

# 精密元刻度机的设计和试制

庄 夔

## 一、前 言

精密圆刻度机是用来刻划高精度度盘的,很多光学仪器,如:经纬仪、测角的计量仪器等,都需要依靠度盘作角度基准<sup>[1][2]</sup>。精密圆刻度机是在1958年开始设计和试制,于1959年12月刻出一些玻璃试验度盘( $\phi 140$ ),精度是 $\pm 0.87 \sim \pm 1.90$ 秒,达到了设计的要求( $\pm 2$ 秒)。

(1) 原理:机械式,蜗轮蜗杆间歇分度,往复机构刻线。(2) 特点:主轴采用圆柱形的V形轴系,有校正机构。(3) 尺寸:1500×1200×1200 (4) 主要技术规格:①刻线速度:4~16条/分 ②度盘最大直径:1000毫米, ③刻线间隔:30'~1.25' ④刻线最大长度:20毫米。

## 二、设计上的几点考虑

### (一) V形竖轴系:

轴系是圆刻度机的关键之一,对刻划精度的影响最大,尤其是小直径度盘。而轴系中最伤脑筋的是双周晃动,即以 $720^\circ$ 为一周期的轴晃动(见图1)。

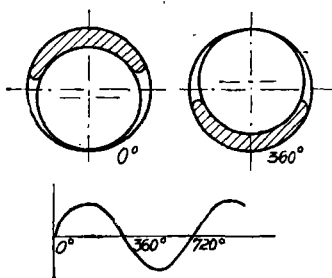


图1 双周晃动

减小双周晃动对刻划精度的影响,有三个途径:

① 在有双周晃动存在时,利用 $720^\circ$ 为一周期的特点,选择合适的落刀点,减小其影响(在图1中的 $0^\circ$ 落刀,影响最小。在 $180^\circ$ 落刀,影响最大)<sup>[3]</sup>。

② 改变调整方法,使双周晃动量减小(锥形轴系的调整见<sup>[4]</sup>)。

③ 改变轴系的结构,去除双周晃动的原因,或减小双周晃动的幅值,例如采用V形轴系等。

我们把V形轴承和圆柱轴所构成的轴系,称作“V形轴系”。这种轴系常见于仪器或精密机械中的横轴系统和短的竖轴系统,用在长的竖轴系统中还很少见到。自从1957年由蒋潮江老师提出用V形轴系作精密的竖轴系统后,曾建议在刻划机上<sup>[5]</sup>和这台圆刻度机上应用<sup>[3]</sup>,得到良好的效果。还有其他应用<sup>[6]</sup>,都得到良好的效果。

在设计之前,我们利用小圆柱轴作了V形轴系的模型试验,测得略不规整的双周晃动,其晃动量在 $\frac{0.2}{2} \sim \frac{0.3}{2}$ 微米以下,因当时是用一对显微镜对准度盘进行测定,晃动量已小于测量误差。经过试验,可以认为:

① V形轴系的置中精度较高,可用在圆刻度机上,②轴系的稳定性已由于采用了刚性厚压板,而能稳定地正常工作。

这类轴系与锥形轴系相比较,有如下优缺点:

优点:

① V形轴系的圆柱轴,采用高硬度材料(经处理),通过研磨;可得到表面很光,圆度很好的高精度圆轴,减小了单周晃动,

并且加工方便。

② 由于硬度高, 主轴不易磨损, (可适当增加与轴承的接触面积等办法, 来提高轴系的磨损)。

③ 双周晃动和偶然晃动, 可通过上下轴承分别调整来减小, 可达到较高的精度 (锥形轴系上下轴承相互制约)。

缺点:

① 摩擦力矩稍大。

鉴于以上种种原因, 在正式设计时, 采用了V形竖轴系。

轴承的结构简图见图2, 轴承与轴接触处, 都括成一小圆柱面, 增加接触面积。压板A一边可固定, 垫片B可修研, 使初间隙小到一定数量。再依靠螺丝C微调。因而成了: 既是机动式的、在短时期内, 却又是变相的标准式轴系。

