

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 Φ 600, 主焦距 $F=1500$, 材料: 零膨胀玻璃。付镜为椭球面反射镜, 口径 Φ 154, 主付镜间距为 1861.7, 组合焦距 $F=10000$, 主光路的垂轴放大率 $\beta_1=10000/1500=6.66$, 轴向放大率 $\alpha_1=\beta_1^2=4.44$, 准直成象系统的垂轴放大率 $\beta_2=1.2$, 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 $4' \times 5'$ 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, 并同时九个视屏上显象。

由于滤光器透过率很低 ($\approx 3\%$), 透过带很窄 ($0.05\text{\AA} \sim 0.5\text{\AA}$) 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 Φ 640 入射密封窗, 主镜后放置 Φ 200 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 $3^{\circ} - 5^{\circ}$ 。因此设置了地平高度保护。

二、主镜室

2.1、主镜: 图 3

主镜坯 $\Phi 620 \times 80$, 中心孔 $\Phi 100$, 有效口径 $\Phi 600$, 焦距 $F=1500$, 抛物面, 微晶玻璃。主镜重量:

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

式中: V ——体积 (cm^3), ρ ——比重 $= 0.00258 \text{Kg/cm}^3$

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

$$G = 55.5 \text{Kg}, G_{\text{外}} = 60 \text{Kg}$$

2.2、主镜的温度变形计算:

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

2.2.2、镜面温度变形引入的光程差 δ :

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

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, k_9 玻璃的 $k = 7.2 \times 10^{-6}$, 微晶玻璃 $K < 1.5 \times 10^{-7}$, 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°C , 则 $r=300$, $R=3000$, $K=1.5 \times 10^{-7}$, $\Delta T=10$,

$$\delta = 0.45 \times 10^{-4} \text{mm} = 0.045 \mu \approx \lambda / 12$$

与镜面加工误差基本一致。若用普通玻璃则要求温差 $< 1/5^{\circ}\text{C}$ 。

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: $P_{\text{内}} \times 60 = 2P_{\text{外}} \times 15$, $P_{\text{内}} + 2P_{\text{外}} = 1/30G = 20 \text{kg}$

$$\therefore P_{\text{内}} = 4 \text{kg}, P_{\text{外}} = 8 \text{kg}$$

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

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

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

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

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

$r = 13.55\text{g/cm}^3$, S —水银带的接触宽度 $S = 1.6\text{cm}$

由图可见ABC面积大小,取决于主镜的尺寸 R ,及水银面高度 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	2654cm ²	2821.4cm ²	2932cm ²	2992cm ²
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 $\alpha = 60^\circ$ 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 $\delta - e = 25\mu$, $\delta + e = 31\mu$

$$\therefore \delta = 28\mu \quad e = 3\mu$$

$e = +3\mu$ 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 $<3\mu - 5\mu$,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, $\Phi 160 \times 20$,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 $<\lambda/8$ 。

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 $\Phi 80 \times 480$ 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 $\Phi 154 \times 20$,内孔 $\Phi 40$,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 $\pm 2.5\text{mm}$,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 $S=6\text{mm}$,最小调焦量为 $1.5/360 \times 1/50 \times 6=0.5\mu/\text{步}$ 。

3.5、调焦量与温度的关系

设一年的温度变化为 $-30\sim 50^\circ\text{C}$,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

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

式中 L = 主副镜间距 = 1861

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

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

温度升高,副镜应下行 $0.021 \cdot \Delta T$

温度下降,副镜应上行 $0.021 \cdot \Delta T$

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

上行极限读数为 -0.02V ,下行极限读数为 $+0.60\text{V}$ 。

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 $\Phi 39 \times 147$,螺距 $S=6$;滚珠 $\Phi 3.969$,分布圆 $\Phi 40$ 。

