

# 激光扫描测径仪中的若干问题

测径仪研制组\*

(中国科学院安徽光学精密机械研究所)

## 一、引言

在工业生产和科学研究的很多部门中,需要对各种棒材外径进行测量与控制。我们研制的激光扫描测径仪是把力学、光学和电子学技术结合起来而制成的一种自动显示和控制外径的仪器。它利用激光方向性好的特点,把激光束对被测外径进行扫描挡光而取出外径的测量信息。这种仪器具有精度高,抗干扰性能好,快速无接触测量等优点。

我们若对测量头光路系统进行改进(见本文第四部分),并在整机设计时选取高的理论分辨精度,可以做成测量范围从几十微米到几百毫米的一系列仪器,使之系列化。这样就能满足电线电缆、冶金、精密机械加工、拉晶和光导纤维等一切需要对产品外径进行测量与控制部门的需要,扩大了使用范围。

## 二、基本原理

### 1. 整机工作概况

如图1所示,由氦氖激光器发出的一束激光经棱镜1和2转折后,使之平行于透镜5的主光轴入射,并聚焦在置于其焦点处由同步电机带动的旋转平面反射镜3上,变成扫描光束8,然后再经过透镜5由透镜6聚焦于光电二极管4的光敏面上变成电信号输出。扫描激光束在镜5和6之间是平行光束,并且平行于透镜5的主光轴移动。当这束光被待测棒7挡住通不过时,信号放大及半峰值检出器输出一个代表被测外径的脉冲。这个脉冲宽为 $t$ 的脉冲和晶

振源脉冲进入信号分离器,由与门进行复合后,输出棒脉冲信号,再进入可逆计数存贮器进行计数显示。存贮器附有预置开关,它可把产品额定外径值存贮于计数器中,使其和实际测量值进行加减运算,并取出误差值输入数模转换,变成误差信号去控制执行机构,达到对外径进行自动控制的目的。整个测量过程由逻辑控制部分自动准确进行。

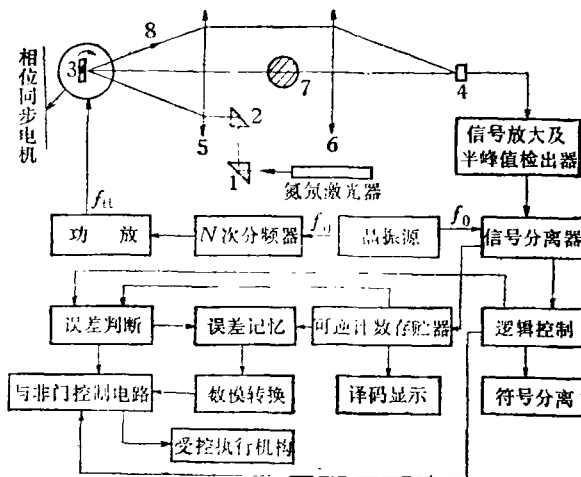


图1 整机原理方框图

### 2. 测量公式推导

由图1中光路部分可知,同步电机的转速为 $f_m$ ,则其转动的角速度为

$$\omega_m = 2\pi f_m \quad (1)$$

而光束8转动的角速度为

$$\omega_* = 2\omega_m \quad (2)$$

假设光束8扫过透镜5的轨迹是以透镜5的焦距 $F$ 为半径的圆弧,且 $\omega_*$ 是匀速的,则在透镜5上光束8移动的速度 $v$ 不变,即

$$v = 4\pi f_m F \quad (3)$$

\* 本文执笔者为岳古明同志。

其近似为在整个测量区间光束的平移速度。

设被测棒外径为  $\phi$ ，其对应信号脉宽  $t$  则为

$$t = \phi/v. \quad (4)$$

将(3)式代入(4)式并整理为

$$\phi = 4\pi f_m F t. \quad (5)$$

假如晶振源脉冲周期为  $T_0$ ，则在  $t$  内信号分离器所输出的棒脉冲信号中所含晶振源的脉冲数  $n$  为

$$n = t/T_0. \quad (6)$$

由(5)式和(6)式可得每个晶振源脉冲代表的数值是

$$\frac{\phi}{n} = \frac{4\pi f_m F}{f_0}. \quad (7)$$

令  $N = f_0/f_m$  为分频比，则(7)式变成

$$\frac{\phi}{n} = \frac{4\pi F}{N}, \quad (8)$$

即有

$$\phi = \frac{4\pi F}{N} n. \quad (9)$$

(9)式表明， $n$  和  $4\pi F/N$  的乘积就是被测棒外径的大小。因为我们测量显示取十进制， $\phi/n$  只能取数  $10^{-b}$ ， $b$  为自然数。