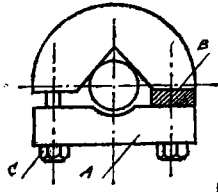


图2 轴承的结构简图

分析圆刻度的精度可知<sup>[4]</sup>, 影响最大的是轴系, 其次是刀架刀桥, 第三是蜗轮付等等。

从图3看出, 上轴承对度盘的精度传递

比  $\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{b+h}{h}$ , 而下轴承的精度传递比为

$\frac{\partial f}{\partial y} = \frac{b}{h}$ ,  $\frac{\partial f}{\partial x} > \frac{\partial f}{\partial y}$ , 即上轴承是影响精度的主要因素。在设计时, 应作到b值尽量小。

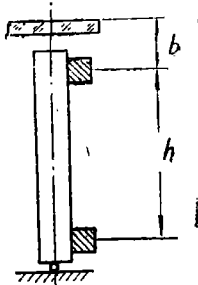


图3 轴系简图

当圆柱轴具有一定误差时, 将造成轴系的单周晃动。今大略分析单周晃动与主轴面形及V形夹角 $\theta$ 的关系, 来确定 $\theta$ 值。

主轴的面形, 可以用一个付利叶级数来表示:

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n \sin(nx + \varphi_n)$$

不难证明, 当  $\theta = \frac{360^\circ}{2n}$  时, 沿Y轴的单

周晃动为0, 当  $\theta = \frac{360^\circ}{n}$  时, 沿Y轴的单

周晃动最大, 其中  $n = \text{任意整数} (n > 1)$ , 常见

的圆柱轴, 多以椭圆为主, 兼有其他棱形 (三、四、五、六、七等), 因此V形夹角选用  $90^\circ$  为宜 (见图4), 这样, 沿Y轴的单周晃动较小, 所以刻刀的刻划方向选在沿X轴, (其他分析方法见<sup>[3]</sup>)。

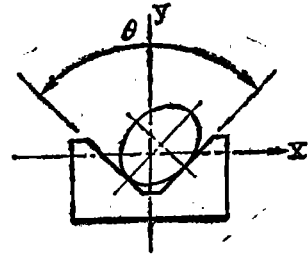


图4 单周晃动

## (二) 精密蜗轮付:

精密蜗轮付是分度的基准, 也是关键之一。我们采用球面蜗轮付, 主要由于: ①加工精度可以高, ②使用时蜗杆多齿啮合, 相邻误差平均, 刻划精度可以高。蜗杆架是浮动式的, 以消除啮合间隙。

模数采用  $m = 0.5$  毫米, 齿数2160, 则分度圆直径为  $\phi 1080$  毫米。

因蜗轮付用来高精度分度, 不是作为动力传动, 所以〔7〕中的设计数据仅供参考。

## (三) 校正机构:

因估计我所加工高精度精密蜗轮缺乏经验, 所以还采用了校正机构, 能使蜗杆根据

下表为同类型圆刻度机的几个参数：

	m	齿厚	蜗轮分度圆直径	蜗杆分度圆直径	蜗杆有效长	q	螺旋角(计算)	包含牙数
我所圆刻	0.5	5.5	1080	40	100	80	4' 39"	67
OFD KH 500	0.5	3.0	540	25	26	50	6' 52"	17
OFD KH 1000	0.5	4.5	1080	30	40	60	5' 46"	27

校正曲线多转或少转微小角度，来校正系统误差。这种附加运动较直接，故校正重复性较好。其缺点是每次分度终了有一些冲击。

#### (四) 其他机构：

应考虑保证其主要部件的精度，其他也有一定的相应精度。考虑温度变化等因素，结构应对称，减小振动，传动平稳可靠，使总体结构匀称稳定。

### 三、主要零件的加工

#### (一) 轴与轴承：

主轴原设计材料为氮化钢，加工时暂以低碳钢渗碳淬火来代替，在细磨之前，经过两次人工时效处理，最后进行了研磨，经检查不圆度小于0.2微米，光洁度在13级以上。

轴承材料是锡磷青铜，加工并处理后，分别装在轴套的两端，以心轴工具为准（直径与主轴相同，较轴长），涂红油看接触面情况来修括，使接触面积有80%以上，并要保证心轴与轴套端面基准垂直。

