

太阳磁场望远镜的进展

(中国科学院“太阳磁场望远镜联合研制组”)

提 要

由南京天文仪器厂,北京天文台,长春物理研究所和福州物质结构研究所等四单位联合研制的太阳磁场望远镜已在1982年基本完成,目前正在天文仪器厂由北京天文台太阳物理研究室进行试观测。初步结果表明仪器性能良好。

这台望远镜采用折射系统,物镜口径35厘米,有效视场 $4' \times 6'$ 。为了测量在磁场作用下磁敏谱线偏振光的四个Stokes参数,即向量磁场和视向速度场,采用了KD*P调制器和专门设计的窄带干涉滤光器组成的偏振测量系统。由于不存在歪曲横向磁场的仪器偏振,可以测量向量磁场。仪器备有三种接收系统:照相、光电和视频系统,也就兼有所有三种磁象仪的功能。

1975年,北京天文台太阳物理研究室进行了台址选择的工作,最后选定了北京郊区怀柔水库内的一个小半岛,望远镜将安置在岛端高25米的水泥塔上。观测室土建和园顶正在施工之中。园顶是特殊设计的,必要时可移出到水泥塔顶北端,与望远镜相距15米。

本文概述了仪器的研制结构和性能,并同美国马歇尔飞行中心的30厘米向量磁象仪作了比较。介绍了进一步提高仪器性能的措施。

一、引言和回顾

1953年,美国Babcock发明光电磁象仪(Photoelectric magnetograph)^[1],将磁场测量的灵敏度比经典方法提高2—3个数量级,开创了太阳磁场研究的新局面。三十年来,各种型式(照相、光电和视频)的太阳磁象仪相继问世,成为现代太阳物理学研究必不可少的手段。

目前世界上大约有20—30太阳磁象仪,它们大多是在高色散、高分辨力的太阳摄谱仪基础上发展起来的光电磁象仪,其优点是磁场测量灵敏度高(~ 1 高斯),空间分辨力也不低($\sim 1''$),可随意选择观测谱线和在多条谱线上同时工作。其代表是美国基特峰天文台在1974年建成的60厘米真空太阳塔—光电磁象仪^[2],现已成为逐日发布全日面纵向磁图的常规仪器。早期光电磁象仪是逐点对日面扫描的。近来,采用一维CCD(或Reticon)线阵,可用入射狭缝进行扫描,加快了观测速度,但时间分辨力仍是不高的,通常观测一个活动区,至少要几分钟。例如,上述基特峰天文台的光电磁象仪采用512通路的二极管线性阵作为接收器,它的每个像元对应日面1角秒,四次扫描完成全日面观测,需要38分钟。因此,光电磁象仪很难适应实时观测日面活动区内快速变化的磁场的要求。现有光电磁象仪的另一个缺陷是它的前置光学系统一般采用定天镜将太阳光引入大型摄谱仪,由于定天镜镜面的倾斜反射和

反射角随时间而变化,引进了难于精确补偿的仪器偏振,它往往淹没掉强度相对微弱的横向磁场的偏振信号,因此,现有光电磁象仪一般只测量向量磁场的—一个分量,即沿视线方向的纵向磁场。最近,法国墨东(Meudon)天文台开始执行 THEMIS 计划^[3],其核心是建造—台光学结构复杂的口径 90 厘米的真空太阳望远镜—向量光电磁象仪,它能避免仪器偏振的影响。

七十年代初,随着电视和电子计算机技术迅速发展,为了实时观测活动区磁场,有人在莱顿(Leighton)照相磁象仪^[4]基础上发展了视频磁象仪,其中有美国马歇尔飞行中心(MFSC)的 30 厘米向量磁象仪^[5],澳大利亚库哥拉(Culgoora)天文台的 20 厘米望远镜磁象仪^[6]等。它们都是小口径单色望远镜,其窄带滤光器的透过带被调到对准磁敏谱线,由于滤光器前的偏振光分析器处于轴对称光路中,前方没有倾斜反射或透射,因而不存在仪器偏振。接收器是二维光导摄像管,其输出信号由电子计算机处理,从而实现对活动区向量磁场的实时观测,时间分辨力为 10 秒钟左右,比光电磁象仪提高 1~2 个数量级。在现代,还可用二维阵列探测器(CCD 或 Reticon)代替摄像管。

