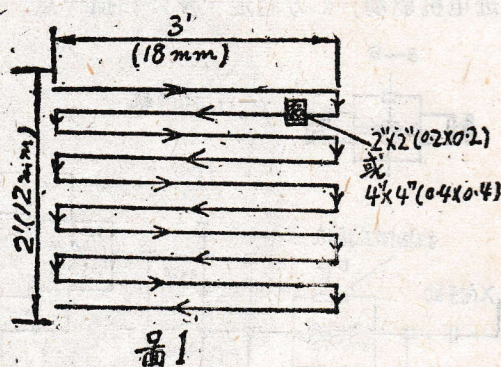


太阳磁场望远镜X-Y机械扫描器

吕韵翎

一、功能及技术要求

x-y机械扫描器的功能是测量太阳活动区磁场用的执行扫描动作的装置。它安装在太阳磁场望远镜光电系统的第三焦面（扫描焦面）上〔1〕。将天文使用要求转换成机械运动，其技术要求在第三焦面上，扫描微方孔以1米/秒，2米/秒和0.2/秒的平均速度对 18×12 （毫米²）和 18×24 （毫米²）太阳像，逐点作x-y方向扫描运动。积分常数为2秒和0.2秒两种。运动精度：在18毫米一行内累积误差0.05毫米；对同一区域连续两次扫描之间对应点之位置重合误差为0.1毫米。运动方式：天文学家考虑地球视向速度及自转等现象要求南北扫描，也即x坐标取南北向，y坐标取东西向。 0.2×0.2 （毫米²）和 0.4×0.4 （毫米²）微方孔沿x方向往复逐点扫描，图1为其运动方式示意图。



二、方案设计和结构概述

1. 运动机构选择

在下面几种实现直线往复运动机构方案中进行选择。它们是：齿轮齿条电磁铁机构、丝杆螺母机构、凸轮弹簧机构和曲柄连杆机构。根据要求运动精度、定位精度高，平均移动速度低而使用时间连续频繁，以及光电扫描系统机械总布局〔1〕所给定的空间及位置，最后选用丝杆螺母机构。

2. 机械执行元件采样方式

采样方式是指对太阳活动区扫描摄取（让光讯号通过）的方式。是采用连续扫描，还是非连续“步进”扫描呢？

从利于实现全自动程序扫描、数字显示和简化电控线路用步进电机驱动最有利。定位精度高，步进电机步距误差不积累，转一圈为零。而用步进电机驱动中可分为一步采样（扫描）一点，或是走若干步采样一点两种方式。

我们设计是采用大步距角步进电机驱动，走一步扫描一点。与同步电机连续扫描及与小步距角步进电机走若干步扫描一点相比，在平均移动速度相同，积分常数和扫描微方孔大小都相同的条件下，一步一采样，能充分利用步进电机走一步中，选择一定的走停比来提高扫

描所得讯号的空间分辨率和讯号的准确度。走一步当中停的时间比例越大对上述提高越有利。这只是定性分析，在有条件和需要时可以定量测量和研究试验。可用两种方法进行：①在步进电机控制线路中接进某种特殊设计电路，②用高速摄影拍下扫描微方孔移动情况。可以测出步进电机在所承受负载下一步中，走与停的真实值及比例。对太阳磁场望远镜光电扫描系统来讲，利用了这个特性已经得到较满意的结果（当然是综合结果），满足了天文使用要求。如有人对此有兴趣，也可以用我们的x—y机械扫描器进行承载条件下大步距角电机特有性能的研究试验。

3. x—y机械扫描器结构概述

经过一般的传动计算与机械扫描参数匹配设计，包括机械设计对电控某些数据要求的机电匹配扫描参数列于表1。结构方案如图2

①x方向（主扫描方向）y方向（移行方向）都用相同的步距角 $\theta=60^\circ$ 和 30° 的大步距角步进电机驱动。x方向走一步，扫描一点。在同一幅扫描中，x、y方向都用相同的步距角和频率。以简化程序控制电路〔2〕，提高电路的可靠性及便于维修。