#### (二) 精密球面蜗杆<sup>[8]</sup>：

蜗杆的材料是40Cr，由哈量加工，他们改装了一台大的精密滚齿机，用来加工球面蜗杆。其方法为：工件粗细加工和处理后，装在原来装滚刀的部位，将车刀装于滚齿工作台上，调好分度链进行车削（如需要，可

车后再装磨头进行磨削）。多根铸铁球面研杆，也是这样加工出来的。

#### (三) 精密蜗轮：

蜗轮材料是锡磷青铜，毛坯的粗精加工和处理，都是哈量进行的，轮齿的铣和研在本所进行。

##### ① 轮齿加工前的准备工作：

铣研轮齿都在刻度机上进行。

调整精密圆刻度机的端面轴承，使轮齿对称中心面A—A与工作台的高度H，调到设计尺寸(见图5)。以后所有的铣刀中心，研

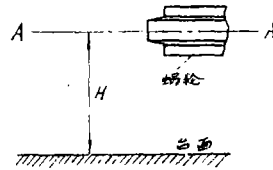


图5 标准高度

杆中心线、检查蜗杆中心线、工作蜗杆中心线，都要保持在同一平面A—A上（用块规和千分表确定一固定高度  $H \pm 0.002$  作为标准高度，来修磨各工具及工作蜗杆架的调整块底面）。

调整轴承的径向间隙，使主轴晃动小于0.1~0.2微米，（用一对显微镜测定，最好用乌氏干涉仪测定）。

铣齿和研齿在一个密闭较好的小房间进行，自装温度控制系统，温度变化为  $\pm 0.25^\circ\text{C}$ 。

圆刻度机机座下面垫上厚橡皮。

研齿时，地面打腊，保持清洁。

## ② 铣齿：

我们利用一个 $\pm 1$ 秒的 $\phi 500$ 精密玻璃度盘，安装在蜗轮上，调好偏心水平后，用一对显微镜对准分度。精密度盘刻线是2160条，并经检查，可给出修正数。铣具应重复性好，装上单片模数铣刀（ $M=0.5$ ， $Z=137\sim\infty$ ），倾角与螺旋角相符，由小马达及

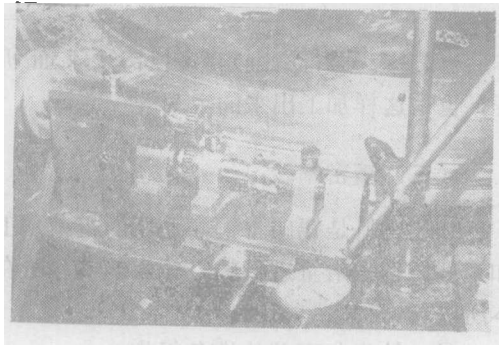


图6 铣具

皮带传动进行切削，深度由百分表控制（加撞块）。为避免因温度变化引起累积误差，采取一定间隔跳铣，很快转过一周，引起相邻误差略大，但可通过球面研杆研磨减小。这样，蜗轮的累积误差就能小些。

因铣切时间长，显微镜易被碰动。因而在无人碰动的地方设立一个标准点，它是用一个短臂显微镜，对准粘在蜗轮上的分刻板，经常核对工作显微镜。另外在蜗轮边和机座支架上各粘一小反射镜，远处放自准平行光管，也可作为核对点。还要同时核对标准度盘的偏心 and 水平，观察是否有度盘移