### 3. 理论分辨精度的选定

由公式(8)可知， $4\pi F/N$  的大小就决定了这种类型仪器的理论分辨精度。因为对于  $4\pi F/N = 10^{-b}$  来说， $b$  值越大，相当于误差一个晶振源脉冲所带来的误差数值越小，仪器精度就可越高。

因此，要使仪器精度达到 0.001 毫米数量级，必须选取  $4\pi F/N = 0.001$  毫米。这就要选取小的  $F$  或大的  $N$ 。 $F$  选小会影响仪器的线性度；增大  $N$  就要提高晶振源脉冲频率  $f_0$  或者降低  $f_m$ 。 $f_m$  的大小受到同步电机本身性能的限制，不能太小，否则测量速率太低，不能更好地测量快速运动的外径。对于提高  $f_0$ ，须有更高频率响应的数字电路。

我们研制的样机是为解决电线电缆生产时的测量和控制的。由于这种应用要求精度不高，取  $4\pi F/N = 0.01$  毫米，同时取  $N = 2 \times 10^5$ ，

得到所需透镜 5 的焦距为

$$F = \frac{\phi}{n} \cdot \frac{N}{4\pi} \doteq 159.155 \text{ (毫米)}. \quad (10)$$

这样，若取单透镜有效通光孔径  $D = 30$  毫米，就能保证  $D/F < 1/5$ ，满足线性度要求。

## 三、误差原因和样机主要指标

### 1. 线性度误差

所谓线性度误差是指把同一被测棒放在透镜 5 主光轴偏上或偏下的不同位置处时所测得的数值，与正好放在主光轴上时所测得的数值之间的偏差。产生这一偏差的原因有：(i) 透镜球差、彗差和其他光学畸变的存在，致使在焦点处发射的激光束扫过其边缘出射时和主光轴产生夹角(会聚作用)。出射光束和主光轴夹角越大，造成误差也越大。(ii) 信号放大器输出波形失真也造成线性度误差。由于光电二极管的光电响应随光线入射在其光敏面上的角度不同而不是线性的，光电二极管所加反向偏压过低，信号放大器工作在非线性区或者放大管本身放大性能的非线性以及级间耦合不合理等都将造成信号波形失真。

另外，由公式(9)和(6)我们得到绝对误差公式

$$d\phi = \frac{4\pi}{N} (ndF + Fdn), \quad (11)$$

$$dn = \frac{T_0 dt - t dT_0}{T_0^2}. \quad (12)$$

### 2. $dF$ 引起的固定误差

$dF$  是由透镜 5 的实际焦距  $f'$  和理论计算得到的焦距  $F$  之间的偏差。由(11)式可知，当  $N$  为常数， $dn = 0$  时，这种误差由  $dF$  大小决定。而被测棒外径越大(相当  $n$  大)，引起的绝对误差也越大。

### 3. $dn$ 引起的不稳定性误差

由(11)式可知，当  $N$  一定， $dF = 0$  时， $dn$  可引起测量值的变化。由(12)式可知  $t$  的变化和  $T_0$  的变化都能引起  $n$  的变化，从而造成测量数值的漂移而不稳定。

引起  $\epsilon$  变化的因素有: (i) 由于氦氖激光器输出功率不同, 或者输出功率漂移而引起光电二极管输出电流的变化以及由于光电二极管随工作环境的变化而引起输出光电流和暗电流的变化, 从而导致信号电压幅度波动。 (ii) 由于同步电机性能不好, 其负载大小影响及其供电

电源引入的频率干扰而导致电机转速  $\omega_{机}$  的不均匀。

对以上各种误差因素, 我们采取了有效的克服措施, 因此研制的样机各项指标达到了设计要求。主要数据如下:

表 1 被测棒标称值与测量值对照表(鉴定时测得)

标称值 (毫米)	$\begin{matrix} +0.005 \\ -0.010 \end{matrix}$ 2.00	$\begin{matrix} +0.022 \\ +0.010 \end{matrix}$ 4.50	$\begin{matrix} +0.023 \\ +0.018 \end{matrix}$ 6.00	$\begin{matrix} +0.004 \\ +0.002 \end{matrix}$ 8.00	$\begin{matrix} +0.006 \\ +0.004 \end{matrix}$ 12.00	$\begin{matrix} -0.006 \\ -0.012 \end{matrix}$ 17.00	0.84 (千分卡测)	25.01 (千分卡测)
测量值 (毫米)	1.98~1.99	4.49~4.50	5.99~6.00	8.00~8.01	12.01~12.02	17.01~17.02	0.83~0.84	25.07~25.08