早在六十年代末期,北京天文台太阳物理研究室就提出研制视频磁象仪的建议。1972年,经中国科学院批准,开始研制太阳磁场望远镜。天文仪器厂负责主机光机电的设计和研制,北京天文台同志承担双折射滤光器的光学设计,并参与其研制,负责在天文仪器厂进行试验性观测。福州物质结构研究所负责研制双折射滤光器KD*P晶体用的高压调制电源。而视频磁象仪的摄像机系统是由长春物理研究所承担研制的。十一年来,这四个单位先后有五十余名科技人员参与工作。1982年,望远镜光机电总联调在天文仪器厂完成,1983年4月交付北京天文台进行试验性观测。目前,怀柔水库太阳观测站的基建施工正在紧张进行,园顶也在北京的工厂投产,预计在1984年可将望远镜安装在怀柔站。

二、仪器的概述

图 1 示出在天文仪器厂观测室进行调试的磁场望远镜的外貌,这是一台折射望远镜,安置在叉式赤道基架上。图 2 示出望远镜的主光路系统的结构。物镜 O_1 通光孔径为 350mm,焦距 2800mm,对两条磁敏谱线 5324 Å 和 4861 Å 消色差,主焦点 F_0 处有一倾斜光阑,通光矩孔为 $4' \times 6'$,不用的太阳光被返射到镜筒之外,从而极大地减小了仪器内部的散射光来源。由主镜会聚的太阳光经准直镜 C 变成平行光。在准直镜和物镜之间,有一段包括太阳辐射高度集中的主焦点区在内的真空镜筒,占全部光路长度的 89%,目的是极大地减小镜筒内部由于太阳辐射热引起的空气湍动,提高成像质量。由准直镜出射的平行光经过磁场分析器、窄带双折射滤光器,由成像镜 M 会聚,焦点 F_4 前有一转像棱镜 P_1 ,可分别将太阳光反射入照相或光电接收系统;此棱镜还可移出光路,光线便直接射入视频接收系统。照相系统有两个成像位置 F_1 和 F_2 ,由棱镜 P_2 转换,比例尺分别为 0.05mm/弧秒和 0.15mm/弧秒。在这两个位置上,可先后拍摄反圆偏振(左和右旋)太阳像,再用 Leighton 法照相相减,获得纵向磁图。实际上,由于照相相减法操作十分麻烦,我们并不以它为主要观测手段。棱镜 P_1 转动 90° ,光线经过放大透镜组和两块棱镜,在 F_3 处成像(0.1mm/弧秒),那里有一个 X-Y 机械扫描器,

