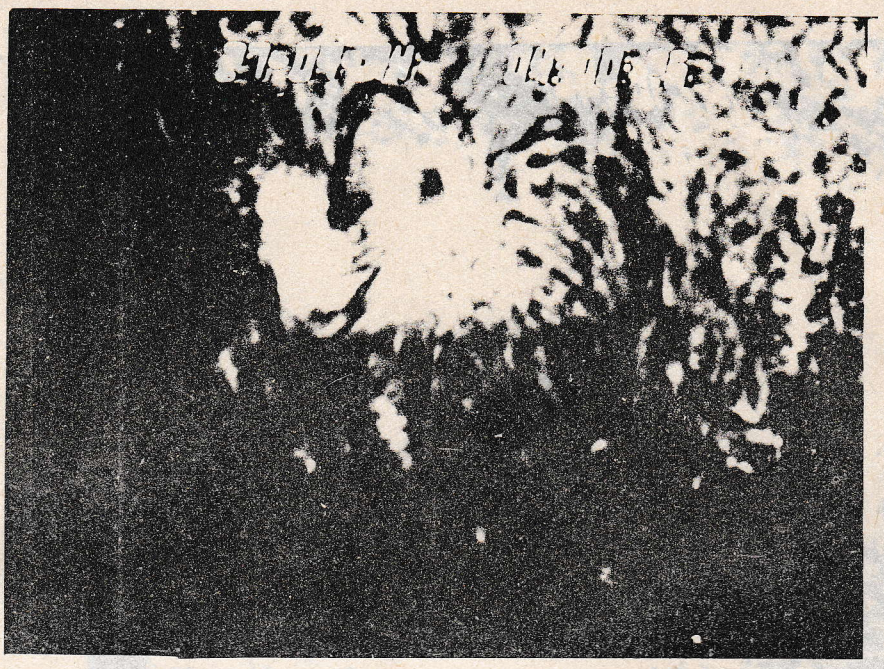
Aug. 28, 1994, 02:22

图7. 九通道各磁敏谱线观测磁图

九通道望远镜4686单色像：资料先用录像带记录，事后放像翻拍。视场约4.′5×3′，黑子靠近日面中心。正上方沟状物为CCD上脏物，右边略有挡光。



九通道望远镜5250单色像：资料先用录像带记录，事后放像翻拍。视场约4.′5×3′，黑子靠近日面边缘。黑色圆圈为CCD上灰尘。



九通道望远镜Hα黑子照片：资料先用录像带记录，事后放像翻拍。视场约4.′5×3.′0，活动区在日面东南方向。曝光时间1秒，光圈4，焦距0.5米。

九通道望远镜5876单色像：资料先用录像带记录，事后放像翻拍。视场约4.′5×3′，黑子靠近日面边缘。黑色圆圈为CCD上灰尘。

图8. 多通道太阳望远镜部分谱线单色像。

多通道太阳望远镜电控设计研制介绍

朱立卿

南京天文仪器研制中心，210042

摘要

本文介绍多通道太阳望远镜的电控设计系统，包括驱动控制、九通道滤光的工作状态的计算机控制以及滤光的恒温控制。

多通道望远镜自一九八五年开始研制，于90年10月到北台安装并于92年底完成。电控系统的设计思想主要是以满足使用需要为原则，全面考虑光学和机械对电控的设计要求和综合布局，制定电控的最佳控制方案。

多通道望远镜是一台多镜筒组合望远镜，它配备有四套滤光器（九通道体滤光器、九通道头滤光器、H α 滤光器、0.1Å 滤光器）。并且配备的各种电器多，其中有交流、直流、及高压电器。由于系统中使用计算机，因此各种电器产生的磁场和电场干扰，对计算机的稳定工作影响很大，所以对电控设备和线路的布局是一个需要认真考虑的课题。

望远镜电控系统包括：望远镜驱动控制系统、多通道体滤光器计算机控制系统、滤光器恒温控制系统。为使各个系统工作稳定可靠，各系统的布局采用了分柜积木化设计。各自柜中的布局安排采取交流电器抽屉远离直流电器抽屉，大电流线路远离信号线路，并采取信号线屏蔽传输，以减少电源噪声及传输通道对电控系统的干扰。

另外，对电路的布线采取了特殊设计 ——“树形”结构的分线方法，这种布线方法的特点是线路走向清楚，便于检查和维修。

随着电子工业的日新月异的发展，元器件的更新换代是一个比较突出的问题。为保证仪器的可靠性和先进性，所以在课题下达研制的开始，就用大量时间对市场进行技术调研。尽量使用新型元器件、组件。并对控制对象的功能进行优化设计，尽量用先进的数字逻辑电路代替继电器逻辑电路，使电控设备的体积大大缩小，控制功能增强，可靠性提高。

在仪器设备的装配过程中，注重采用先进工艺。对元件、接插件、印制板的标准化和互换性，焊接和布线工艺都做了严格的、科学的处理。以下对各分电控系统做一简要介绍。

一、多通道太阳望远镜驱动系统

多通道组合太阳望远镜根据设计安排，驱动系统采用多电机，差动传动机构，再经蜗轮付驱动望远镜。按使用要求，除设置恒动及导行外，还设置有快动、慢动、反向拉偏等功能；用电磁离合器将恒动等与主传动轴联结起来。为了消除蜗轮付的啮合齿隙，加上反力矩电机机构。

为了使用方便，控制功能键分别放置在手控盒、操作盒以及控制柜面板上。

在系统设计时，力求简单、实用、可靠。实践证明已经收到了较好的效果。以往的恒动驱动皆采用恒频电源来驱动磁滞同步电机，不仅增加成本，加大工作量，而且随着器件数量的增多，故障率也增加。实际上，太阳的运动并不是很规则的，即使恒频电源质量做的很高，对望远镜的跟踪精度价值也不大。因此，该望远镜直接采用市电驱动恒动的磁滞同步电机，用较高的恒定的导行精度来保证跟踪精度，收到了较为满意的效果。

慢动、反向拉偏和导行驱动电路，采用当时较为先进的脉冲调宽直流调速系统。根据本望远镜的实际需要，进行了必要的改进，增加了一些功能电路，使PWM控制方式适用于望远镜的驱动。

在光电导行电路设计中，采用了一种全新的误差处理方法，将对数电路应用于误差处理，消除了太阳照度因四季和早、中、晚及云层厚薄的变化而引起的跟踪精度的变化，达到了导行精度恒定，大大提高了跟踪精度。

二、滤光器计算机控制系统

多通道望远镜配备有四套滤光器。驱动滤光器内波片旋转的步进电机共有51套。考虑到使用方对电控要求驱动波片位置转换的快速性、可靠性，并且波片的旋转精度要求优于0.1度，微调周期（波片旋转3度时）小于0.05秒。因此控制系统采用智能型及扩展性灵活的主——从结构的多微机系统。在滤光器计算机控制系统中，主机是一台实时控制的指挥仪，它对滤光器波片旋转实行并行控制，从机系统共可扩展为八十通道。

主机选用IBM-386微机，并配备有一块可编程并行数据卡(8255)，用其A口作为数据口，B口作为地址口，C口作为通讯联络口。从机系统包括MCS-48系列单片机和步进电机驱动单元。

主机和从机之间有一套接口电路。它包括光电隔离、通道号显示、数据通路、应答通路和译码网络。

在滤光器微机控制系统中，主机是一台控制指挥仪。它不仅能选通八十个从机中的任意一个，而且对该从机发送控制命令和数据。控制命令包括滤光器波片正反旋转及角度，波片正反方向回零等。

从机的功能是接收主机的命令，并且判断命令的内容，然后执行相应的运转程序。从机系统实际是一个步进电机驱动系统，步进电机的运转都是由单片机执行程序完成的，功放电路采用光电隔离提高系统的抗干扰能力。功放电路采用电流斩波方式，使输出功率大。

为使滤光器旋转波片准确定位，选用带施密特电路的红外光电开关做定位检测，定位精度达0.01度。

三、滤光器恒温控制系统

多通道望远镜共四套滤光器：Hα、0.1Å、九通道头、九通道体滤光器，四套滤

光器中以九通体滤光器的结构最为复杂，为长方形结构，体积为50×50×80CM，重量大于250kg。滤光器侧面不均匀分布了四十多只步进电机。由于这种复杂结构的滤光器以前没有人做过，因此，在正规产品之前，在中间实验装置上做了大量的实验工作，并在此实验的基础上总结出经验。九通道体滤光器的设计采用双层、两级恒温和端面辅助加温的控制方案。这样，就比较好的保证控制体内的恒温精度。由于滤光器是方形结构，温控电路共有八块长方形加热板和两个端面加热绕组构成。因为体积大，结构复杂，又要拆卸方便，所以对电路的绝缘可靠性与控制可靠性有更高的要求，所以在电路设计和电路工艺设计方面作了仔细考虑。

由于共有四套滤光器，而且九通道体滤光器又是双层两级恒温，所以恒温电控不采用以往采用的可控硅控制方式，而采用大功率三极管作为加热驱动，并使用直流电源，这样可以避免各个分系统之间的互相干扰，而且晶体管的线性度比可控硅好，所以可大大提高温度控制的精度。

另外，电控电路采取测温电桥和加热绕组分开的方法，获得较好的控制效果。测温电桥的阻值设计为100Ω左右，大大提高测温电桥的灵敏度，并减小检测电流引起的静态功率的增加，加热绕组的阻值设计减小为15Ω左右，这样可以减少预热和系统过渡过程的时间。

太阳多通道望远镜自一九九零年在北京天文台怀柔观察站安装以来，经过多年实际观测，至目前为止，运转正常。各项性能、指标均已达到设计任务书要求。

多通道太阳望远镜的部分调试

宋国峰，艾国祥，王敬山
邓元勇，张斌，叶祥明
中科院　北京天文台 100080

摘要

太阳多通道望远镜是目前世界上唯一的一台能够同时观测太阳同一活动区不同谱线的两维磁场、速度场等物理量的天文观测仪器。它是集光、机、电等技术于一身的综合性设备。此望远镜虽由于太阳磁场观测的特殊性和复杂性有许多技术难点和问题，但经过几年的刻苦攻关，于九一年部分投入试观测使用，九四年全部交付试观测，为我国太阳物理学走在世界前沿提供了技术基础。本文叙述多通道太阳望远镜四年多的调试和改进过程中攻克的技术难点，以及遇到的问题和处理方法。

一. 引言

太阳磁场的测量经历了几代观测仪器的改进和观测方法的改善，在时间分辨率和空间分辨率以及灵敏度等诸方面日臻完善。磁场观测仪器经历了点源磁场测量仪器（美国威尔逊山天文台），光电磁象仪（美国威尔逊山天文台），视频磁象仪[1]（美国大熊湖天文台，中科院北京天文台），发展到今天的多通道太阳望远镜[2]。它的特点是能同时获得多条谱线（不同太阳层次上）的两维矢量磁场，从而在不同层次上观测太阳大气三维磁结构，这样的仪器目前世界上唯一的一台，也就是多通道太阳望远镜，是1986年开始设计，1990年开始初装调，1991年开始和望远镜光、机、电、滤光器联调的，先后将全日面太阳磁场望远镜、色球磁场望远镜交付使用，1994年整个望远镜开始全面试观测。图1为望远镜结构示意图。它由5个光学望远镜组成，1. 60cm格里高利反射真空望远镜，配备世界上独一无二的多通道滤光器，可同时获得太阳上不同形成深度的五条谱线的太阳单色像、矢量磁场和速度场的测量结果，它是目前国内最大的真空望远镜系统；2. 35cm的真空折射望远镜，即原太阳磁场望远镜；3. 全日面磁场速度场望远镜，口径10cm；4. 全日面和局部色球太阳望远镜，口径14cm；5. 全日面钙单色像监视望远镜，口径8cm。本文叙述60cm主望远镜的联合调试情况。

在长达四年多的安装调试和改进过程中，先后三次修改望远镜附镜部件结构；两次修改光阑结构；重新设计修改了所有滤光器的恒温控制、保温结构；重新设计了宽视场KD*P电光调制器；根据实际光路的需要，重新选配了十余只CCD接收器，并完成光电接收和数据处理系统和步进电机驱动系统的设计改进及调试。

二. 60cm反射望远镜光机结构部分的调试

主望远镜为60cm反射格里高利系统，如图1示。望远镜光学设计、光学调整原理和过程参见文献[3]，这里不赘述这一问题，仅就望远镜调试过程中的一些问题和解决方法进行讨论。

2.1 光阑结构尺寸的确定

太阳望远镜进入滤光器之前，光量非常强，观测太阳上局部的活动区域，有用视场一般只有3～5′，而太阳象有32′。那么多余的能量如果不去除，则会全部照射在滤光器的晶体或波片上，这将会导致晶体等的损坏。因此需在主镜焦点上加入光阑，以清除多余的光。光阑结构尺寸应该由系统结构和接收视场的大小确定。表1列出了几种焦距下的CCD靶面对应太阳象值。