内通孔 $\Phi 18$ —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 $\Phi 60 \times \Phi 92 \times 40$,材料:黄铜,中间有隔套筒, $\Phi 60 \times \Phi 92 \times 70$,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 $4' \times 5'$;线尺寸 $1.75 \times 2.18\text{mm}$,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 $A = \pi R^2 = 3.14 \times 30^2 = 2840\text{cm}^2$

太阳能 $W = 2 \times 2840 / (60 \times 1000) = 0.1 \text{千卡/秒} = 0.4 \text{千瓦}$

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

$$[1 - (7' / 32')^2] \times 0.7 \times 0.4 = 0.266 \text{千瓦}$$

有效透过光能为

$$[4' \times 5' / 3.14 \times 16^2] \times 0.4 = 0.01 \text{千瓦}$$

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 $\Phi 20 \times \Phi 34 \times 47$ 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热电偶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 $\Delta t = 380^\circ\text{C}$,焦面 $t = 420^\circ\text{C}$

热管式焦面散热器 3.3mV $\Delta t = 47.5^\circ\text{C}$ $t = 90^\circ\text{C}$

水冷式散热器 3.1mV $\Delta t = 45^\circ\text{C}$ $t = 87^\circ\text{C}$

(室温 35°C , 镜筒表面温度 42°C)

五、入射真空密封窗, 镜罩, 镜前冷却

5.1、入射窗玻璃尺寸 $\Phi 640 \times 40$, 材料 K9, 平行度 $< 1''$, 平面度 $< \lambda/8$, 重 40kg, $E = 7 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$, $R = 32$, $h = 4$

抽真空时的最大应力

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

中心变形量

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

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	Δ cm	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

$$\Delta \lambda = \Delta T t [(n-1) \alpha + dn/dt] / \lambda = \Delta T t G \quad (10)$$

式中 G ——温度效应系数(与材料有关)

ΔT ——温差($^\circ\text{C}$)

t ——厚度(cm)

K9 与 K7 相类似, $G = 0.107272 (\mu/\text{度} \cdot \text{cm})$

若要求光程差 $\Delta \lambda < \lambda/10$ 时, LEST: 要求 $\Delta T = 1/30^\circ\text{C}$

多通道: $\Delta T = 1/8^\circ\text{C}$

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

$\Delta \lambda = \text{应力系数} \cdot \text{应力} \cdot \text{厚度}$

应力系数 $2.74 \times 10^{-6} \text{mm}^2/\text{N}$, 应力 $=76.8 \text{kg}/\text{cm}^2 = 7.5 \text{N}/\text{mm}^2$

$\Delta \lambda_p = 2.74 \times 10^{-6} \times 7.5 = 0.2 \mu = 0.4 \lambda$

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。

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

对于K9玻璃: $E = 8.277 \times 10^5$, $\alpha = 7.1 \times 10^{-6}$, $\beta = 2.74 \times 10^{-7}$, $K = 19.32$

熔石英: $E = 7.45 \times 10^5$, $\alpha = 0.52 \times 10^{-6}$, $\beta = 3.45 \times 10^{-7}$, $K = 1.604$

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: $B = 2.74 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{kg}$

d—密度 $d = 0.000251 \text{kg}/\text{cm}^3$

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 $\Phi 690$,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:

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

$$\psi_1 = \frac{(P_1 + P_2)L^2}{6EJ} = 1.7'' \quad (14)$$

式中 P_1 = 筒体重120kg

P_2 = 消光筒重50kg

$E = 2.1 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$ (钢的弹性模量)

J - 截面惯性矩 = 51400 cm^4

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

$$f_2 = \frac{QL^3}{3EJ} = 27\mu \quad (15)$$

$$\psi_2 = \frac{QL^2}{2EJ} = 4.5'' \quad (16)$$

式中 $Q = 150\text{kg}$,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 (kg/cm^2)的理论值为

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

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 $n = 3-4$, $\lambda = \pi R/l = 0.6$

$$Z = \frac{\lambda^2 + n^2}{\lambda} = 21 \quad (18)$$

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

求得临界力: $P_{k\text{计}} = 5.334 \text{kg/cm}^2$

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 $P_{k\text{实}} = 2.6 \text{kg/cm}^2$ 真空气压, 故镜筒在抽真空时是稳定的。

