

编号：0121

内部

# 科学技术成果报告

高精度丝杠磨床激光自动校正装置

科学技术文献出版社

**科学技术成果报告**

高精度丝杠磨床激光自动校正装置

(内部发行)

编辑者：中国科学技术情报研究所

出版者：科学技术文献出版社

印刷者：中国科学技术情报研究所印刷厂

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

开本 $787 \times 1092 \cdot \frac{1}{16}$  2印张 54千字

统一书号：15176·349 定价：0.25元

1979年2月出版 印数：9800册



# 目 录

绪言.....	( 1 )
一、装置的工作原理及结构.....	( 2 )
(一) 测量系统.....	( 3 )
(二) 自动校正系统.....	( 9 )
二、研制中解决的主要问题.....	(12)
(一) 方案选择.....	(12)
(二) 原理试验.....	(13)
(三) 振动问题.....	(15)
(四) 自动校正的时间常数和残存误差.....	(17)
(五) 温度、气压修正及温度控制.....	(23)
三、精度.....	(25)
(一) 精度分析.....	(25)
(二) 精度试验.....	(29)
结束语.....	(31)

# 高精度丝杠磨床激光自动校正装置

北京机床研究所、北京机床配件厂

## 绪 言

高精度丝杠磨床激光自动校正装置课题，是北京机床配件厂和北京机床研究所协作的探索性课题。这个课题的主要任务，是把在计量领域里已经使用的激光这门新技术，在恒温加工车间条件下，直接应用在精密加工机床上，重点解决丝杠磨床的周期误差自动校正问题。这个课题是北京机床研究所等单位研制的激光丝杠动态测量仪的继续和发展，是把只是丝杠被动测量手段，发展到对机床误差的主动控制，这样就可以在加工过程中，缩小机床传动链误差，为国内精密丝杠加工精度的进一步提高，开辟一个新的途径。

众所皆知，采用校正尺来提高精密丝杠磨床精度，由于结构简单，以及校正机床累积误差卓有成效，已成为丝杠磨床和精密丝杠车床不可缺少的组成部分。但这种校正方法的缺点是不能解决周期误差的校正问题，而机床的周期误差，越来越成为丝杠加工的矛盾之一。

本课题企图解决这个矛盾，用先进的激光技术和圆光栅组成机床磨削时的临床测量系统，把机床误差动态测量的信号，反馈到由步进电机等组成的校正执行机构，对机床误差进行“随时”的自动校正，在丝杠加工过程中，使机床误差保持在很小范围内，以达到积极控制提高精密丝杠磨床精度的目的。

在六十年代，为了提高精密机床的加工精度，人们提出了以精度为核心的技术途径——“母机论”，即制造高精度的母机来加工精密零件，如丝杠母机、蜗轮母机等。但这种纯机械的手段，越来越满足不了零件高精度加工的要求。随着测试技术的发展，及激光、光栅、感应同步器、磁尺等新技术的应用，特别是电子技术和数控机床的发展，进而应用了闭环的反馈原理和自动校正技术，使精密机床精度来一个大“突破”，使机床传动链精度，提高一个数量级。这样反馈的理论，以更先进的技术，充实、丰富、提高了“母机论”的内容。毫无疑问，“反馈论”在精密机械制造业中，将有引人注目前途。

国外，美国的格里森公司，在一台改装的螺纹磨床上，加上了激光自动校正装置，据称零件的加工精度提高了10倍。英国在一台五米丝杠磨床上，安装了激光自动校正装置，并立为专利。西德、日本也在研究这方面的技术。

我们经过三年多的努力，终于在SG7430型丝杠磨床上，安装了激光自动校正系统，经过一年多对200根次丝杠试磨，系统基本稳定可靠，把机床传动链误差，由原来的周期误差为3微米，累积误差为30~40微米，均提高到1微米以内，可以稳定磨出零级精度丝杠，并于1977年10月，由一机部及全国有关研究院、所和有关工厂进行了鉴定，鉴定小组主要意见为：这种自动校正系统“结构简单，温度补偿控制可靠，对周期误差及螺距累积误差的校正效果良好，在磨削过程中，校正系统工作基本稳定，达到了预定的技术指标，控制基本是成功的。在技术上具有我国自己的特点。”鉴定小组对系统不足之处，还提出了改进意见，如加自动保护系统，加工件的临床测量装置，及进一步提高精度，磨出超零级丝杠等。

这台机床的研制工作，对于精密丝杠加工，对某些精密机床精度的提高，将有重要的意义。对激光技术在机床上的应用，也积累了一些经验。这篇研制报告，简要地介绍了系统的工作原理，研制中解决的问题，以及精度等。因试验尚不十分充分，有不妥之处，请指正。