表1. CCD靶面对应太阳象大小

等值焦距	太阳象直径	1802 CCD靶面对应太阳大小	TM860 CCD靶面对应太阳大小
400cm	37.2mm	6.84′ ×5.55′	7.57′ ×5.68′
600cm	55.85mm	4.56′ ×3.70′	5.04′ ×3.78′
1200cm	111.7mm	2.28′ ×1.85′	2.52′ ×1.89′

多通道太阳望远镜主镜焦距$f_1=1500$，主镜焦点处太阳象直径，$R_{\odot}=14.00$mm，由此可以计算得到对应视场的光阑结构尺寸，表2为初步计算的结果。

表2. 不同视场的光阑结构尺寸

太阳像大小/视场	对应光栏尺寸	面积
5′ ×4′	2.18×1.75mm²	3.815mm²
6.84′ ×5.55′	2.99×2.43mm²	7.27mm²
7.57′ ×5.68′	3.31×2.49mm²	8.24mm²

实际使用光阑大小为2.2×1.9mm²，大致对应等值焦距600 cm系统时的5′ ×4′左右视场，对两种CCD都是可以使用且多余光量可以有效去除的。

2.2 副镜结构的改进

多通道太阳望远镜采用格里高利系统，主镜焦点加有光阑。光阑相对付镜可以三轴平移并可以绕光轴方向旋转。这一部件，原设计时加在付镜的压镜圈上，导致付镜变形。为此，将付镜和光阑部件改为各自独立的结构，消除了对付镜的非对称压力。

主镜焦点处太阳象直径14mm左右，而主镜口径为600mm，如果焦点处为黑体且不传导热量的话，其温度会高达几千度。由于光阑本身及望远镜的传导等作用，光阑附近约有几百度的高温，这样光栏仍会被氧化，不能有效去除多余能量。为不损坏光栏结构，实际处理上采用循环水致冷措施，目前光栏温度约有几十度，但由于光栏刀口处无法用水冷却，所以在光栏向光面加入45°锥面的铜导热套，使热量尽可能多的被

金属结构件传导出去。改进后的结构，目前使用效果良好，但一旦停止水循环，亦会有故障。这是一大隐患。

2.3 CCD位置调节装置的改进

由于先后选用几种不同型号的CCD，所以原始设计的CCD位置三维调节装置就不能适应需要。

多通道滤光器为减小体积和重量，光学和机械结构的安排上比较紧凑，各通道之间中心距只有60mm，而要求CCD可以两维平移，以调整靶面位置，沿光轴平移，以适应大范围的调焦。CCD本身外形尺寸为 42mm×48mm(MTV1802型)和42mm×36mm(TM860型)，在如此紧凑的空间内设计一种三维调节装置，看上去并没有什么东西，实际上是非常困难的。不仅如此，CCD前端还要求在平移过程中仍能良好消除杂散光的影响。经过反复的设计和试验，这一问题终于圆满地解决了。

三. 滤光器的调试和改进

3.1 多通道滤光器的性能、特点和结构改进[4]

多通道望远镜的核心，即为能同时获得九条谱线的两维观测的窄带双折射滤光器。

滤光器的通带范围为3968Å～6563Å，带宽为0.05Å～0.5Å，工作温度42℃，工作温度的稳定性要求优于0.005℃。

所有通道的透过波长万能可调，能够测量矢量磁场、速度场等太阳物理参数，共用一组电光调制器，电光调制器要求恒温、全色宽视场。

为了满足上述要求，保证滤光器稳定可靠地使用，多通道滤光器设计使用了五十余个步进电机，重新设计了宽视场、恒温、全色KD*P调制器，并且重新设计了端面恒温和保温结构，与外部接触的晶体室都改用保温材料隔离，两端的入射、出射窗周围增加恒温控制，使滤光器保证了温度的稳定性。

改进光学设计，引入等付利叶滤光器的调带方法，改进了滤光器的透过轮廓[5]。

3.2 滤光器的通带的确定

为了使滤光器每个通道的透过带确定在某一条磁敏线上，必须先在光谱仪上进行光谱调试。为此，我们专门改造了一台太阳望远镜，使之更适用于滤光器的光谱检测，参见文献[6]。这里只讨论滤光器的调试方法。首先在CCD监视器上找到某一太阳谱线，记下该谱线在监视器上的位置，然后把滤光器放置在狭缝前面。转动这一通道的所有步进电机，使各晶体级的透过带轮廓在相同的位置上，再测量出离太阳谱线的距离，通过计算把透过带移至太阳谱线线心。利用这种方法可以得到滤光器在每个太阳谱线附近的透过带轮廓，其光谱精度约为0.01Å～0.02Å。但对一些带宽非常窄的通道在监视器观察确定精确的位置是困难的，要想获得更好光谱精度，还要进一步用光电倍增管细调。

方法是：将滤光器放入望远镜，与成像光路调试协调好以后，用光电倍增管作望

远镜滤光器组成的光路的接收器，转动每个通道的最厚的几级调带电机，使滤光器的输出光量达到极小。这样就把每个通道的透过带都调到了太阳谱线的线心。此方法的光谱偏差小于千分之五。

3.3 成象光路与滤光器的联调

多通道滤光器实际上分为两体，即多通道头和多通道本体。两部分分别放在会聚光路和准直光路中，中间是一准直镜。

滤光器光轴必须与主光路同轴，这一点并不难理解。但由于准直镜基座设计在滤光器本体上，而本体上实际有5个入射孔径，9个出射孔径，这就不仅仅要求其中直接透射的一路与主光路同轴，而且要求5个准直镜以及由它们之后分出所得到的9路光必须平行。

实际装调中要求滤光器各通道之间不平行度$<2'$，而5个准直镜由于光线经过的玻璃、晶体介质的厚度不同，不同波长的准直镜放置位置也有较大差别。调试过程中我们先后采用了几种尺寸的准直镜筒，获得不同焦距位置的太阳象进行比较，最后找到最好的焦距位置的象以便观测使用。

四. 图象接收处理系统设计、改进和调试

4.1 CCD的选择[7]

由于多通道望远镜是对不同波长的谱线观测，谱线通常半宽度非常窄，即使光学系统的透过率很高，在焦面上的光子数依然比较少。相对一般的光学观测而言，要求CCD灵敏度有所提高，即要求高量子效率。通常采用的电视制式的CCD量子效率较低，高响应度的光谱范围小，而非电视制式的专用CCD价格一般比较昂贵。对CCD性能价格比的选择，是一种有益的工作。

多通道望远镜优选的谱线在3968Å～6563Å之间，约2500Å左右的光谱区间内分布，对这个区间的谱线，一般CCD都有一定的响应度，但各种牌号的CCD，由于靶面的结构、各层介质的折射率和消光系数、各层介质的厚度等的不同，其光谱响应曲线的形状和峰值波长有很大差别。后续电路的设计，放大倍数等也影响着CCD的信噪比等参数。

原太阳磁场望远镜使用的及其它天文台采用的视频观测系统，大多采用PULNIX公司之TM系列产品。多通道望远镜原设计中，采用的是TM-860型CCD，但经过实际观测，此CCD在35cm的太阳磁场望远镜上使用时，由于光弱CCD灵敏度不够，而不能获得清晰的单色象。多通道望远镜初步计算和实际测试的结果表明，由于滤光器带宽非常窄，导致其光量略小于35cm的太阳磁场望远镜。因此，使用860CCD是不可能的。

目前我们采用的CCD主要以敏通公司的1802型CCD为主，辅之以TM560型和LZ2122型，初步的使用情况看，还是能够满足使用要求的。

4.2 控制和接收系统

多通道望远镜磁敏线选择了5条，即可以同时获得5条谱线的磁场。另外4条谱线

也要求进行同步的其它方面的测量。九个通道同时观测，共用同一组光电调制器，这就要求各通道的接收系统要和调制器同步工作，而且由于横场纵场等观测状态不同，滤光器波带需要随时可以更换，因此采用一台主控计算机控制步进电机驱动电路，以改变波带，同时发指令给观测计算机控制151图象处理器等采集数据，并进行叠加等处理。系统硬件框图如图2所示。

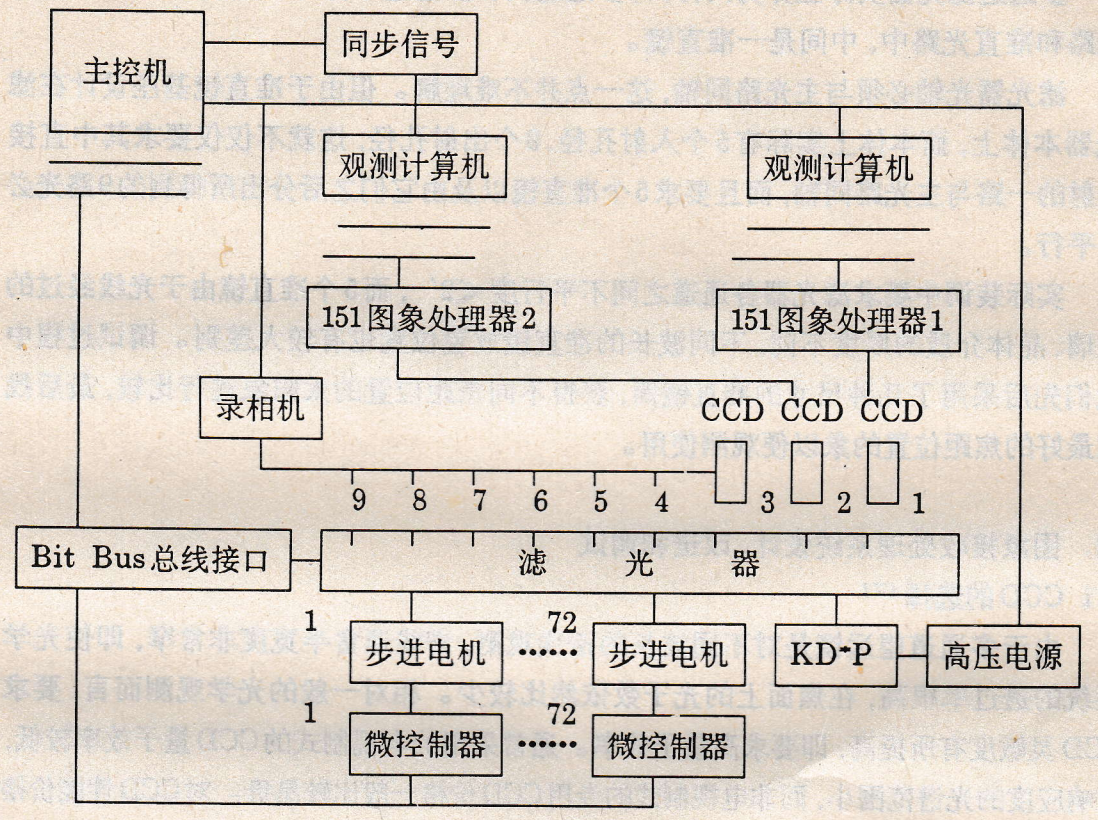


图2. 图象接收、控制系统框图

4.3 软件设计

4.3.1 波带调节系统的设计[8]

对多通道而言，要求波片经常转换位置，各个电机要求同时转动及回零等，所以每个波片由一个微控制器控制，而由主控机集中管理。这样主控机与微控制器的接口便是关键。我们设计了一种实用的位总线网络系统，采用RS-422口同微机连接，硬件上加有短路保护，使网络系统安全可靠。RS-422的接口方式具有较强地抑制共模干扰能力，以确保通讯无误。另外在软件设计上，我们自行建立一种开放式多层次的网络接口模式，即每个信息包包括五个部分。其结构如下：

同号头	地址	命令块	数据块	结束符标志
layer 1	layer 2	layer 3	layer 4	layer 5

这种多层次的软件结构使信息交换出错率为零。

这也是确保波带为正确位置的关键。

4.3.2 同步控制和数据采集[9]

软件的简单流程如图3示。在数据的累加和处理方法上与原磁场望远镜的观测软件基本相同，主要特点在于各观测计算机和电光调制器同步及两台以上计算机同时控制151存取CCD的数据的软件的设计。目前采用151图象处理器处理后数据存入磁盘，以后准备改用磁带机记录这些数据。还有象诸如主程序菜单、散射光的测定、显示子程序等都有一些改进，限于篇幅，不再叙述。