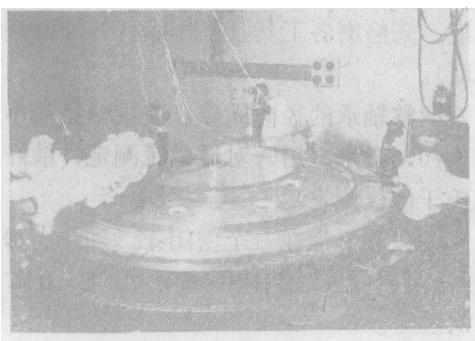


图7 铣齿分度及标准点

位。显微镜都包上一些隔温材料，以减小体温对它的影响。对好度锁紧后，就可进行铣切，锁紧和切削时，保证不位移和变形。

共铣三次：（1）粗铣：进给较大，（2）开槽，（3）精铣：进给较小。其他按合理的切削规范进行。

## ③ 研齿：

三研杆研齿原理见图8，国外也曾介绍过这种研法<sup>[9]</sup>。

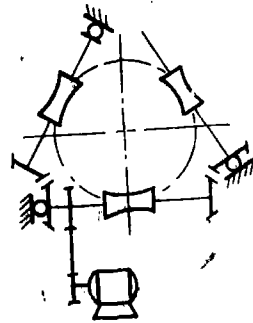


图8 三研杆研蜗轮原理图

经过研磨，可将蜗轮的累积误差减小，而局部误差则依靠单球面研杆研磨而减小。

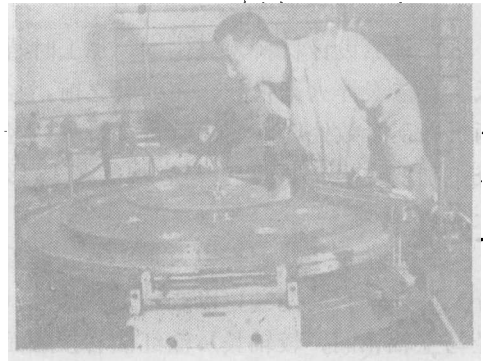


图9 三研杆研蜗轮

如果研杆等角度布置，则以 $\frac{120^\circ}{n}$ 为周期的误差消除不掉，所以最好角度不等，可消除多种周期的误差。也可利用多研杆多角度来研磨，效果可能会更好些。研磨速度100转/分左右，研料是氧化铝，先用 $M_5$ ，次用 $M_3$ ，再用 $M_1$ 和氧化铬，研好后还要退砂，并用机油跑合。清洗后用检查蜗杆（磨出的

直蜗杆),对度盘检查,精度为  $\pm 1.8$  秒。

要用工作蜗杆跑合后,方能试刻。

蜗轮的铣齿、研齿精度检查数据 (1959年)

项目	检查内容		第一台			第二台	
			精度(秒)	检查日期	精度(秒)	检查日期	
铣齿	铣齿精度(系统误差)		$\pm 6.0$	$\pm 5.6$	27/10	$\pm 4.4$ 最大 $\pm 8.8$	13/12
	铣齿精度 ( $20^\circ$ 内间隔 $1^\circ$ )	$0^\circ \sim 20^\circ$	$\pm 3.6$	$\pm 4.0$	28/10	$\pm 8.8$	13/12
		$90^\circ \sim 110^\circ$	$\pm 3.6$	$\pm 3.6$	28/10		
		$180^\circ \sim 200^\circ$				$\pm 8.8$	13/12
		$270^\circ \sim 290^\circ$	$\pm 3.2$	$\pm 3.0$	28/10		
	铣齿精度( $0^\circ \sim 20^\circ$ 内逐齿)		一般 $0.8 \sim 1.6$ 最大 $4.0$		28/10		
研齿	单球面研杆研齿精度(系统误差)		$\pm 2.2$	$\pm 2.0$	20/11	$\pm 5.8$	15/12
	单球面研杆研齿精度 ( $20^\circ$ 内逐齿)	$0^\circ \sim 20^\circ$	$0.16 \sim 0.24$ 最大 $0.4$		20/11		
		$180^\circ \sim 200^\circ$	$0.16 \sim 0.24$ 最大 $0.4$		20/11		
	三研杆研齿精度(系统误差)		$\pm 1.8$		2/12	$\pm 1.8$	23/12

#### 四、调查和试刻

1959年12月2日研蜗轮完成后,进行调整试刻。调整时上轴承要调得较紧,即间隙要小些,用显微镜对度盘(最好用乌氏干涉仪或电感仪),边调边测,测几圈后:

① 在同一角度相邻圈数据相减,选取最大值除2(绝对值),即得轴系的双周晃动,我们调到了  $\frac{0.2}{2} \sim \frac{0.3}{2}$  微米。