对  $8.00^{+0.004}_{-0.002}$  的棒进行稳定性考验, 在 8 个小时内显示数基本不变(8.00—8.01)。

#### 四、扩大测量范围的两种设想

##### 1. 改进后可测大直径的一种光路系统

样机中, 由于透镜孔径  $D$  不可能做得很大, 测量大的外径就受到了限制。若把测量头光路系统改成如图 2 所示的形式, 测量范围可以扩大很多倍。因为在数据处理中附有预置开关, 平行调节平面反射镜 7 和 8, 9 和 10 之间为相同距离  $S$ , 并通过预置开关把这一距离数值预置在计数器里, 就可测很大的被测棒外径。镜 7, 8, 9, 10 和透镜 5 和 6 的主光轴交角分别为  $45^\circ$ , 透镜 5 和 6 的主光轴要平行。

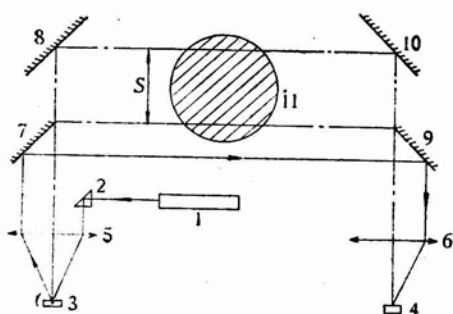


图 2

1—氦氖激光器; 2—直角棱镜; 3—旋转平面反射镜; 4—光电二极管; 5, 6—单透镜; 7, 8, 9, 10—四个平面全反射镜; 11—被测棒外径

##### 2. 一种测量细小外径的望远镜系统

物理

样机中, 由于在测量区扫描平移光束是平行光束, 光束直径不可能很小, 测量细小外径就不能进行。图 3 所示的测量头光路系统是一个一倍开普勒望远镜系统。在透镜 4 和 5 之间移动的扫描光束是聚焦光束, 并在  $SO$  焦平面上有最小光束直径, 因此能够测量很小的外径。

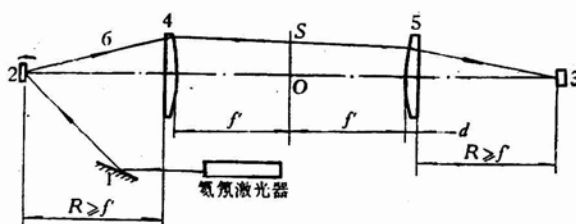


图 3

1—平面反射镜; 2—旋转平面反射镜; 3—光电二极管; 4, 5—两个透镜, 焦距均为  $f$ ; 6—扫描光束

这一系统测量公式推导如下:

如图 3 所示, 设扫描光束 6 旋转的角速度为  $\omega_{光}$ , 其对透镜 4 的最大张角为  $\alpha$ , 则其扫过  $\alpha$  角所需时间  $t_1 = \alpha / \omega_{光}$ 。假设在  $SO$  面上聚焦点移动的速度为  $v_{焦}$ , 移动的最大长度为  $L$ , 则扫完  $L$  长所需时间  $t_2 = L / v_{焦}$ 。因  $t_1 = t_2$ , 而有  $v_{焦} = \frac{L \omega_{光}}{\alpha}$ 。即

$$v_{焦} = \frac{L \times 4\pi f_{机}}{2 \arctg D / 2R} \quad (13)$$

式中  $f_{机}$  为电机转速,  $D$  为透镜 4 最大通光孔径,  $R$  为透镜 4 的平面到镜 2 的距离。

设被测棒外径为  $\phi$ , 在  $SO$  面上扫过它的时间为  $t'$ , 则有

$$\phi = v_{\text{晶}} T_0 n, \quad (14)$$

式中  $T_0$  为晶振源脉冲周期,  $n = \frac{f'}{T_0}$  为棒脉冲中包含的晶振源脉冲个数。

将(13)式代入(14)式并整理成

$$\frac{\phi}{n} = \frac{2\pi L}{N \text{arc tg } D/2R}, \quad (15)$$

式中  $N = f_0/f_{\text{晶}}$  为分频比,  $f_0$  为晶振源脉冲频率。

下面求  $L$  和  $D$ ,  $f'$  等之间的函数关系。对于图 3 给定的光路系统, 我们有图 4 所示的局部放大示意图, 其中,  $EH \parallel O''O$ ;  $EH \perp EG$ ;  $O'C \perp CU$ ;  $C$  为  $CU$  与弧  $\widehat{CB}$  的切点;  $CA \perp O'O$ ;  $CA \perp KS$ ; 透镜曲面曲率半径  $O'C = r$ ;  $BO = f'$ ;  $EG = D/2$ ;  $O''G = R$ ;  $SO = L/2$ ;  $n'$  为透镜用玻璃对使用光波的折射率。

