

望远镜传动系统设计

顾伯伟

(南京天文仪器厂)

一、对传动系统的要求

对传动的基本要求是:

1、传动平稳,工作可靠,结构稳定。

其速率赤纬:

慢动 $0.5^{\circ} \sim 7.5^{\circ}/\text{分}$

微动 $2'/\text{分}$

赤经:

快动 $120^{\circ}/\text{分}$

慢动 $0.5^{\circ}/\text{分}$

微动 $2'/\text{分}$

恒动 $15'/\text{分}$

2、当光电导行镜工作时其镜筒必须同赤经,赤纬慢动作同步的反方向运动,以便在望远镜观测日面上不同区域时,光电导行镜始终对准太阳中心。

二、传动系统的设计

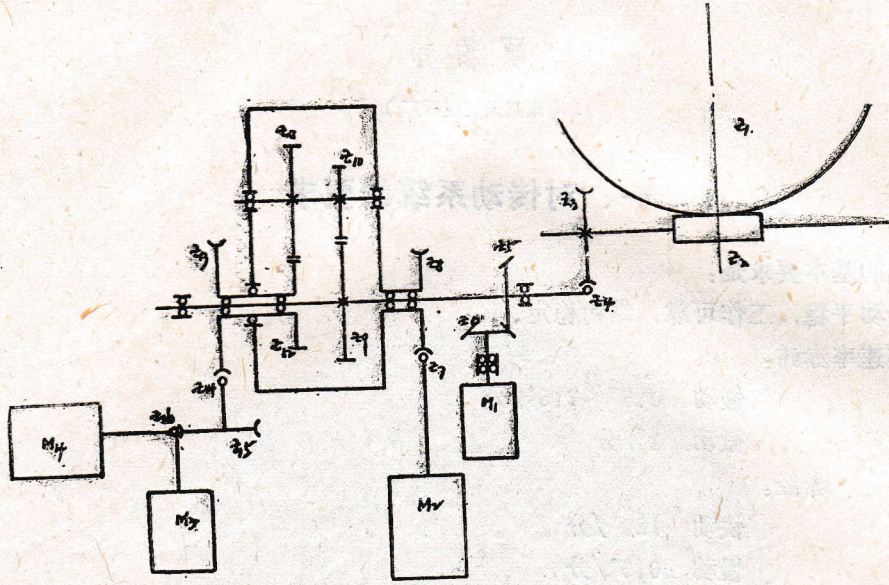
1. 赤纬: 赤纬传动由于没有快动和恒动,所以传动系统结构较简单,赤纬蜗轮及传动箱固定在右叉臂上,蜗杆架用二组滚动轴承“挂”在蜗轮边缘上,每组有一个内圈,一个外圈,一个端面作为径向,侧向定位。由一个 M_2 的DI-9印刷绕组盘形电极直流电机带动,其额定功率45瓦,转速3000转/分,利用无级调速和一级差动齿轮机构传到末级赤纬大蜗轮付来实现赤纬慢动。并用 M_4 的70SL5A2伺服电机作微动,其额定功率14瓦,转速1500转/分。赤纬系统传动链图如图一所示,图中 M_1 为自整发送机, M_3 为测速电机。