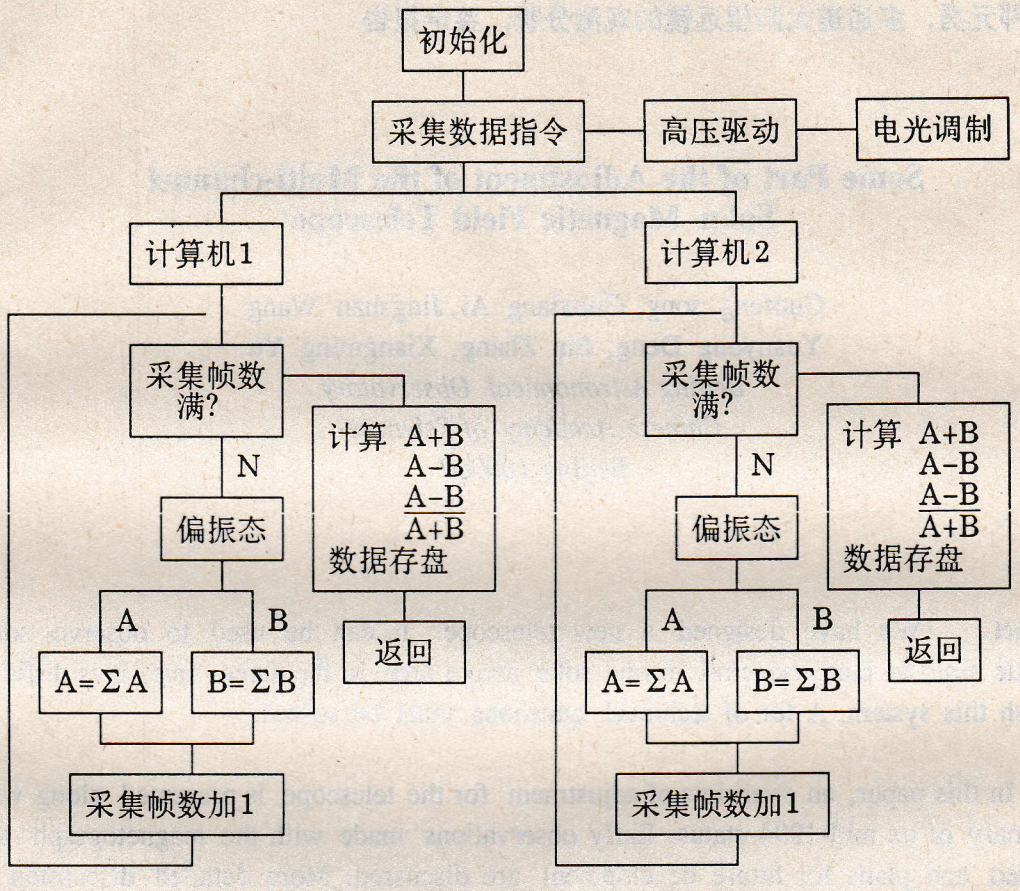


图3. 同时数据采集软件流程图

五. 初步观测结果[10][11]

1991年8月实现全日面太阳磁场的高时间分辨率观测，同年获得色球Hα像的观测。

1994年8月多通道望远镜实现多通道同时的单色像观测和单通道独立的磁场观测，11月实现多通道同时的磁场观测。

全日面磁场空间分辨率约2″，基本达到了设计指标要求。主望远镜空间分辨率优于1″，达到了设计指标。

参考文献

[1] 艾国祥，胡岳风，北京天文台台刊，8（1~10）1986，6

[2] 艾国祥，多通道太阳望远镜

[3] 李德培，口径60cm多通道太阳望远镜的光学系统的调整，鉴定报告

[4] 王敬山，太阳多通道双折射滤光器，鉴定报告

[5] 王敬山，重庆太阳会议文集，(1993) 220
[6] 宋国峰，用于滤光器光谱调试的光谱仪系统
[7] 宋国峰，多通道太阳望远镜的光量测定与CCD选配
[8] 叶祥明，多通道滤光器波带调节控制系统，鉴定报告
[9] 张斌，多通道望远镜图象接收控制系统，鉴定报告
[10] 刘扬，全日面磁场望远镜观测资料的初步分析，天体物理学报
[11] 邓元勇，多通道太阳望远镜的观测分析，鉴定报告

Some Part of the Adjustment of the Multi-channel Solar Magnetic Field Telescope

Guofeng song, Guoxiang Ai, Jingshan Wang
Yuanyong Deng, Bin Zhang, Xiangming Ye
Beijing Astronomical Observatory
Chinese Academy of Sciences
Beijing 100080

Abstract. We have designed a new telescope. It can be used to observe solar magnetic field at many spectral in one solar active area in the same time. It is difficult to finish this system. A lot of technical questions must be solved.

In this paper, an overview of adjustment for the telescope is presented along with a summary of its mid-1994 status. Early observations made with the magnetograph are presented and plans for future development are discussed. More detailed discussion of individual components and scientific results from the data will be published separately as appropriate.

全日面太阳色球磁场望远镜

宋国锋　艾国祥　邓元勇
王敬山　刘扬
北京天文台　100080

杨世模　胡企千
南京天文仪器研制中心　210042

提要：色球磁场的观测近年来有许多重要的进展。北京天文台怀柔站利用太阳磁场望远镜在Hβ谱线上对太阳色球磁场进行了长时期的矢量磁场测量，取得了许多有价值的观测结果，使我国太阳色球磁场的测量走在了世界的前列。但磁场望远镜是对太阳局部区域（4′ ×6′）进行视频观测，整个太阳日面的大尺度的色球磁场还不能实时获得。因此，改进14cm色球望远镜使之实现实时全日面太阳色球磁场测量是对太阳色球磁场测量的一个推进。

一、引言

自从Hale(1908)开创太阳磁场的测量以来，在太阳磁场测量的灵敏度和空间分辨率以及时间分辨率上已经取得了飞速的进展。这些发展都是基于偏振分析光学、光谱分离技术和探测器件的发展。目前已得到接近几乎极限空间分辨率的，只有几高斯强度的，几秒钟时间分辨率的太阳磁场图象。这些仪器的发明和资料的获得，揭示了许多太阳活动和太阳现象的基本结构和物理过程。

视频磁象仪用于色球磁场观测近几年有了长足的发展。以往的观测都只限于局部太阳象，用于全日面太阳色球磁场测量的设备都是分时观测，然后拼接在一起，这样获得一幅全日面磁图，耗时几十分钟，时间分辨率非常低。而视频磁象仪具有高时间分辨率高空间分辨率的特点，因此将视频磁象仪引入全日面色球磁场的观测，将对大尺度色球磁场的实时观测起到推动作用。但由于CCD等探测器件的限制，全日面色球磁场的空间分辨率还不高，系统的整体性能还有待进一步提高，特别是随着新兴的电子技术、光电技术的发展，会有更多的性能优异的器件用于太阳全日面色球磁场的观测。我们目前的工作仅是一个尝试，在这里做一简单介绍。

二、仪器

2.1 望远镜系统

全日面太阳色球磁场望远镜，是一台折射式望远镜，工作波长6563Å，光路如图1所示。

视场 ±16′，采用CCD观测全日面和局部太阳色球单色像和磁场，带宽 ±32Å可调

系统参数如下：

1. 物镜口径: 140mm

焦距: 1400mm

2. 准直系统: 光线经物镜成象后，由准直镜将其重新变成平行光

双折射滤光器，磁分析器，干涉滤光片和调节分光量的1/2波片，放在此平行光路中

3. 成象系统: 成像镜①将滤光器来的光量重新聚焦于F_1，形成20mm大小的太阳像

在成像镜①之后，又加入一偏振分束器和成像镜②，它们将成像镜①后的光分出一路聚焦于F_2，形成6mm大小的全日面太阳像

结构上，全日面色球磁场望远镜与光电导行镜、全日面太阳磁场望远镜组成小的望远镜系统，通过一个独立的轴系与主望远镜，多通道太阳磁场望远镜连接。它可以始终对准时面中心，实现全日面观测，而局部的获得是采取移动探测接收位置的方法改变观测区域的。

2.2 滤光器和光电调制器

该滤光器是用于观察太阳Hα精细结构的，透过带半宽为0.5Å，透过率约为9.0%，共有七个晶体级，其中前五级为宽场的冰洲石级，第六、七级是水晶窄视场级。工作温度42℃，透过带 ±32Å 可调。

电光调制器置于滤光器的前端，为普通宽视场的消色差系统。作为磁分析器，由于前面没有换波片装置，因此只能测量色球纵向磁场。由于只测量纵场，所以也没有增加恒温装置。

2.3 数据接收和图象处理

图象接收使用视频CCD。由于分别有一个全日面Hα像和一个局部Hα像，我们对全日面像做磁场分析处理。它的信号直接接入图象处理器，由计算机采集并进行实时的累加和运算，获得实时全日面太阳色球Hα磁图。对局部Hα象，因为没有足够的图象处理器，只是将这一路图象送入专用录相机中，用磁带记录下实时的视频信号，然后由资料分析人员作后续处理。

和其它系统一样，对光电调制器，视频CCD的图象采集等，都需要由计算机控制同步工作。图象处理的硬件和软件，与太阳磁场望远镜系统、全日面太阳磁场望远镜系统都基本一致，在此不再赘述。

三、初步结果

一九九一年八月色球望远镜投入试观测，获得连续的太阳局部色球Hα单色像资料。一九九四年调试成功全日面Hα色球单色像和色球全日面磁场测量系统。但由于全日面视场很大，而探测器接收面积有限，象无数又不可能无限制的增多，目前系统的空间分辨率较低，仅能达到4″ 左右。纵向磁场由于Hα磁场灵敏度的问题，也仅能

达到 ±30G 左右。整个系统性能还需不断加以完善。

参考文献

1. 艾国祥，胡岳风，北京天文台台刊，8(1～10)，1986，6.
2. 艾国祥，胡岳风等，北京天文台台刊，8(75～82)，1986，6.
3. 艾国祥，胡岳风等，北京天文台台刊，8(85，97)，1986，6.

The Full Disk solar Chromosphere Magnetic Field Telescope

Guofeng Song, Guoxiang Ai
Yuanyong Deng, Jingshan Wang, Yang Liu
Beijing Astronomical Observatory
Chinese Academy of Sciences
Beijing 100080

Shimo Yang, Qiqian Hu
Nanjing Astronomical Instrument Center
Chinese Academy of Sciences
Nanjing 210042

Abstract. The BAO Full disk solar chromosphere magnetic field telescope is a new instrument of Huairou Observing Station which features real-time digital analysis of Hα spectrum formed on a two-dimensional CCD detectors.

This instrument is placed at the top of the multi-channel Magnetic Filed Telescope and used an modulator of circular polarization, commercial video processing boards are used to digitize the spectral images at video rates and separate, accumulate, and buffer the spectra in the two polarization states. An attached processor removes the half retarder bias and gain from the spectra is cadence with passband controlling of the filters. The data control computer perform position and width analysis of the line profiles as they are acquired and records line of sight magnetic field, and other computed parameters. The observer controls the instrument through windowed processes on a data control console using a keyboard and mouse. Early observations with the spectra magnetograph are presented and plans for feature development are discuss.

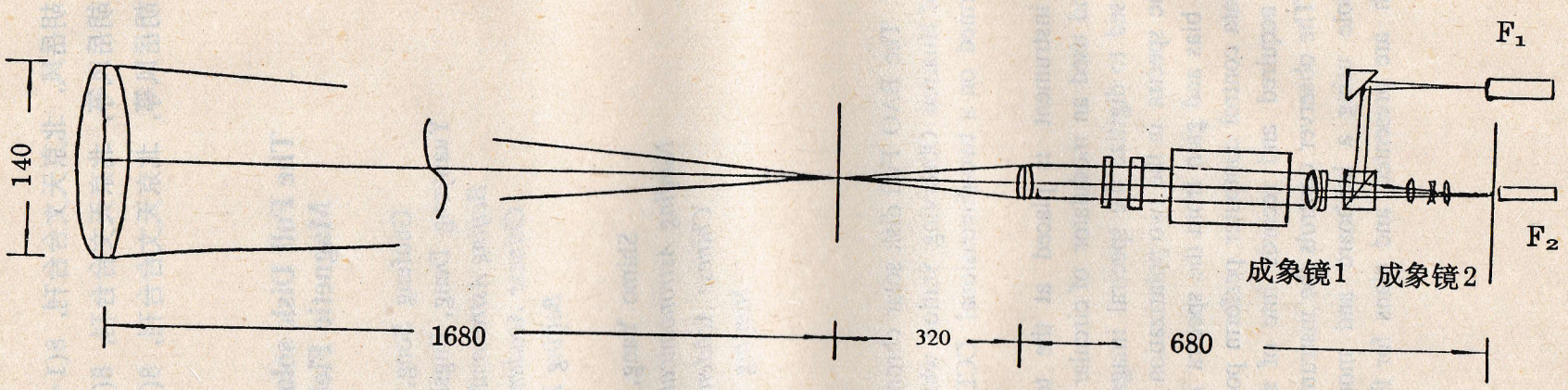


图1　改进后的14cm望远镜示意图

全日面太阳磁场望远镜

宋国峰　艾国祥　邓元勇
王敬山　刘扬　张斌
北京天文台　100080

胡企千　杨世模
南京天文仪器研制中心　210042

提要：我国在太阳磁场和速度场的观测方法和设备上，具有世界领先水平。九一年开始，又开展了全日面磁场和速度场的观测，其观测资料具有高时间分辨率和较高的空间分辨率，为太阳整体行为的研究提供了有效和先进的数据和资料。