②对活动区磁场扫描点数，移行的行数，用数码管记数并在控制柜上实况显示。正常扫描全部按程序进行。普遍磁场（微弱磁场）观测用手动和电点动，不用程序。同时备有x向y向手动机构供复位（事故停电后）调零用。

③扫描微方孔 0.2×0.2 （毫米²）， 0.4×0.4 （毫米²）和方孔 2×2 （毫米²）的调换用手动实现。

④扫描微方孔在程序扫描过程中的状况用旋转狭缝、光敏二极管装置进行实时扞测，并在控制台装有显示和故障报警装置。

⑤x方向y方向均用双圆弧导轨（设计从略，制作工艺见文章〔3〕），运动平稳、灵活，精度高，在低速而长期持续运动条件下比一般V形导轨耐磨，能较长时间保持原有精度。

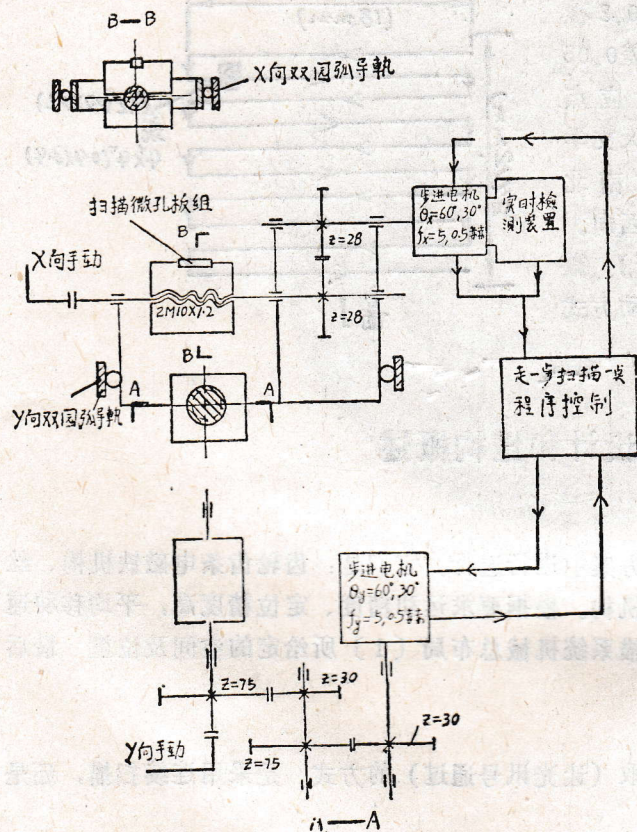


图2 大步距角步进电机非连续扫描方案示意图

精度，剖分螺母消除；y向丝杆5 M12×1.5，I级精度，用整体尼龙螺母消除，效果良好。

⑦x向、y向均用模数 $m=0.4$ 小模数齿轮，5级精度。

⑧特殊“皮老虎”：x方向手动机构中的手把（轴）和扫描微方孔的换孔机构中的手把（轴）必须外露在扫描器外面便于操作。当程序扫描时它们又要作xy二向随动，而又必须

与外界光线隔绝。设计采用特制“皮老虎”连接该手把及扫描器外壳，“皮老虎”能作x、y方向的移动，又防漏光。

⑨扫描微方孔采用金属整体结构〔4〕。

⑩x、y方向均有限位、调零、复位装置。

三、计算步进电机的负载启动力矩和扫描精度

1. 步进电机负载启动力矩计算

设x方向负载启动力矩为 M_x ，y向负载启动力矩 M_y 。

$$M_x = M_{cx} + M_{ax} \quad [5]$$

表1 x—y机械扫描器工作参数表

名称	单位	扫描区域参数		3'×2' (18×12毫米 ²)		3'×4' (18×24毫米 ²)	
		毫米 (弧秒)	毫米 (弧秒)	毫米 (弧秒)	毫米 (弧秒)	毫米 (弧秒)	毫米 (弧秒)
扫描孔径	毫米 (弧秒)	0.4×0.4 (4"×4")	0.4×0.4 (4"×4")	0.2×0.2 (2"×2")	0.4×0.4 (4"×4")		
积分常数	秒	0.2	2	0.2	0.2		
扫描速度	毫米/秒 (弧秒/秒)	2 (20)	0.2 (2)	1 (10)	2 (20)		
扫描电机频率 f_x	赫芝	5	0.5	5	5		
扫描电机步距角 θ_x	度	60°	60°	30°	60°		
扫描一行时间	秒	9	90	18	9		
移行电机频率 f_y	赫芝	5	0.5	5	5		
移行电机步距角 θ_y	度	60°	60°	30°	60°		
回程时间	秒	12	120	48	24		
扫一幅总时间	分	4.9	49	19.6	9.8		

$$M_y = M_{cy} + M_{ay}$$

其中 M_c ——静态力矩； M_a ——动态力矩

$$M_{ax} = J_x \frac{d\omega_x}{dt} = \frac{G_x D_x^2}{375} \cdot \frac{dn_x}{dt} \quad G_x D_x^2 = 4gJ_x$$

