

## 0.2秒圆刻机的基本原理

邹 自 强

本文根据作者所搜集到的资料综述了圆刻机的发展历史，在漫长的发展过程中大体经历了抄录刻划、机械刻划和光电刻划三个阶段，中国古代曾对刻划技术的发展作出过重要贡献。列表说明了世界上圆刻机生产及研制现状。

本文介绍了长春光机所近十几年来研究成功的一种光电圆刻方法，它的特点是：利用传统的机械方法进行分度粗定位，而后再用光电伺服控制对误差进行微量校正。这是一种机电结合、粗精结合的方法，和国外已有的方法相比：电子学控制系统大为简化；既可进行间歇刻划，又可进行连续刻划；既可进行“光刻”，又可进行“刀刻”，还便于对现有机械式圆刻机进行光电改装。

近代刻划技术要求刻线越来越密，分度间隔越来越小，本文介绍了作者在1971年提出的、在0.2秒圆刻机上实现的一种细分刻划方法，即用移相电阻链和细分机构相结合的方法，它可将刻线密度提高数十倍。

### 一、历史 和 现状

圆刻机是制造度盘、码盘、光栅盘等测角元件的关键性机器，在近代尖端技术中，例如在火箭弹道测量设备、光电自动检验、超精加工等方面，起着重要作用。随着近代科学技术的飞速发展，圆刻机也有了很大进展，在近代圆刻机上集中体现了当代精密机械制造、光电自动定位等技术的代表性水平。

圆刻机是制造圆刻度的工具，人类社会的发展一直离不开度量问题，因而也一直离不开相应的刻度技术。在国外，刻度最早的有文字记载的成果是在公元前<sup>[2]</sup>，到了公元九世纪有了圆刻机的原型<sup>[3]</sup>；在我国，则有着更为悠久的历史，大量考古挖掘工作已经发现中国古代许多刻度技术的杰出成果，早在皇帝时代（公元前两千年）中国就制造了骨尺和玉尺<sup>[4]</sup>，这种在骨头上和在玉石上所进行的刻度虽然很粗糙，每一寸刻一条线，用肉眼就可分辨出刻度不均匀，但它们反映了中国远古时代的刻度雏形。到了战国初期（公元前500年），铜尺刻度已经细到每一分一条线，刻度总长误差已经做到“不差累黍”<sup>[5]</sup>，公元前488年，鲁班改进了木工尺的刻度标准，前汉时期（公元九年）制成的新莽铜尺，刻线细处一分一条线，刻度工艺十分精巧，使用滑动的游尺进行读数，和近代的游标卡尺十分相似<sup>[5]</sup>（图1）。元朝郭守敬在著名的简仪上，把圆刻度刻到每6分一条线。清朝康熙十三年（公元1674年）建造的地平经仪上，度盘直径大到近两米，为了加强刚度而又减轻重量，巧妙地用一条腾空飞舞的长

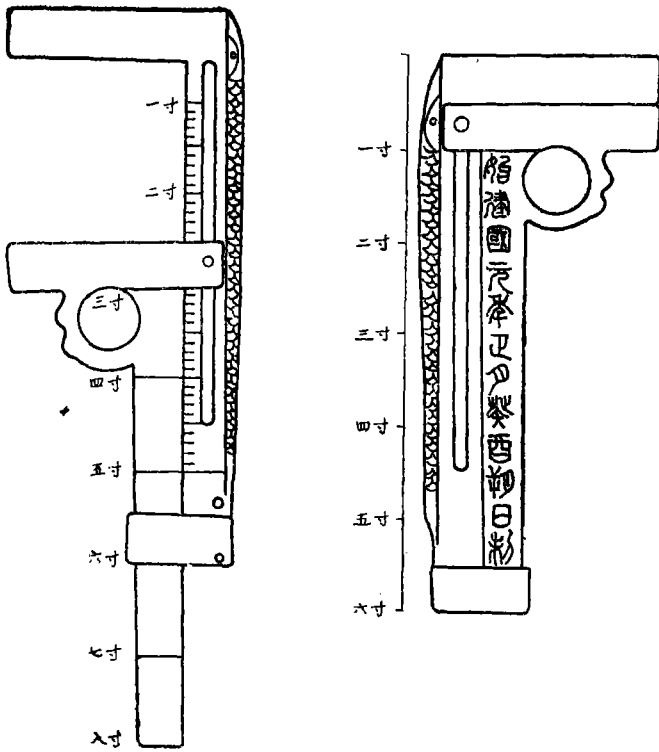


图1 中国古代新莽铜尺刻度

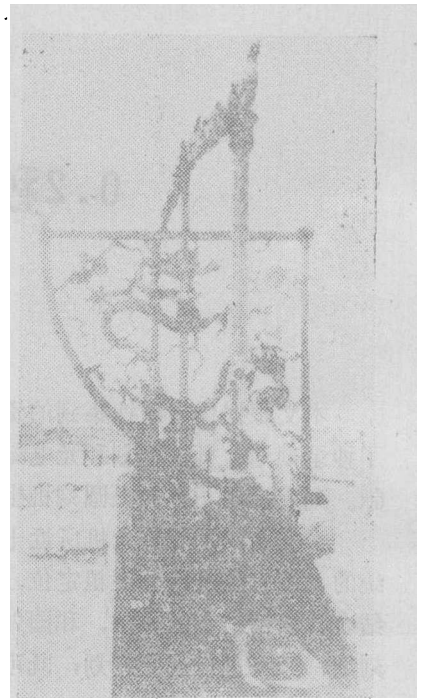


图2 清朝地平经仪度盘

龙支持着刻度圈，龙身飞向一边起到静平衡的效果（图2），每度内刻有10条线，附加刻有斜向细分刻度线，可以细读到 $10''$ 。清朝乾隆九年（公元1744年）建造的畿衡抚辰仪度盘直径约两米，具有很高刻度水平，当时并详细著书论述了刻度技术的许多问题，如：度盘平面的加工方法，刻度方法，等等，绘图说明了度盘自重怎样引起变形，主轴磨损后怎样继续维持轴系精度，等等，乾隆皇帝亲自为此书写了序言<sup>[6]</sup>，这在两百多年前的历史条件下，在世界技术史上也是一项宝贵的历史遗产。