## 一、装置的工作原理及结构

高精度丝杠磨床激光自动校正装置，是在丝杠磨床上，增加了激光自动校正装置。它由测量系统和自动校正系统两部份组成。该装置的外观图和示意图如图 1、图 2 所示。

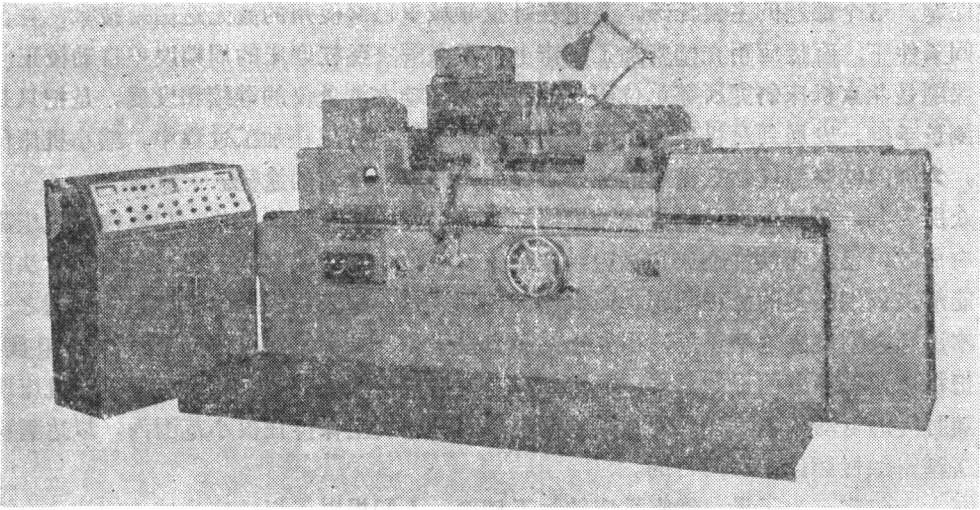


图 1 高精度丝杠磨床激光自动校正装置外观图

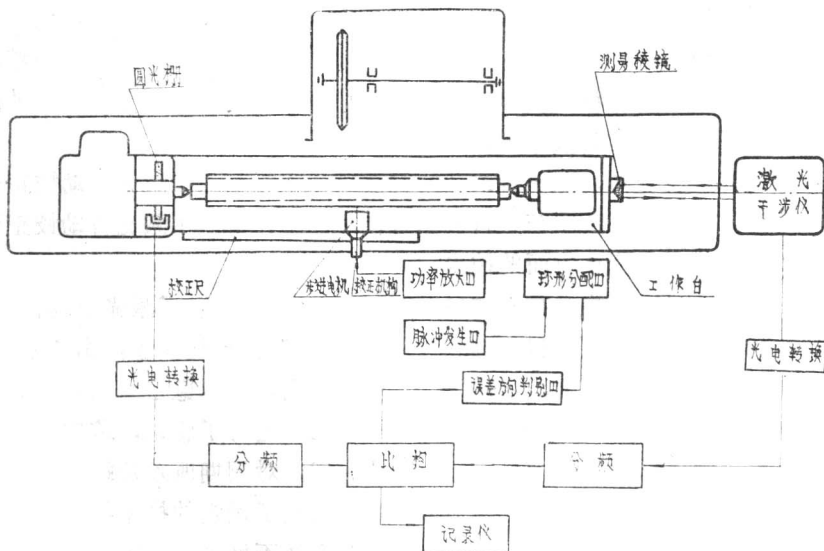


图 2 机床误差测量与校正示意图

机床是SG7430型丝杠磨床，在主轴箱里装了圆光栅，作为角度基准，在床身后面装了激光干涉仪，作为长度基准，组成了机床临床测量系统。圆光栅的莫尔条纹，通过光电转换和电气分频，输入给相位计；同时工作台位移，使激光干涉仪产生干涉条纹，通过光电转换及电气分频输入给相位计，这样机床回转信号与工作台位移信号在相位计里比相，测量出相位误差，也就是机床传动链误差。用记录仪记出误差曲线。比相的结果，经过误差方向判别器，判别机床误差是正误差还是负误差，来决定校正机构的步进电机旋转方向，通过杠杆臂转动机床螺母，使工作台产生补偿位移，达到自动校正目的。脉冲发生器是步进电机的脉冲源，它的振荡频率，决定了校正速度。环形分配器和功率放大器是步进电机本身所需要的。下面按测量和校正两部份，分别介绍如下：

## (一) 测 量 系 统

### 1. 测量原理

对机床误差进行测量，要有测量基准和比较仪。我们用圆光栅做旋转角度基准，用氦氖激光波长做长度基准，组成一个“理论螺旋基准”。用相位计做比较仪，来测量主轴转角与工作台位移的关系，如果机床传动链没有误差，则激光信号相对于圆光栅信号，没有相位的变化，记录仪记出一条直线，如果机床有误差，就附加一个光程差，致使激光信号相对于光栅信号超前或者滞后，即激光信号“相位”有了变化，经过滤波，记录仪就记出机床误差曲线。

图3是两路信号比相示意图。相位测量原理，表面看来是连续的，实际是间隔的，是一对一对脉冲进行比相。在图3中，光栅信号是均匀的标准信号，激光信号由于机床有误差，而不均匀。在第一对脉冲里，激光脉冲本应在虚线位置出现，因机床有 $+\Delta S$ 螺距误差，致使滞后 $\Delta\varphi$ ，同样在第三对脉冲里，激光脉冲超前 $\Delta\varphi$ ，这 $\Delta\varphi$ 就是相位变化的机床误差。相位计

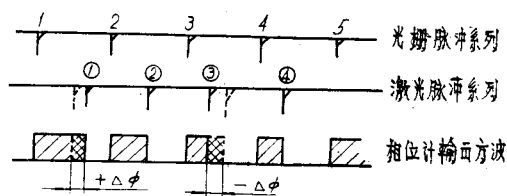


图3 比相示意图

实际就是双边输入的触发器，光栅脉冲输入使相位计的一边输出，由低电位变成高电位，激光脉冲输入，又使高电位变成低电位，因此激光信号迟来或早来，就造成相位计输出方波宽窄的变化，经过解调，即取出方波宽窄的平均电位，就表示此比相点的机床误差。所以“比相”必须有两个条件：一是有两个脉冲信号，二是这两路信号频率必须相等，一个信号相对于另一个信号在一赫芝之内的频率变化，就是相位变化。为了保证不同种类、不同螺距丝杠磨削时，两路信号频率相等，两路接收的信号分别除以不同的分频系数。激光信号经过B分频以后，则分频后的波长为 $B \cdot \frac{\lambda}{2}$ ， $\lambda$ 为激光波长， $B \cdot \frac{\lambda}{2}$ 就是相位角为 $360^\circ$ 所对应的位移量，所以机床的螺距误差 $\Delta S$ ，和相位误差 $\Delta\varphi$ ，就建立下列的函数关系式。

$$\Delta S = \frac{B \cdot \frac{\lambda}{2}}{360} \cdot \Delta\varphi$$

## 2. 角度基准及装置

在机床主轴箱里, 装有 $\phi 200\text{mm}$ 的圆光栅, 通过拨盘, 和被磨工件一起旋转。圆光栅有两圈刻线, 外圈刻线条纹数为13906, 用于磨削公、英制丝杠, 内圈条纹数为11060, 用于磨削模数丝杠。两圈刻线之间, 刻有基准圆, 用作光栅安装找正基准。光栅装置示意图如图4所示。

## 3. 长度基准及装置

长度基准是采用氦氖激光波长。在机床床身尾端装一干涉仪, 在工作台侧面装一支架, 上有测量稜镜, 由此组成工作台位移测量装置。示意图如图5。由He—Ne激光管①发出激光光波, 经反射镜②平行光管③以直径 $\phi 4\text{mm}$ 的平行光束, 经过反射镜④, 射向分光镜⑤。分光镜将入射光束分为两路, 一路射向参考稜镜⑥, 另一路经过五角稜镜⑦射向测量稜镜⑧。

在磨削螺纹时由于工作台移动, 两路光程差不断变化。当工作台每移动 $\frac{\lambda}{2}$ , 明暗条纹变化一次。一路由光电头⑩接收, 另一路经反射镜⑨由光电头⑪接收, 进入相位计。从激光管的压电陶瓷端输出激光经反射镜⑫由稳频前置放大器⑬接收后进入稳频器。