$$M_{ay} = J_y \frac{d\omega_y}{dt} = \frac{G_y D_y^2}{375} \cdot \frac{dn_y}{dt} \quad G_y D_y^2 = 4gJ_y$$

$$J_x = J_{x1} + J_{x2} + J_{x3} + \dots + J_{xn}$$

$$J_y = J_{y_1} + J_{y_2} + J_{y_3} + \dots + J_{y_n}$$

其中 J_x, J_y —— 分别为 x 方向和 y 方向运动件的总转动惯量并考虑了移动件的惯量 [6]

$$\frac{dn}{dt} \text{ —— 角加速度。}$$

$\frac{dn}{dt}$ 取值: 高速档为 5 赫 (见图 1, $f = \frac{1}{T}$, 即 0.2 秒走一步。假定一步中用 $0.2 \times \frac{1}{10} = 0.02$ 秒走, 其它时间停, 则加速度时间为 0.02 秒。

$$\text{步进电机转速 } N = \frac{\theta \cdot f \cdot 60}{360^\circ} \text{ 转/分}$$

其中 θ 为步距角, f 为步进电机的频率。

$$\text{对 } x \text{ 方向 } N_{\max} = \frac{60^\circ \times 5 \times 60}{360^\circ} = 50 \text{ 转/分}$$

$$\text{则 } \frac{dn_x}{dt} = 2500 \text{ 转/分/秒}$$

y 方向的 θ 和 f 都和 x 方向一样

$$\frac{dn_y}{dt} = 2500 \text{ 转/分/秒}$$

分别按结构计算出全部运动另件的 J_x, J_y 算出:

$$M_{ax} = 118 \text{ 克} \cdot \text{公分}$$

$$M_{ay} = 258 \text{ 克} \cdot \text{公分}$$

丝杆螺母机构传运静力矩 M_c [7]

$$M_c = \mu \frac{\pi \cdot \gamma \cdot \theta}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}$$

$$\text{计算得 } M_{cx} = 56 \text{ 克} \cdot \text{公分}$$

$$M_{cy} = 740 \text{ 克} \cdot \text{公分}$$

负载起动力矩

$$M_x = 56 + 118 = 174 \text{ 克} \cdot \text{公分}$$

$$M_y = \frac{740 + 258}{6.25} = 160 \text{ 克} \cdot \text{公分} \quad (i_y = 6.25)$$