圆分度刻划方法和刻划机械的发展大体上经历了三个阶段，即：

1. 抄录刻划 它是以原始“母盘”为分度基准，进行抄录复制，在抄录过程中可以对“母盘”误差加以修正。这种方法出现得最早，原始的“母盘”是用圆规或者夹成角度的两个标记进行反复校正刻出来的。这种古老的方法直到现在有些地方仍归使用它；

2. 机械刻划 它是以精密蜗轮等机械原件为分度基准，依靠蜗轮蜗杆等传动机构进行刻划。十八世纪中期，在美国和德国差不多同时出现了这种自动刻度机<sup>[2]</sup>，较大量的推广使用这种刻度机是在本世纪二十年代，目前，作为商品出售的圆刻机主要是这种类型的；

3. 光电刻划 它是以圆光栅等光电元件为分度基准，依靠光电控制来进行刻划，这是最近廿几年出现的新型刻划方法，现在还没有国家以正式商品方式提供这种圆刻机。

圆刻机按其刻划精度可以分为以下四个等级：

- i) 低精度级，最大直径误差大于10秒；
- ii) 中精度级，最大直径误差大于1秒至10秒；
- iii) 高精度级，最大直径误差大于0.2秒至1秒；

iv) 超精级, 最大直径误差小于等于0.2秒。

目前, 各国高精度圆刻机如表一所示, 超精级的如表二所示。

光电圆刻机发展历史还较短。德国在五十年代初期曾经作过尝试, 但当时效果不佳<sup>[9]</sup>。美国 *Baldwin* 公司于 1955 年初步建成一台光电圆刻机<sup>[10][11]</sup>, 后来进行不断改进和提高<sup>[12][13][14]</sup>。英国 *J.M. Burch* 于 1960 年提出了一种方案设想<sup>[17]</sup>, *N.P.L.* 于 1966 年建成了一台圆光栅刻划机<sup>[18]</sup>。荷兰 *Philips* 公司依靠 *N.P.L.* 提供的母光栅也进行过光电刻划试验<sup>[19]</sup>。

作者及其同事 1963 年设计改造了一台光电圆刻装置(图 3), 开始探索间歇运动刻划的光电控制方法, 当时用人工校正方法刻出了一些试验性度盘, 在精度上比原有 1" 机械圆刻机有明显提高<sup>[22]</sup>; 1971 年, 用同样原理改造建成了一台正式的光电圆刻机, 刻出了成品码盘; 经过进一步改进, 1972 年又建成了另一台光电圆刻机(图 4), 除可进行间歇刻划外, 进一步试验成了光电连续刻划方法, 刻出了多种高精度码盘和光栅盘。在以上三阶段工作的基础上, 按照这

