

磁场望远镜机架设计

杨 还

(南京天文仪器厂)

一、机架型式的选择:

为了简化望远镜跟踪控制系统,采用赤道式机架。赤道式又可分为双柱式和叉式两种,据文献推荐,当地理纬度 $\varphi \geq 40^\circ$, 建议采用叉式, 而 $\varphi < 40^\circ$, 采用双柱式。本望远镜安装在北京, $\varphi = 40^\circ$, 两种型式常均采用。但太阳望远镜, 赤纬角变化范围较小, 即 $\delta = \pm 23.5^\circ$, 叉臂甚短, 刚性好, 且叉式为对称式, 不需另加平衡重, 故重量轻, 结构尺寸亦小, 外形美观, 故我们选择叉式机架。图 1 为望远镜外貌。

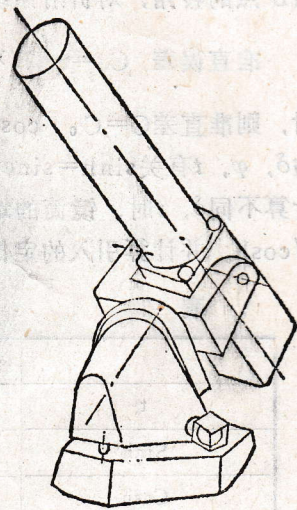


图 1

二、仪器的跟踪精度分析:

1、太阳本身运动的不均匀性:

$$\frac{d\Delta t}{dT} = 5''/5\text{分钟}; \quad \frac{d\Delta\delta}{dT} = 1.6''/5\text{分钟}.$$

2、电机的稳速精度为 $\frac{1}{1000}$

$$\frac{d\Delta t}{dT} = \frac{5 \times 15 \times 60''}{1000 \times 5\text{分钟}} = 4.5''/5\text{分钟}$$

3、蒙气差:

由于蒙气差的影响, 太阳的真坐标 (δ_\odot, t_\odot) 与观察到的太阳坐标 (δ, t) 是有差异的。其差值 $\Delta\delta, \Delta t$ 与地理纬度 φ , 纬角 δ , 时角 t 有关, 计算公式相当复杂, 这里只把计算的结果列在下面。

	t	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°
$\delta=0$	Δt	7.5''	8.4''	9.4''	11.6''	14.3''	17.6''	25.4''
	$\Delta\delta$	3.5''	4.3''	5.2''	8.6''	8.1''	12.4''	19''

由表上数据可见, 当 t 在 $55^\circ \sim 60^\circ$ 时, 产生最大的跟踪误差。

$$\frac{d\Delta t}{dT} = \frac{25.4'' - 17.6''}{20\text{分钟}} = 2''/5\text{分钟}, \quad \frac{d\Delta\delta}{dT} = \frac{19'' - 12.4''}{20\text{分钟}} = 1.65''/5\text{分钟}.$$

4. 镜筒的自重变形; 已知: $l=240\text{cm}$; 外径 $D=49\text{cm}$, 内径 $d=48.2\text{cm}$ B点处主镜重量 $W=50\text{kg}$ 焦距 $F=280\text{cm}$, 镜筒的惯性矩

$$J = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} = 35000\text{cm}^4$$

自重的均布负荷 q 为

$$q = \frac{3.14 \times 48.2 \times 0.8 \times 7.8}{1000} = 0.944\text{kg/cm}$$

设镜筒处于水平时, 则 $p=W=50\text{kg}$ B点的弯测量 f_b

$$f_b = \frac{pl^3}{3EJ} + \frac{ql^4}{8EJ} = 8.9 \times 10^{-3}\text{cm}$$

而B点的转角, 对折射系统而言, 不引入准直误差, 故不加计算。

$$\text{准直误差 } C_0 = \frac{f_b}{F} \times 2 \times 10^5 = 6.35'', \text{ 当镜筒的地平高度为 } h$$