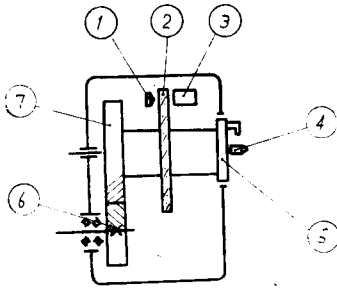


图4 光栅安装示意图

1. 光电接收头。
2. 圆光栅。
3. 指示光栅头。
4. 顶针。
5. 拨盘。
6. 小斜齿轮。
7. 大斜齿轮。

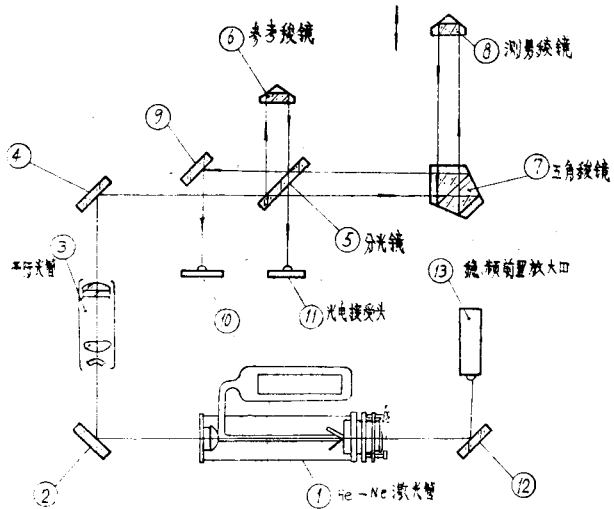


图5 干涉仪光路图

## 4. 关于小数有理化问题

氦氖激光波长, 在标准状态下,  $\lambda = 0.63281983 \dots$

则每毫米的条纹数为 $N$ ,  $N = 3160.45746$ 条/毫米。 $N$ 是个无理数, 通常用近似计算的补减脉冲的方法, 来解决所谓“小数有理化”问题。我们是用特殊的圆光栅条纹数来解决这个问题, 使电气线路大大简化。如测量原理所说, 比相必要的条件之一, 两路信号频率必须相等。即有下列关系式

$$\frac{M}{A} = \frac{S \cdot N}{B} \quad (1)$$

式中 $M$ 为光栅条纹数,  $A$ 为光栅信号分频系数,  $B$ 为激光信号分频系数,  $S$ 为被磨丝杠螺



距,  $A$ 、 $B$ 都应是自然整数。由于公英制丝杠, 用同一圈光栅使  $S = \frac{b}{a}$ ,  $a$ 、 $b$ 也为整数。现在

我们用上述等式, 寻找一个  $M$  条纹数, 对于不同螺距丝杠, 改变  $A$ 、 $B$  的分频系数, 满足  $\frac{M}{A}$

$= \frac{S \cdot N}{B}$  的关系, 即可解决小数有理化问题。现用  $N_1 = \frac{69530}{22} = 3160.4545$  来代替  $N$  的数值。

即把  $N$  的无理数, 用一个近似的分数来代替它。

$$\text{则 } \frac{B}{A} \cdot M = \frac{b}{a} N_1; \quad N_1 = \frac{69530}{22}, \quad \text{令 } M = 2 \times 6953$$

$$\frac{B}{A} = \frac{b}{a} \cdot \frac{5}{22} \tag{2}$$

从②式可以看出, 当  $M = 2 \times 6953 = 13906$  条刻线时, 两路信号分频系数之比, 与螺距  $S = \frac{b}{a}$ , 只有一个简单的常数关系。根据不同丝杠螺距, 就可选择相应的分频系数, 满足比前两路信号频率相等的要求。这就是我们选择  $M = 13906$  的根据。例如  $S = 6 \text{ mm}$ , 取  $B = 150$ ,  $A = 110$ 。

$$S = \left( \frac{1}{6} \right)'' = \frac{1}{6} \times 25.4 \text{ mm} = \frac{127}{6 \times 5}$$

即  $S = \frac{b}{a} = \frac{127}{30}$ , 取  $B = 127$ ,  $A = 132$ 。

同理, 对于模数丝杠来说, 每  $\pi$  激光条纹为  $N_1$ ,

$$N_1 = \pi \times 3160.4545 = 9928.86701 \text{ 条}/\pi \text{ 毫米},$$

$$\text{每毫米条纹数 } N = \frac{1}{\pi} \times 9928.86701 \text{ 条}/\text{毫米}$$

$$\text{以分数 } N_2 = \frac{35 \times 79^2}{22} = 9928.86363 \text{ 代替 } N_1$$

$$\text{则公式①可以写成 } \frac{B}{A} \cdot M = \frac{b}{a \cdot \pi} N_2 = \frac{b}{a} \cdot \frac{35 \times 79^2}{22}$$

$$\text{令 } M = 35 \times 4 \times 79, \text{ 则有 } \frac{B}{A} = \frac{b}{a} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{79}{88} \tag{3}$$

即光栅条纹  $M = 35 \times 4 \times 79 = 11060$  时, 两条信号分频系数之比, 与  $\pi$  螺距, 只有一个简单的常数关系。例如  $S = \frac{1}{2} \cdot \pi$  时, 取  $B = 158$ ,  $A = 352$ 。

当然  $M$  的选择, 除满足两路信号频率相等的原则, 使  $A$ 、 $B$  为合适的整数的条件外, 还要考虑光栅盘的刻制工艺, 比相频率, 以及一个波长代表的  $\mu$  值范围等等因素。以分数来代替无理小数, 一定要精确到小数点后的第七位数。

### 5. 测量电气系统

图 6 为电气测量逻辑图。实际使用激光一路信号没有方向辨别和可逆计数。电测系统的核心是相位计, 两路信号经过放大整形和分频, 使其频率相等, 进行比相, 相位误差经过误差分选, 记录成误差曲线。为了表示出曲线幅度的大小, 就要定标。为了使测量有合适的初相位置, 就要有初相选择。为了温度、气压修正, 就要有累积补偿。下面分析几个线路单元。