七、方箱

外形尺寸为 $700 \times 700 \times 2250$, 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 P_1	时间间隔 Δt	真空表终值 P_2	真空压力变化 ΔP	泄漏率 $\Delta P / \Delta T$	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 $32 \times 46 \times 200$

- 要求: 1) X 方向位移量 $\pm 2\text{mm}$
- 2) Y 方向位移量 $\pm 2\text{mm}$
- 3) Z 方向位移量 $47 \pm 5\text{mm}$
- 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) 导轨与孔的配合为 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蝶阀连接一体,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、蝶阀(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 $-0.096 \sim -0.098\text{MPa}$ 时,先关球阀,再切断真空泵电源,再关闭蝶阀。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,可以不再关闭蝶阀,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

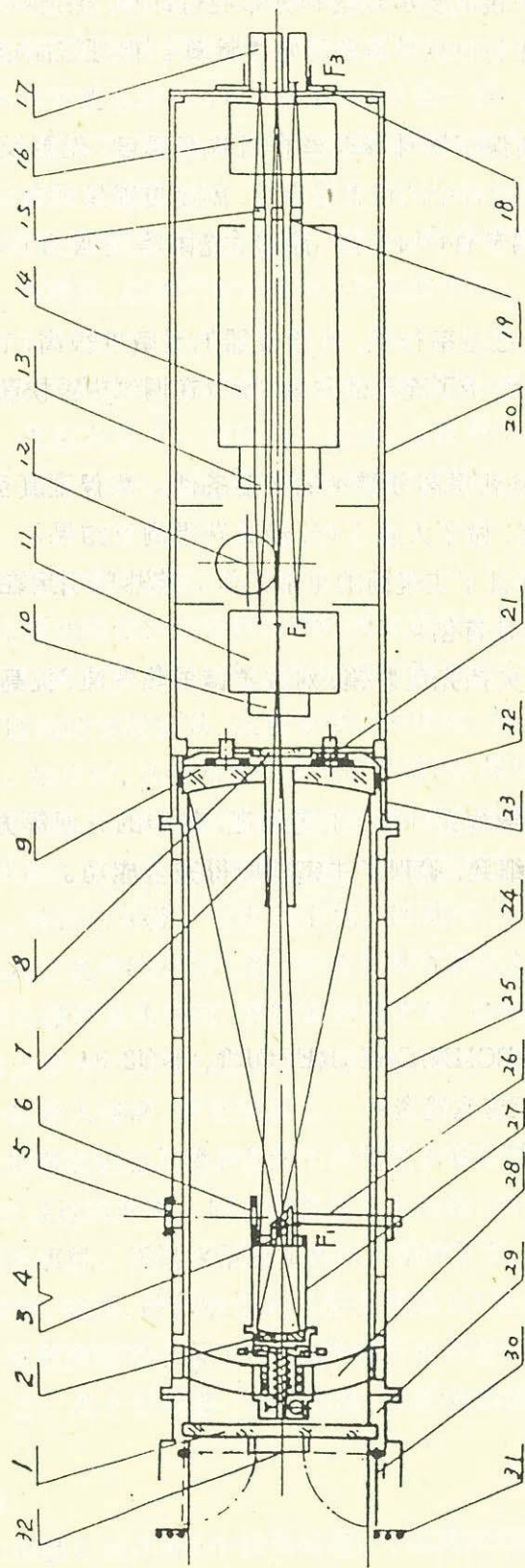


图1 真空主镜筒示意图

- 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及波片转基 11. 减光器 12. 纬抽 13. 准直镜组 14. 九通通光期 15. 成像镜组 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