赤纬转动有限位装置,用微动行程开关限位,其范围为 $\pm 25^{\circ}$,由赤纬度盘指示。

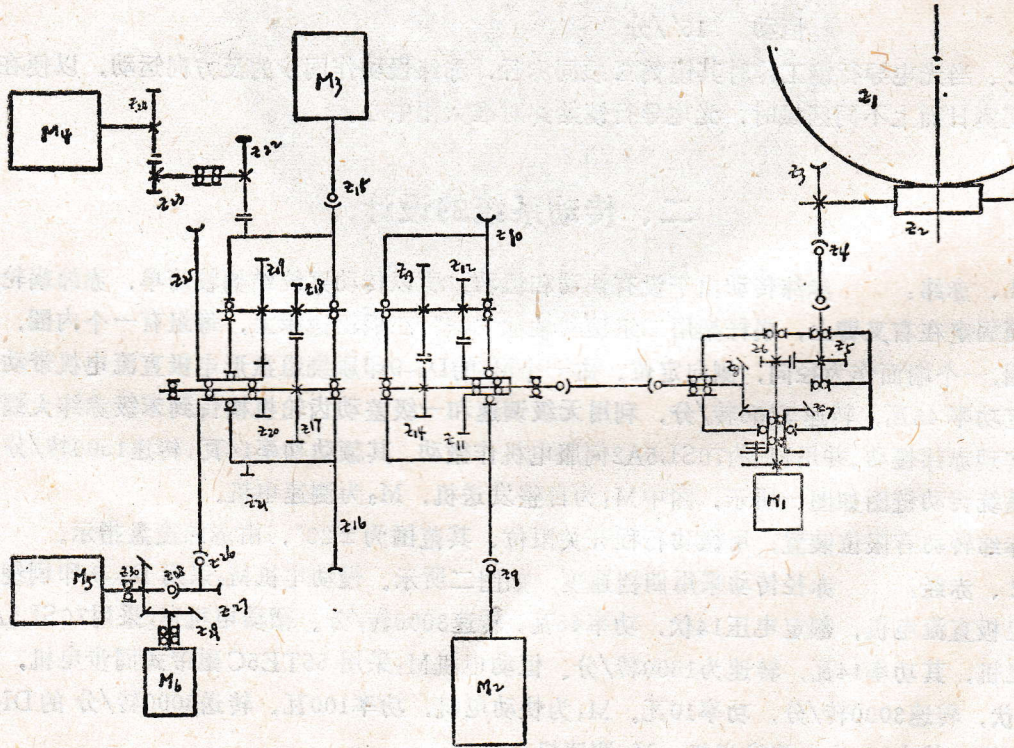
2. 赤经: 赤经传动采用四档速度,如图二所示。慢动电机 M_5 采用DI-9印刷绕组盘形电极直流电机,额定电压14伏,功率45瓦,转速3000转/分。微动电机 M_6 采用70SL5A2伺服电机,其功率14瓦,转速为1500转/分。恒动电机 M_2 采用55TE5C磁带式同步电机,电压200伏,转速3000转/分,功率10瓦。 M_1 为快动电机,功率100瓦,转速3000转/分的DI-9直流电机。其中 M_4 为自整发送机, M_3 测速机。

赤经传动包括恒速跟踪,要求运动极其平稳。而影响运动平稳性的因素,除了控制系统的本身质量外,主要决定于末级传动件,即大蜗轮的传动精度,特别是短周期误差和齿形误差。

赤径精密蜗轮位于叉臂正下方，固连在极轴上，蜗杆架与赤纬系统类似，“挂”在蜗轮轮缘上，实现径向侧向定位，其端面定位利用两边强力弹簧的球头轴实现。当外负荷超过额定负荷值时，蜗轮付轴向移动，使行程开关作用，断开电路，实现过载保护。



图一，赤纬系统传动链



图二，赤径系统传动链

慢，微，恒动采用二级差动齿轮机构，三种运动可独立地进入传动箱，通过快动箱内

吸合的电磁离合器传动末级精密蜗轮付。快动时，离合器脱开，则快动直接传到末级精密蜗轮付，不致与慢，微，恒动相互干涉，赤径转动也有限位装置，用微动行程开关实现，其范围在 $\pm 105^\circ$ ，由赤径度盘指示。

三、传动系统的计算

(一) 赤纬系统

1、采用二档速度：

$$n_{\text{慢}} = 0.5^\circ \sim 7.5^\circ/\text{分}$$

$$n_{\text{微}} = 2'/\text{分}$$

$$\text{得速比 } i_{\text{慢}} = \frac{2\pi n_{\text{电}}}{n_{\text{微}}} = i_1 \times i_2$$

因 $i_{\text{慢}}$ 差15倍，所以其最低速度为 $n'_{\text{电}} = 200$ 转/分，而所采用的DI-9印刷电机最低转速可以用到100转/分。

$$\text{而 } i_{\text{微}} = \frac{120\pi n_{\text{电}}}{n_{\text{微}}} = i_1 \times i_3$$

2、蜗杆架传动付参数

$$\text{大蜗轮: } Z_1 = 300, m_1 = 2, Z_2 = 1, i = \frac{Z_1}{Z_2} = 300, D = 600 \text{毫米}, d = 51 \text{毫米},$$

$$\alpha = 20^\circ, q = 25.5, \lambda = 2^\circ 14' 44'', f = 1, \text{5级精度}$$

$$\text{小蜗轮: } Z_3 = 20, m_3 = 1, Z_4 = 1, i = \frac{Z_3}{Z_4} = 20 \text{ 5级精度。}$$

3、慢微动传动箱

$$\text{① } i'_{\text{慢}} = \frac{2\pi n_{\text{电}}}{i_1 \cdot n_{\text{慢}}} = i_2 = i_4 \cdot i_5$$