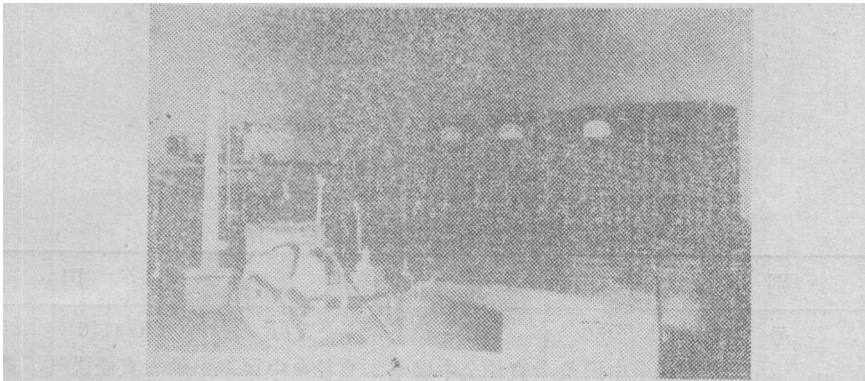


图 3 1963年光电圆刻装置

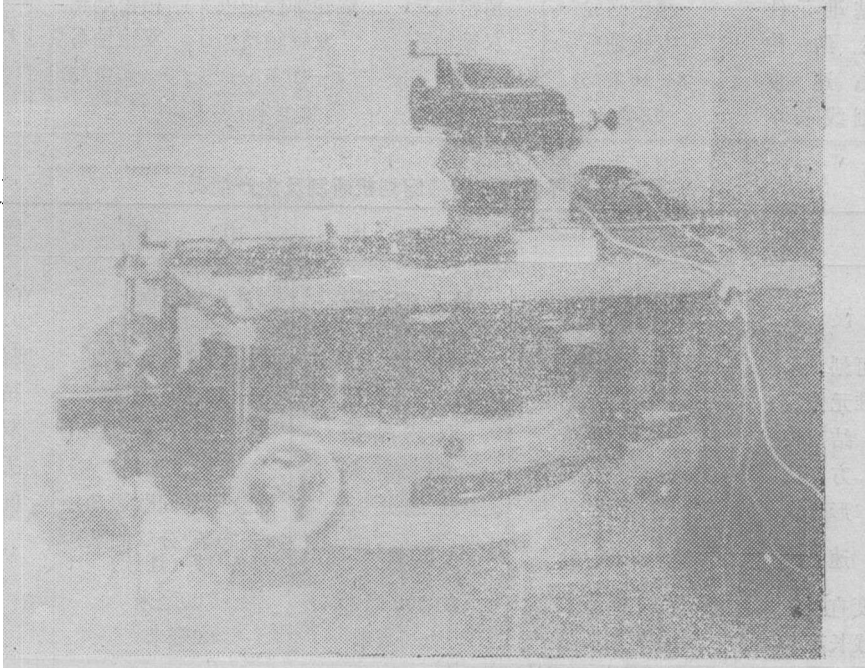


图 4 1972年光电圆刻机

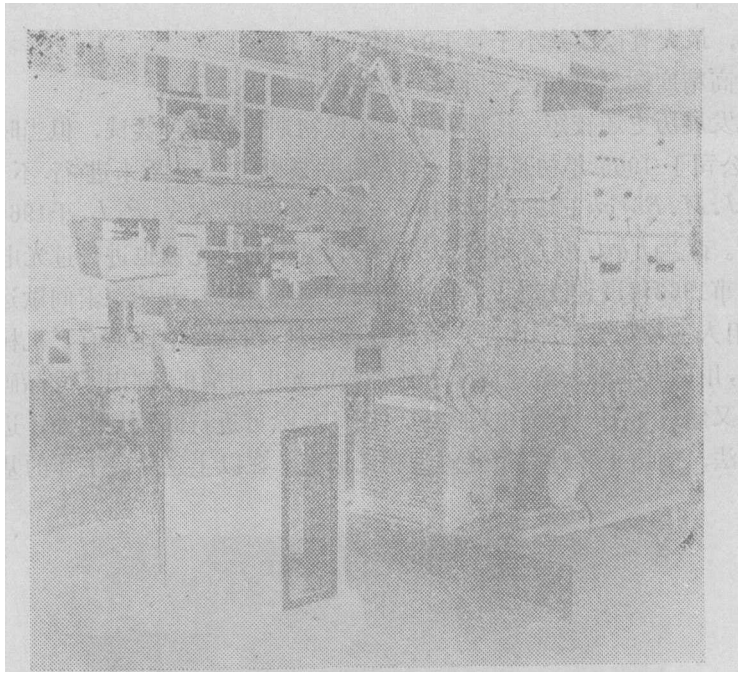


图5 0.2秒圆刻机外貌

表1 世界各国高精度圆刻机生产情况

国 别	德 国	德 国	瑞 士	中 国	苏 联
型 号	TKF450	TM-43	SIP	QG4110	BE-05
刻 度 误 差	直径全中误差 $\pm 0.4'' \sim \pm 1''$	直径全中误差 $\pm 1''$	直径全中误差 $\pm 1''$	最大直径误差 $\pm 1''$	最大直径误差 $\pm 0.5'' \sim \pm 1''$
最大刻度直径	450毫米	600毫米	1000毫米	1000毫米	1000毫米
分度基准元件	精密蜗轮	精密蜗轮	蜗轮加修正板	精密蜗轮	精密蜗轮
轴 系 结 构	双锥轴系	双锥轴系	双锥轴系	双锥轴系	V槽滚珠轴系
刻 线 速 度	8-16条/分	8-16条/分	4-10条/分	8-16条/分	4-16条/分
最大刻线长度	12毫米	12毫米	12毫米	12毫米	15毫米

表2 世界各国超精级圆刻机研制及生产情况

国 别	美 国	英 国	中 国	德 国
刻 度 误 差	最大直径误差 $\pm 0.3$ 秒	最大直径误差 $\pm 0.2$ 秒*	最大直径误差 $\pm 0.2$ 秒	直径全中误差 $\pm 0.1 \sim \pm 0.2$ 秒
用途(可刻对象)	码盘、光栅盘	光 栅 盘	码盘、度盘光栅盘	度盘、光栅盘
分度基准元件	一块圆光栅	一对圆光栅	一对圆光栅	精密蜗轮
轴 系 结 构	一对石英球	双球轴系	V 型 轴 系	双锥轴系
刻 划 方 法	光 刻	光 刻	光刻、刀刻	刀 刻
运 动 形 式	连续运动	连续运动	连续运动间歇运动	间歇运动
刻 线 速 度	$\frac{1}{15}$ -20转/分	50条/秒	3-20条/分(间歇) 30条/秒(连续)	4-16条/分
最大刻度直径	约400毫米	约300毫米	700毫米	950毫米
最大刻线长度	2毫米	约30毫米	60毫米	12毫米

\* 根据作者访问英国NPL时该实验室所介绍的数据

些基本原理，经与昆明机床厂、大邑光电所合作于1974年研制成0.2秒光电圆刻机。近年来，我们在使用中对长春光机所的这台0.2秒光电圆刻机（图5）不断改进，性能有了进一步提高，在一般情况下，最大直径误差 $\leq \pm 0.2$ 秒（直径全中误差 $\leq \pm 0.1$ 秒），经过特殊措施，最大直径误差 $\pm 0.1$ 秒左右（直径全中误差 $\pm 0.046 \sim 0.078$ 秒），这样刻出的高精度光栅盘1981年10月经过了鉴定<sup>[1]</sup>。