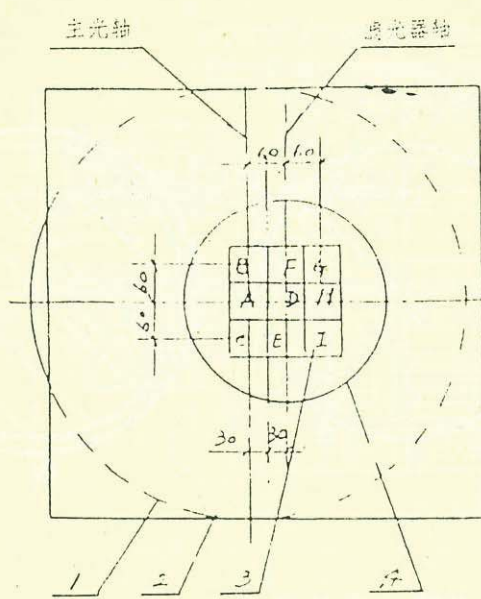


图2. 主光路系统与滤光器接收器的分布

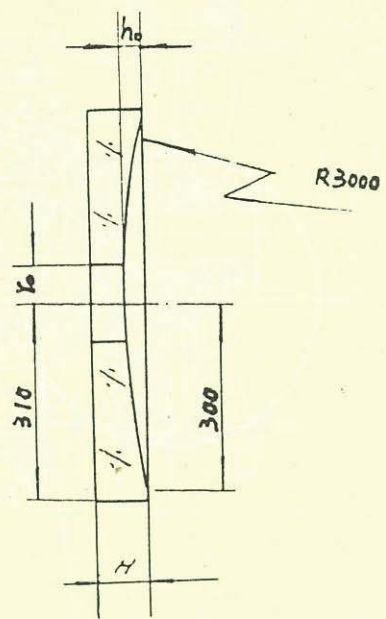


图3. 主镜

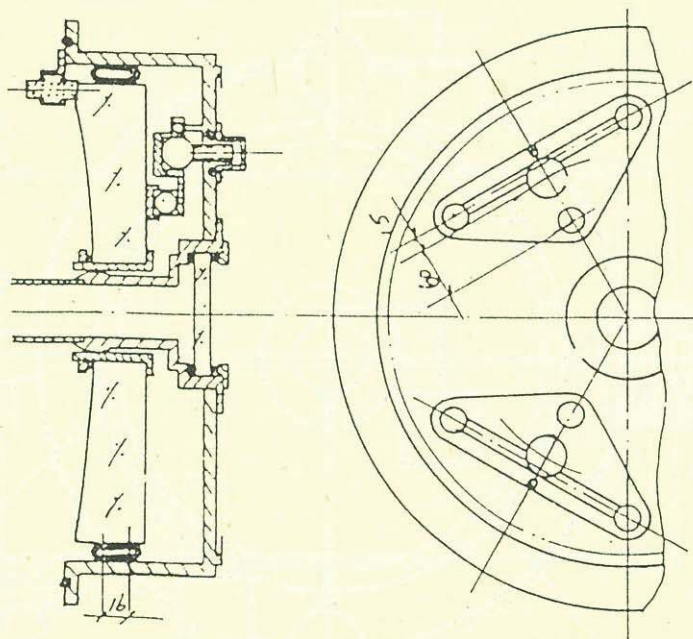


图4. 主镜室示意图