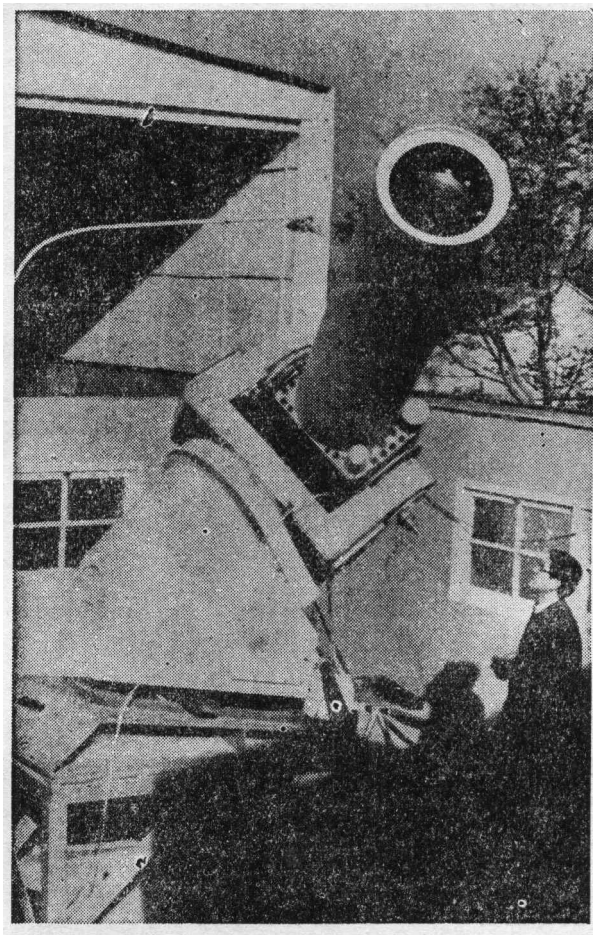


图 1 总装调试中的磁场望远镜

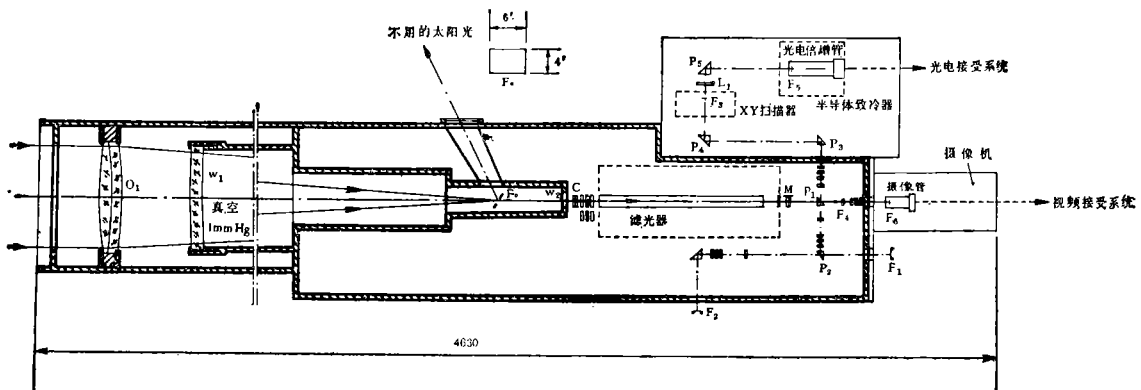


图 2 太阳磁场望远镜主光路结构

用 $2'' \times 2''$, $4'' \times 4''$ 或 $20'' \times 20''$ 的方孔对 $3' \times 4'$ 局部太阳像步进扫描, 出射光经法布里透镜 L_1 和棱镜 P_5 , 落到光电倍增管的光阴极上。为减小暗流, 提高信噪比, 光电倍增管是由半导体致冷器冷却的, 可将工作温度降到比环境温度低 $30^\circ \sim 35^\circ\text{C}$, 在夏天, 光阴极的工作温度可保持为 0°C 左右。光电倍增管输出的信号经前置放大, 选频放大, 相敏检波, 滤波积分, 模数转换, 除法电路, 最后用打印机输出。目前, 正着手用单板机和 X-Y 绘图仪代替打印机, 作出磁场强度图和视向速度图。以上系统实际上就是光电磁象仪。

将棱镜 P_1 移出光路, 光线便进入视频接收系统, 其工作作焦点 F_0 前, 有 5 组倍率不同的放大透镜组, 可分别转入光路, 给出 0.005 , 0.01 , 0.02 , 0.03 , 0.04mm/弧秒 等五种成像比例尺。此外, F_0 前还可插入测试卡投射镜筒, 供调节摄象管工作参数之用。视频系统包括摄象机, 取样保持器, 模数转换器, 精密电源, 误差校正系统和同步机等。采用硅靶摄象管作为二维接收器。输出信号经过传输电缆进入电子计算机 (目前借用天文仪器厂的 TQ-16 计算机), 实时完成有关运算, 最后, 用 X-Y 绘图仪显示磁图和视向速度图。以后, 将配备 Eclipse MV-6000 型 32 位超级小型机, 并引用图像处理技术, 以提高资料处理水平。

综上所述, 磁场望远镜集照相、光电和视频磁象仪于一体, 具有多种功能。此外, 备有 8 种不同成像比例尺, 为适应将来新型二维接受器, 留有极大的余地, 这在国际上同类型仪器中是不多的。但在另一方面, 也导致仪器光学系统的复杂性, 望远镜成像系统 (包括导行镜, 但不包括双折射滤光器) 共有 91 块透镜和棱镜, 数量之多, 也是少见的。口径 35 厘米的折射物镜, 在我国生产的折射天文望远镜中是最大的。