一、引言

北京天文台和天文仪器研制中心合作于八十年代初，研制成功了一台具有国际先进水平的太阳磁场观测设备，太阳磁场望远镜，获得了一大批具有较高价值的较高时间、空间分辨率的太阳磁场、速度场观测资料，并在此基础上取得多项重要的太阳物理研究成果，使我国在太阳磁场和速度场观测和研究方面跨入了世界先进行列。

继35cm太阳磁场望远镜之后，为满足国内外太阳物理研究者对太阳大尺度磁场、速度场的观测和研究的需要，推动对太阳整体行为的研究，我们又自行研制了全日面太阳磁场望远镜。这是目前国际上唯一的一台不仅具有较高空间分辨，同时具有高时间分辨率的全日面太阳磁场观测系统。

它由一台10cm口径的折射望远镜，一台万能可调的0.1Å双折射滤光器以及宽视场的磁场速度场分析器，CCD接收器和数据处理设备组成的。

整套系统于1991年8月投入试观测，后经几次改进于1994年正式投入运行。本文介绍系统研制和改进的情况。

二、仪器

2.1 光学系统

全日面太阳磁场望远镜采用折射式光学系统。物镜口径100mm，焦距1200mm，经一组放大和缩焦系统得到焦面上6mm的全日面太阳像，整个光路如图1所示。其中成象镜F3是由两组透镜组成的，调节两组透镜的位置可以改变太阳象大小和焦面位置，具体的光路计算过于繁琐，此处不再赘述。

此光路特点是滤光器置于放大系统的会聚光路中。

采用这样一个光学系统的出发点在于减少由于滤光器内部晶体缺陷带来的视场效应等问题，同时这样一个系统由于采用了可调整的缩焦系统，使太阳象大小可以根据CCD靶面大小改变，对适应不同型号的CCD的使用是有利的。

望远镜光学系统参数如下

物镜口径：10cm

相对孔径：1/12

全视场：$2W=\pm16'$

工作波长：4500～6600

太阳象大小：6mm

2.2 望远镜结构

全日面太阳磁场望远镜与多通道太阳磁场望远镜等共同组成一个综合的太阳磁场观测设备，使用同一套恒动和光电导行跟踪系统。

全日面太阳磁场望远镜与光电导行镜固定在一起形成一个整体，它不随主望远镜拉偏移动，而是始终保持光轴指向日面中心，因此与主望远镜传动系统有相对运动，并且有独立的轴系和实现相对移动的自整角传动系统以完成不受主望远镜拉偏影响的全日面观测，具体结构参考文献（胡企千，1994）。

2.3 滤光器

全日面太阳磁场望远镜，采用的是新双带方案的万能双折射滤光器，带宽0.1Å，工作温度42℃，有两组KD*P电光调制器，即可以测全日面矢量磁场，也可以测量全日面速度场。可以根据观测的需要选择观测谱线。由于前置干涉滤光片选择的原因，目前望远镜选择了两条谱线FeI 5324.19Å和HeII 5576.106Å，测量太阳纵向磁场精度达±10G左右，测量太阳横向磁场的精度约为±100G，空间分辨率约为2″。

滤光器设计了7个晶体级，前5级为宽视场的冰洲石级，第六级为窄视场的冰洲石级，第七级为天然水晶制作的窄视场级。每一级晶体的设计参数见表1。

表1. 滤光器的晶体参数

序号	材料	厚度(mm)	视场状况
1	冰洲石	25.8352×2	宽视场
2	冰洲石	17.9176×2	宽视场
3	冰洲石	8.9588×2	宽视场
4	冰洲石	4.4794×2	宽视场
5	冰洲石	2.2393×2	宽视场
6	冰洲石	2.9393	窄视场
7	石英	21.940	窄视场

该滤光器的透过带公式为

$$T(\lambda)=\pi\cos^2\left(\frac{\mu_i(a)d_i}{\lambda}\pi+2\psi_i\right)$$

其中 ψ_i 是每个旋转1/2波片的角度。

滤光器采用隔热材料制作型腔，采用端面和圆周加热方法获得42℃的恒温，温度稳定度为 ±0.01℃。

2.4 接收器件和图象处理器

2.4.1 系统的组成

目前我们仍采用了两套接收处理系统，一套高分辨系统和一套中分辨系统。下面简述一下高分辨系统的组成方案。

1. 采用一只美国Kodak公司生产的ViDEK Megaplus CCD作为接收器
2. 一台美国ITI公司生产的高分辨SR-150/151－1K图象处理器对图象进行实时采集，A/D变换和实时处理
3. 一台486PC机作为主控微机，辅以其它控制设备来控制CCD，KD-P高压调制，数据采集器的同步，并进行实时的数据图象处理
4. 一台日本三菱公司生产的高分辨率HL6935K大屏幕显示器，显示CCD采集的图象
5. 数据处理工作站，由一台Sun470服务器和一台VAX750小型机组成，对采集到的磁场数据资料进行后续处理。图2为系统简化示意图。

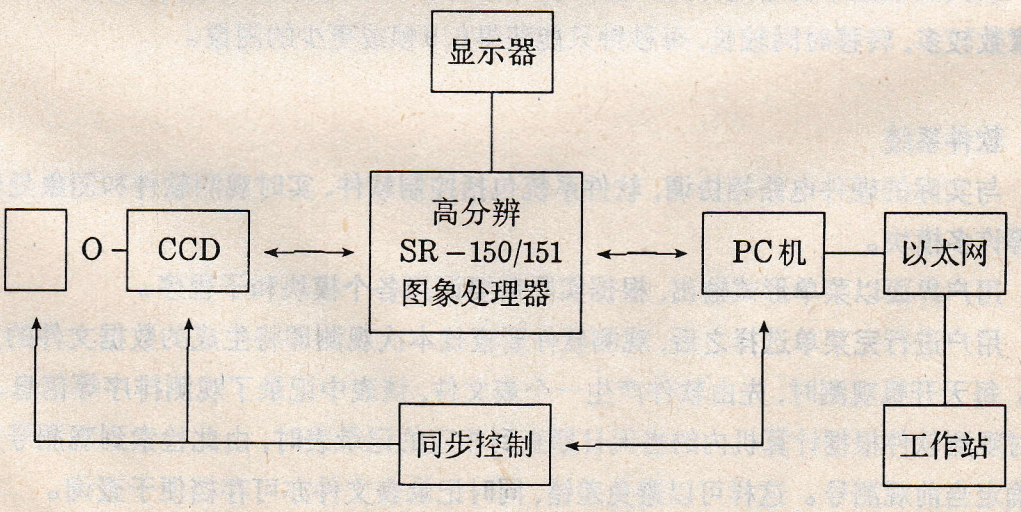


图2. 图象处理系统框图

中分辨率系统组成与前述系统相似，只是CCD为TM-860型(512×512)，图象处理器为512×512，显示器为标准视频，不再重复。两种CCD性能比较见表 2 。

表2. 两种CCD的主要特性

	Mepaplus	TM-860
Total pixels	1342×1037	590×800
pixel sige	6.8×1340	11.5μ×11.0μ
active Area	8.98×7.04	6.6×8.8
量子效率	48%, max at670nm	
响应区间	400～700nm	
饱和曝光量	0.12μJ/cm2 at550nm 0.12μJ/cm2 400～700nm	
动态范围	48dB	50dB
曝光时间	15～50μsec	20～40ms
传输速率	10MHz	14MHz
帧 频	最大6.9帧每秒	25帧每秒

2.4.2 Kodak公司Megaplus高分辨CCD的特点

这种CCD是一种靶面象元之间无间隙100%光敏材料填充本征硅制作的光电器件，具有8bit的A/D变换器，可产生256个灰度等级的数字输出信号，电荷转移方式为在每次曝光后利用一段单独的黑暗期来转移电荷，以避免转移过程中的继续积分。曝光控制由快门完成，以形成间隙曝光的黑暗期，曝光时间长短由外部控制。

最大的帧速率受曝光时间和帧转移时间的影响，即使是非常短的曝光时间，由于象素数较多，转移时间较长，每秒钟只能获得6.9帧或更少的图象。

2.5 软件系统

与实际的硬件电路相协调，软件系统包括控制软件、实时观测软件和图象处理软件等许多模块。

用户界面以菜单形式输出，根据实际需要调用各个模块和子程序。

用户进行完菜单选择之后，观测软件要查找本次观测即将生成的数据文件的文件名。每天开机观测时，先由软件产生一个表文件，该表中记录了观测排序等信息。当实时观测软件根据计算机内的当天日期查到相应的记录表时，由此检索到观测号并以此确定当前观测号。这样可以避免差错，同时记录表文件亦可存档便于查询。

接下来是程序通过调用DOS功能，查询8255 I/O接口板的输入端口是否接收到同步电流，若接收到则发出开始观测信号，通过8255接口板送到系统各部分并开始观测，同时对图象处理器进行操作，完成采集、累加和处理任务。计算机内对已采集的帧数计数，当累加到指定帧数时，观测过程结束。

随后计算机调用图象处理软件模块将图象处器中的图象数据传到计算机中进行归算，归算结果按先后生成的文件名存盘，同时传回图象处理器中用于显示。

三、初步数据处理

经过一年多的软、硬件调试工作，全日面太阳磁场望远镜已投入观测使用。图 3 为利用此望远镜获得的全日面磁场图象。经与磁场望远镜比对（刘扬等，1993），其分辨率约为3～4角秒之间，磁场灵敏度为 ±40高斯左右，基本上达到了设计要求。

参考文献：

艾国祥，Fear，R. J.，汲培文，天体物理学报，10（1990）180
刘扬，宋国峰，王敬山，天体物理学报，14（1994）191
胡企千，多通道太阳磁场望远镜，鉴定报告（1994）

The Full-disk Solar Magnetic Field Telescope

Guofeng Song, Guoxiang Ai, Jingshan Wang
Yuanyong Deng, Yang Liu, Bin Zhang
Beijing Astronomical Observatory
Chinese Acadmey of Sciences
Beijing 100080

Shimo Yang, Qiqian Hu
Nanjing Astronomical Instruments Center
Nanjing 210042

Abstract. The BAO full-disk solar magnetic field telescope (FSMFT) is a new instrument of Huairou observing station, which features real-time digital analysis of sight line magnetic field, velocity field and vector magnetic fieldformed on a two-dimensional CCD detectors.

It used an modulator, commerical video processing boards are used to digitige the spectral images at video rates and separate, accomulate and buffer the spectra image in the two polarization states, then caculate the magnetic field data.