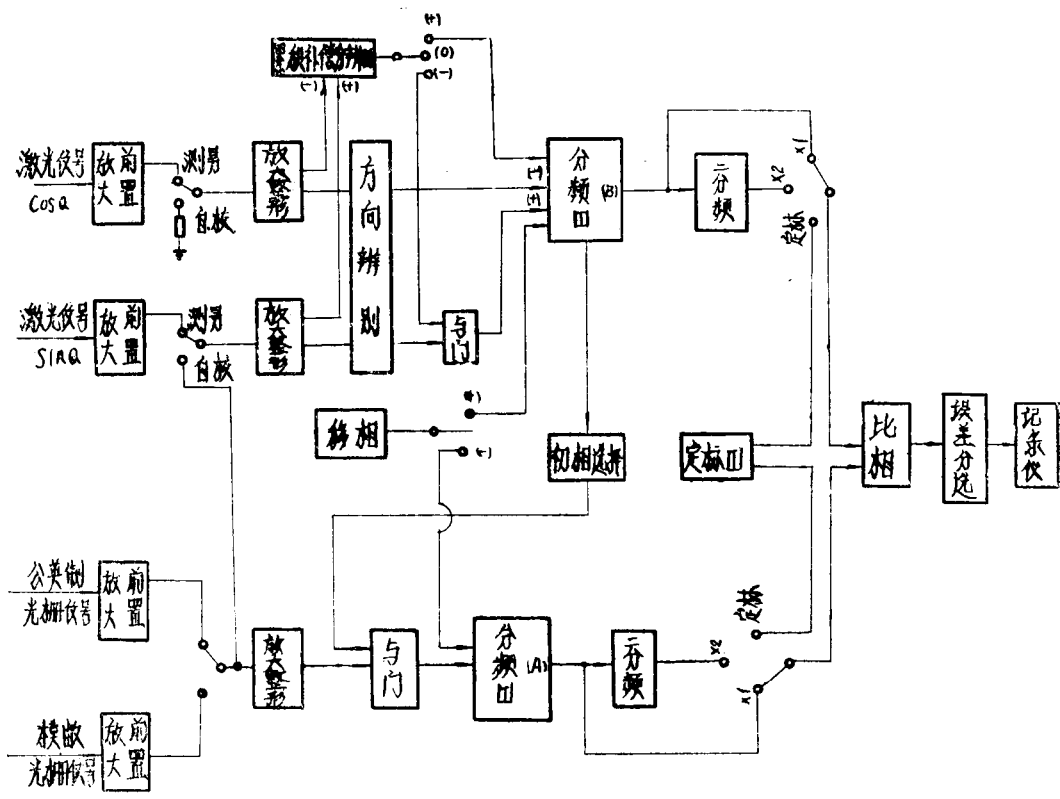


图6 测量部分电气逻辑图

(1) 无级分频器：两路分频的作用，是保证磨不同螺距丝杠时，其两路信号频率相等。图7是分频器的逻辑图，它是由三位“十进计数器”和与门、倒相、延时等电路组成，根据丝杠种类和螺距，“波段开关”预先选好两路分频系数。当三位十进计数器，达到要求的分频数时，与门打开，输出一个脉冲，同时使计数器复“0”，再接着下一个计数分频。

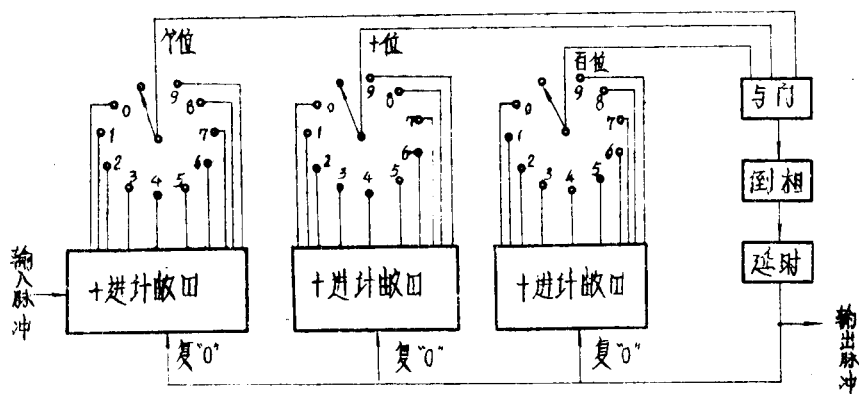


图7 分频器逻辑图

(2) 初相选择电路：初相选择的作用，在测量机床传动链误差时，根据机床误差大小和方向，使相位计在合适的初始位置，免使机床误差，超过相位计量程。在自动校正机床误差时，要使相位计指针在“0”位上。图8为初相选择逻辑图。

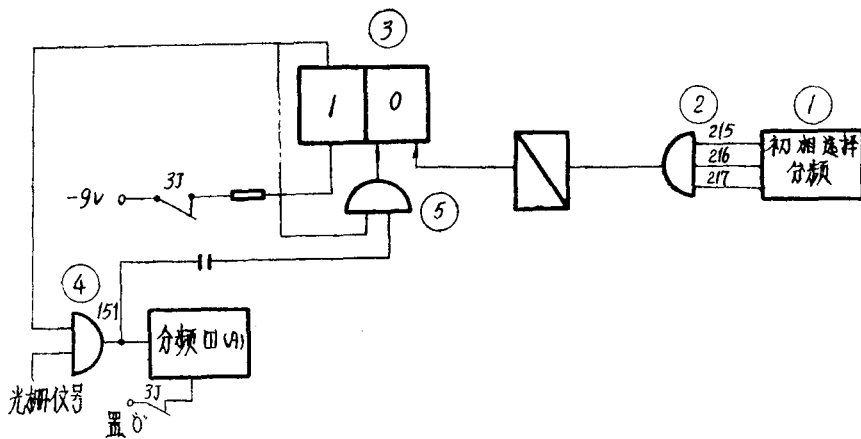


图8 初相选择逻辑图

根据选定的初相，经初相波段开关①，激光一路先计数到相应初相的脉冲数 $M$ ，打开与门②，经反相器输入给触发器③，打开光栅输入信号与门（先已置0），这时光栅一路才计数分频。这样两路信号相差 $M$ 个数。则有初相角 $\varphi_0 = \frac{m}{B} \times 360^\circ$   $B$ 为激光分频系数，例如磨英制丝杠，量程选 $\times 2$ 挡，初相波段选9， $m=126$ ， $\varphi_0 = \frac{126}{2 \times 127} \times 360 \approx 180^\circ$ 。光栅信号同时给与门⑤，保证初相选择时间里，触发器状态不变。当开关使常闭触头打开，切断初相选择，接通相位计，开始机床误差的正常测量。

(3) 累积补偿电路：由于激光波长受大气温度和气压的影响以及工件热伸长和小数有理化的误差，需要对丝杠累积误差进行补偿、修正。其修正基本原理，是按照工作台行程，按比例增进或扣除激光脉冲。其一米修正量为 $\Delta S$ 。

每米激光脉冲数为 $\frac{1 \times 10^6}{\lambda/2}$ ，令修正的分频系数为 $F$ ，在每米增减的脉冲数为 $\frac{1 \times 10^6}{\lambda/2 \cdot F}$ ，则

$$\Delta S = \frac{1 \times 10^6}{\lambda/2 \cdot F} \cdot \frac{\lambda}{2}, \Delta S = \frac{1 \times 10^6}{F} (\mu). \text{ 这样我们就可以根据 } \Delta S, \text{ 选择 } F, \text{ 进行修正, } \Delta S \text{ 可以根据量得的空气温度, 气压, 及工件温度查表而得, 也可以根据上一根丝杠计量结果而得.}$$

例如 $\Delta S = +6.4 \mu$ ， $F = \frac{1 \times 10^6}{6.4} = 156 \times 10^3$ 。 $F$ 就是由7位十进计数器组成的计数分频器，前面四位可以任意拨码。图9为累积补偿逻辑图。