## 二、间歇刻划原理

一般的机械刻划方法已经有了长期使用的经验，作者的基本想法是：把光电控制技术和传统的机械刻划方式结合起来，建立一种比较简单而用途比较广泛的光电圆刻方法。它的要点是：分度定位由粗精两步联合完成，粗定位用一般机械方法进行，然后用光电方法校正机械误差进行精定位，即光电控制只负责最后的微量误差校正，分度传动、间距调整、刻划动作等仍用传统的蜗轮蜗杆等机械方法来完成。这是一种机电结合、粗精结合的方法，和国外的电子学程控方法相比，它的优点是：电子学系统可以大为简化，可靠性较高，既可进行“刀刻”，又可进行“光刻”；既可进行连续运动刻划，又可进行间歇运动刻划；便于对现有圆刻机进行光电改装以提高精度。

原理示意图如图6所示。按照这种原理布置的0.2秒圆刻机的具体结构如图7所示。

在圆刻机主轴上装一块光栅度盘（动光栅）和主轴同心，同轴旋转，其上刻线稍许偏离中心，切于一个半径约0.6毫米的小圆。上面再装一块光栅度盘（静光栅），刻线也切于一个半径0.6毫米的小圆，但倾斜方向和动光栅恰好相反。两者刻线数取相同，对于二进制，32768条线；对于六十进制，32400条线。在平行光照明下形成一簇以主轴中心为中心的同圆心环，动光栅每转过一条刻线，这种莫尔条纹扩张出一圈条纹。

为了准确地瞄准这种条纹，使用了成对的粗狭缝，每对包括两条相邻的粗狭缝，它们均呈圆弧形，中心间距等于相邻两条莫尔条纹间距的一半，缝后各放一块小透镜，焦点上安置光敏二极管，它们敏感出来的波形为较好的正弦波，相位相差 $180^\circ$ 。