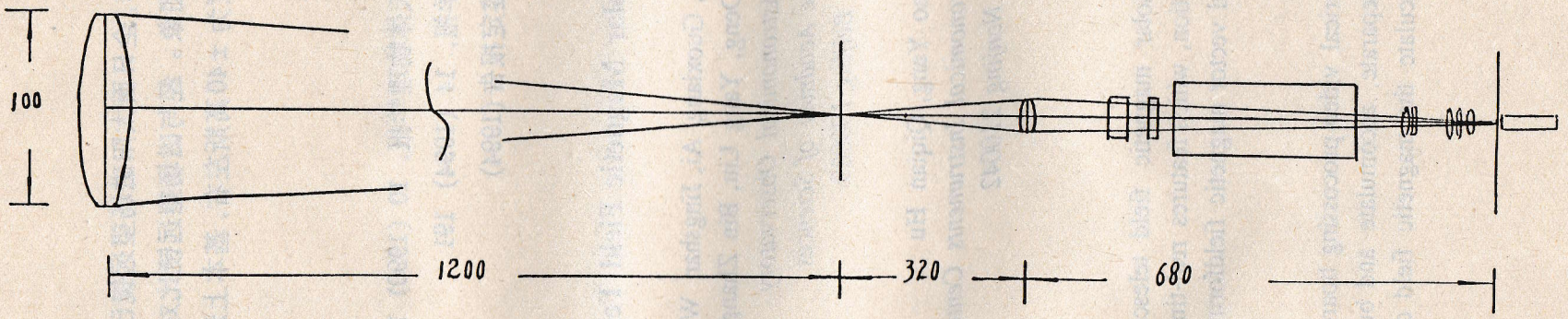


图1　改进后的10cm望远镜示意图

$f_1=1200$　　$f_2=251$　　$f_3=55$

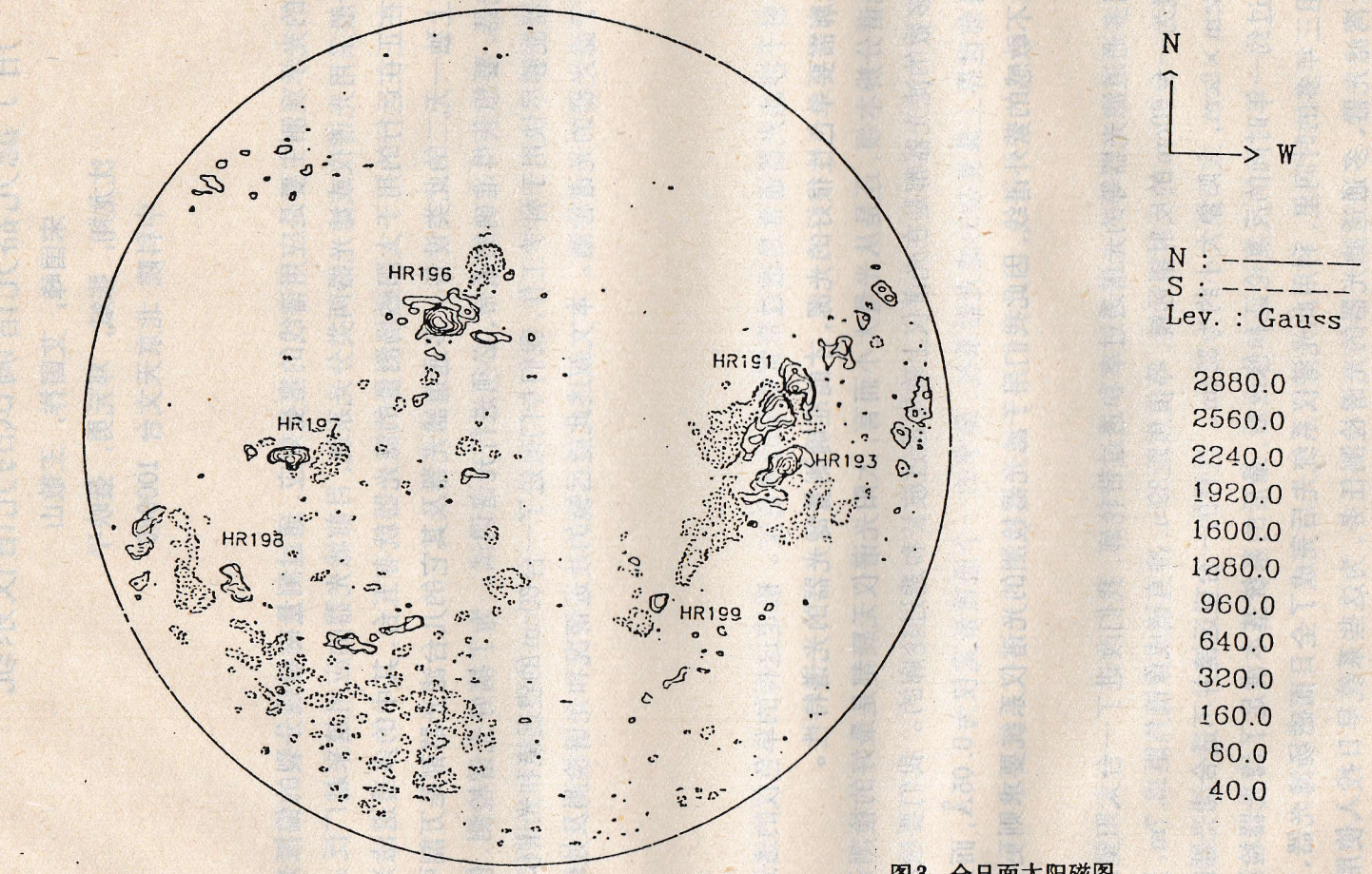

Huairou, Beijing Astro. Obs.
Time : Oct-04,1991. 04:25:18
HR196
HR191
HR197
HR193
HR198
HR199
N
W
N : ————
S : - - - - - -
Lev. : Gauss
2880.0
2560.0
2240.0
1920.0
1600.0
1280.0
960.0
640.0
320.0
160.0
80.0
40.0

图3 全日面太阳磁图

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0.05Å，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11.2cm×8cm，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、Hα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

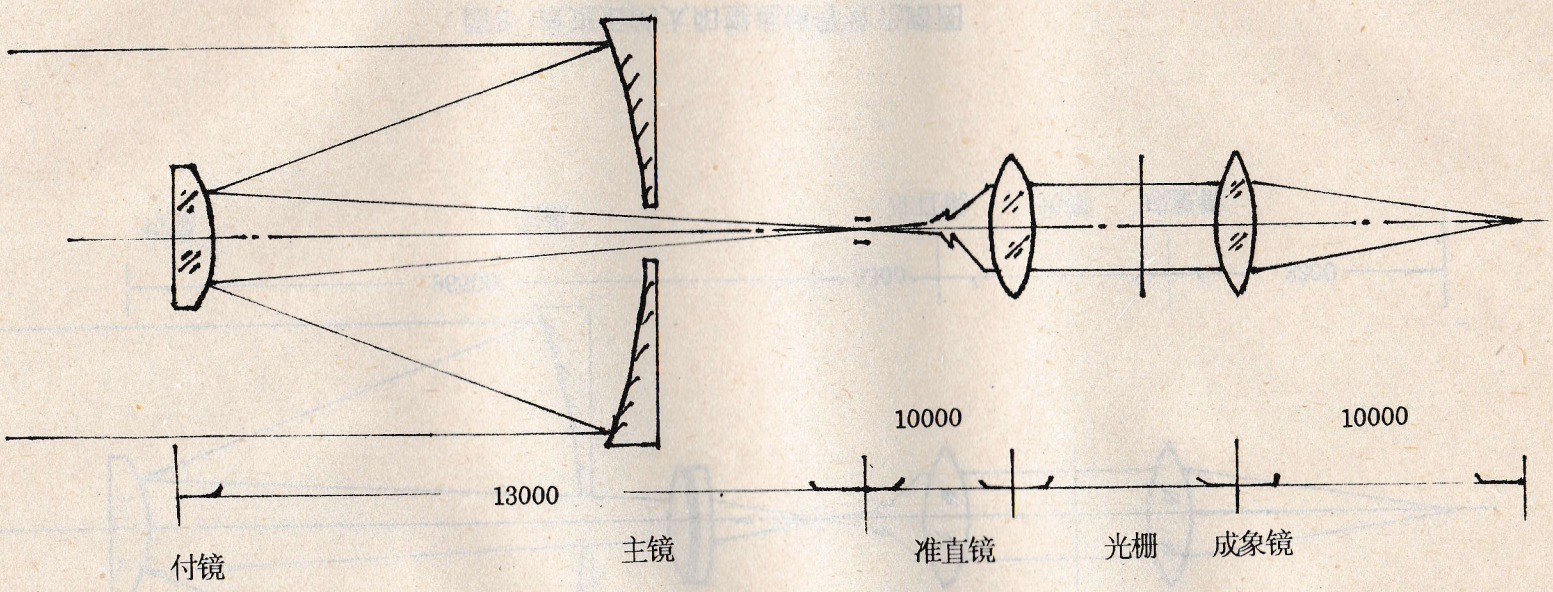


图1　太阳望远镜等效光路图

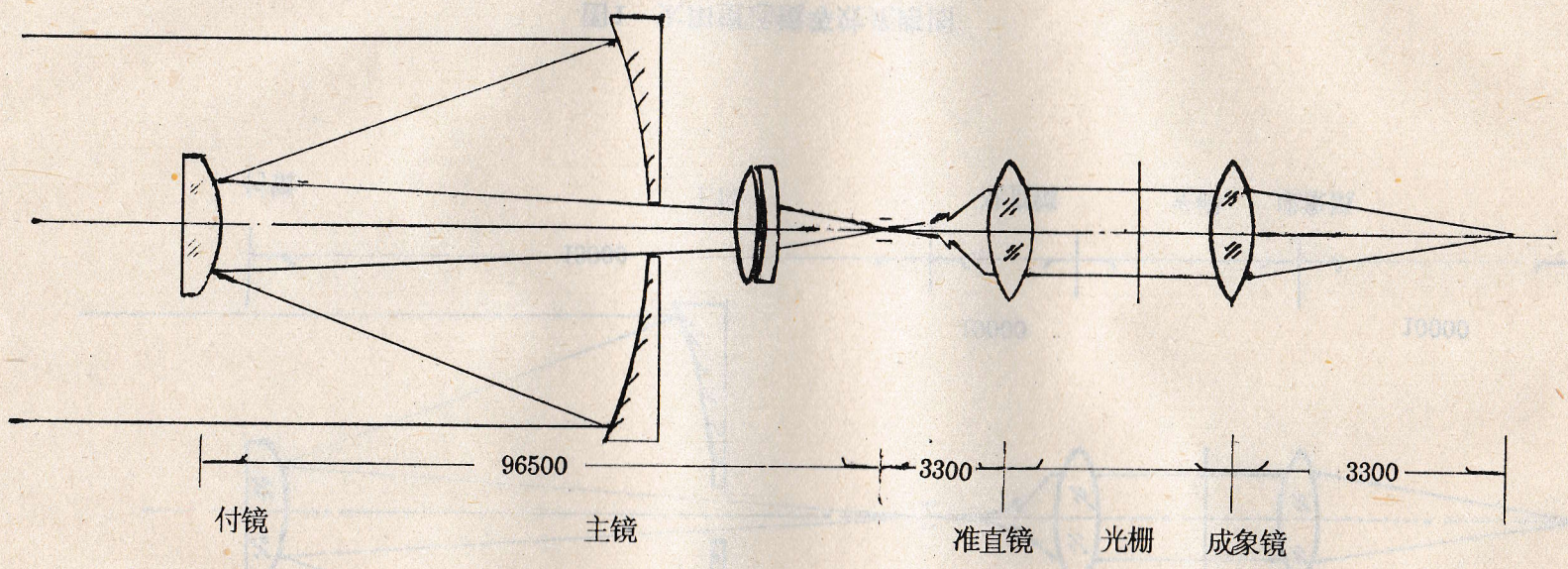


图2　改进后的太阳望远镜等效光路图

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·m/dcos θ 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：$R_{\odot}=5.5cm$

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：$dl/d\lambda=0.4mm/A$

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。

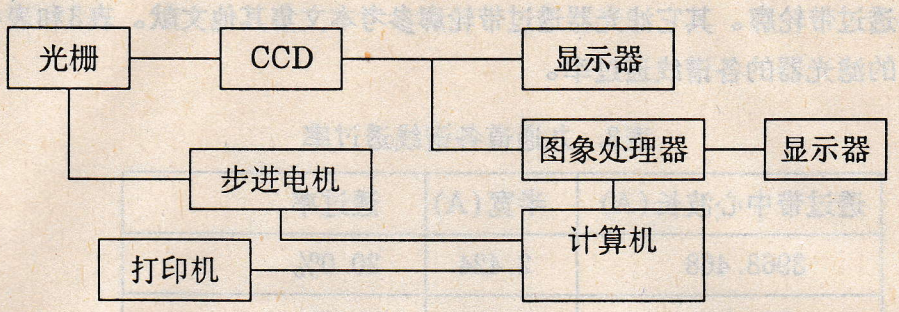


图3. 光电接收和图象处理系统框图

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1Å/0.4mm，对1802CCD有1Å/0.4nm×7.96mm≈20Å。即在显示器上可以看到20Å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，必须先在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侯，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0.01Å～0.02Å。

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.