由一级蜗轮付加上差动齿轮机构减速，速比

$$i_4 \text{ 取一级蜗轮付，参数为 } Z_6 = 26, m_6 = 1.75, Z_7 = 2,$$

7级精度。

速比 i_5 用差动齿轮机构实现，按黄锡恺“机械原理”中公式计算得。

$Z_8 = Z_{11} = 48, Z_{10} = Z_{12} = 32, m = 0.7, 7$ 级精度。用这样机构也能满足 $i_{\text{慢}}$ 传动 $0.5^\circ/\text{分}$ 的要求。

$$\text{② } i_{\text{微}} = \frac{120\pi n_{\text{电}}}{i_1 n_{\text{微}}} = i_6 \cdot i_7 \cdot i_8$$

由两级蜗轮付加上差动齿轮机构的齿轮减速实现。

$$i_6 \text{ 蜗轮参数为: } Z_{13} = 48, m = 1.5, Z_{14} = 1, \text{7级精度。}$$

$$i_7 \text{ 蜗轮参数为: } Z_{15} = 25, m = 1.5, Z_{16} = 1, \text{7级精度。}$$

$$\text{③ } i_{\text{自整机}} = 19.500$$

4、速度

$$n_{慢1} = 2\pi n_{电} \left(1 - \frac{Z_{12} \cdot Z_{10}}{Z_{11} \cdot Z_9}\right) \cdot \frac{Z_7}{Z_8} \cdot \frac{Z_4}{Z_3} \cdot \frac{Z_2}{Z_1} = 7.5' / 分$$

$$n_{慢2} = 120\pi n_{电} \left(1 - \frac{Z_{12} \cdot Z_{10}}{Z_{11} \cdot Z_9}\right) \cdot \frac{Z_7}{Z_8} \cdot \frac{Z_4}{Z_3} \cdot \frac{Z_2}{Z_1} = 30' / 分$$

$$n_{微} = 120\pi n_{电} \cdot \frac{Z_{16}}{Z_{15}} \cdot \frac{Z_{14}}{Z_{13}} \cdot \frac{Z_{12}}{Z_{11}} \cdot \frac{Z_{10}}{Z_9} \cdot \frac{Z_4}{Z_3} \cdot \frac{Z_2}{Z_1} = 2' / 分$$

(二) 赤径系统

1. 传动链计算

① 采用四档速度

$$n'_{快} = 120' / 分 \quad (\text{调区域})$$

$$n'_{恒} = 15' / 分 \quad (\text{跟踪})$$

$$n'_{慢} = 30' / 分 \quad (\text{调视场})$$

$$n'_{微} = 2' / 分 \quad (\text{光电导行})$$

得速比

$$i'_{快} = \frac{2\pi n_{电}}{n'_{快}} = i_1'$$

$$i'_{恒} = \frac{120\pi n_{电}}{n'_{恒}} = i_1' \cdot i_2'$$

$$i'_{慢} = \frac{120\pi n_{电}}{n'_{慢}} = i_1' \cdot i_3'$$

$$i'_{微} = \frac{120\pi n_{电}}{n'_{微}} = i_1' \cdot i_4'$$

② 蜗杆架

大蜗轮参数:

$$Z_1 = 288, \quad m_1 = 2.5, \quad Z_2 = 1, \quad i = \frac{Z_1}{Z_2} = 288, \quad D = 720 \text{ 毫米},$$

$$d = 55 \text{ 毫米}, \quad \alpha = 12^\circ, \quad q = 22, \quad \lambda = 2^\circ 36' 06'', \quad f = 1, \quad 4 \text{ 级}.$$

小蜗轮参数:

$$Z_3 = 40, \quad m_2 = 1.75, \quad Z_4 = 2, \quad i_1 = \frac{Z_3}{Z_4} = 20, \quad 5 \text{ 级精度}.$$

③ 快动箱

$$i_{快}'' = \frac{i_1'}{i \cdot i_1} = \frac{Z_5}{Z_6} \quad (\text{用一对正齿轮付 } Z_5 = 25, Z_6 = 16, M_3 = 1.5 \text{ 来实现}).$$

④ 慢, 微, 恒动箱

$$i_{恒}'' = i_2' = i_5' \cdot i_6' \quad (i_6' = \frac{Z_7}{Z_8} = \frac{36}{30} \text{ 由锥齿轮付实现}).$$