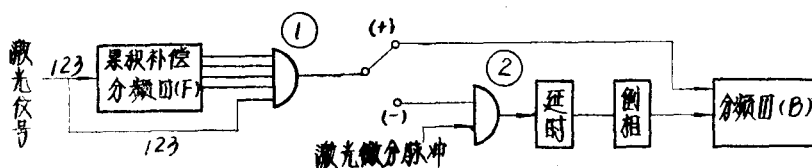


图9 累积补偿逻辑图

激光信号经分频器F，加入或减去脉冲到分频器B中，当 $\Delta S$ 为正时，则要减去激光脉冲，这时与门①就去堵住一个激光脉冲。123的输入线，是保证当其他四个输入端到指定的数，正好堵住一个激光脉冲。当 $\Delta S$ 为负时，通过或门，给分频器B输入按长度比例加一个脉冲。

(4) 滤波器：滤波器的作用，是滤掉比相频率，保存校正残存误差频率或机床误差的频率，它基本上是个积分线路。比相频率 $f_{\phi} = \frac{M}{A} \cdot \frac{n}{60}$ ， $n$ 为机床主轴转速（转/分）

自动校正残存误差频率 $f_x$ ，从下面二(四)的分析中可知，它是比相频率的一半，即 $f_x = \frac{1}{2} f_{\phi}$ 。

机床误差频率 $f_d$ ，通常指机床周期误差频率，取误差基波的三次谐波，误差基波 $f_0 = \frac{n}{60}$ 。 $n$ 为主轴转速（转/分） $f_d = 3f_0$

$$\text{最低比相频率 } f_{\phi} = \frac{M}{2A} \cdot n = \frac{6 \times 13906}{60 \times 2 \times 150} = 4.6 \text{ 赫芝}$$

最低校正频率 $f_x = 2.3$ 赫芝

最高误差频率 $f_d = 3 \times \frac{15}{60} = 0.75$ 赫芝

理想的滤波频率特性如图10所示。

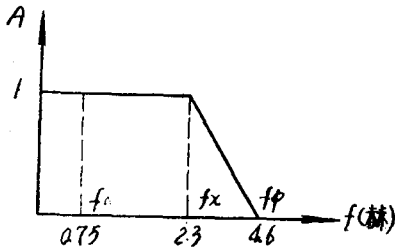


图10 理想的滤波频率特性图

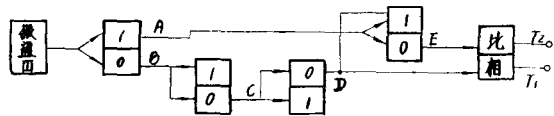


图11 45°定标逻辑图

(5) 定标：定标的作用，就是把机床误差测得的曲线，或自动校正的残存误差曲线，标定出 $\mu$ 值大小。为此把已知的相位角如45°，记出曲线高度，即算出定标值（ $\mu$ /格）。仪器有180°，90°，45°定标，常用45°定标。图11为45°定标逻辑图，图12为45°定标波形图。

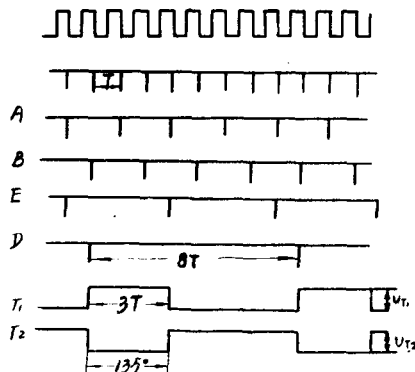


图12 45°定标波形图

由于 $T_1$ ,  $T_2$ 输出给两个滤波器, 在 $180^\circ$ 相位,  $T_1T_2$ 波形都对称, 此时相位计指针在中间“零”位置,  $45^\circ$ 定标, 标准相位角为 $180^\circ \pm 45^\circ$ , 是 $135^\circ$ 或 $225^\circ$ 。

为了确保定标 $45^\circ$ 时, 标准相位角是 $135^\circ$ , 在图11中, D点对E点输入一个箝位脉冲, E点起始电位可能是高电位, 此时标准相位角就是 $225^\circ$ 了。定标角度,  $\varphi = 180^\circ + \frac{U_{T_1} - U_{T_2}}{2V}$ 。  
 $360^\circ = 180^\circ - 45^\circ = 135^\circ$ 定标时按动定标按钮, 同时走纸, 即可记出 $180^\circ$ 和 $135^\circ$ 的曲线高度A算出记录纸每格代表的 $\mu$ 值。例如磨削英制, 一个波长代表的 $\mu$ 值 $B \cdot \frac{\lambda}{2}$ ,  $B \cdot \frac{\lambda}{2} = 127 \times 0.3164 \mu = 40 \mu$ , 即 $360^\circ$ 相位角占据 $40 \mu$ 位移量。 $45^\circ$ 即 $5 \mu$ , 记出 $A = 20$ 格, 则定标  $C = 5 \mu / A = 0.4 \mu / \text{格}$ 。

## (二) 自动校正系统

### 1. 自动校正原理

自动校正原理和原机床校正原理差不多, 机床的测量系统把磨削中的机床误差, 随时指令自动校正机构, 转动螺母, 给工作台微量补偿, 使机床误差自动调整到“零”, 这种校正