时, 则准直差 $C = C_0 \cdot \cos h$ 。按球面天文公式, (图2), 镜筒高度 h 与 δ, φ, t 有关 $\sinh = \sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos t$ 。

计算不同 δ, t 时, 镜筒的地平高度 h , 及相应的准直误差 c , 和准直误差的变化值 $dh = c \cdot \Delta \cos h$ 。并计算引入的定位误差 $d\Delta t$, 求出跟踪误差列于表1。

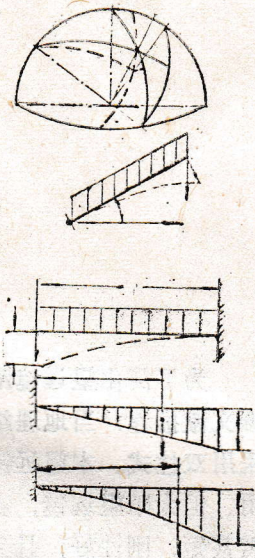


图 2

表 1

t	$\delta=0$				$\delta=23.5^\circ$			
	60°	45°	30°	15°	60°	45°	30°	15°
Sinh	0.38	0.54	0.66	0.74	0.608	0.753	0.865	0.934
Cosh	0.925	0.842	0.751	0.673	0.794	0.658	0.502	0.357
ΔCosh	0.083	0.091	0.078		0.136	0.156	0.145	
h	22.33°	32.68°	42.30°	47.73°	37.45°	48.85°	59.88°	69.07°
Δh	10.35°	9.62°	5.43°		11.4°	11.03°	9.19°	
$\Delta t / \Delta h$	1.45	1.56	2.76		1.316	1.36	1.63	
$dh = C_0 \cdot \Delta \text{Cosh}$	$0.53''$	$0.58''$	$0.50''$		$0.86''$	$0.99''$	$0.92''$	
$d\Delta t = \frac{\Delta t}{\Delta h} \cdot dh$	$0.768''$	$0.905''$	$1.38''$		$1.13''$	$1.35''$	$1.50''$	
$d\Delta t / dT / 5\text{分钟}$	$0.064'' / 5\text{分钟}$	$0.075''$	$0.115''$		$0.094''$	$0.113''$	$0.125''$	

由表1可见, 由于镜筒的自重变形引入的最大跟踪误差 $d\Delta t / dT = 0.125'' / 5\text{分钟}$

5. 叉臂的变形, (对照图3) 叉臂 (即AB) 的转角 θ_b 引起赤纬误差为 $\Delta\delta = \theta_b \cdot \cos\varphi \cdot \cos t$ 。已知 $W=1000\text{kg}$ $l_{\text{叉}}=46\text{cm}$,

$$J_{\text{叉}} = \frac{1}{12} (ab^3 - a_1b_1^3) = 36883\text{cm}^4, \quad p = \frac{W}{2} \cdot \cos\varphi = 383\text{kg},$$

$$q = (ab - a_1b_1) \cdot r_{\text{比重}} \cdot \cos\varphi = 0.93\text{kg/cm}$$

$$\theta_b = \frac{Pl^2}{6EJ} + \frac{ql^3}{6EJ} = 0.57 \times 10^{-5} = 1.14''$$

当 $t=55^\circ \sim 60^\circ$ 时, $d\Delta\delta = 0.064''$

$$\therefore \frac{d\Delta\delta}{dT} = \frac{0.064''}{20 \text{分钟}} = 0.016''/5 \text{分钟}$$

6. 赤纬轴承的变形 (见图4)