望远镜备有光电和目视导行镜, 分别位于镜筒左侧的上、下方, 两者均为折射系统。目视导行镜口径 60mm, 焦距 1080mm, 分束棱镜将入射光分送入照相机 ($d_0 = 10.5\text{mm}$) 和目视系统, 后者通过放大透镜, 给出 2024mm 的等值焦距, 成像在刻有日面坐标投影网络的分划板上, 用以判断被观测区域在日面上的坐标。光电导行镜口径 $\phi 70\text{mm}$, 与放大透镜组合, 等值焦距为 8975mm。太阳像直径 83.5mm, 导行精度 $1''$ 。传感器采用四个边缘检测光电器件是 DG-74E 型光导管 (峰值波长 $= 5550 \text{ \AA}$)。与传统方法不同的是: 前面的狭缝是按太阳像半经方向安置的, 于是, 无需随太阳角直径的变化而调整狭缝的径向位置。

望远镜采用叉式赤道装置和经典的传动机构: 传动箱为多电机差动叠加机构, 通过蜗轮付驱动望远镜。赤经驱动速度为: 快动 $120^\circ/\text{分}$, 慢动 $0.5^\circ/\text{分}$, 恒动 $15'/\text{分}$, 微动 $2'/\text{分}$ 。赤纬驱动速度, 慢动 $7.5^\circ - 0.5^\circ/\text{分}$, 微动 $2'/\text{分}$ 。为消除主蜗轮付的啮合间隙, 极轴和纬轴都由力矩电机通过齿轮付加上 10 公斤·米的固定力矩。

在镜筒设计中考虑了环境温度变化对光学系统稳定性的影响: 主镜室采用了马克苏托夫提出的温度补偿结构^[7], 准直镜通过由钢管和钢管组成的温度补偿杆同主镜室连接。诸光学元件的共轴性是由机械加工保证的, 只在轴向可作手动调焦移动。

三、双折射滤光器概述^[8]

采用双折射滤光器分析在磁场作用下磁敏谱线单色光的偏振, 目的在于能得到二维单色像, 可使用如摄象管, CCD, Reticon 等二维接收器, 获得比一维或逐点扫描 (摄谱仪) 观

测快得多的速度,通过电子计算机快速处理,可实现活动区快速变化的磁场和速度场的实时观测。此外,双折射滤光器采用的宽视场结构,可在整个观测视场内使透过带中心波长位置变化甚小,得以在锐谱线的线翼或线心工作,这是采用Fabry-Perot标准具的干涉滤光器所达不到的。但它的缺点是选择谱线不如摄谱仪灵活,透过带宽度也不象摄谱仪出射狭缝那样可以随意调节。此外,光谱分辨力($\sim 4 \cdot 10^4$)也不如光栅摄谱仪($R > 10^5$)高。因此,必须慎重选择滤光器的工作谱线。

北京天文台太阳物理研究室通过理论计算,选定 5324 \AA (FeI)和 4861 \AA (H_{β})两条工作谱线,以便观测光球(高层)和色球(低层)两个太阳大气层次的磁场和视向速度场,要求在两个波长处,透过带半宽(FWHI)分别为 0.15 \AA 和 0.12 \AA 。为达到 ± 100 米/秒的视向速度测量精度,要求滤光器中央的工作温度($T = 42^\circ\text{C}$)稳定到 $\pm 1/200^\circ\text{C}$ 。

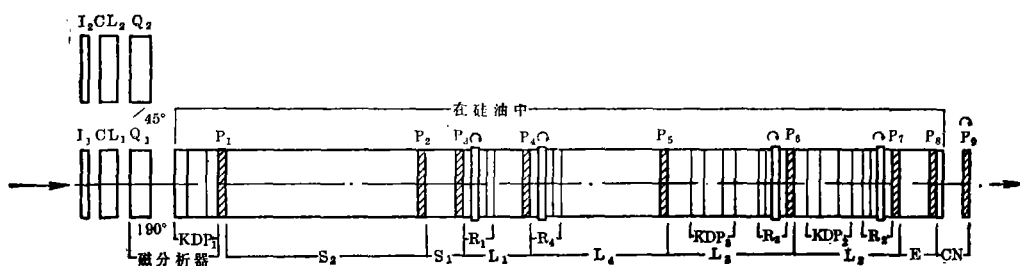


图3 磁场和速度场测量用窄带双折射滤光器的光学结构

图2示出双折射滤光器的光学结构。第一块偏振片 P_1 之前的磁场分析器由宽视场 KD^*P 电光调制器和 $1/4$ 消色差波片组成。滤光器设计的一个重要特点是在最后第2和第3Lyot宽视磁级中间,各安置一组宽视场 KD^*P 电光调制器,这种设计使得滤光器透过带能交替对准谱线两翼,从而测量视向速度。滤光器由一个Evans级^[9],二个Solc级^[10],4个宽视场的Lyot级^[9]组成,还有一级减少旁带散射光的反差级。总透过率(包括前置干涉滤光片)为5.3%。此外,有4个旋转元件,用来调节透过带的波长位置。