② 将测得数据,取奇次圈(或偶次

圈),各角度自取最大差值,即是偶然晃动

(小于  $\frac{0.2}{2} \sim \frac{0.3}{2}$  微米)。

③ 单周晃动是由圆柱轴的不圆度所引起,不能调整,只有通过研磨主轴和选择V形轴承的角度来减小,(其测量问题于下节讨论)。

调整后,我们试刻出10块 $\phi 140$ 的试验度盘,(用维道棱茨法, $20^\circ$ 分格检验),数据见下表(第一台,1959年)。

度盘编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
刻划日期	22/12	23/12	25/12	25/12	26/12	26/12	27/12	28/12	28/12	29/12
刻划精度(秒)	$\pm 1.48$	$\pm 1.90$	$\pm 1.47$	$\pm 1.70$	$\pm 1.59$	$\pm 1.27$	$\pm 1.56$	$\pm 1.34$	$\pm 1.02$	$\pm 0.87$
刻划情况	未校正					第一次校正				

## 五、轴系单周晃动的测量

关于主轴单件的检测，可参看专文<sup>[10][11][12]</sup>。这里仅就圆刻度机轴系单周晃动的测量，论述于下：

① 测量时，可在圆刻度机上固定一个圆度非常好的标准测棒，调好中心即可测定（见图10）。若在X轴方向刻划，则晃动在Y

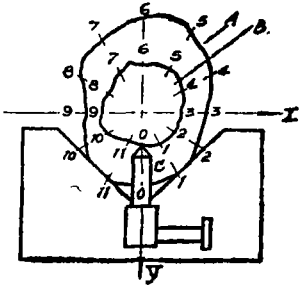


图10 测单周晃动

轴方向的投影影响度盘精度。将乌氏干涉仪装在C位置上就可测出（分若干等分），连续

测几圈（偶次）。

将测出数据先处理掉双周，即各角度自取平均值，再消去偏心后（对径相加除2），其极大值与极小值之差，即是沿Y轴的单周晃动。将数据按各角度画出曲线，即是沿Y轴的单周晃动曲线。

如果装上两个90°的乌氏干涉仪，则可将主轴中心在XY平面内的晃动轨迹，画出曲线。

② 如果标准测棒的表面形状误差与单周晃动量是同一数量级，而标准测棒的面形也不知道，则可将〔1〕中362页说到的古典“辅助分划尺方法”，用在轴的晃动测量上，可求出轴晃动和标准测棒面形。

两轴都作12等分（30°一间隔，见图10），将分隔线编号自0至12（0与12重合），量测程序如下：先0与0对准，测量几周（数据处理同①），得出一组数据（ $a_1, a_2, \dots$ ）。再将A的1与B的0对准，测量几周，又得出一组数据（ $b_1, b_2, \dots$ ），如此类推，可见下表

A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
0-1	0-1	1-2	0-1	2-3	0-1	3-4	0-1	4-5	0-1	5-6	0-1
0-2	0-2	1-3	0-2	2-4	0-2	3-5	0-2	4-6	0-2	5-7	0-2
0-3	0-3	1-4	0-3	2-5	0-3	3-6	0-3	4-7	0-3	5-8	0-3
0-4	0-4	1-5	0-4	2-6	0-4	3-7	0-4	4-8	0-4	5-9	0-4
0-5	0-5	1-6	0-5	2-7	0-5	3-8	0-5	4-9	0-5	5-10	0-5
0-6	0-6	1-7	0-6	2-8	0-6	3-9	0-6	4-10	0-6	5-11	0-6
0-7	0-7	1-8	0-7	2-9	0-7	3-10	0-7	4-11	0-7	5-12	0-7
0-8	0-8	1-9	0-8	2-10	0-8	3-11	0-8	4-12	0-8		
0-9	0-9	1-10	0-9	2-11	0-9	3-12	0-9				
0-10	0-10	1-11	0-10	2-12	0-10						
0-11	0-11	1-12	0-11								
0-12	0-12										

A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
6-7	0-1	7-8	0-1	8-9	0-1	9-10	0-1	10-11	0-1	11-12	0-1
6-8	0-2	7-9	0-2	8-10	0-2	9-11	0-2	10-12	0-2		
6-9	0-3	7-10	0-3	8-11	0-3	9-12	0-3				
6-10	0-4	7-11	0-4	8-12	0-4						
6-11	0-5	7-12	0-5								
6-12	0-6										