此处 y 方向用传动比 $i_y = 6.25$ 以降低 y 向的负载启动力矩使其与 x 方向接近, 使 x, y 向都用同样的步进电机。

负载启动力矩是设计中选用步进电机的最重要数据之一。当然还有步距角和启动频率。这是与设计中选用同步电机所不同之处。

1972 年, 那时我国国产大步角步进电机只有 $\theta = 60^\circ$, 没有同时兼有 30° , 外形尺寸与负载启动力矩都与我们的设计匹配不好, 尤其是步距误差很大。北京电工所为我们试制的步进电机负载启动力矩 $350 \sim 450$ 克·公分 (安全系数为 2 左右) 步距角 $\theta = 30^\circ$ 和 60° , 步距误差 $\Delta\theta = \pm 1.5^\circ$ 和 $\pm 75''$ 。

2 扫描精度计算

此处“扫描精度”系指机械运动精度。某些天文因素如太阳自转引起扫描误差乃是一系统误差, 可以改正掉。扫描误差由机械扫描器、镜筒变形和电系统的误差组成。

A, 扫描一行内积累误差:

主要由下列组成: (毫米)

- | | |
|---------------|--------|
| 1) 步进电机步距误差引起 | 0.01 |
| 2) 丝杆传动 (I级) | 0.0076 |
| 3) 齿轮传动 (5级) | 0.0167 |
| 4) 导轨 | 0.003 |
| 5) 轴承系统 (C级) | 0.003 |

中误差 $\Sigma\delta = 0.021$ 毫米

(1) 步进电机步距误差计算: 由于步进电机步距误差不积累转一圈误差为零, 因此, 扫描一行走的误差等于走一步的误差, 所以, 由步距误差引起一行扫描误差 $\Delta S_{\text{步}}$ 有如下关系式:

$$\frac{\Delta S_{\text{步}}}{S} = \frac{\Delta\theta}{\Sigma\theta}$$

$$\Sigma\theta = H \cdot \theta = f \cdot \tau \cdot M \cdot \theta$$

其中 S——扫描一行线距离, 18毫米

$\Delta\theta$ ——步距角误差 $\pm 1.5^\circ$

θ ——步距角, 60°

M——扫描一行的点数, 也即扫一行走的步数, 45点

τ ——扫描一点的积分常数, 0.2秒

f——步进电机频率, 5赫芝

$$\begin{aligned} \text{在我们的系统里 } \Delta S_{\text{步}} &= \frac{\Delta\theta}{f \cdot \tau \cdot M \cdot \theta} \cdot S = \frac{1.5^\circ}{5 \times 0.2 \times 45 \times 60^\circ} \times 18 \\ &= 0.01 \text{ (毫米)} \end{aligned}$$

(2) 齿轮、丝杆传动误差计算:

一般计算考虑: 齿形误差 Δf , 相邻齿距误差 Δt , 螺纹半角误差 $\Delta\alpha$, 齿距积累误差 $\Delta t\Sigma$, 径向跳动 ΔE 和轴向跳动 Δb [8]。由于前三项相对很小, 影响可以忽略, 只计算径向跳动 ΔE , 轴向跳动 Δb 和齿距积累误差 $\Delta t\Sigma$ 等三项主要误差。

径向跳动: 齿轮: 丝杆径向跳动公差的最大值 δE (按精度等级由公差表查得) 在切向引起线性误差为 $\Delta S'$

$$\Delta S' = \Delta E \tan\alpha$$

式中 α 为齿轮的啮合角或丝杆螺纹半角。当传动转角 $\varphi < \pi$ 时 ΔE 即可以 δE 代入, δE 查表获得。

$$\text{当 } \varphi \leq \pi \text{ 时, } \Delta S' = \delta E \tan\alpha \sin^2 \frac{\varphi}{2}$$

轴向跳动: 齿轮轴向跳动 Δb 在切向引起线性误差 $\Delta S''$

$$\Delta S'' = \delta b \tan\beta \quad \varphi > \pi,$$

$$\Delta S'' = \delta b \tan\beta \sin^2 \frac{\varphi}{2} \quad \varphi \leq \pi$$