滤光器共有98片 $37 \times 37 \text{ mm}^2$ 的方形晶体(石英,冰洲石, KD^*P),它们的工艺要求相当高的光学加工是在天文仪器厂完成的^[11],所有晶体材料,尤其是符合光学要求的大块冰洲石,都是在国内解决的。为了加工晶体,还专门设计制造了晶体定轴测厚仪^[12],它在滤光器制造中起了很大的作用。 KD^*P 晶体透明电极所用的二氧化锡导电膜是由北京天文台专门制作的,透过率高达99%^[13]。所施加的调制电压,根据不同的应用,有 $\pm 970\text{V}$ 的135Hz矩形波,幅度2000V的270Hz锯齿波和 $\pm 970\text{V}$ 的0.1Hz矩形波等。 KD^*P 晶体置于恒温、隔绝空气的环境下,保证了长期的工作稳定性。

滤光器的机械设计和结构保证了晶片在光学上的准直:平行度和光轴方向误差小于 $2'$;诸可拆接头及转动环节的密封以防止硅油(用以消除光学元件的界面反射损失)泄漏;尽可能好的隔热保温措施,保证了工作温度的稳定。

滤光器的电气控制在于高灵敏度地检测滤光器的工作温度并随时补充热量的损失,以保证高度稳定的工作温度。用可以估读到 $1/1000^\circ\text{C}$ 温度变化的水银温度计,通过读数望远镜监测滤光器中部的温度,连续三昼夜未发现出温度变化,这表明工作温度的稳定性已优于所要

求的 $1/200^{\circ}\text{C}$ 。

四、和美国 MSFC 向量磁象仪的比较

就目前我们所知,美国 MSFC 的向量磁象仪^[14]是与我国太阳磁场望远镜性能相似的仪器。该仪器于 1973 年初次参与美国 Skylab/Apollo 计划的观测,尔后进行重大的修改,于 1976 年春开始进行日面向量磁场的测量,并逐日提供向量磁场数据。表 1 给出了它同我国磁场望远

表 1 我国太阳磁场望远镜和美国 MSFC 向量磁象仪的性能比较

比较项目	中国太阳磁场望远镜	美国 MSFC 向量磁象仪
可观测的物理量	向量磁场 r_0, r_u, r_v , 亮度场 r_l , 视向速度 v_{11}	向量磁场 r_0, r_u, r_v , 亮度场 r_l
工作谱线和可观测的层次	5324Å(光球高层) 4861Å(色球低层)	5250Å(光球)
望远镜	折射系统,口径 35 厘米,视场 $4' \times 6'$ 。有 8 种成像比例尺	反射系统,有效口径 28.8 厘米,视场 $5' \times 5'$ 。有两种太阳成像比例尺。
滤光器	专门设计制造的双折射滤光器,可在 5324Å 和 4861Å 工作,透过带半宽 0.15Å 和 0.12Å。内有叁组 KD*P 调制器,用以测量磁场和视向速度。	德国用 Zeiss 厂生产的双折射滤光器,在 5200Å 上工作,透过带半宽 0.12Å
接收器	有照相、光电和视频三种系统	视频系统
视频系统的设计指标	空间分辨力 $1''$, 时间分辨力 10° , 磁场分辨力 10G	空间分辨力 $1''$, 时间分辨力 10° , 磁场分辨力 20G

镜的性能比较。可以看出,作为视频磁象仪,两台仪器性能相当,但我国的太阳磁场望远镜多一条工作谱线,可多观测一个太阳大气层次。更重要的是太阳磁场望远镜可测量视向速度场,从而显示出较大的优越性。此外,拥有 8 种不同比例尺的太阳成像也是一个优点。因此,可以说太阳磁场望远镜的性能优于 MSFC 的向量磁象仪。还应指出的是 MSFC 磁象仪选用的工作谱线 5250 Å 是对磁场相当敏感的($g=3$),长期以来被许多光电磁象仪采用,但在七十年代有人指出这条谱线对温度也十分敏感^[14],它在黑子本影中的等值宽度是光球中的 3.4 倍,这种非磁场引起的等值宽度变化导致对观测资料的解释十分困难,这也是 MSFC 向量磁象仪的不足之处。