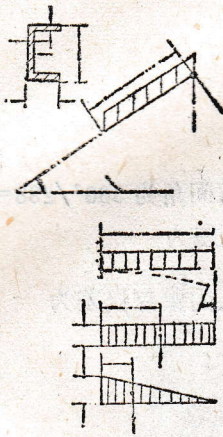


图 3

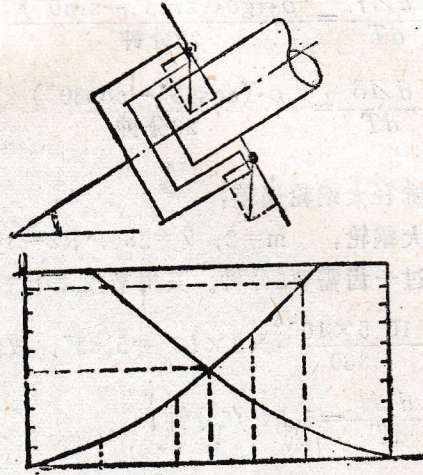


图 4

赤纬轴承选用双列调心滚珠轴承。 $d_m = 1.9 \text{cm}$, $Z = 30$ 粒, $\beta = 12^\circ$ $W = 1000 \text{kg}$
 $R = W \sin \varphi$ $A = W \cdot \cos \varphi$ $\varphi = 40^\circ$, 故 $R = 343 \text{kg}$, $A = 766 \text{kg}$ 。

为使两叉臂都承受负荷, 轴承应加预紧力 A_0 。

$A_0 = 1.58 \cdot \text{tg} \beta \cdot R + 0.5A = 600 \text{kg}$, 预紧后, 轴承的钢珠承受的预紧力为 p_0 , 轴承的预变形为 δ_0 。 $p_0 = \frac{A_0}{Z \cdot \text{tg} \beta} = 94 \text{kg}$; $\delta_0 = 1435 \times 10^{-7} \times 3 \sqrt{\frac{p_0^2}{d_m}} = 24 \times 10^{-4} \text{cm}$

加外载后, 各轴承承受的负荷应为

$$R_1 = R_2 = 321 \text{kg}; A_1 = A_2 = 383 \text{kg}。$$

钢珠受力

$$p_{\text{负}} = \frac{5R_1}{2 \cdot Z \cdot \cos \beta} + \frac{A_1}{Z \cdot \text{tg} \beta} = 87.4 \text{kg}$$

轴承在预紧力和负荷共同作用下的总变形为 δ 。

$$\delta = 1435 \times 10^{-7} \times 3 \sqrt{\frac{(p_0 + p_{\text{负}})^2}{d_m}} = 37 \times 10^{-4} \text{cm}$$

负荷变形为 $\Delta\delta_{\text{负}} = \delta - \delta_0 = 13 \times 10^{-4} \text{cm}$ 。

由此引入轴系不正交 $i_1 = \frac{2 \cdot \Delta\delta}{1} = 5.84''$, 加上加工装配时原有的轴系不正交偏差 $i_2 \approx$

$5''$, 变形后总的不正交偏差约 $i = i_1 + i_2 = 12''$, 由于 i 引入定位误差 $\Delta t = i \cdot \text{tg} \delta \cdot \text{coto}$, 当 t 为

55°~60°时, 跟踪误差最大, 故其最大跟踪误差

$$\frac{d\Delta t}{dT} = \frac{i \cdot \text{tg}\delta \cdot (\cos 60^\circ - \cos 55^\circ)}{20 \text{分钟}} = 0.1''/5 \text{分钟}$$

7、极轴的调整偏差

ρ 表示仪器极与真极的偏离量。我们要求仪器极的调整误差为 $\rho=30''\sim 60''$, 由 ρ 引入的定位误差为 $\Delta t = \rho \cdot \text{tg}\delta \cdot \text{sin}t$; $\Delta\delta = \rho \cdot \text{cos}t$, 其跟踪误差为:

$$\frac{d\Delta t}{dT} = \frac{\rho \cdot \text{tg}\delta \cdot (\sin 5^\circ - \sin 0^\circ)}{20 \text{分钟}} = 0.57''/5 \text{分钟}$$

$$\frac{d\Delta\delta}{dT} = \frac{\rho \cdot (\cos 55^\circ - \cos 60^\circ)}{20 \text{分钟}} = 1.1''/5 \text{分钟}$$