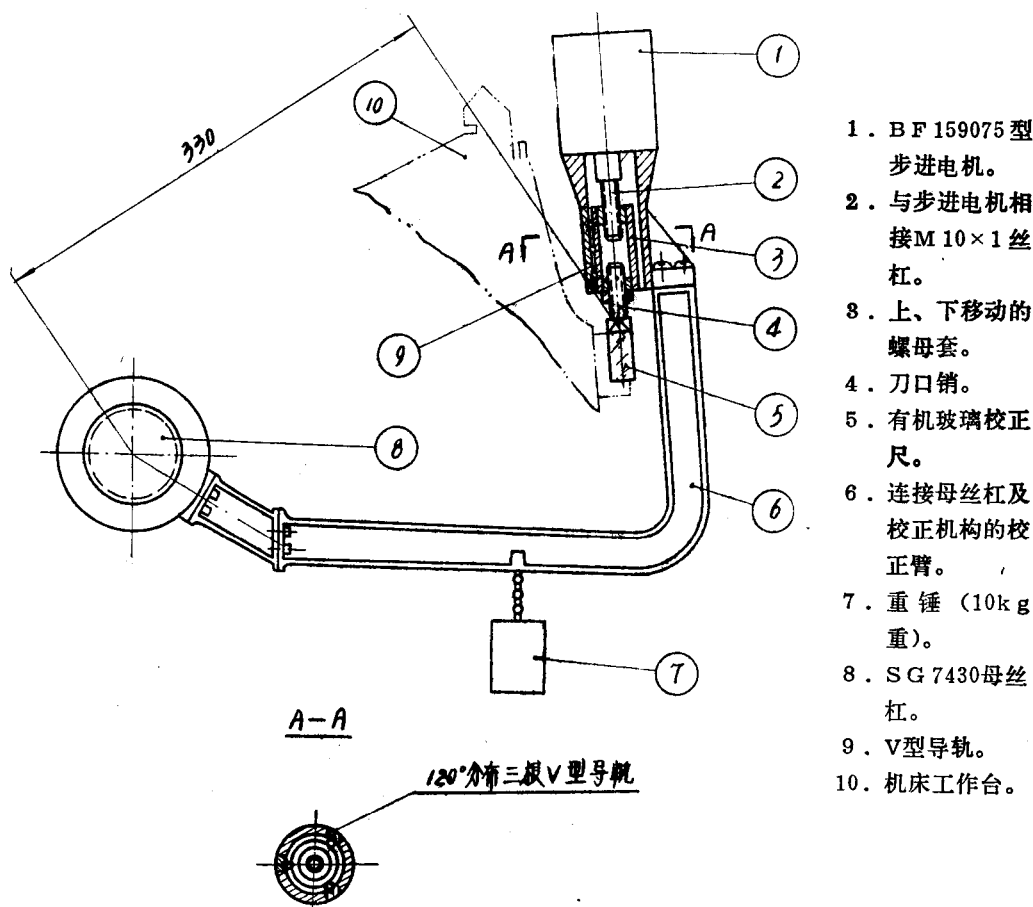


图13 自动校正机械结构示意图

原理的特点是：连续性、封闭性以及自动拉“零”。它是一个随机的自动反馈系统。和一般校正装置的显著差异，是有一个不断旋转的步进电机，步进电机的旋转，通过小螺杆和螺母，变成上下的行程位移，来代替原校正尺的高低不平。由于它是不断的随机校正，就可以很方便的校正机床周期误差和累积误差。从测量原理可知，机床误差的大小变成相位计输出方波宽窄变化，用一个标准方波和与门，能很快判别机床误差是“正”还是“负”，这就决定步进电机旋转方向。步进电机的进给时钟脉冲，是由一个谐波振荡器供给的。它的振荡频率就决定校正的速度。总之步进电机动作，给工作台的附加位移，使相位计方波输出的宽窄，始终接近“标准方波”，也就是使机床误差始终接近“零”。这时记出的误差曲线，基本上是一条直线。

## 2. 自动校正的机械结构

图13为自动校正的机械结构图。

机床误差的正负控制步进电机“反”或“正”的旋转，通过小螺杆2和螺母套3，使杠杆臂6摆动，和杠杆臂固定在一起的丝杠螺母就有微量转动，通过机床母丝杠8，使工作台有一个附加位移。

## 3. 自动校正的电气系统

图14为自动校正电气逻辑图。谐波振荡器是步进电机环形分配器的时钟脉冲源。误差方向判别器，是根据相位计输出方波的宽窄，来决定步进电机旋转方向，也就是决定校正量的

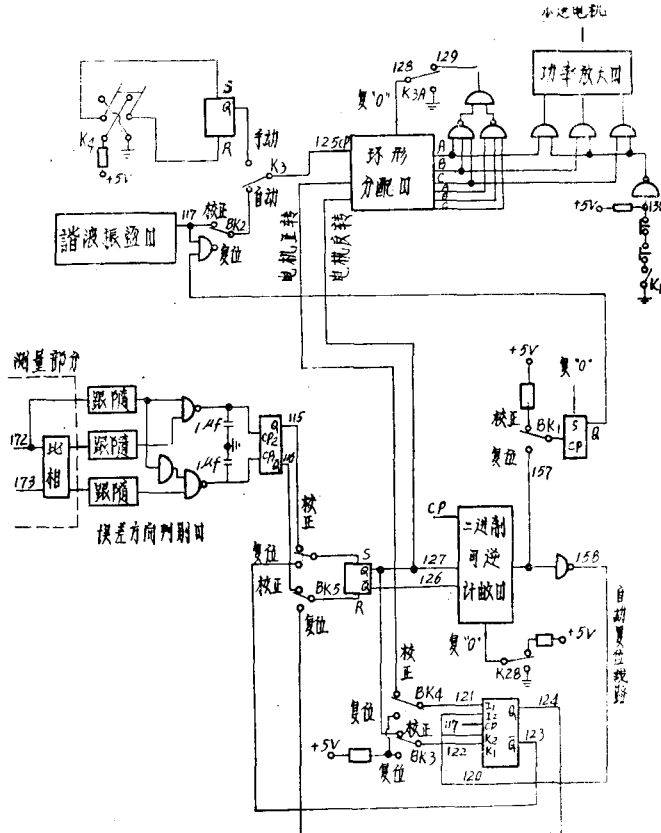


图14 自动校正电气逻辑图

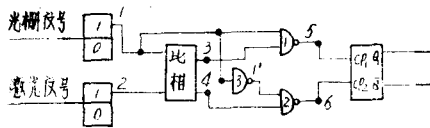


图15 误差方向判别器逻辑图

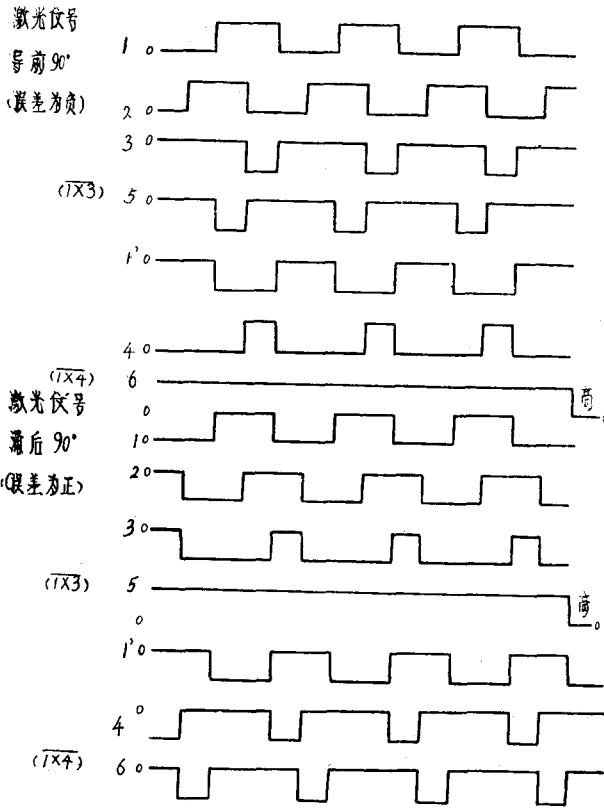


图16 误差方向判别器的波形图

正负。自动复位电路，是在机床校正完以后，恢复步进电机行程到原始位置，它是 $2^{12}$ 二进制可逆计数器。手动脉冲进给是为了检查环形分配器的逻辑关系，平时不用。环形分配器和功率放大器是步进电机所需要的，也是一般成熟线路，分配方式是三相六拍。环形分配器旁的三个与门是分配器自动复零。当环形分配器工作不正常时，自动复一次零，又接着工作。现着重介绍一下误差方向判别器和自动复位电路。