假设： $x_n$ 代表被测轴系上等分处的晃动量， $\lambda_n$ 代表标准测棒B上等分处的误差，

$a_1, \dots, l_i$ 代表轴系的晃动量。则误差方程成以下形式：

$$\begin{aligned}
 x_0 - x_1 + \lambda_1 &= a_1, & x_1 - x_2 + \lambda_1 &= b_1 \cdots \cdots x_{10} - x_{11} + \lambda_1 = k_1, & x_{11} - x_{12} + \lambda_1 &= l_1 \\
 x_0 - x_2 + \lambda_2 &= a_2', & x_1 - x_3 + \lambda_2 &= b_2 \cdots \cdots x_{10} - x_{12} + \lambda_2 = k_2, \\
 \cdots \cdots \cdots & \cdots \cdots \cdots \\
 x_0 - x_{11} + \lambda_{11} &= a_{11}, & x_1 - x_{12} + \lambda_{11} &= b_{11} \\
 x_0 - x_{12} + \lambda_{12} &= a_{12}
 \end{aligned}$$

I

法方程则为：

$$\begin{aligned}
 13(x_0 - x_1) + \lambda_1 + \lambda_{12} &= \Delta_0, & 12\lambda_1 - x_{12} + x_0 &= s_1 \\
 13(x_1 - x_2) + \lambda_2 + \lambda_{12} &= \Delta_1, & 11\lambda_2 - x_{12} + x_0 - x_{11} + x_1 &= s_2 \\
 \cdots \cdots \cdots & \cdots \cdots \cdots \\
 7\lambda_6 - x_{12} + x_0 - x_{11} + x_1 - x_{10} + x_2 - x_8 + x_3 - x_8 + x_4 - x_7 + x_5 &= s_6 \\
 6\lambda_7 - x_{12} + x_0 - x_{11} + x_1 - x_{10} + x_2 - x_9 + x_3 - x_8 + x_4 - x_7 + x_5 &= s_7 \\
 \cdots \cdots \cdots \\
 13(x_{11} - x_{12}) + \lambda_{12} + \lambda_1 &= \Delta_{11}, & 2\lambda_{11} - x_{12} + x_0 - x_{11} + x_1 &= s_{11} \\
 & & \lambda_{12} - x_{12} + x_0 &= s_{12}
 \end{aligned}$$

II

每一个  $x$  和  $\lambda$  的数值，可以从  $x_0 = 0, x_{12} = 0$  的条件和已知的  $\lambda_{12}$  (现  $\lambda_{12} = 0$ ) 来计算。 $\Delta$  值可以从已知的  $a, b, c \cdots \cdots$  计算：

$$\left. \begin{aligned}
 s_1 &= a_1 + b_1 + c_1 + \cdots \cdots + l_1 \\
 s_2 &= a_2 + b_2 + c_2 + \cdots \cdots + k_2 \\
 \cdots \cdots \cdots \\
 s_{12} &= a_{12}
 \end{aligned} \right\} \text{III}$$

$$\left. \begin{aligned}
 \Delta_0 &= p_0 - p_1 + q_1 \\
 \Delta_1 &= p_1 - q_1 - p_2 + q_2 \\
 \Delta_2 &= p_2 - q_2 - q_3 + p_3 \\
 \cdots \cdots \cdots \\
 \Delta_{11} &= p_{11} - q_{11} + q_{12}
 \end{aligned} \right\} \text{IV}$$

以上公式内的  $p$  和  $q$  值则从以下公式求得：

$$\left. \begin{aligned}
 p_0 &= a_1 + a_2 + a_3 + \cdots \cdots + a_{12} \\
 p_1 &= b_1 + b_2 + b_3 + \cdots \cdots + b_{11} \\
 \cdots \cdots \cdots \\
 p_{11} &= l_1
 \end{aligned} \right\} \text{V}$$

$$\left. \begin{aligned}
 q_1 &= a_1 \\
 q_2 &= a_2 + b_1 \\
 \cdots \cdots \cdots \\
 q_{12} &= a_{12} + b_{11} + c_{10} + \cdots \cdots + l_1
 \end{aligned} \right\} \text{VI}$$