β ——齿轮螺旋角

δ_b ——轴向跳动公差最大值，查表得。
对丝杆，其轴向跳动就是切向线性误差

$$\Delta S'' = \delta_b \sin \frac{\delta}{2}$$

齿距累积误差 $\Delta S'''$

$$\Delta S''' = \delta_t \Sigma \sin \frac{\varphi}{2}$$

其中 $\delta_t \Sigma$ ——齿距累积公差的最大值，查表获得。

由 $\Delta S'$ 、 $\Delta S''$ 和 $\Delta S'''$ 计算出传统系统误差 ΔS

$$\Delta S_d = \sqrt{\Delta S'^2 + \Delta S''^2 + \Delta S'''^2}$$

在我们系统里，计算结果：齿轮传动误差 $\Delta S_d = 0.0167$ 毫米

丝杆传动误差 $\Delta S_d = 0.0076$ 毫米

(3) 导轨误差：考虑二个因素，温度变化时导轨间隙变化 δ_t ， $\delta_t = D \cdot \Delta \alpha \cdot \Delta t$ ，由于我们的配合尺寸很小（即 D 很小用 $\varphi 5$ 钢球），则此项可忽略，主要是导向误差。扫描方向行程 18 毫米，要求导向误差 0.003 毫米，计算很困难，尤其在采用双圆弧导情况下。

(4) 轴承误差：C 级向心轴承，公称内径 < 30 毫米，其径向晃动不超过 0.003 毫米（查表得到）。

$$\text{故扫描一行累积误差 } \Delta S = \sqrt{\Delta S_1^2 + \Delta S_2^2} = \sqrt{0.021^2 + 0.02^2} = 0.029 \text{ 毫米}$$

其中 ΔS_1 为前面计算的机械扫描器扫一行累积误差，

ΔS_2 为镜筒在 $t = 9$ 秒扫描一行中的变形，由镜筒计算获得 [10]。

$\Delta S = 0.029$ 毫米 < 0.05 毫米。给电系统留有较大的余地。

B、重复性误差：主要由两部分引起

(1) 由齿隙、螺母间隙、轴承间隙、正反转间隙不等所引起误差 $\Delta \delta_1$ 。齿隙： $D_b = 0.006$ 毫米（查公差表得到）

螺母间隙：调节消除，由设计装配保证。

轴承间隙：结构设计有消除机构。在最坏情况下，消不掉留下最大值为 $g_1 = g - K \cdot y$

g ——原始游隙，查表得到

y ——名义过盈，查表后计算得。

k ——系数，查表。

$$\text{计算 } \Delta \delta_1 = \sqrt{D_b^2 + g_1^2} = 0.02 \text{ 毫米}$$

(2) 步进电机超调引起误差：目前无法估算，查不到数据，依靠电机研究所及有关单位的试验摸索。在 $x-y$ 扫描器调试及试观测中，超调现象并不明显，也许是使用电机频率（5 赫芝）很低之故。但由于没有参考数据及有关文献记载，故设计时留的余地较大。即要求齿轮、丝杆螺母、轴承的精度更高，尽可能全部消除。 $\Delta \delta_1 = 0.02$ 毫米 < 0.1 毫米（重复性精度要求），只占其百分之二十。留下的全部给步进电机超调引起的误差。

四、结 果

1. $x-y$ 机械扫描器未装到望远镜上之前，在实验室进行机械与步进电机程序控制联

试时,进行了运动精度测量。18毫米行程内累积误差和电控程序扫一幅 18×12 (毫米²) 的重复性误差最大值为 $0.009 \approx 0.01$ 毫米 $\left\langle \begin{matrix} 0.05 \\ 0.1 \end{matrix} \right|$ 毫米|的累积误差和重复性误差的设计要求。