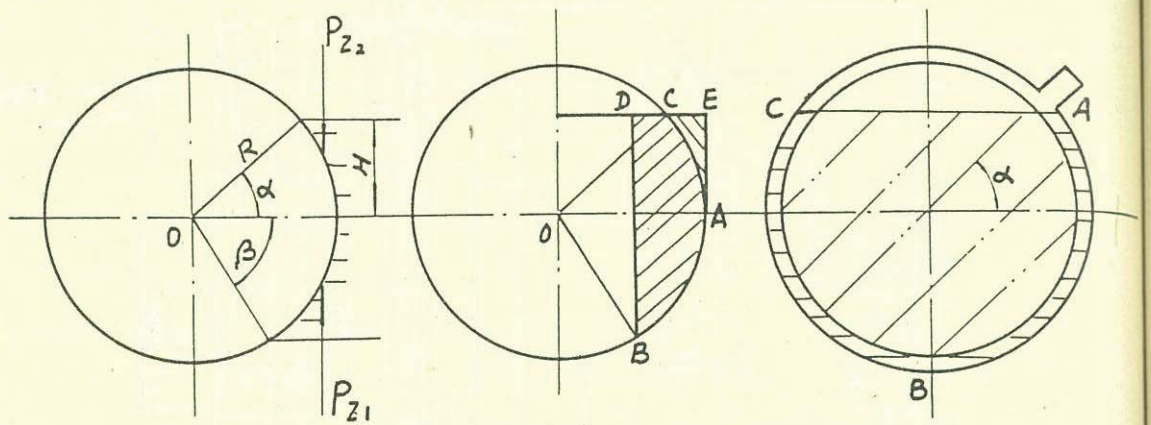


图5. 水银支承的浮力

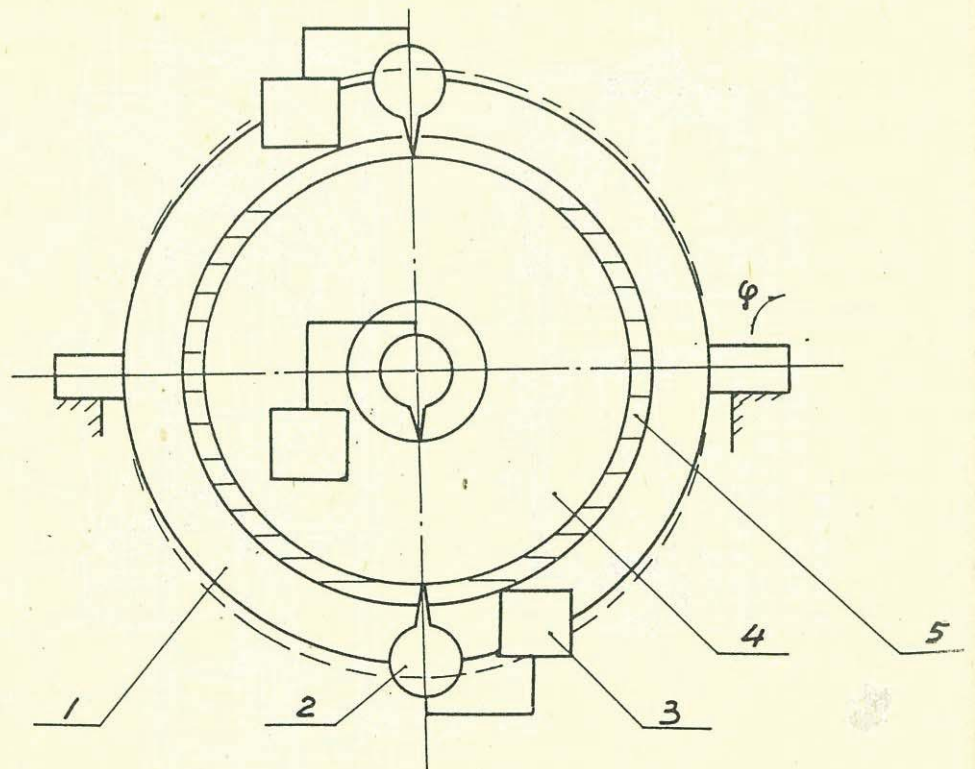


图6. 水银支承的测试

1. 主镜室 2. 千分表 3. 磁性表架 4. 代主镜 5. 水银带

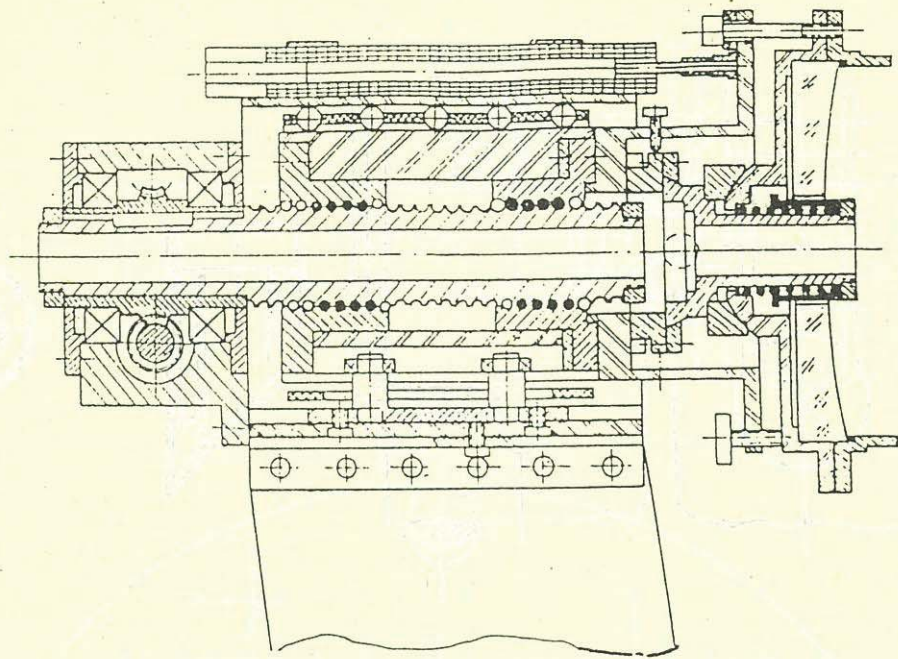