$i_{慢}'' = i_3' = i_7' \cdot i_6'$ ($i_5' i_7'$ 由差动齿轮机构实现)。

$i_{微}'' = i_4' = i_8' \cdot i_6'$ (i_8' 由两级蜗轮付加上差动齿轮机构的齿轮减速来实现)。

⑤ 差动齿轮机构计算

参阅黄锡恺“机械原理”计算方法得恒动箱

$$Z_{10} = i_5' \cdot \left(1 - \frac{Z_{12} \cdot Z_{14}}{Z_{11} \cdot Z_{13}}\right) = 111 \quad (\text{这里 } Z_{12} = Z_{14} = 34, Z_{11} = Z_{13} = 40)。$$

因此取蜗轮付为: $Z_{10} = 111, m_4 = 0.8, Z_9 = 1$

其效率为

$$\eta_1 = \frac{1}{1 + |1 - i_H| (1 - \eta^H)} = 0.794 \quad (\text{式中 } \eta^H = 0.9, i_H = 3.6)$$

按上述计算原理得慢动箱蜗轮齿数

$$Z_{16} = \frac{W_0}{W_1} \left(1 - \frac{Z_{18} \cdot Z_{20}}{Z_{19} \cdot Z_{17}}\right) = 80$$

因此取慢动蜗轮 $Z_{16} = 80, m_5 = 1, Z_{15} = 1, 7$ 级精度。

其效率为 $\eta_2 = 0.926$ 。

$$\textcircled{6} \text{ 微动速比 } i_8' = i_9' \cdot \frac{Z_{17} \cdot Z_{19}}{Z_{18} \cdot Z_{20}} \cdot \frac{Z_{11} \cdot Z_{13}}{Z_{12} \cdot Z_{14}}$$

而 i_9' 由两级蜗轮付减速实现, 故取

$Z_{25} = 80, m_6 = 1, Z_{26} = 2, 7$ 级精度。

$Z_{27} = 24, m_7 = 1, Z_{28} = 1, 7$ 级精度。

⑦ 自整角机发送机速比为 18900。

⑧ 速度

$$n_{快} = 2\pi n_{电} \cdot \frac{Z_8}{Z_5} \cdot \frac{Z_4}{Z_3} \cdot \frac{Z_2}{Z_1} = 120^\circ/\text{分}$$

$$n_{恒} = 120\pi n_{电} \left(1 - \frac{Z_{12} \cdot Z_{14}}{Z_{11} \cdot Z_{13}}\right) \cdot \frac{Z_9}{Z_{10}} \cdot \frac{Z_8}{Z_7} \cdot \frac{Z_6}{Z_5} \cdot \frac{Z_4}{Z_3} \cdot \frac{Z_2}{Z_1} = 15'/\text{分}$$

$$n_{慢} = 120\pi n_{电} \left(1 - \frac{Z_{18} \cdot Z_{20}}{Z_{19} \cdot Z_{17}}\right) \cdot \frac{Z_{15}}{Z_{16}} \cdot \frac{Z_{14}}{Z_{13}} \cdot \frac{Z_{12}}{Z_{11}} \cdot \frac{Z_8}{Z_7} \cdot \frac{Z_6}{Z_5} \cdot \frac{Z_4}{Z_3} \cdot \frac{Z_2}{Z_1} = 30'/\text{分}$$

$$n_{微} = 120\pi n_{电} \cdot \frac{Z_{28}}{Z_{27}} \cdot \frac{Z_{26}}{Z_{25}} \cdot \frac{Z_{20}}{Z_{19}} \cdot \frac{Z_{18}}{Z_{17}} \cdot \frac{Z_{14}}{Z_{13}} \cdot \frac{Z_{12}}{Z_{11}} \cdot \frac{Z_8}{Z_7} \cdot \frac{Z_6}{Z_5} \cdot \frac{Z_4}{Z_3} \cdot \frac{Z_2}{Z_1} = 2'/\text{分}$$

⑨ 赤径蜗轮强度计算

取 1, 风荷阻力矩 $M_1 = 950\text{kg-cm}$

2, 反力矩 $M_2 = 2000\text{kg-cm}$

3, 轴承摩擦阻力矩 $M_3 = 100\text{kg-cm}$

4, 最大起动力矩 $M_4 = 98.5\text{kg-cm}$

则最大传递力矩为

$$M_{max} = M_1 + M_2 + M_3 + M_4 = 3150\text{kgcm}$$

而园周力 $P = \frac{M_{\max}}{R} = 87.5 \text{ kg}$

i, 求接触应力最大值

接触点上的相当曲率半径为

$$\rho = \frac{D}{2} \frac{\sin \alpha_n}{\cos^2 \lambda} = \frac{D}{2} \sin \alpha = 7.5 \text{ cm}$$