(1) 误差方向判别器：误差方向判别器是判别机床误差的正负，从而确定步进电机旋转方向，它是自动校正电路的关键部分。图15为误差方向判别器的逻辑图。两路信号分频一次，进入相位计比相，这是测量部分。误差方向判别器，实际只有三个与非门和一个双边输入JK触发器组成。与非门1的一个输入端，是光栅信号经过一次分频的“标准方波”，另一端是随机床误差变化的狭窄变化方波。与非门2也是如此。因相位计两边输入相位差 $180^\circ$ ，所以光栅信号的“标准方波”，也经过与非门3倒相一次。当机床误差为“正”时，激光信号

滞后光栅信号，相位计输出方波，3点变宽，4点变窄，和“标准方波”与的结果，与非门1的输出点5是脉冲信号，与非门2的输出点6是高电位。这样进入双边输入触发器的CP<sub>1</sub>和CP<sub>2</sub>，使Q为高电位， $\bar{Q}$ 为低电位控制步进电机正转，进行工作台位移的“负校正”，当机床误差为“负”时，则相反，进行工作台位移的“正校正”。图16是各点的波形图。

(2) 步进电机自动复位电路：步进电机复位，是在丝杠磨完以后，回到原来的起始位置，不致于下一次磨削时行程不够，另外电机复位后，工作台返回原来起磨位置，也不会由于电机不在原始位置而有附加位移，使“对刀”也方便。

自动复位电路是12位二进制可逆计数器。即把进入步进电机的脉冲数记录下来，并记下停机后，最后一次过“零”时的电机旋转方向。然后扭动“复位”开关，通过触发器，使电机旋转方向倒过，进行“放数”，直放到计数器为“零”，发出低电位，堵死步进电机脉冲源，电机就停在校正时的起磨位置上。自动校正行程为 $\pm 10\text{mm}$ ，校正机床误差 $\pm 30\mu$ ，电机走240步，校正 $3\mu$ ，二进制计数器的容量为 $2^{12}=4096$ ，可校 $51.2\mu$ （因机床累积误差随温度在变化，起点不一定在行程中间位置）。图17为自动复位逻辑图。这里值得指出的是，机

床磨完停机后，步进电机停机前的状态（正转或反转）和步数不是计数器对 0 数的数目和方向。假如第一个比相点电机走 + 8 步，第二比相点反转 6 步，即  $+ 8 - 6 = + 2$  在这时停机，电机是反转，计数器却是 + 2，即还要继续反转二个数，才能复位。为此就要有复位方向鉴别。

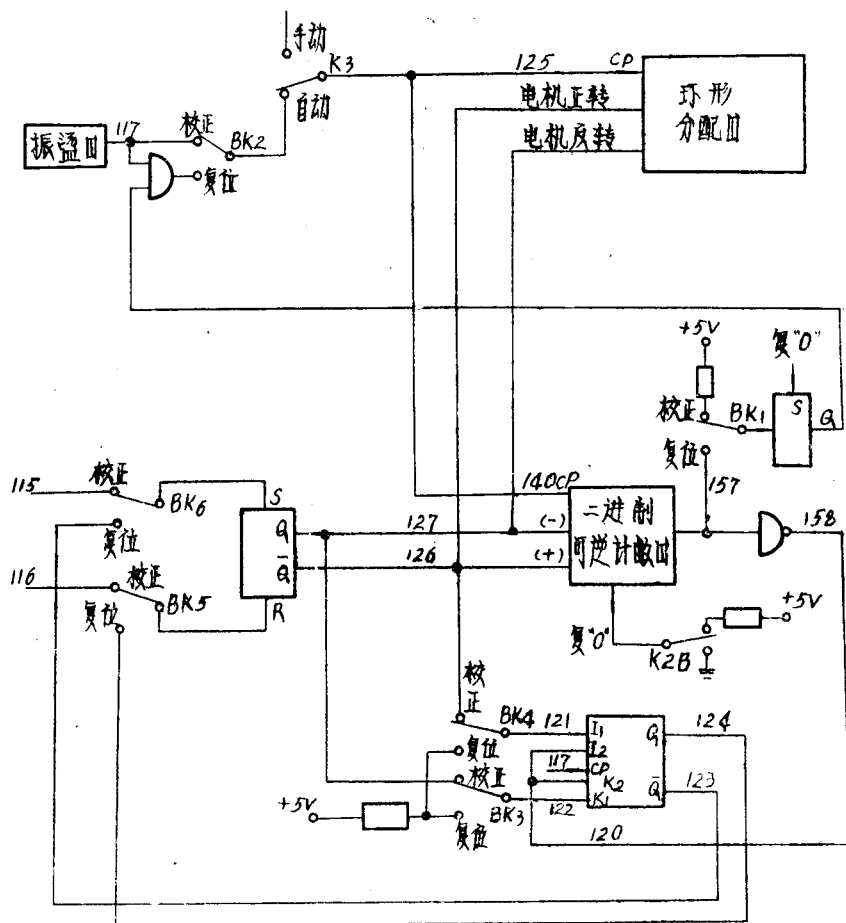


图17 电机自动复位逻辑图

图17中用与非门的158线，控制第一级触发器的J、K端，当计数器到零，158是高电位，计数脉冲才进入CP端，进行从 0 以后的计数，这样就记下步进电机停机后最后一次过零数目。如上例中第一点 + 8 个数第二点反转 6 个数，计数器记下的是 + 2，而不是 - 6。