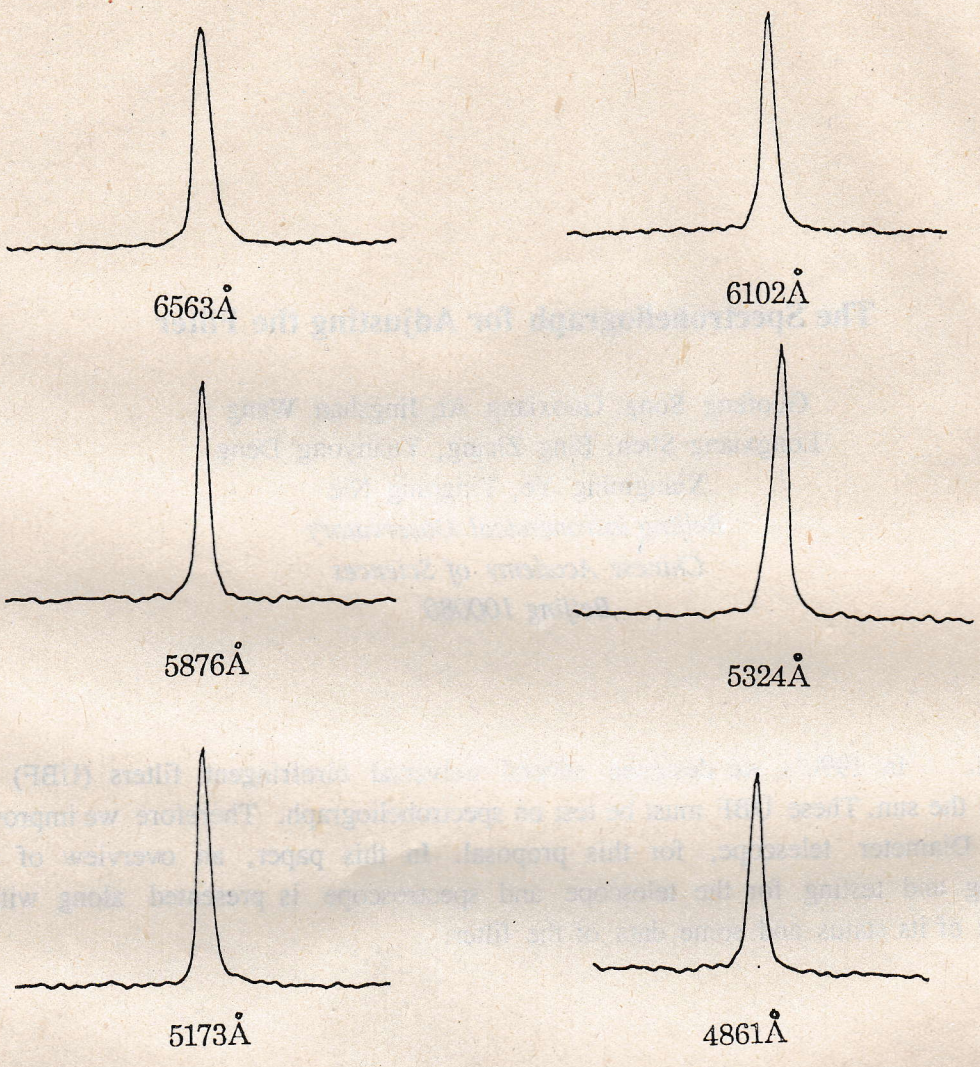


图4. 台湾滤光器各谱线透过带轮廓

多通道太阳磁场望远镜试观测报告

邓元勇，艾国祥，王敬山
宋国峰，张斌，叶祥明
中国科学院北京天文台

引言

多通道太阳磁场望远镜是一台以双折射滤光器为基础的视频磁像仪系统，它主要由60cm九通道望远镜、35cm太阳磁场望远镜、10cm全日面太阳磁场望远镜、14cmH α望远镜组成及8cm全日面Ca望远镜组成，具有在光学波段对太阳进行多层次、多形式的实时测量的功能。它的出现是太阳物理仪器的一项重大突破。

多通道望远镜中的35cm太阳磁场望远镜作为一个单独的系统已工作过多年，其余四个部分从1990年下半年起陆续安装、调试，历经近四年的时间，到目前为止，已基本达到设计要求。本文就简要介绍这四个部分在试观测期间取得的一些观测结果。

一. 九通道望远镜

九通道望远镜的设计工作谱线为CaII3968，HeII4686，MgI5173，FeI5247，HeI5876，FeI5576，FeI6302及H α 6563九条，但由于滤光器是万能可调系统，因此还可以在许多别的谱线上工作。理论上除了HeII4686和HeI5876两条发射线及FeI5576外，该系统可同时在其余六条谱线上进行太阳磁场的观测，这种实时的多层次测量特别有助于太阳三维磁结构的研究，而FeI5247和5250两条谱线是经常被用来作太阳小尺度磁场研究的著名谱线，在该系统中，由于它们仅在达到接收器之前才分为两束，这种几乎绝对的同时性可以排除以往用线对比例(line-ratio)法作太阳小尺度研究的许多不利条件。由于H α 这条广泛应用的色球线吸收线和HeI4686，HeI5876这两条发射线的使用，又使得我们可以不同的层次直接去观测研究耀斑的空间结构。上述这些工作都是当今太阳物理研究中的前沿学科，因此我们相信该望远镜必将对太阳物理的研究起到积极的促进作用。

1.1 白光像

九通道望远镜的物径口径为60cm，因此其衍射极限分辨率高于0.″2，不过这只有在成像系统和接收系统的综合分辨率与之匹配的情况下才可能达到。因为双折射滤光器的透过率很低，因此在有滤光器时侯像不可能太大，否则光量不足，因而估计系统的分辨率是在无滤光器的状态下进行的。试观测结果是令人满意的，以下我们将看到单帧图像的分辨率已经达到至少是接近衍射极限分辨率，而长积分的图像通过处理也可以接近这一分辨率。

1993年夏季，在望远镜光路调试完成后搜集到一批白光资料，观测中使用了5250±50Å的干涉滤光片，视场约45″×30″，系统分辨率约为0.″090×0.″058/pixel。图1

是一张单帧的米粒照片，CCD曝光时间40ms。由图中可见，米粒及米粒间的暗径都清晰可见，因为米粒间暗径的平均尺度约0.″4左右，因此这幅图的分辨率远高于0.″4的量级。图2显示的是用斑点干涉像复原方法得到的长积分的米粒图像，视场大小约12.″76×9.″9，单帧图像的曝光时间为1/1000秒，CCD扫描速度25帧/秒，采样时间共约30秒。其中c是单帧样本，虽然由于打印机的质量差而使分辨率降低了很多，米粒及其间的“暗径”仍然是容易分辨的，a是30秒内的长曝光像，b是相关改正后的长曝光像，d是运用斑点干涉像复原方法对这30秒内的资料处理后得到的结果，分辨率优于0.″5，而且这个分辨率是由于当时所用的CCD质量差造成的。如果CCD质量更好，这个分辨率会大大提高[1]。

1.2 单色像

在有滤光器的状态下，对我们所用的CCD而言，它的视场变为4.′5×3.′2。图3、图4均为6563通道在线心的单色像。图3为活动区，图4为暗条，因为观测时间在9月底，大气宁静度已很不理想，但即使如此，Hα的各种色球结构，例如色球纤维、纤维底部的亮点、谱斑等仍清晰可见。另外，我们还用录相带记录了一些日面边缘的Hα单色像，从这些录像上可以看到清楚的日珥、针状体等Hα结构。图5为HeI4686的单色像，因为它是一条发射线，因此在无发射时显示的仍然是光球特征。图中小黑子的本影、半影是可以分辨的，但由于兼顾米粒的反差，并不十分清晰，黑子之外的区域，米粒组织也是明显可以分辨的。此外，除了3968通道由于CCD不敏感而难于获得资料外，其它各路的单色像都不存在问题。至于3968通道，最好的办法是配备对紫区灵敏的CCD，这有待今后的改进。

1.3 磁场观测

在九通道望远镜中，经常用于磁场测量的是FeI5247、FeI5250和FeI6302这几条强的磁敏线，另外象CaII3968、MgI5173及Hα6563这些磁敏因子较小的通道也可用于磁场测量。前面已经提到由于接收器的原因，3968通道只能改做它用，而Hα的磁场非常弱，只有在大气宁静度非常好的时侯才会得到满意的结果。因此本文只给出前述四个通道的测量结果。在此需要说明的是，我们总是把九通道磁场测量的结果和35cm太阳磁场望远镜的结果相比，因为后者是一台性能非常优良的视频磁像仪系统，因此这种比较是可信的。磁场望远镜的磁图视场约为6′×4′，而所有九通道的结果，除非特别说明，都是4.′5×3′。另外，对于九通道磁场定标，我们采用由滤光器透过带轮廓与谱线轮廓卷积然后归算定标系数的简单定标方法，滤光器轮廓由理论计算得到，谱线轮廓由美国Livingston教授提供，他们的数据已做了各种散射光改正。精确的定标将由理论和实践两方面给出，这是今后努力的一个方向。

图6是双通道实时测量的磁场结果，所用谱线是5247和5250两条谱线，我们已经多次提到，多通道实时测量是我们这套系统的优势。例如对于Fe5247和5250这一著名的线对，它们的实时测量有助于解决太阳物理中一个古老而又热门的话题：太阳小尺

度磁场是强场还是弱场？但以往的仪器很难保证观测时的环境状态、观测起止时间、仪器的性能及状态等的完全一致。在九通道望远镜中，这两条谱线仅在到达接收器之前才分开，因而可以排除许多附加因素的影响。从图中可以看到二者的磁结构是一致的，一些小的差异，如场强略有不同等，可能是由于定标方法不十分严格引起的。

作为一个万能可调双折射滤光器系统，九通道滤光器的每一个通道都可以调到别的波长上工作，这里仅给出将5173通道调到5247、5250波长上的测量结果。图7是用5173通道测量多条谱线磁场的例子。

1.4 谱线轮廓

同样，由于九通道滤光器的万能可调性，我们还可以用它进行谱线轮廓的扫描。虽然这种轮廓不是同时得到的，但可用于某些大尺度速度场的研究。以下我们将给出对H α 6563和FeI5173谱线的扫描结果。

图8是6563的谱线轮廓，扫描区域为日面中心的宁静区。图中实线为实测的轮廓，圆圈是扫描点，共扫描约40点，扫描间隔约为0.0906Å。图中虚线为美国国立天文台Livingston教授提供的谱线轮廓，他们的光谱分辨率为0.007826Å。可见两条曲线的大致轮廓是一致的，它们的相关系数源于调波带的步进电机的误差以及天气的细小变化。获得这一组资料约需15－20分钟。

图9是MgI5172.699的谱线轮廓。同样，实线为实测结果，扫描区域为日面中心的宁静区。扫描点为60，步长为0.036Å，虚线为Livingston提供的轮廓，光谱分辨率为0.003467Å。同样，两条曲线吻合得非常好，相关因子约为0.95。获得这一组资料约需20－25分钟。

虽然以上两个例子给出的仅是谱线轮廓，但由它们极好的相关性我们可以肯定，该系统同样可以获得各Stokes参数轮廓，因为扫描谱线轮廓和扫描Stokes参数轮廓在方法上是一样的。但遗憾的是，由于这个时节大气宁静度极差，且太阳活动处于低年，因此我们目前没有获得这方面的资料。另外，由于受调波带用的步进电机速度限制，扫描谱线的时间分辨率较低，这将在以后加以改进。

二. 14cm H α 望远镜

该望远镜的基本目的是用作耀斑活动的监测及研究。它的滤光器的带宽为0.5Å，±32Å可调节。由于它的这种宽范围可调性，可以用作白光耀斑的观测。该望远镜有两套成像系统，其一为H α 局部像，另一路为全日面H α 像。局部像系统从91年开始工作，信号直接送往录像机。在观测时，由计算机自动控制录像机，可连续录像，也可隔一定间隔录一段。图10为一张耀斑期间的H α 局部像。最近，H α 全日面像也已调试成功，已经开始投入使用。

作为H α 望远镜的改造项目，目前已在该系统上安装了磁分析器，从而使得望远镜可以测量大尺度的H α 磁场，这也是一项很有价值的改进。

三. 10cm 全日面望远镜

该望远镜有两条工作谱线，FeI5324.19线主要用于全日面纵向磁场的测量，也可以测矢量磁场或速度场；FeI5576线是一条非磁敏线，主要用于全日面视向速度场的测量。该望远镜于1991年开始工作并得到了第一张全日面磁图。在此之前，太阳物理学家们使用的都是美国Kitt Peak的全日面磁场图，他们得到一幅全日面磁图需两个多小时，时间分辨率极低。我们的全日面磁图与Kitt Peak的资料相关性极好[2]，而且获得一幅磁图仅需1分钟左右，这种时间分辨率的提高对于太阳振荡及其它一些大尺度太阳特征的研究具有十分重要的意义。

图11为91年的一张全日面纵向磁场图。

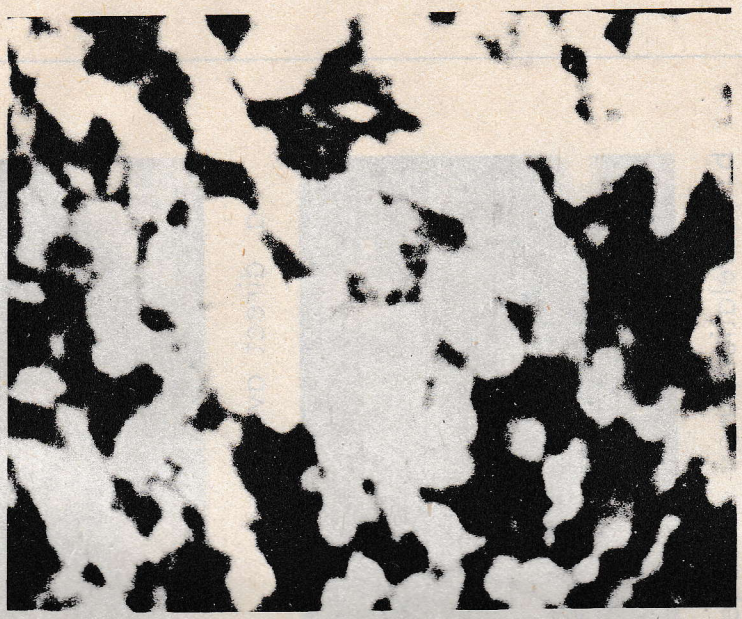
四、8cm 全日面望远镜

该望远镜使用一个D-Star滤光器，FWHM为2Å，工作谱线为CaII3933.664。它主要用来监视日面上的活动，因为众所周知，它的谱斑同光球磁场有非常好的对应关系。图12就是它的一张单色像，时间与图11的全日面磁图为同一天。可见Ca谱斑同光球磁场极好的相关性。