根据折射定律, 由图 4 可得

$$\sin \angle CEH = \frac{\sin \angle EO''G}{n'}$$

$$\sin \beta = n' \sin \angle O'CE.$$

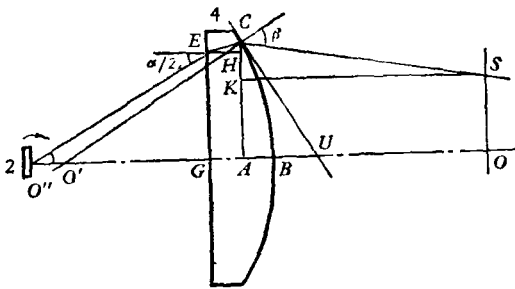


图 4

再由平面三角和平面几何知识, 得到下列各式:

$$\begin{aligned} \cos \angle O'CA &= \frac{CA}{O'C} = \frac{CH + H.A}{O'C} \\ &= \frac{CH + D/2}{r}, \end{aligned}$$

$$\angle EO''G = \text{arc tg } \frac{EG}{O''G} = \text{arc tg } D/2R,$$

$$\beta = \text{arc sin } (n' \sin \angle O'CE),$$

$$\angle O'CE = \frac{\pi}{2} - \angle CEH - \angle O'CA.$$

$$\angle ACS = \pi - \beta - \angle O'CA,$$

$$SO = CH + HA - (AB + BO) \text{ctg } \angle ACS.$$

由以上各式整理得到

$$L = D + 2CH - 2(AB + f') \text{ctg } \angle ACS. \quad (16)$$

对于给定的薄单透镜, 当  $\text{arc tg } D/2R$  很小时,  $CH$  和  $AB$  大小可忽略, (16)式变成

$$L = D - 2f' \text{ctg } \angle ACS. \quad (17)$$

将(17)代入(15), 得到理论分辨精度公式:

$$\frac{\phi}{n} = \frac{2\pi(D - 2f' \text{ctg } \angle ACS)}{N \text{arc tg } D/2R}, \quad (18)$$

式中

$$\angle ACS = \pi - \text{arc cos } \frac{D}{2r}$$

$$- \text{arc sin } (n' \sin \angle O'CE),$$

$$\angle O'CE = \frac{\pi}{2} - \text{arc cos } \frac{D}{2r}$$

$$- \text{arc sin } \frac{\sin \text{arc tg } D/2R}{n'}.$$

由公式(18)和其中各给定的参数值, 改变  $R$  的大小, 分别计算得到的分辨精度和选定的理论分辨精度相差甚微。这说明改变  $R$  的大小对测量被测物外径大小的影响可以忽略不计。

在  $SO$  焦平面上聚焦光束直径  $y$  由下式决定:

$$y = f'\theta + \frac{1.22f'\lambda}{x},$$

式中  $f'$  为透镜 4 的焦距,  $\theta$  为激光发散角, 其大小由激光腔参数等因素决定,  $\lambda$  为激光波长,  $x$  近似为入射光束  $\phi$  的直径,  $f'\theta$  项由  $\theta$  角引起的,  $\frac{1.22f'\lambda}{x}$  项是由平行光圆孔衍射引起的。

在(18)式中, 当  $\phi/n$  选定后,  $N$  和  $f'$  的大小由公式(8)确定, 但必须使选取的分频比  $N$  在电路设计时容易实现, 并使  $f'$  满足  $D/f' < 1/5$  的条件,  $D$  为透镜 4 的通光孔径; 另外, 最好取  $R = f'$ ;  $r$  由式  $r = (n' - 1)f'$  决定。(8)式中的  $F$  即是  $f'$  的理论计算值。

### 参 考 文 献

- [1] 荆工、史尔编, 应用光学, 国防工业出版社, (1973), 161-163.
- [2] 天津大学精密仪器系编, 激光技术, 科学出版社, (1972), 649.
- [3] 覆野秀雄, エレクトロニクス, (1978), 2月号, 209.