## 二 研制中解决的主要问题

### (一) 方案选择

我们是把激光丝杠测量仪的原理，直接应用在丝杠磨床上。但是丝杠磨床，一般是在恒温机加工的车间中，振动、油雾、外界环境干扰等等，对灵敏而又“娇气”的激光，将是一



个严峻的考验。那又为何把长度基准选用激光波长呢？这是因为和其他长度基准元件如光栅、磁尺、感应同步器、刻线尺等等，比较起来，激光有它突出的优点，如精度高，激光加稳频后，每米精度可达 $0.1\mu$ ，甚至更高；激光很容易符合阿贝原则，而不增加床身行程的长度；激光半波长脉冲当量只有 $0.32\mu$ ，很容易细分。激光的缺点是显而易见的，怕振动、娇气、受环境影响较大，还要进行温度、气压修正；由于激光波长相对于工件和机床来说线胀系数不一样，对温度就更要求严格。测量系统的圆基准，采用特殊条纹数的圆光栅，来解决激光波长“小数有理化”问题，使电气线路大大简化，但使用圆光栅要特别注意油污。测量系统采用比相原理，并可连续划出误差曲线。既可做机床传动链误差测量仪，又可做自动校正磨削时的监视装置。记录曲线明朗、直观、实用。而不采用“数字显示”或打字记录。校正部分的方案，也有多种选择，应根据具体机床对象，妥善考虑。如可以移动砂轮架，产生补偿位移。这特别适用于砂轮架移动的机床布局中，例如英国的五米激光自动校正丝杠磨床，就是采用这个方案。校正机构还可以装在工件主轴的拨盘上，使工件有一个附加旋转，产生补偿位移，其优点是推动工件旋转比较灵活，惯量小，其缺点是拨盘结构复杂。校正机构通常装在机床母丝杆的螺母上，转动螺母，产生工作台的补偿位移。这个方案对杠杆螺母校正机构的机床，改装很方便，基本上可以利用原来的校正装置，其优点是杠杆比大，校正机构误差对附加位移影响很小，能获得较大的校正行程，其缺点对校正尺朝下结构的机床，如国产Y7520K丝杠磨床，改装很困难。对于自动校正方案的选择，我们曾有这样设想：利用原有的机床校正机构，校正累积误差，利用“压电陶瓷”的伸缩，使砂轮轴有补偿位移，来校正机床的周期误差，这种“分工”式的校正方案，有待于进一步的研究。对于自动校正的电气，我们试验了两个方案。第一方案是用两套单结晶体管和电阻、电容组成的脉冲振荡器来做误差方向判别器和步进电机脉冲源，振荡器的频率是由误差大小控制的，它能随误差大小而改变校正速度。在下面“原理试验”中，我们将介绍了这个方案的电气方框图。这个方案的优点是，因经过滤波器，对5赫以上的干扰有抑制作用，其缺点，是误差经过滤波器的解调后，时间常数较大。校正电气的第二方案，也就是现在采用的方案，是方波触发方案，时间常数小，抗干扰强，线路也很简单。总之最后确定的整个自动校正方案，具有连续、封闭、“自动拉零”的特点，在本章的（四）中，将进一步分析，在自动校正过程中，有一个电机正反旋转的频率，也就是校正频率，它是比相频率的一半，机床误差就是叠加在这个校正频率的振幅上，而进行自动校正。这个原理与激光稳频一样，除变化的误差外，还有“压电陶瓷”的“搜索信号”来校正激光谐振腔长度的变化。实践证明：这种方案具有较强的对误差变大的抑制能力，从而保证校正系统的稳定、可靠工作。其缺点是校正频率的这个“搜索信号”，也带来“残存误差”。

## （二）原 理 试 验

为了对“自动拉零”校正方案，进行试验研究，并确定校正机构的主要参数，研究校正机构对误差变化的适应能力，我们在试验台上，进行了原理性试验。图18是原理试验装置图。其中校正机构的参数，和机床实际结构的参数一样，用电机1通过皮带轮和减速箱2来模拟机床主轴转速，用可调偏心轮3，来模拟机床周期误差的大小。当偏心轮旋转时，偏心轮的振摆，使固定在杠杆臂的螺母摆动，从而使丝杠4有一正弦轴向位移，用电感表头6、表头放大器和记录仪记下这正弦曲线的大小，这就是模拟的机床周期误差。图19是原理试验的

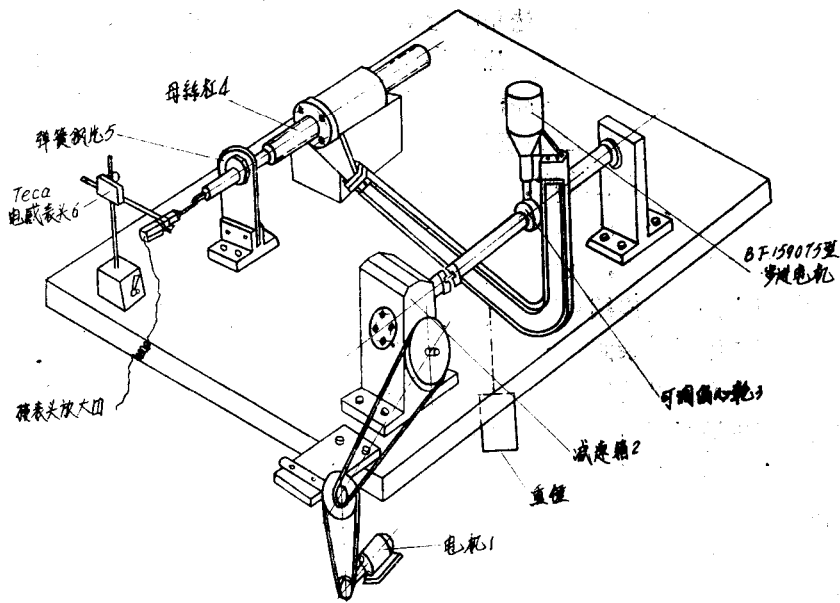


图18 自动校正原理试验装置图

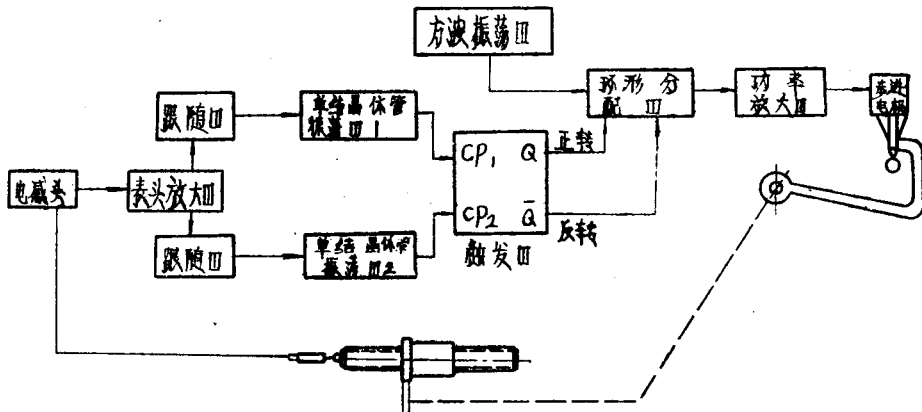


图19 自动校正原理试验电气方框图

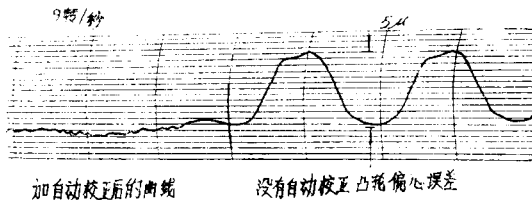


图20 自动校正原理试验效果图

电气方框图，也就是上面提到的自动校正电气的第一方案，正弦误差的正半周，使单结管振荡器1，产生振荡脉冲，从 $CP_1$ 输入给触发器，这样 $Q$ 是高电位， $\bar{Q}$ 是低电位，步进电机正转。正弦误差的负半周，使单结管振荡器2，产生振荡脉冲，从 $CP_2$ 输入给触发器，这时 $Q$ 是低电位， $\bar{Q}$ 是高电位，步进电机反转。这样随偏心轮旋转的正弦误差的正负交替变化，使