而接触线长度最大值

$$L_k = \pi d \frac{2\gamma}{360 \cos \lambda} \varepsilon \zeta = 6.9 \text{ cm}$$

蜗杆用40cr钢: 则 $E_1 = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

蜗轮用M级铸铁: 则 $E_2 = 1.6 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

其综合弹性模数: $E = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2} = 1.8 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

而单位接触载荷: $q = \frac{P}{L_k \cos \alpha} = 13 \text{ kg/cm}$

所以蜗轮的接触应力为

$$\tau_{\text{赤径}} = 0.145 \sqrt{\frac{qE}{\rho}} = 256 \text{ kg/cm}$$

同理得

$$\tau_{\text{赤纬}} = 290 \text{ kg/cm}^2$$

ii, 弯曲强度

根据计算和分析赤径, 赤纬蜗轮的弯曲强度均很小, 一般仅在几 kg/cm^2 。

⑩风荷造成的蜗轮接触变形。

无风时的园周力, $P_0 = \frac{P_{\text{反}}}{R} = 55.5 \text{ kg}$

风荷造成的园周力, $P_1 = \frac{P_{\text{阻}}}{R} = 26.3 \text{ kg}$

按公式

$$\begin{aligned} \delta &= 0.65 \times \left(\frac{1}{E_2} + \frac{1}{E_1} \right) \times \frac{P}{l_k} \times \lg \frac{67 \cdot l_k \cdot \rho}{\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \rho} \\ &= 0.113 \times \rho \cdot 10^{-6} \times \lg \frac{315}{\rho} \times 10^7 (\text{厘米}) \end{aligned}$$

则无风时:

$$\delta_0 = 0.113 \times 55.5 \times 10^{-6} \times \lg \frac{315}{55.5} = 0.49 \mu$$

当风力与反力矩方向同向时

$$\delta_1 = 0.113 \times 81 \times 10^{-8} \times 1g \frac{315}{81.8} \times 10^7 = 0.70 \mu$$

所以 $\delta_1 - \delta_0 = 0.21 \mu$

$$\text{而赤径变形角 } \Delta\psi_1 = \frac{\delta_1 - \delta_0}{1000 \times R} \times 206265 = 0.13''$$

当风力与反力矩方向相反时。

$$\delta_2 = 0.113 \times 29.2 \times 10^{-8} 1g \frac{315}{29.2} \times 10^7 = 0.27 \mu$$

所以 $\delta_0 - \delta_2 = 0.22 \mu$

因而赤径变形角 $\Delta\psi_2 = 0.13''$

用同理方法可求得赤纬大蜗轮的变形角

$$\Delta\varphi_1 = 0.17''$$

$$\Delta\varphi_2 = 0.18''$$

2. 赤径大蜗轮付精度考虑:

因太阳自身运动不均匀性及蒙气差影响, 将机械传动精度做得太高是没有意义的, 从天文年历中(1971)可查出一年中太阳赤径, 赤纬变化情况, 在方格纸上以日期为横座标, 每小时变量(赤径, 赤纬, 角秒/小时)为纵座标, 求出 Δt , $\Delta\delta$ 的平均值, 故查得一年中太阳运动不均匀性引入平均误差为:

$$\overline{\Delta t} = 8.2''/\text{小时}, \quad \overline{\Delta\delta} = 37''/\text{小时}$$

$$\text{所以 } \Delta_1 = \sqrt{\overline{\Delta t}^2 + \overline{\Delta\delta}^2} = 3.16''/5\text{分钟}$$

而蒙气差 ($Z \leq 70''$, $\psi = 40^\circ$) 造成运动偏差平均值(从蒙气差的影响表中查出)。

$$\Delta t' = \frac{d(\overline{\Delta t})}{dt} = 2.89/5\text{分钟}$$

$$\Delta\delta' = \frac{d(\overline{\Delta\delta})}{dt} = 1.32''/5\text{分钟}$$

$$\text{故 } \Delta_2 = \sqrt{(\Delta t')^2 + (\Delta\delta')^2} = 3.3''/5\text{分钟}$$

所以由于蒙气差(大气折射对跟踪精度的影响为 $3.3''/5\text{分钟}$ 。

$$\text{由此 } \Delta_1' = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2} = 4.6''/5\text{分钟}$$