参考文献

[1] 邓元勇，艾国祥，张斌，天文学报，1994年，No.4

[2] 刘扬，宋国峰，王敬山，汪景秀，天体物理学报，1994年，No.2

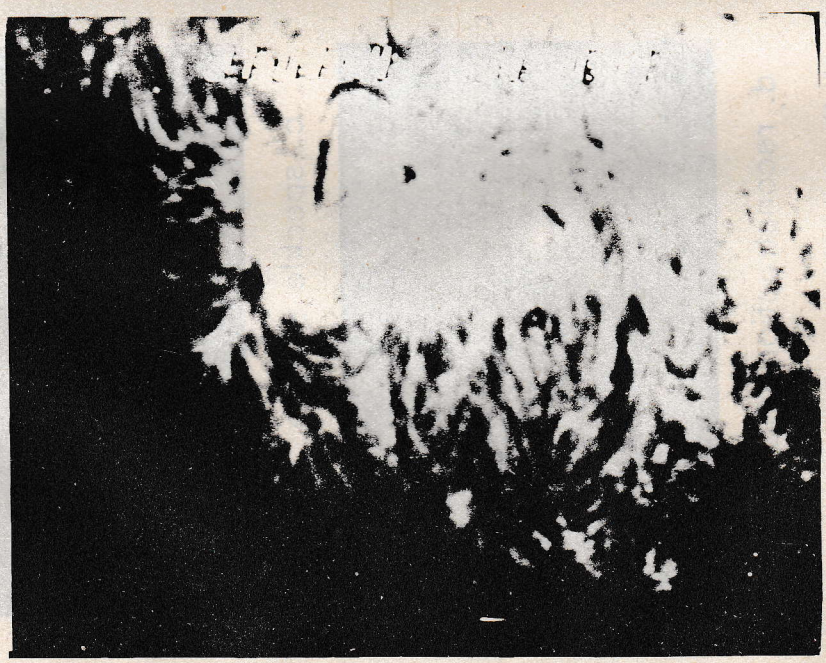


图一 九通道望远镜白光米粒像（短曝光）

*在无滤光器状态下，使用5250±50Å
干涉滤光片获得

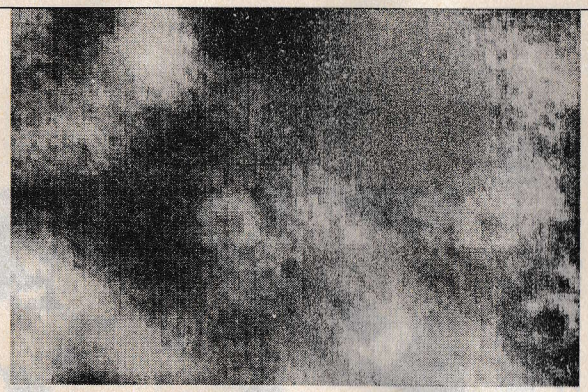
*视场：39"*32"