8、赤径大蜗轮误差:

赤径大蜗轮: $m=2, Z=288, R_2=360$, 五级精度, 齿间角为 $360^\circ/288=75'$, 即跟踪时每转过一齿需要5分钟。其用节误差 $\delta t=10.5\mu$ 相应的角偏差为

$$\frac{10.5 \times 10^{-3}}{360} \times 2 \times 10^5 = 5.83'', \text{ 故由于蜗轮误差列入的跟踪误差为}$$

$$\frac{d\Delta t}{dT} = 5.83''/5 \text{分钟}.$$

综合以上八种因素引入的跟踪误差列于下表:

	太阳不均匀	电机不稳速	蒙气差	镜筒变形	叉臂变形	轴承变形	极轴偏离	蜗轮周节差	综合
$d\Delta t/dT$	5''	4.5''	2''	0.125''		0.1''	0.57''	5.83''	9.14''/5分钟
$d\Delta\delta/dT$	1.6''		1.65''		0.016''		1.1''		2.55''/5分钟

由表可见, 误差主要来源为传动误差(包括蜗轮误差及电机不稳速), 其次为极轴的调整误差, 再其次为变形误差, 蒙气差应设法改正。

三、仪器的刚度计算

本仪器要求在5级风力下, 仪器抖动小于1''。

1、镜筒的风荷抖动 θ_1 ; (如图5)已知: $l_1=240\text{cm}, l_2=110\text{cm}, D=49\text{cm}$, 壁厚 $\delta_1=1\text{cm}, \delta_2=0.5\text{cm}$, 故 $J=2J_2=44000\text{cm}^4$ $V_{\text{风速}}=10.7\text{米/秒}$; $\rho_{\text{密度}}=\frac{1}{8}\text{公斤秒}^2/\text{米}^4$

$C_x=0.74, F=280\text{cm}$ $q_{\text{风}}=C_x \cdot \rho \cdot \frac{V^2}{2} D=0.026\text{kg/cm}$, 图中a——梁的尺寸, 惯性矩;

b——负载图 q ; c——弯矩图 M d——虚梁负载图 q_f , e——虚梁的弯矩图 M_f 。

由图可见 $q_{f1}=\frac{1}{2}ql_1^2, q_{f2}=\frac{1}{2}ql_2^2,$

$$M_{t1} = g_{t1} \cdot \frac{l_1}{8} \cdot \frac{3}{4} l_1 = \frac{1}{8} q l_1^4, \quad M_{t2} = \frac{1}{8} q l_2^4$$

B 点弯沉 $Y_B = \frac{M_{t1} + M_{t2}}{EJ} = \frac{1}{8EJ} q(l_1^4 + l_2^4) = 1.28 \times 10^{-4} \text{cm}$

风力抖动 $\theta_1 = \frac{Y_B}{F} \times 2 \times 10^5 = 0.1''$

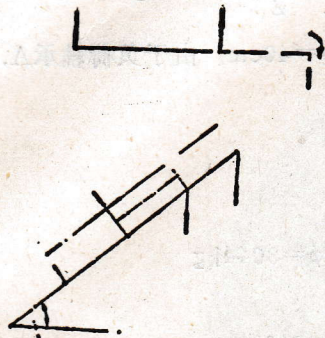


图 6

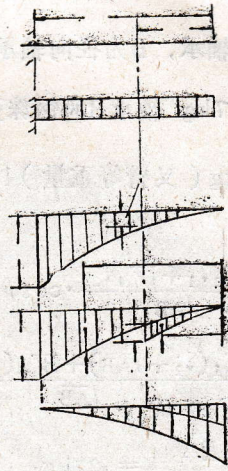


图 5

2、叉臂的风荷抖动 θ_2 ：

叉臂端点受到一个风力 $P_{\text{风}}$ 及风力矩 $M_{\text{风}}$ ，

$$P_{\text{风}} = \frac{1}{2} q_{\text{风}} \cdot l_{\text{镜筒}} = 3.12 \text{kg}; \quad M_{\text{风}} = \frac{1}{2} q_{\text{风}} \cdot l_1^2 = 750 \text{kg-cm}$$