五、磁场望远镜的现状和展望

自 1983 年 4 月起,北京天文台太阳物理研究室的同志在天文仪器厂观测室用磁场望远镜进行试观测。由于系统透过率不高,在照相焦面 F_1 ($d_{\odot}=100\text{mm}$),曝光时间需 $0.5^{\text{s}} \sim 1^{\text{s}}$,受大气宁静度限制,分辨力约 $3''$,难以拍摄日面细节,因而尚未获得高质量的照相磁图。视

频系统已在同TQ-16 计算机联机调试, 已获得初步的纵向磁场图, 目前主要是用光电系统记录日面磁场和速度场, 初步的观测结果表明仪器具有良好的性能:

1) 用光电接收系统的监视目镜, 在大气宁静度较好的瞬间, 可清晰地看到日面米粒组织的网络结构, 还看到 $H\beta$ 色球的精细结构, 这表明望远镜具有较高的成像质量。大黑子本影实测光度为光球背景的 $1/6.5$, 说明仪器内部散射光较小。

2) 对中等黑子测得纵向磁场引起的最大圆偏振度为 17.6% 。光电系统测量的信噪比为 2000 和 1000 (积分时间 2° 和 0.5°), 对应纵向磁场灵敏度为 10 和 20 高斯。横向磁场灵敏度为 $150\sim 200$ 高斯, 视向速度灵敏度为 ± 30 米/秒。

3) 用 $20'' \times 20''$ 扫描孔, 积分时间 2° , 信噪比 20000, 对应纵向 (普遍) 磁场灵敏度 1 高斯。

图 4 示出 1983 年 6 月 18 日对一个活动区的观测结果, 表示为纵向磁场等强度轮廓图。



图 4 典型的观测记录

目前, 磁场望远镜的性能已达到或超过原定指标, 能稳定地进行太阳观测, 但为了进一步提高仪器的质量, 尽可能采用新技术, 近期内还将作以下改进:

- 1) 将滤光器中四块调波长的波片和偏振片的手动旋转改为由单板机控制的步进电机执行转动, 实现按程序自动调节透过带位置。
- 2) 改善滤光器中反差元件的结构, 进一步压低旁带散射光, 提高单色像的对比度。
- 3) 用 X-Y 绘图仪直接描绘出等强度磁图和视向速度图。

4) 为照相系统增加一种成像比例尺: $0.025\text{mm}/\text{弧秒}$, 即 $d_{\odot}=50\text{mm}$, 以缩短曝光时间, 提高空间分辨力。

5) 将目视导行镜中照相光路的像直径扩大到 60mm , 用一台照相机拍摄记录用的日光太阳像。

6) 在条件可能时, 用二维阵列检测器(CCD或 Reticon等)代替电视摄像管, 提高视频系统的观测质量。

目前, 怀柔太阳观测站的土建施工正在进行之中。怀柔站是我国第一个经过大气光学质量论证后确定的太阳台址^[16,17], 它是水域中的半岛, 与美国大熊湖(Big Bear)天文台^[18]的地理状况有相似之处。在这个近地面大气宁静度十分稳定的半岛上将望远镜架在 25 米高的塔上, 再加上圆顶结构的特殊设计, 它具有一般天文台圆顶的功能, 必要时, 还可平移到北端与望远镜相距 15 米的地方, 使得望远镜前方没有会被太阳晒热的建筑物引起的空气湍流。因此, 可以指望仪器所在处的大气宁静度是相当好的。由于怀柔水库是北京市规划中的游览风景区, 要求圆顶和观测室外形美观。经过多次反复, 最后确定了经北京市规划局认可的方案, 如图 5 所示。圆顶和观测室分别是由南京天文仪器厂和北京市建筑设计院设计的。