图7. 付镜机构

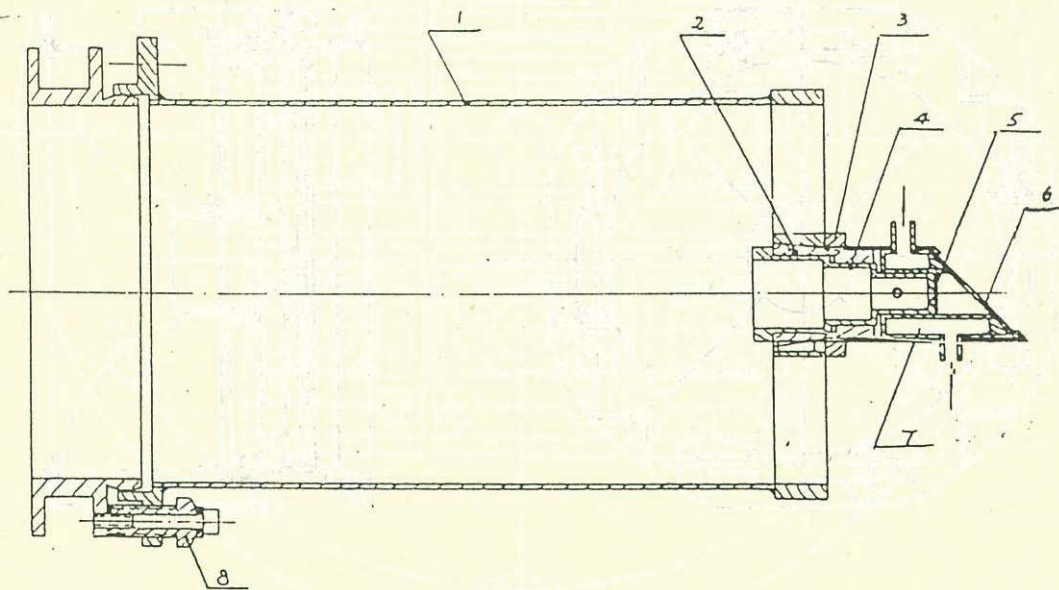


图8. 光阑部套

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

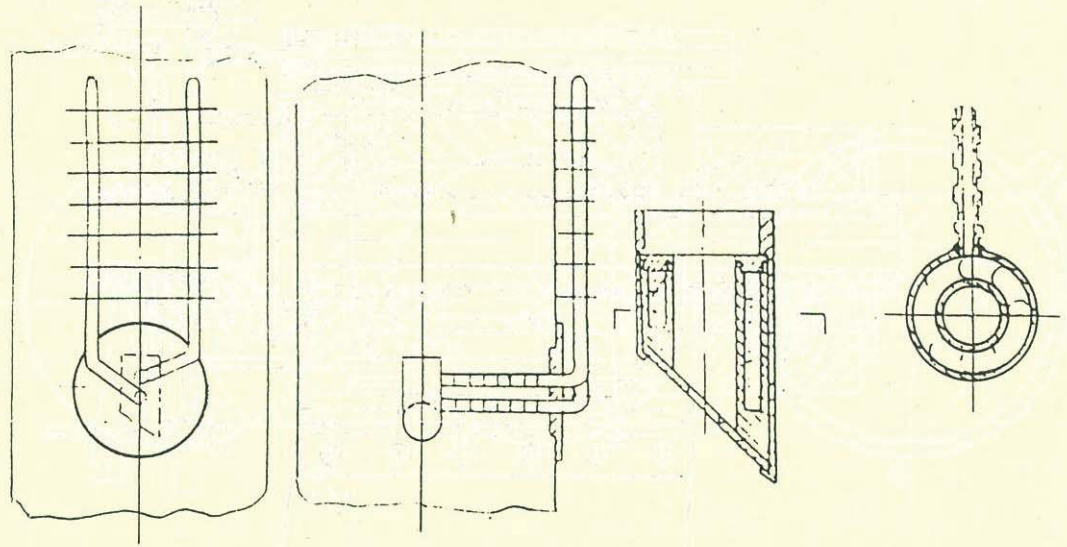