$$J_{\text{叉}} = 36883 \text{cm}^4, \quad l_{\text{叉}} = 46 \text{cm}.$$

叉臂在风荷下的总转角 θ_2

$$\theta_2 = \frac{P_{\text{风}} \cdot l_{\text{叉}}^2}{2EJ_{\text{叉}}} + \frac{M_{\text{风}} \cdot l_{\text{叉}}}{EJ_{\text{叉}}} = 0.009'' + 0.094'' = 0.1''$$

3、赤纬轴承的风力抖动 θ_3 ：

由于 $M_{\text{风}}$ 轴承中所受径向力 $R_{\text{风}} = \frac{M_{\text{风}}}{l_{\text{轴承距}}} = \frac{750}{89} = 8.4 \text{kg}$

钢珠受力为 $P_{\text{风}} = \frac{5R_{\text{风}}}{2 \cdot Z \cdot \cos \beta} = 1 \text{kg}$

轴承在预紧力，负载，及风力作用下的总变形为

$$\delta_{\text{总}} = 1435 \times 10^{-7} \times 3 \sqrt{\frac{(P_{\text{重力}} + P_0 + P_{\text{风}})^2}{d_m}} = 37.26 \times 10^{-4} \text{cm}$$

风力变形 $\Delta \delta_{\text{风}} = \delta_{\text{总}} - \delta = (37.26 - 37) \times 10^{-4} = 0.26 \times 10^{-4} \text{cm}.$

风力抖动 $\theta_3 = \frac{2 \cdot \Delta \delta_{\text{风}}}{l_{\text{轴承距}}} = 0.12''$

4、赤径轴承的变形引起的极轴抖动 θ_4 ，(图6)已知， $l_{AB} = AB = 38\text{cm}$ ， $l_{BC} = 24\text{cm}$ ，轴承A、B在风力 $P_{\text{风}}$ 和 $M_{\text{风}}$ 作用下的支反力

$$R_{A\text{风}} = \frac{P_{\text{风}} \cdot l_{BC} + M_{\text{风}}}{l_{AB}} = 24\text{kg}$$

$$R_{B\text{风}} = \frac{P_{\text{风}} \cdot l_{AC} + M_{\text{风}}}{l_{AB}} = 30\text{kg}$$

轴承A为径向止推轴承，B为径向轴承。 $Z=20$ ， $\beta=26^\circ$ 轴承A的钢珠受的力

$$P_{A\text{风}} = \frac{5R_{A\text{风}}}{Z \cdot \cos\beta} = 7\text{kg} \quad \text{轴承B的钢珠受力} \quad P_{B\text{风}} = \frac{5R_{B\text{风}}}{Z} = 7.5\text{kg} \quad W_1 = 1000\text{kg} \text{ (镜筒重量)}$$

$W_2 = 500\text{kg}$ (叉臂等重量) $l_1 = 74\text{cm}$ ， $l_2 = 40\text{cm}$ 。由于负荷轴承A、B分别承受的径向力

$$R_A = \frac{W_1 l_1 + W_2 l_2}{l_{AB}} \cdot \cos\phi = 1895\text{kg}$$

$$R_B = \frac{W_1(l_1 + l_{AB}) + W_2(l_2 + l_{AB})}{l_{AB}} \times \cos\phi = 3044\text{kg}$$

$$P_A = \frac{5R_A}{Z \cdot \cos\beta} = 527\text{kg}; \quad P_B = \frac{5R_B}{Z} = 760\text{kg}$$

$$\delta_{A\text{重力}} = 96 \times 10^{-6} \times 3 \sqrt{\frac{P_A^2}{d_A}} = 39.5 \times 10^{-4}\text{cm} \quad (d_A = 4\text{cm})$$

$$\delta_{B\text{重力}} = 96 \times 10^{-6} \times 3 \sqrt{\frac{P_B^2}{d_B}} = 48.5 \times 10^{-4}\text{cm} \quad (d_B = 4.5\text{cm})$$