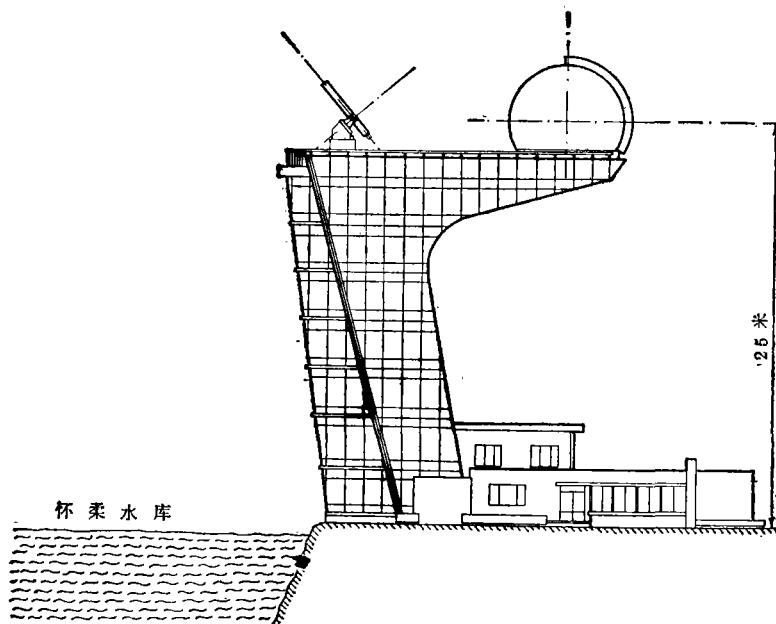


图 5 怀柔太阳观测站外貌

我们期望太阳磁场望远镜在正式安装和投入常规观测后, 能为我国太阳物理学的发展提供有价值的观测资料。

参 考 文 献

- [1] Babcock, H. W., *Ap. J.*, 118 (1953), 387.
- [2] Livingston, W. C., *Applied Optics*, 15 (1976), 33.
- [3] Hegvaeters, J., et al., "THEMIS", May 1982.

- [4] Leighton, R. B., *Ap. J.*, **130** (1959), 366.
- [5] Brueckner, G. E., *Solar magnetic fields*, ed. R. Howard, (1971).
- [6] Ramsey, J. V., et al., *Solar magnetic fields*, ed. R. Howard, 24, (1971),
- [7] 李挺, 光学技术, (1983), 4, 25.
- [8] 艾国祥等, “太阳磁场测量用的双折射滤光器”(天文学年会报告) (1982).
- [9] Evans, J. W. J., *O. S. A.*, **39** (1949), 229.
- [10] Solc, I. J., *O. S. A.*, **55** (1965), 621.
- [11] 何凤宝, 光仪技术, (1981), 4, 61.
- [12] 杨还等, 北京天文台台刊, (1978), 11, 41.
- [13] 胡岳凤等, 光学技术, (1980), 6, 32.
- [14] Hagyard, N. P., et al. NASA TM-82045, February 1981.
- [15] 叶式辉, “天体的磁场”, 65, (1978).
- [16] 史忠先等, 天文学报, **17**(1976), 193.
- [17] 王建民等, 天文学报, **18**(1977), 182.
- [18] Zirin, H., *Sky & Teles.*, **39** (1970), 215.

THE PROGRESS OF THE SOLAR TELESCOPE-MAGNETOGRAPH

(The Co-operative development group of the solar telescope-magnetograph, Academia Sinica)

Abstract

The solar telescope-magnetograph which is developed co-operatively by the Nanjing Astronomical Instruments Factory, the Beijing Observatory, the Changchun Physics Institute and the Fuzhou Matter Structure Institute has been produced in Nanjing. At present, this telescope is being used for trial observation in the factory. The preliminary observational results show that the performance of the telescope is very good.

This telescope has a refractive imaging system with a doublet objective of 35cm aperture and a 4'x6' effective field of view. In order to measure the vector magnetic fields and the radial velocity, a polarization measuring system made up of a KD*P modulator and a specially designed narrow band birefringent filter is used. There are three kinds of detective systems in the telescope: The photographic, the photoelectric and the video system.

In 1975, after the site investigation for the telescope was done, the solar physicists of the Beijing Observatory chose definitely a small peninsula inside the Beijing Huairou Reservoir, the telescope will be installed on a 25m tower building at the peninsula.

In this paper, the development, construction and performance of the telescope are presented. A comparison between this telescope and the MSFC's vector magnetograph of the U. S. A. is given. Finally, some considerations for further improving the telescope performance of the telescope are described.