故设大蜗轮付运动误差引入跟踪误差为 $4''/5\text{分钟}$,

小蜗轮付累积误差引入跟踪误差为 $2''/5\text{分钟}$ 。

则传动误差为:

$$\Delta_2'' = \sqrt{4^2 + 2^2} = 4.5''/5\text{分钟}$$

即与太阳运动的不均匀性和蒙气差的影响所引起的误差 $\Delta_1' = 4.6''/5\text{分钟}$ 接近。对太阳的精确跟踪 $1''$, 就能依靠光电导行来解决。

现因赤径大蜗轮 $Z_1 = 288$, $m = 2.5$, $Z_2 = 1$

则蜗轮每转过一齿所需时间为

$$t = \frac{24 \times 60'}{288} = 5 \text{ 分钟/每齿}$$

而4"/5分钟对应的传动误差是：（亦即传动周期误差的公差）

$$\delta_T = \frac{4'' \times 288}{206265} \times 1000 = 5.6\mu$$

因此根据机标（JB）162-60（新标准）大蜗轮付精度高于5级，接近4级，（4级精度为 $\delta_T=5.2\mu$ ）。

按照天仪厂现有的滚齿机的加工精度及精度滚刀参数，我们将赤径蜗轮的短周期误差的精度定为4级精度，而累积误差定为5级精度。

小蜗轮按引入的跟踪误差2"/5分钟，根据分析，采用5级精度。对于差动齿轮机构中的蜗轮及正齿轮精度要求不高，但考虑到差动齿轮机构装配上的要求，选用较高些精度比较合适，因此我们设计中都取用国家（新）标准的7精度。

四、精密蜗轮的加工

赤纬赤径大蜗轮参数在传动系统计算中已提到，大蜗轮的材料均为M级铸铁，蜗杆为40cr钢，赤径蜗轮为4级精度，赤纬蜗轮为5级精度。赤径赤纬大蜗轮共加工了四只，其中三只赤径蜗轮，三只大蜗轮在我厂采用重庆机床厂Y3180滚齿机加工，用我厂的精密分度蜗轮滚刀高AA级滚齿。另一只是在南京第二机床厂的重庆分度蜗轮滚齿机Y3780上滚齿，四只蜗轮经南京机床厂检验科用德国进口仪器Hc-400静态齿轮检测仪测定，其结果如下表：

序号	参数	δ_{gt} (相邻)	$\delta_{tg\Sigma}$ (累计)	啮合斑点	精度等级 $\delta_{gt}/\delta_{tg\Sigma}$	滚齿机	结果
赤经I号	24u	34 μ	调不出	7级/4级	Y3180	度	
赤经II号	8u/16u	36 μ	85%	4~5级/4~5级	Y3180	好	
赤经III号	8u	70 μ	调不出	4~5级/5~6级	Y3780	不好	
赤 纬	10u	32 μ	90%	5级/5级	Y3180	好	

在赤纬和赤径传动箱内，各有一只自整角发送机HД501，通过适当的速比与慢动级相连。自整角发送机同装在光电导行镜处的自整角接收机电气上是藕合的，保证了光电导行镜反方向的同步运动。

五、结 论

经北京天文台太阳物理研究室磁场望远镜组同志在我厂对太阳磁场望远镜进行几个月的试观测及传动精度测试结果，本仪器驱动系统已满足设计要求，机械传动平稳，工作可靠，精度达到设计要求。

THE DRIVING MECHANISM FOR THE SOLAR MAGNETIC FIELD TELESCOPE

Gu Beiwdi

(*Nanjing Astronomical Instrument Factory*)

Abstract

The driving speeds for the telescope was selected as following: R.A.: slew $120^\circ/\text{min}$; slow $0.5^\circ/\text{min}$; tracking $15'/\text{min}$; fine $2'/\text{min}$. Declination: slow $0.5-7.5^\circ/\text{min}$; fine $2'/\text{min}$. On each polar and declination axis, a large worm wheel is mounted. The precession of R.A. drive was so decided that its period error is the same magnitude as that caused by non-homogeneity of solar motion and differential reiraction. The tracking accuracy better than $1''$ is ensured by the photoelectric guider.

There are three driving doxes fon moving the telescope, of which one differential box in the fork is drived by two motors, and gives the declination axis the slow and the fine motions. Inside the mounting another differential box driven by three motors gives the slow, the tracking and the ffine motions in R. A., this box is coupled with the fast bfiving box through a electromagnetic clutch.

This paper gives the briving schemes, necessary calculations and the precession measuring result for the R. A. driving worm wheel.