*观测时间：Jun-04, 1993

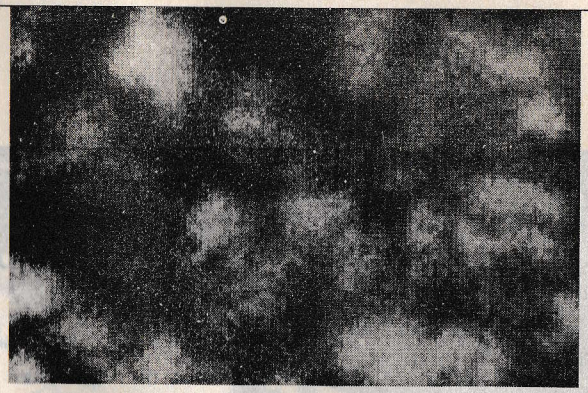


图三 九通道望远镜Hα单色像（活动区）

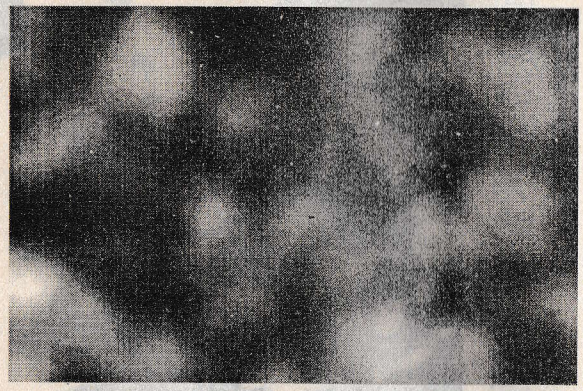
视场：4.'5*3.'2



a. direct average



c. speckle sample



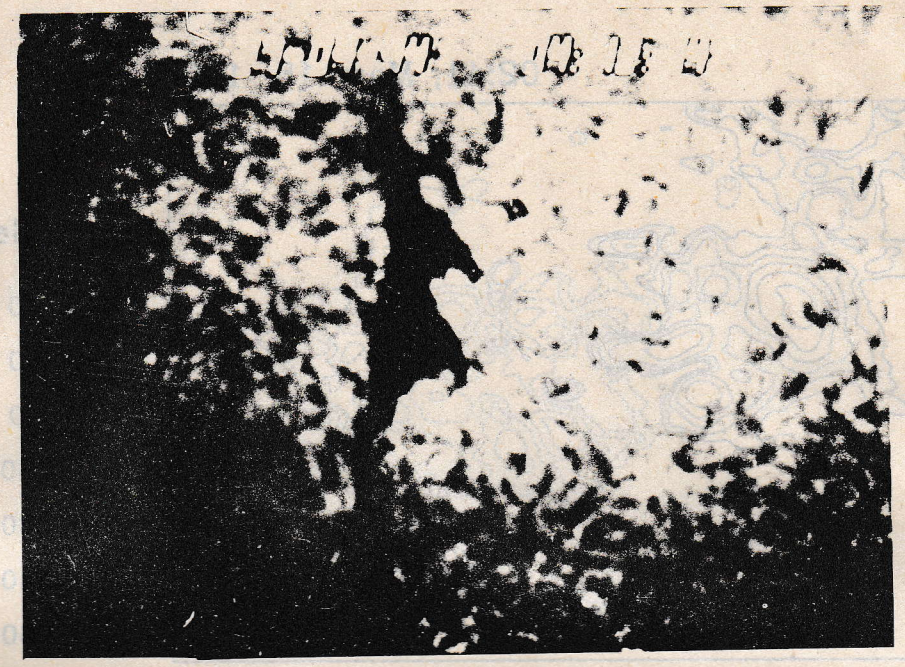
b. correlation then average

d. reconstruction image

图二　九通道望远镜白光米粒像（长曝光）

(a). 30秒长曝光像　　(b). 相关改正后的长曝光像

(c). 单幅短曝光像　　(d). 用斑点干涉方法处理后的图象



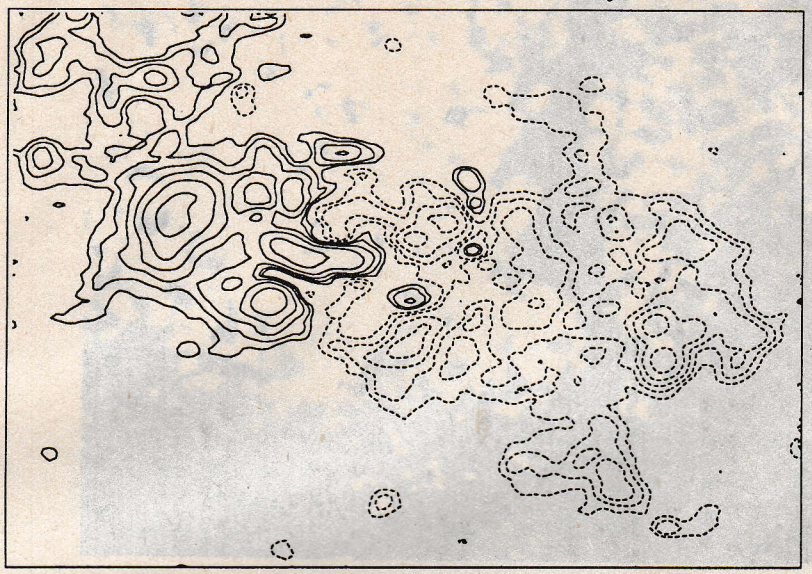
图四　九通道望远镜Hα单色像（暗条）

视场：4.'5*3.'2

图五　九通道望远镜He4686单色像

视场：4.'5*3.'2

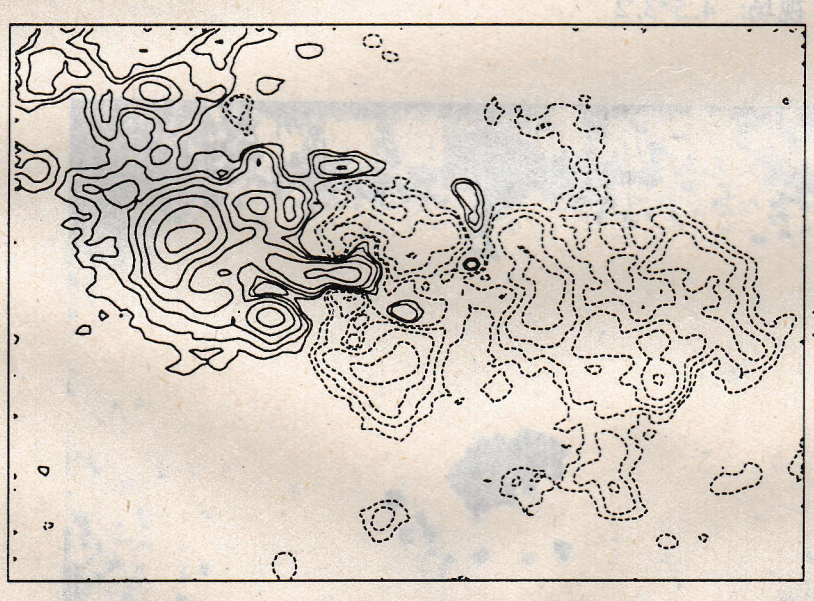
02:41, May-15, 1995



Level: Gauss

20
40
80
160
320
640
960
1280
1600
1920
2240
2560

magnetogram of FeI5247.06Å

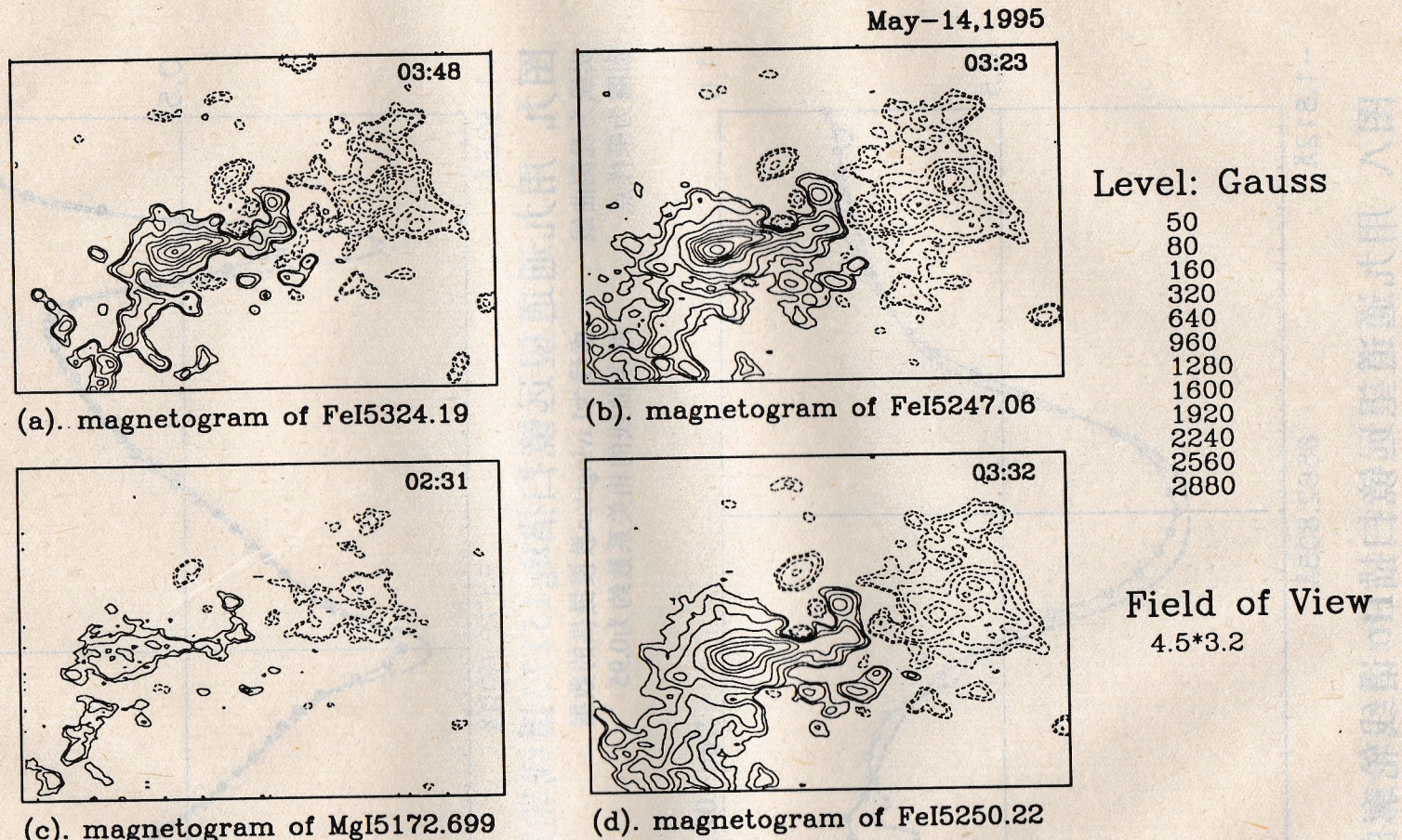


Field of View

4.5*3.2

magnetogram of FeI5250.22Å

图六　两通道实时磁场测量的例子（黑子）



(a). magnetogram of FeI5324.19

(b). magnetogram of FeI5247.06

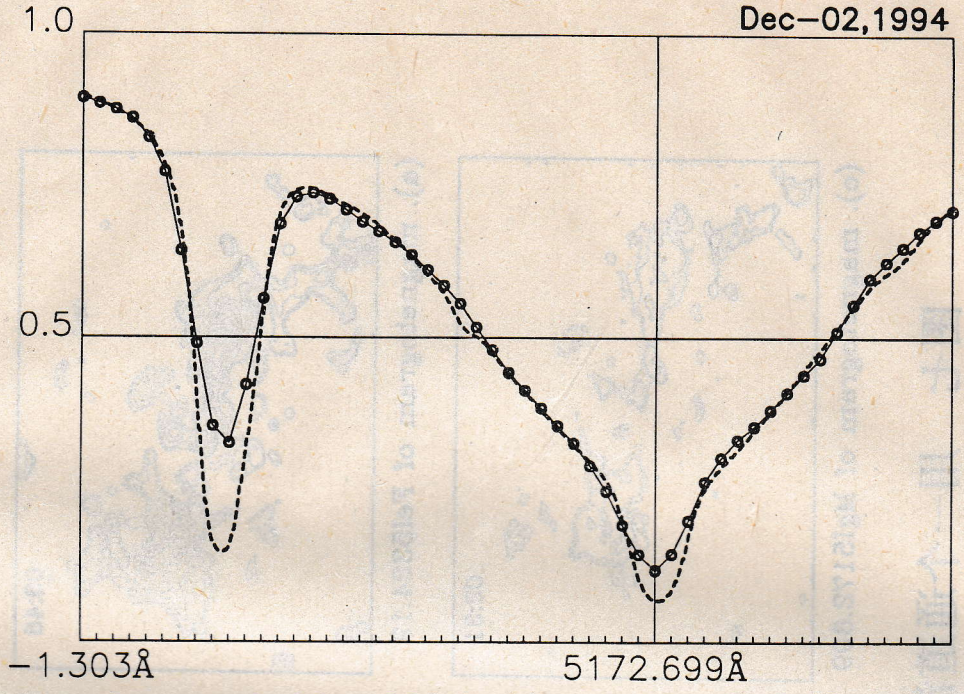
(c). magnetogram of MgI5172.699

(d). magnetogram of FeI5250.22

图七　用一个通道测量多条谱线磁场的例子

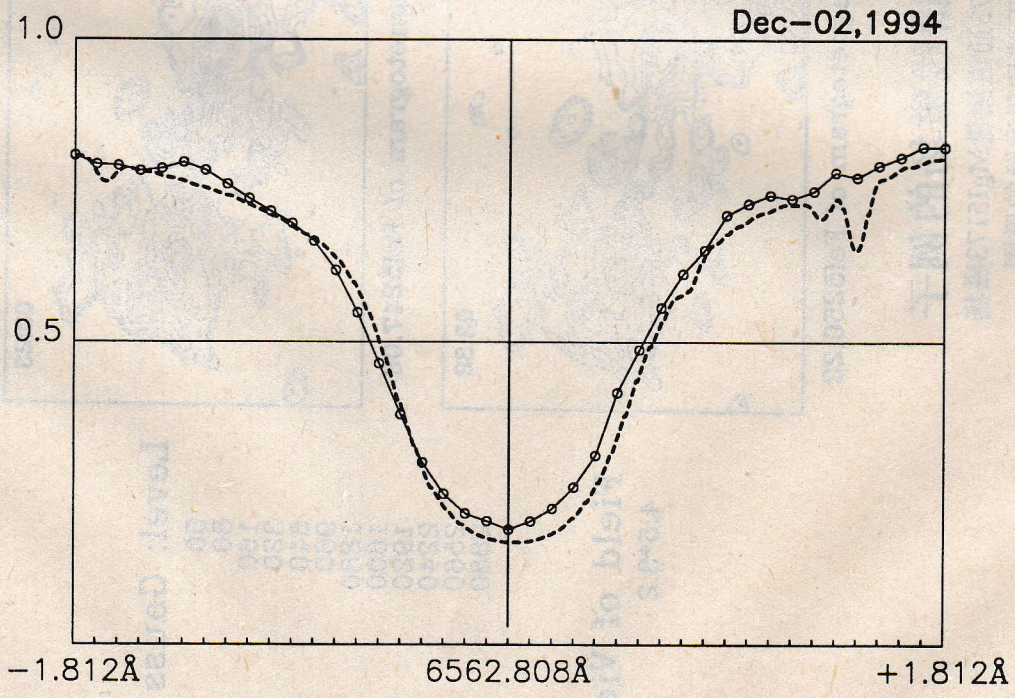
(b) 用5173通道测量FeI5247磁场　(c) 用5173通道测量MgI5173磁场

(d) 用5173通道测量FeI5250磁场　(a) 同一天磁场望远镜的磁图



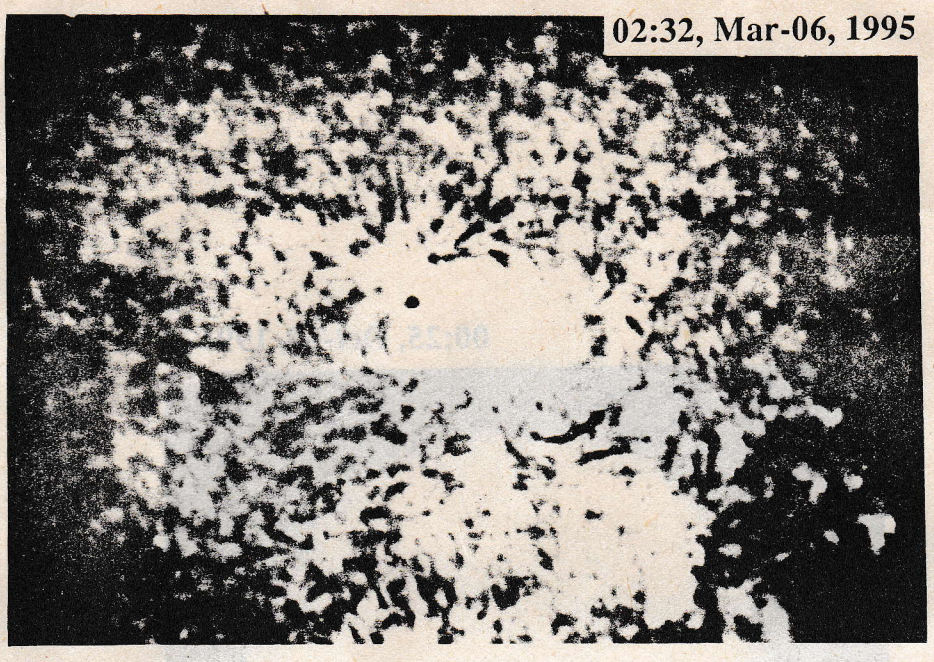
图九 用九通道望远镜扫描MgI5173谱线轮廓的例子

实线为观测曲线　　虚线为Livingston教授提供的数据
圆圈为采样点　　两条曲线的相关系数约为0.95



图八 用九通道望远镜扫描Hα谱线轮廓的例子

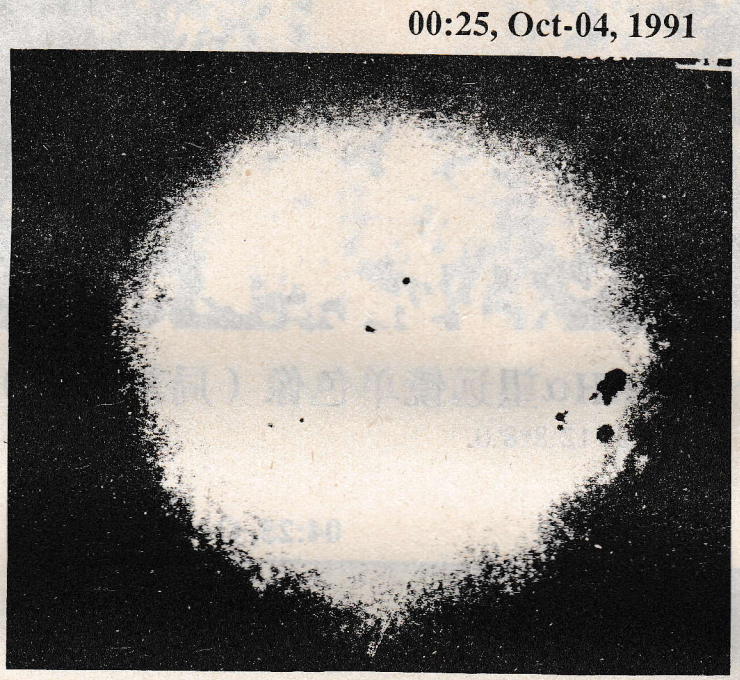
实线为观测曲线　　虚线为Livingston教授提供的数据
圆圈为采样点　　两条曲线的相关系数约为0.89



图十 14cmHα望远镜单色像（局部区域）

视场: 12'.8*8'.0

图十一 10cm全日面磁场望远镜纵向磁图



图十二　8cm全日面望远镜Ca单色像

“95 年全国夜视热成像学术研讨会”会议报道

由中国兵器工业总公司、中国兵工学会光学学会主办，北京理工大学、湖光仪器厂和《光学技术》杂志社协办的“95 年全国夜视热成像学术研讨会”于 95 年 5 月 4 日～8 日在江苏无锡召开。

出席本次会议的单位有：中国兵器工业总公司、国防工办、装甲兵研究所、昆明物理所、西安应用光学研究所、上海技术物理所、津航技术物理所、508 所、中科院北京天文台、西安光机所、南京电子器件研究所、长春光机所、清华大学、北京理工大学、南京理工大学、长春光机学院、装甲兵技术学院、云南光学仪器厂、江南光学仪器厂、5628 光学仪器厂、湖光仪器厂、平原光学仪器厂、华北光电所和国防工业出版社等 20 余个单位，70 余名代表。

本次学术会议共宣读了 30 余篇论文并出版了论文集，还特邀了学部委员昆明物理所所长苏君红、北京理工大学教授周立伟、西安应用光学研究所教授向世明、北京天文台研究员傅德廉等专家做了专题报告，会上有 20 余名代表宣读了论文。代表们对国内外夜视技术和热成像技术的发展水平与前景做了评述；对夜视器件及仪器、热像仪及其器件的生产工艺、特性及其应用进行了深入的讨论。

中国兵工学会光学学会
《光学技术》杂志社　　报道

光学技术（双月刊）　1975 年创刊　增刊/1995 年

主　管：中国兵器工业总公司
主　办：中国兵工学会光学学会
中国兵器工业总公司科技与质量监督局
中国北方光电工业总公司
承　办：北京理工大学
编　辑：《光学技术》编辑部
（北京理工大学，北京 100081）
电话：(010)8416688—3628
主　编：揭德尔
副 主 编：夏　阳

出　版：光学技术杂志社
印　刷：北京市顺新印刷厂
发 行 范 围：公开发行
国内总发行：北京市报刊发行局
国 内 订 购：全国各地邮局
国外总发行：中国国际图书贸易总公司
（北京 399 信箱，北京 100044）
刊　号：ISSN1002-1582（国际标准刊号）
CN11-1879/O4（国内统一刊号）
广告经营许可证：京海工商广字 0051 号

出版日期：1995. 9. 20　　国内统一刊号：CN11-1879/O4