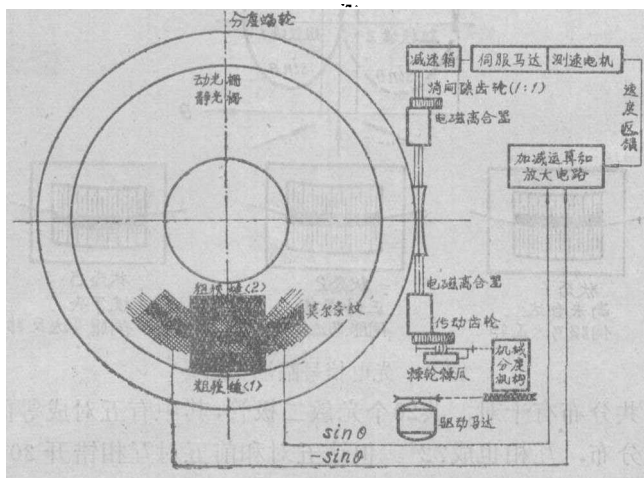


图6 原理示意图

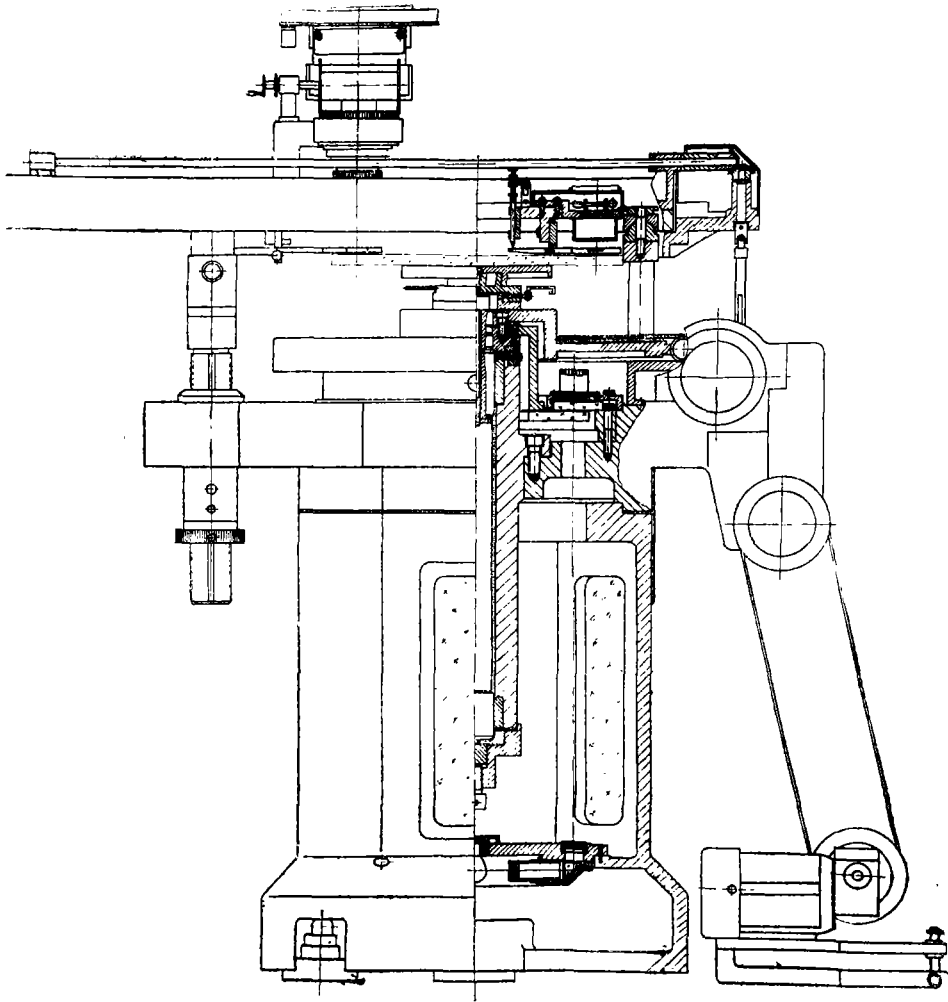


图7 0.2秒圆刻机结构图

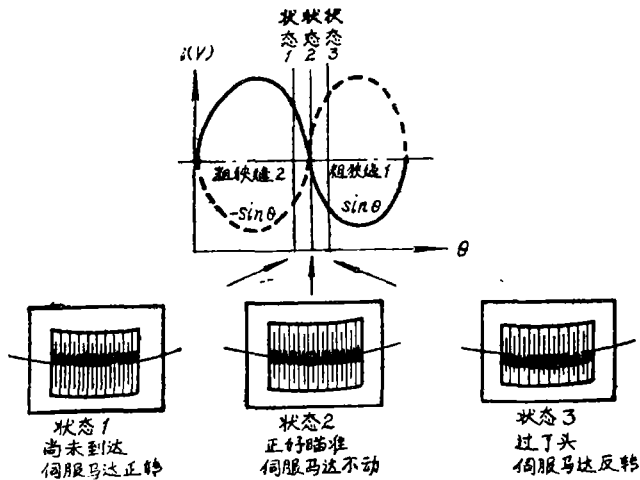


图8 光电信号瞄准状态

这样的狭缝全周共分布有十对，共20个光敏二极管，其中有五对成等间距分布互成 $72^\circ$ ，另外五对也成等间隔分布，互相也成 $72^\circ$ 。但这五对和前五对互相错开 $30^\circ$ 并且狭缝径向位置相差 $1/4$ 莫尔条纹间距，这样组合结果得到：五路正弦信号，五路余弦信号、五路负正弦

信号和五路负余弦信号。这四组五路信号分别送入相加电路求取其和，然后正弦和负正弦，余弦和负余弦分别进入差放电路求得其差，得出的输出信号经过斩波和功率放大推动伺服电机组  $ND-F-09$ 。

每个狭缝长约20毫米，包括约700条刻线，所以圆光栅刻线的局部误差和短周期误差被很好地削弱了，中周期误差也得到了相当的削弱。整个圆周上分布多头读数主要为了削弱圆光栅的长周期误差，同时也可进一步削弱中周期误差。多缝读数和多头读数这两种平均作用适当地搭配才能把各种不同频谱特性的误差充分消除掉。狭缝成对的使用，是为了通过差放电路后削弱刻线均匀性对精度的影响，并且补偿灯丝衰老，电源变化等因素对定位精度的影响<sup>[28]</sup>。

圆刻机工作时，机械分度系统带动蜗轮和主轴转过了某一角度，停下来以后如果没有误差，莫尔条纹处于双缝的平分线上（图8中的状态2）。这时两路光电信号大小相等，差放输出等于零，伺服马达不动。如果停下后分度尚未达到理想位置（图8中的状态1）狭缝1的信号就大于狭缝2的信号，差放后出现正值，伺服马达就正转，通过减速箱，电磁离合器，消间隙齿轮和蜗轮蜗杆使主轴正转，一直转到状态2时，差放输出出现零值，伺服马达才停止转动，如果分度停下后，位置过了头（图8中的状态3），狭缝1的信号就小于狭缝2的信号，差放输出出现负值，伺服马达就反转，一直转回状态2为止。

每分度一次，光电信号的波形如图9所示。详细的动作过程也标注在相应位置上。误差校正动作所需时间不应大于每次分度周期的六分之一，否则就会引入机械误差。

粗动的驱动马达和微动的伺服马达，动力都最后转到蜗杆上，蜗杆两端各有一个电磁离合器，目的是为了把这两种马达的动力互相错开，同时使机械分度误差不会产生累积。当机械分度即将开始（棘爪即将推动棘轮）的那一瞬间，粗动离合器恰好吸上而微动离合器恰好脱离，这两个离合器由同一个凸轮和开关来控制。

微动离合器吸上后，光电校正过程就开始，在指定时间内完成误差校正动作，然后开始落刀刻划或曝光。刀刻或光刻的动作情况和一般刻线机上的动作完全相同。

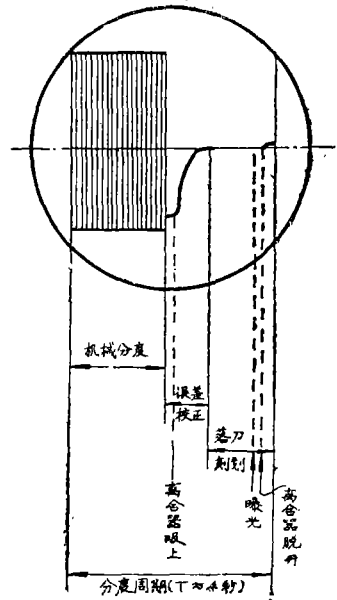


图9 光电刻划示波图形及动作过程

### 三、细分刻划原理

近代刻划技术的一个发展趋势是刻线越来越密，分度间隔越来越小，例如高精度的光栅盘和码盘就往往要求很小的分度间隔。用接触倍增法光刻码盘，只有实现几秒量级的分度间隔才能刻成扇形母板。这就要求圆刻线机在提高精度的同时提高可能的刻线数。在0.2秒圆刻机上，对于二进制，一般情况下最大刻线数为32768，使用细分机构后，最大刻线数为524288。