在重力及风力作用下，轴承A、B的总变形为

$$\delta_A = 96 \times 10^{-6} \times 3 \sqrt{\frac{(P_B + P_{A\text{风}})^2}{d_A}} = 40 \times 10^{-4}\text{cm}$$

$$\delta_B = 96 \times 10^{-6} \times 3 \sqrt{\frac{(P_B + P_{B\text{风}})^2}{d_B}} = 49 \times 10^{-4}\text{cm}$$

$$\therefore \Delta\delta_{A\text{风}} = \Delta\delta_{B\text{风}} = 0.5 \times 10^{-4}\text{cm}$$

风力引起的极轴抖动为 θ_4

$$\theta_4 = \frac{2 \cdot \Delta\delta_{\text{风}}}{l_{AB}} = 0.52''$$

5、蜗轮的风力变形

赤径蜗轮 $R_{21} = 36\text{cm}$ ；赤纬蜗轮 $R_{22} = 30\text{cm}$ 。

蜗杆 $d_2 = 5.1\text{cm}$ ；材料的弹性模量分别为

$E_1 = 1.1 \times 10^9 \text{kg/cm}^2$ (铸铁) $E_2 = 2 \times 10^9 \text{kg/cm}^2$ (钢蜗轮的) 压力角 $\alpha = 12^\circ$ 。啮

合点的曲率半径分别为 $\rho_1 = \infty$ ； $\rho_2 = R_2 \cdot \sin\alpha = 6.2\text{cm}$ ；接触线的长度

$$l_p = \pi \cdot d_2 \cdot \frac{2\gamma}{360^\circ} \cdot \xi = 6.4 \text{ cm},$$

接触变形

$$\delta_0 = 0.65 \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \cdot \frac{P_{\text{风}}}{l_p} \cdot l_g \left[\frac{67 \cdot l_p}{\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) \cdot P_{\text{风}}} \right]$$

赤纬蜗轮变形造成的抖动 θ_5'

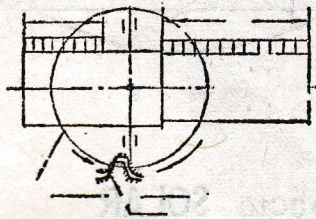
$$\theta_5' = \delta' / R\alpha_2 = 0.1''$$

赤径蜗轮变形造成的抖动 θ_5''

$$\theta_5'' = \delta_0 / R\alpha_1 = 0.08''$$

仪器的风力抖动为 $\theta_{\text{风}} = \sum_{i=1}^5 \theta_i = 0.94'' < 1''$ 满足设计要求。

四、反力矩 (图 7)



$$M_{\text{反}} = (M_{\text{阻}} + M_{\text{风}}) \cdot K; \quad M_{\text{阻}} = 3.35 \text{ kg-米}$$

$$M_{\text{风}} = q_1 \times 230 \times 155 - q_2 \times 104 \times 92 = 525 \text{ kg-cm}$$

$$M_{\text{反}} = (3.35 + 525) \times (1.2 \sim 1.4) = 10 \sim 12 \text{ 公斤-米。}$$

采用力矩电机加反力矩, 传动比 $i = 90$, $\eta = 0.9$,

$$M_{\text{反电}} = \frac{M_{\text{反}}}{i \cdot \eta} = 0.12 \sim 0.14 \text{ kg-M。}$$