2. x—y机械扫描器装在磁场望远镜上,对太阳活动区像进行扫描。经北台天文学家试观测9个月得到结果〔9〕用 0.4×0.4 (毫米²)扫描微孔,光电系统测量信噪比为2000和1000 (积分时间2秒和0.5秒)对应纵向磁场灵敏度为10和20高斯;用 2×2 (毫米²)孔扫描,积分时间2秒,信噪比20000,对应纵场(普遍磁场)灵敏度约为1高斯。这是望远镜总的光电系统测量结果。当然证明直接采集讯号的机械扫描器达到了使用要求。

在试观测中,曾经发现程序扫描得的一幅磁图中,有扫描点数值有规律错位2点至3点的现象,曾怀疑过机械扫描精度有问题,经过试验排除了这种可能,发现是电系统漂移引起。由相应电系统作改进后没有再出现上述现象。

在稳定的测量结果中,用 0.4×0.4 (毫米²)微方孔,最多差 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{2}$ 格(点)。显然,这不单是x—y机械扫描器的累积误差和重复性误差的结果,还有从扫描器送出讯号,到光电倍增管出来,经前置放大,选频、模数转换、打印记录等电系统的误差在内。

参 考 文 献

- (1) 吕韵翎等“太阳磁场望远镜光电机械扫描系统”,本专集。
- (2) 陈志斌“太阳磁场望远镜扫描器驱动控制电路”,本专集。
- (3) 薛俊荪“扫描器双圆弧导轨的制”,本专集。
- (4) 吕韵翎、曹恒泰“扫描微方孔”,本专集。
- (5) 苏联“机器创造者手册”第二卷 P.596
- (6) 黄维德编著“机械振动概论”
- (7) 兀、兀邱拉鲍著“仪器的另件与部件” P.165
- (8) 天津大学金属切削教研室编“金属切削机床连动学” P.109.
- (9) 天文学进展第1卷第1期,1983年7—9月“太阳磁场望远镜的进展”。
- (10) 李挺“太阳磁场望远镜筒设计”本专集。

THE X—Y MECHANICAL SCANNER FOR 35CM SOLAR MAGNETIC FIELD TELESCOPE

Lu Yunling

(Nanjing Astronomical Instrument Factory)

Abstract

This scanner was set in photoelectric system of Solar Magnetic Field Telescope. It was used for obtaining signal of magnetic field in active region of Solar with movement of a square pinhole in the focal plane of the photoelectric system.

To put x coordinate was conformed with north-south direction and y coordinate was conformed with west-east direction. The scanner to be designed was conformed with scanning one point per step of the step-motor rotated in x direction.

The construction of x-y Mechanical Scanner was as follow:

Those two same step-motors with step pitch angle 60° and 30° were adopted for x and y vertical direction to each other drove two leadscrew respectively. They were arranged in an anti-backlash arrangement. The pinhole for scanning was mounted on a small slider jointed with the nut of x direction by dual reed that was very thin. There were two groups of guide whose shape of the section was a double circular arc for both antifriction and moving smooth in x and y direction respectively.

Also in this paper it was described a calculation on the accuracy budget of the step-scanning and start moment of the step-motors.

Some specifications were as follow:

Scanning region (mm \times mm) : 18×12 and 18×24

The dimension of scanning square pinhole (mm \times mm) , 0.2×0.2 and 0.4×0.4

Average scanning velocity (m/sec) : 1, 2, 0.2

Scanning frequency of the step-motor (Hertz) : 5 and 0.5

Scanning accuracy: The accumulating error was 0.05mm in the distance of 18mm. The repeating error was 0.1mm for same region scanned to continue in two times.

THE X-Y MECHANICAL SCANNER FOR SCM
SOLAR MAGNETIC FIELD TELESCOPE

Y. Y. Wang

Chinese Academy of Space Technology

Abstract

This scanner was set as photoelectric scanner of solar magnetic field telescope. It was used for scanning signal of magnetic field in active region of solar. The movement of a square pinhole in the focal plane of the photoelectric