当所需的刻线数大于基准光栅的总线数时，需要采用细分刻划技术，我们研究试验成一种细分电路和细分机构相结合的方法，原理如下（参看图10）。

从差放电路输出端引出四路原始信号： $\sin\theta$ ， $-\sin\theta$ ， $\cos\theta$ ， $-\cos\theta$ ，它们彼此之间相

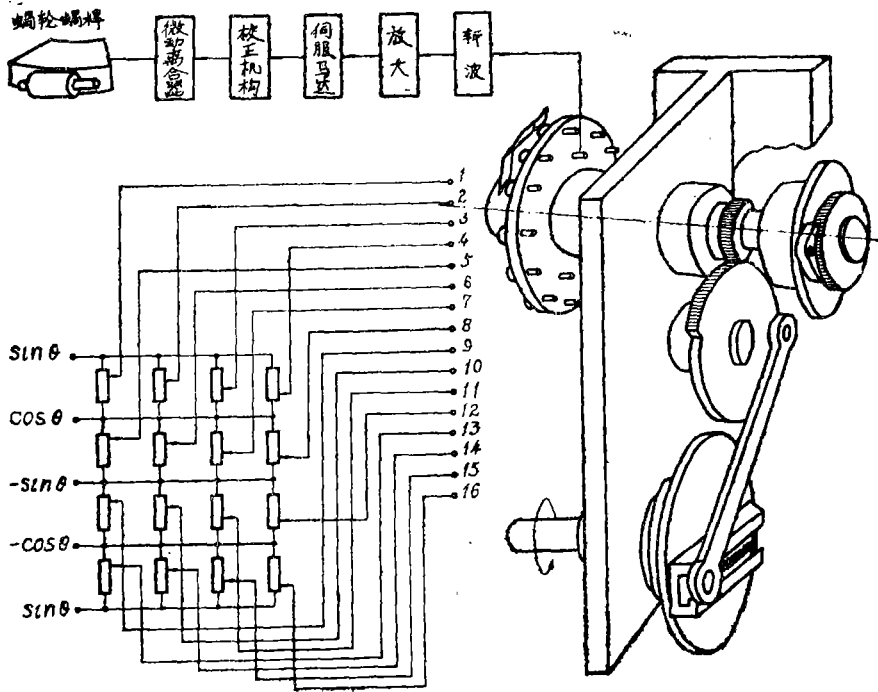


图10 细分原理图

差  $90^\circ$  相位差，每两路之间并联四个电位器，电位器中间抽头输出的就是相位发生某种移动的新的正弦波。以正弦和余弦两路为例（图11），中间抽头输出的实质上是正弦和余弦两路信号以某种比例合成后的新信号，抽头的高低位置就决定了合成的比例。

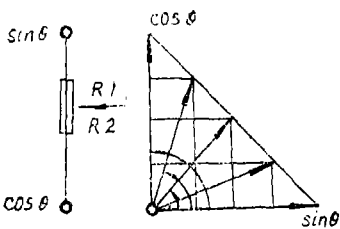


图11 电阻链的移相作用

根据旋转矢量合成的简单关系，可以得到不同相位差的正弦信号。根据细分定标装置（小角度测量装置）所指示的数值，分别调整相应电位器的抽头位置使得各路信号依次移动相位差  $-\frac{360^\circ}{16}$ ，即得到十六路移相信号，它们对应着十

六个零点（正弦波零位）。将这些信号接到细分机构上去。

细分机构的动作原理是（参看图10右图）：偏心连杆机构把输入轴的旋转运动变成扇形齿轮的往复摇摆运动，经过小齿轮啮合后，变成棘爪盘的往复运动，棘爪推动一个十六牙的棘轮，棘轮同轴上装一个铜片制成的接触电刷，电刷与十六个触点的细分盘接触，并根据接触位置把其中一个触点上的信号输送出去。（十六路移相信号分别接在这十六个触点上。）

经过细分机构这样分选后，信号再经过斩波，放大送到伺服马达上。若细分机构使接触电刷往前移动一个触点，伺服马达就驱动圆刻机转过一个  $-\frac{W}{16}$ （ $W$  为动光栅间距），若电刷每次移过两个触点，圆刻机就转过  $2 \times \frac{W}{16}$ ，若电刷每次移过三个触点，机器就转过  $3 \times \frac{W}{16}$  等等，依此类推。

由此可得：

$$\text{细分后最大刻线数} = \text{基准光栅总线数} \times \text{细分份数} = 32768 \times 16 = 524288$$