选用 SYL-20 电机

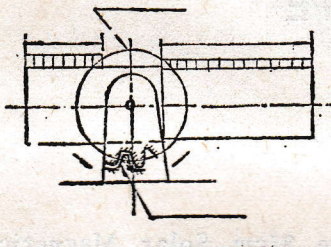


图 7

五、其它

- 1、赤纬轴承: 选球面调心轴承, 以防卡死。轴承应加预载
- 2、底座调节: 采用高度和方位分别调节, 互不影响。调节范围 $\pm 1^\circ$ 。
- 3、反力矩的目的, 是为了消除蜗轮付间隙, 保证望远镜跟踪时始终一个齿面啮合。以增加仪器的扭转刚度, 否则在风力作用下仪器抖动很大 (抖动 = 间隙)

4、限位: 赤径 $\pm 105^\circ$

赤径 $\pm 24^\circ$

仪器在极限位置时, 发出信号并自动停止。

5、由于本仪器观测太阳, 而太阳自身运动不均匀性很大, 加之蒙气差的影响, 以及传动误差等在作较长时间跟踪时, 必须导星。

六、极轴的调整方法

假定仪器极与真极偏离 (ρ, θ) , 则引入赤纬的变化。按天文公式: $\Delta\delta = \rho \cdot \cos(t - \theta)$

$$\Delta\delta = \rho \cdot \cos\theta \cdot \cos t + \rho \cdot \sin\theta \cdot \sin t$$

$$\therefore \Delta\delta = \Delta\phi \cdot \cos t + \Delta A \cdot \cos\phi \cdot \sin t$$

根据上式, 我们在子午面, 及与子午面等时距的三个位置, 测量某一星体的赤纬值 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ (假定取 $t = \pm 60^\circ$,)

$$\text{则 } \delta_2 - \delta_1 = \Delta\phi \cdot [\cos 0^\circ - \cos(-60^\circ)] + \Delta A \cdot \cos 40^\circ [\sin 0^\circ - \sin(-60^\circ)]$$

$$\therefore \delta_2 - \delta_1 = 0.5\Delta\phi + 0.663\Delta A$$

$$\text{同理 } \delta_3 - \delta_1 = -0.5\Delta\phi + 0.663\Delta A$$

$$\therefore \begin{cases} \Delta A = (\delta_3 - \delta_1) / 1.326 \\ \Delta\phi = 2\delta_2 - \delta_1 - \delta_3 \end{cases}$$

根据 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 计算出 $\Delta A, \Delta\phi$ 分别调整底座的方向, 和高度。(见图 8)

P—真极 Z—天顶 P'—仪器极 $\widehat{PP'} = \rho$

$\angle P'PZ = \theta$ S—星体 δ —赤纬 ϕ —地理纬度

$\Delta\phi, \Delta A$ —仪器极的高度偏差和方位偏差。

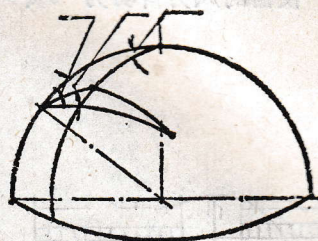


图 8

THE MOUNTING DESIGN FOR THE 35cm SOLAR MAGNETIC FIELD TELESCOPE

Yan Huan

(Nanjing Astronomical Instrument Factory)

Abstract

A fork type equatorial mounting was adopted for the 35cm Solar Magnetic Field Telescope. In this paper, the author analyses the tracking error introduced by various factors of the telescope; investigates the methods to reduce the deformation, lighten the weight and enhance the rigidity for the telescope; gives the calculation results of the deformations caused by the gravitation and wind force with corresponding errors for the tube, the fork, the polar axis and the bearings; checking calculates wind forced drift of the telescope (less than 1" under force 5 wind). Besides, the methods of prestressing the bearings and adjusting the polar axis are also described.