计算后得出轴系沿 Y 轴的晃动量和标准测棒的面形。在下一测量晃动时，就可用①法进行（加上标准测棒的面形校正数）。

所得结果的误差估计，可以按照误差理论的规则进行<sup>[13][14]</sup>。

标准测棒也可用[10]中的方法测出后，再按①法进行。以上方法也可适用于锥形轴系。

三结合的成果，经过大家努力，终于试制成功。工作中也存在一些缺点，有待今后改进。

感谢蒋潮江老师的指导和梁浩明同志的帮助。这项工作的设计人员有：庄夔、邹自强、曹绮葵、何文英、蒙华飞等。工艺装备的设计有：曹绮葵等。精密工艺人员有：刘文富（铣齿）、赵君鹏（研齿）、计竹青（哈量）等。调整试刻人员有：朱元薰、计竹青、庄夔、宋长标（上光）等。铣齿对度及度盘检验有：计量组及唐务浩（测绘总局）等。

除蜗轮轮齿的精密加工外，其他都由哈

## 六、结 语

精密圆刻度机是科技人员、工人、干部

量厂进行加工和装配，共两台。

对哈量和我所的光栅组、刻划组、计量组、试制车间等单位的同志的大力协助，表示感谢！

### 参考文献

[1] 《测量仪器学》С. В. 耶利谢也夫著，方俊译，1956年，科学出版社。

[2] 《刻度工作法》Ф. П. 布尔米斯特洛夫著，孙振洲译，1962年国防工业出版社。

[3] “精密圆刻度机上的几个问题” 邹自强《测绘学报》1963年№1

[4] “精密圆刻度机主轴调整及圆刻度精度” 1964年庄夔（研究工作报告）

[5] “阿基米德螺旋线刻划机及螺旋分划板的刻制” 1959年9月庄夔（研究工作报告）

[6] QGA405 型光电圆刻线机鉴定资料。

[7] 《球面传动装置的制造》卡尔采夫著，魏任之译，1958年机械工业出版社

[8] 《齿轮及蜗轮传动装置的制造》西道联柯等著，刘仁化译1956年机械工业出版社

[9] Edward Leibhardt J. Opt. Soc. Am. 1952年 №7 p. 447

[10] “不圆度的V形测量法” 1977年9月 邹自强（南宁会议报告）

[11] “精密主轴 0.06 微米晃动量的测量” 方益林《机床》1977年3期。

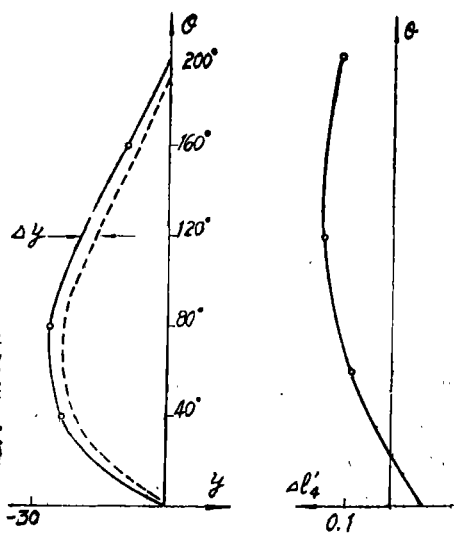
[12] 《机械精度基础》1977年韦恩·R·穆尔著，北京机床研究所译，国防工业出版社

[13] 《刻线长度量具的检验》国家计量局译 1958年机械工业出版社

[14] 《误差理论与实验数据处理》冯师颜编 1964年科学出版社。

〔庄夔执笔〕

上接 4 页



图五：上图为最佳象面位移随凸轮转角 $\theta$ 变化的情况。左图实线为原补偿曲线，虚线为经过修正后的补偿曲线。其坐标原点在计算时，仍移到原曲线的坐标原点。起点（ $\theta=0^\circ$ ）为最长焦距位置 $f$ 。图上的 $\Delta y$ 值被夸大了10倍。

这个方法可以用到实际变焦距镜头的装调中去。用实测的焦距值 $F$ 和与之对应的 $\Delta l'$ 数列，来修正已加工好了的凸轮补偿曲线，以达到消除象面位移的目的。当

然，这要在程序控制铣床上来实现。在国内有关单位正在研制的加工变焦距镜头凸轮的专用程序控制铣床中，是可以做得到的。