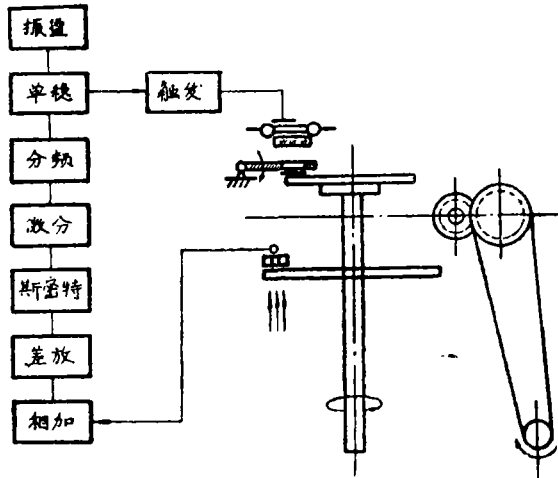


图12 连续运动刻划原理图

## 四、连续运动刻划

连续运动刻划是近年来来的一个发展方向。这种0.2秒光电圆刻线机在作间歇刻划的基础上，同时能作连续运动刻划。其原理如图12所示。

马达通过一对皮带轮带动原来的分度棘轮轴连续旋转，经过一对传动齿轮后，蜗杆及蜗轮也不断连续旋转，因此，主轴、动光栅及涂好感光乳剂的待刻毛坯也不断连续旋转，读数系统不断发出连续的正弦波信号，经过相加电路平差和差放电路补偿以后得到较为理想的正弦信号，斯

密特电路对之进行鉴零转换成相应的方波，由双稳触发器构成的分频器将这列脉冲进行适当分频以便得到指定的重复闪光频率，经过微分电路变成尖脉冲信号，再经过一个单稳触发器变成很窄的方形脉冲，以便使下一级的可控硅得到可靠的触发，触发脉冲加到闪光灯的引燃极上，氙灯急速电离雪崩，发出强烈的闪光。闪光灯发出的光经过聚光透镜变成平行光照射到扇形板上，扇形板装在刀架上，和待刻毛坯的乳剂表面相隔很小的距离，闪光过程中扇形板上的刻线便复印到乳剂表面上。

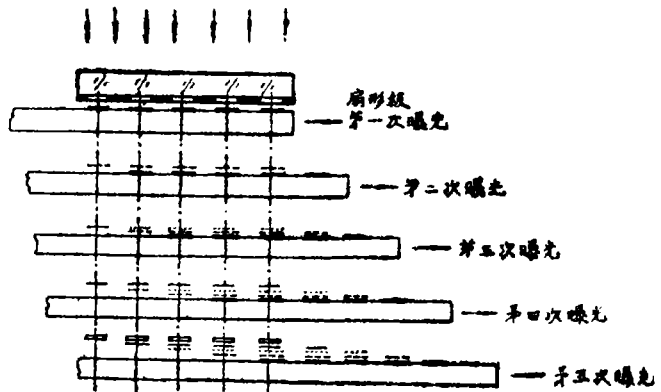


图13 连续刻划线条形成过程

连续运动刻划过程中，线条是多次重复形成的。例如，刻一块32768

线的光栅盘扇形上，共有32条线，灯每闪光一次，在乳剂面上就得到32条线，在连续运动过程中，最后得到的每一条线又是重叠32次形成的。为了说明这个过程，图13表示一个5条缝的扇形板在逐次闪光过程中线条形成及重叠情况。

连续刻划时，线条多次重迭而成，所以偶然误差，扇形本身的误差以及扇形的接头误差得到了很好的平均，误差曲线比较平滑，并且，刀架上没有任何机械的刻划动作，不需要伺服马达校正机构等，减少了许多产生误差的环节和因素。实践证明，连续运动刻划的精度是较高的，此外，连续刻划时，一般的机械往复动作及抬落刀动作均不存在，因而刻划速度可以大大提高。在本机器上，最高刻划速度为每秒钟30条线，刻制一块三万多条线的光栅盘，每转只需18分钟。

值得注意的是：光栅盘连续刻划时，所刻出的线条数决定于扇形板的密度，而不决定于闪光次数。例如：同样一块32768线数的光栅盘，可以曝光32768条线，但也可形成65536甚至131072条线。

本机器采用小距离投影光刻法，其优点是：一方面省去了较难制造的高质量微缩镜头，另一方面，闪光灯的能源可以得到较充分的利用。

## 五、实际效果

长春光机所的这台 0.2 秒圆刻机投入使用已经八年，现将主要情况介绍如下：

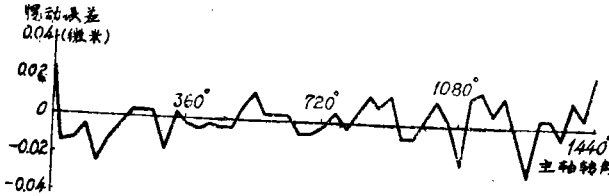


图14 主轴摆动误差曲线

误差均小于0.07微米，典型实例如图14所示。

轴系单周晃动<sup>[21][27]</sup>通过控制主轴不圆度来限制，这台机器主轴的不圆度经用光波干涉仪测量及电子计算机计算<sup>[25]</sup>，如图15所示。

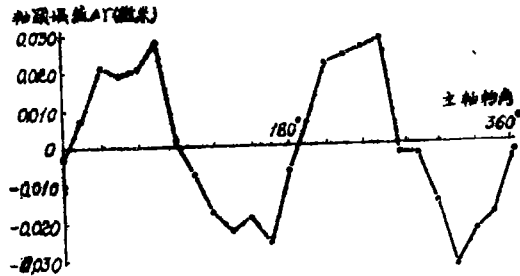


图15 主轴不圆度误差曲线

### 2. 刻划误差

这台机器先后共刻过两类不同进制的盘子，即六十进制和二进制，典型误差曲线见文献<sup>[1]</sup>，检验方法见文献<sup>[40]</sup>及朱应时等同志的六进制检验仪总结报告。