图9. 焦面散热器

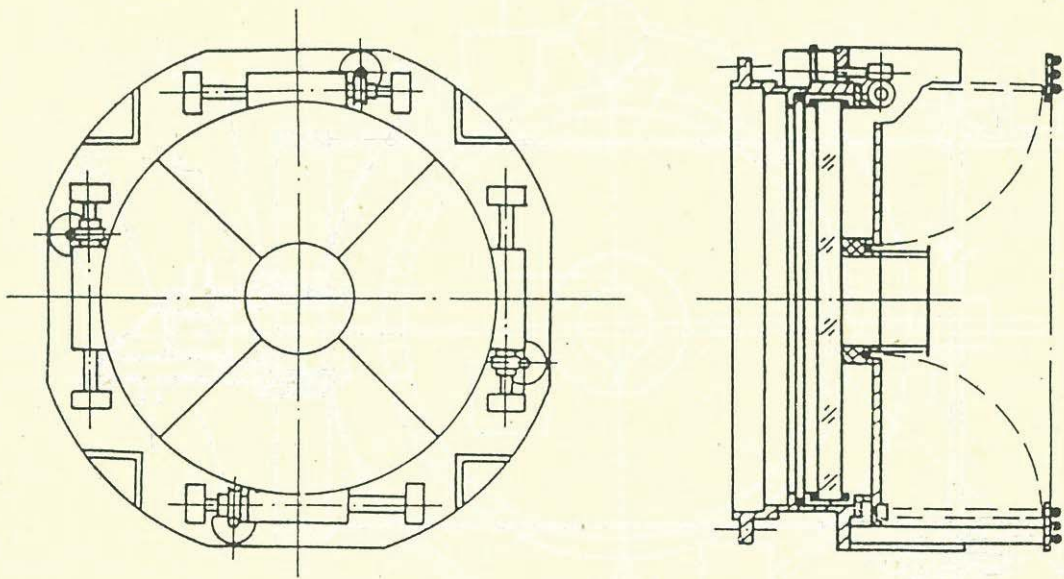


图10. 密封窗

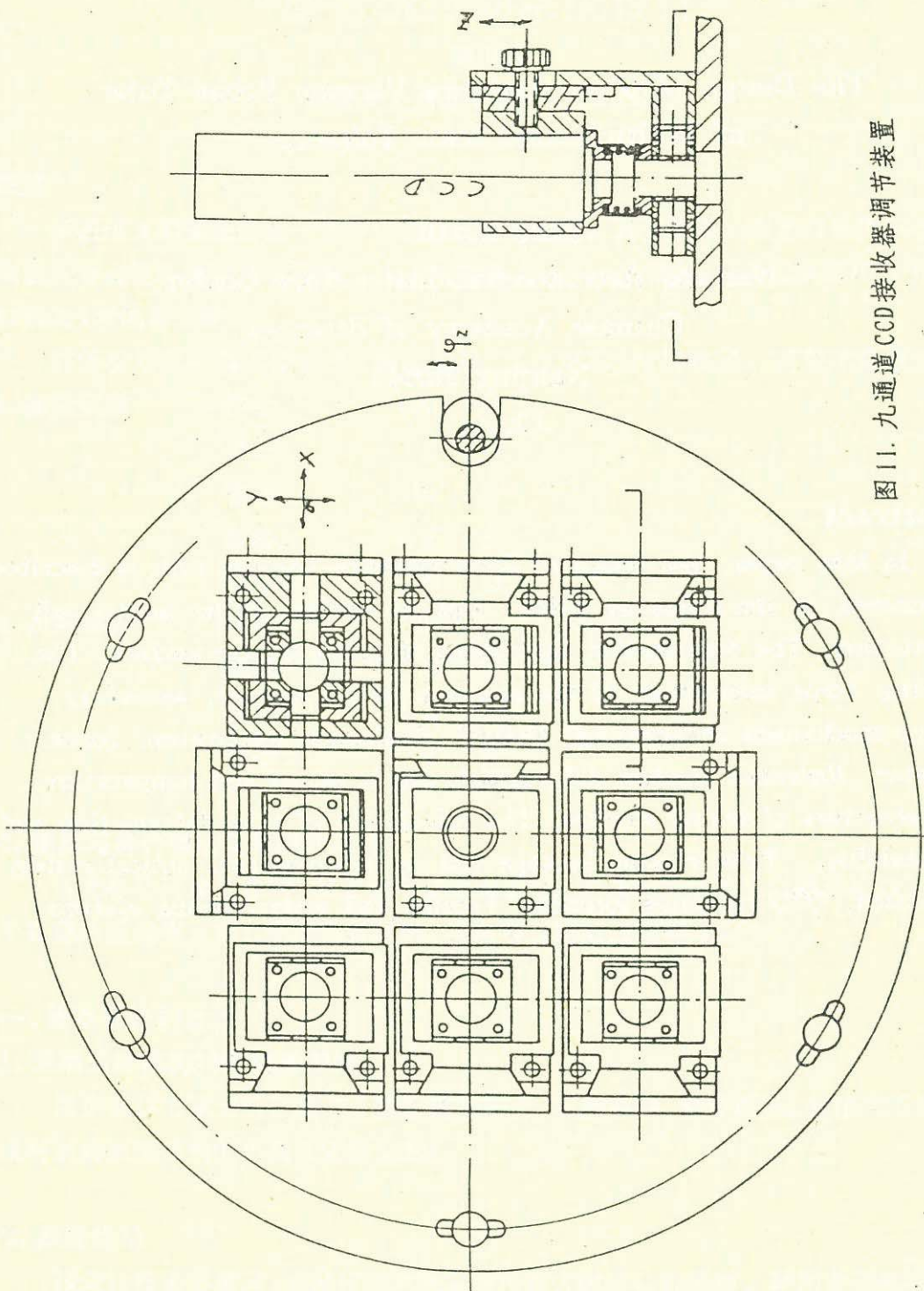


图 11. 九通道 CCD 接收器调节装置

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

Yang Huan

Nanjing Astronomical Instrument Center,
Chinese Academy of Sciences,
Nanjing 210042
China

Abstract

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