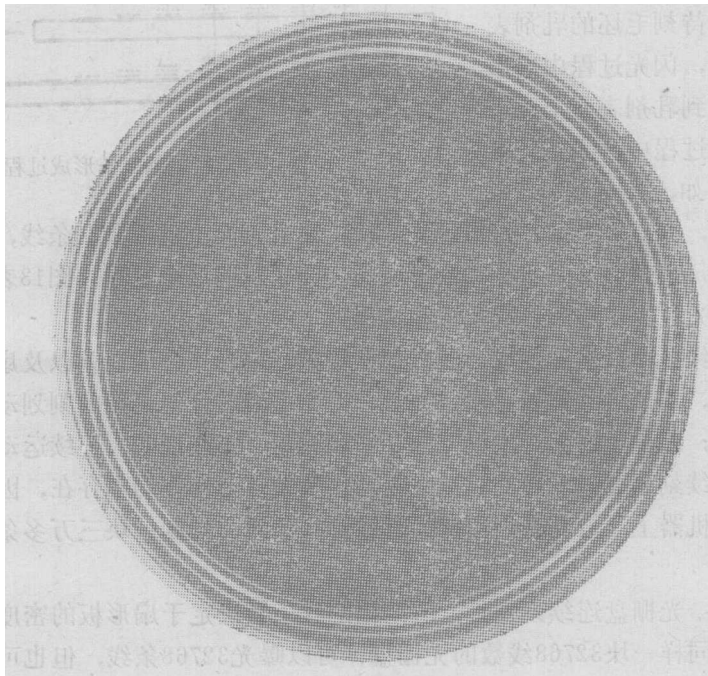


图16 一对光栅盘形成的莫尔条纹。

### 3. 误差特性

由于光电平均作用, 这台机器刻出的光栅误差曲线十分平滑, 将其中两块叠放在一起形成的莫尔条纹十分良好, 为一理想的圆形, 中、短周期误差均已觉察不出 (65536 条线, 刻线切于一小圆)。(图16)。

### 参 考 文 献

- [1] 邹自强, 史淑华等; 高精度大光栅盘的研制, 光学机械, 本期。
- [2] W.Krug; Z.VDI 1938, Vol 82, No 27, S 797
- [3] С.В.Елисеев; Геодезическое Инструментоведение, Г'содсиздаг, 1952.
- [4] 扬宽; 中国历代史度考, 商务印书馆, 1938.
- [5] 吴承洛; 中国度量衡史, 商务印书馆, 1957重印本。
- [6] 钦定仪象考成, 仪说篇, 清朝乾隆版本。
- [7] 元成甫; 易图亲见, 古版本。
- [8] 天文图册, 北京天文馆资料, 1958.
- [9] H.Jochmann; Techn.Hochsch.Dresden, 1955/56, HS, S 843; 1956/57, H, S 57.
- [10] E.M.Jones; Proceedings of the National Electronic Conference, 1955, 288.
- [11] E.M.Jones; Control Engineering 1956, 4, 107.
- [12] Production Engineering 1956, 4, 156.
- [13] E.M.Jones; Electronics 1956, 6, 146.
- [14] C.F.Winder; Electronic Industry, 1963, 6, F 2.
- [15] A,K.Susskind; Notes on Analog—Digital Conversion Techniques, 1957, N.Y.
- [16] E.Bovey; J.S.I.1962, 8, 405.
- [17] J.M.Burch; Research, 1960, 1, 2—7.
- [18] A.H.Mcilraith, A.B.Penfold; J.S.I.1966.7.
- [19] G.Bouwhuis; Optical Instruments and Techniques, 1969, p 230—237. Philips.
- [20] J.J.J.Kernahan; Bell Laboratories Record, 1954, 4, 126.
- [21] 邹自强; 测绘学报, 1963, 1, 44.
- [22] 邹自强, 朱应时; 光电传感器及其应用, 全国精密机械测试会议资料, 1965.
- [23] 方益林; 机床, 1977, 3, 10.
- [24] R.D.Geiser; Photographic Engineering 1953, 1.
- [25] 邹自强; 机械工业标准化, 1979, 3, 19.
- [26] 邹自强; 国外机械, 1963, 5.
- [27] 邹自强; 计量学报, 1982, 3.
- [28] 邹自强; 论圆光栅多头读数系统, 光学机械, 本期。
- [29] Ф.Л.Буристров; Ж.Т.Ф.1938, 6, 431, 930.
- [30] L.A.Sayce; Feinwerk Technik 1961, 9.
- [31] G.Bouwhuis; Optical Instruments and Techniques, 1969, Philips.
- [32] J.M.Burch; Brussels colloquium on Optics in Metrology, 1958.
- [33] J.M.Burch, D.A.Palmer; Optical Acta 1961, 1, 73.
- [34] Ф.Н.Красовский; Руководство по высшей геодезии, НКГД, 1938.
- [35] Ф.Л.Буристров; Делительное Дело, Машгиз.1948.
- [36] D.F.Horne; Dividing, Ruling and Mask—making, 1974, Adam Hilger.
- [37] W.R.Moore; Foundations of mechanical Accuracy, moore press, 1970.
- [38] J.Guild; The Interference Systems of Crossed Diffraction Gratings, oxford press, 1956.
- [39] J.Guild; Diffraction Gratings as Measuring scales, Oxford press, 1960.
- [40] 邹自强, 朱应时等; Symposium of International Conference on Metrology NELEX 82, 1982, Glasgow.
- [41] А.А.Рапошик; Стачки и Инструменты, 1973, 5, стр3—5.