

精密长度测量和微定位中的 一种激光干涉仪

游 江 南

(北京科学仪器厂)

提 要

本文介绍的干涉仪具有体积小、易加工、抗振性能好、便于可逆计数等优点。不但可以用到高精度的测长机上,而且还可以用于线纹尺检验,精密尺度刻划中的微定位,以及精密丝杆检查等方面。

光的干涉现象在光学冷加工中的应用,这已经是大家熟知的准确而又方便的方法了。无论是加工球面或者平面,都需要看“光圈”;“光圈”已经是光学表面面形好坏的度量。在这一比较广泛的应用中,光波的波长起了一把测量微小长度的精密尺子的作用。

1892年,迈克尔逊第一次用光波的波长作尺测量了国际标准米尺。往后,在不同的国家又相继进行了多次测量,出现了各种类型的干涉仪。对于一米以内的量块长度最准确的测定就是用干涉仪进行的。

1960年10月第十一届国际度量衡代表大会决定以氪原子 $86(\text{Kr}^{86})$,在能级 $2P_{10}$ 和 $5d_5$ 间跃迁的辐射光波的真空波长作为长度的基准,一米定义为这个波长的1650763.73倍。目前,在我国使用的长度基准中,也是这一光波的波长,而一等量块则很早就以光波波长为工作基准用干涉仪检定的。

干涉仪在长度计量中的成就和它的精确度是众所周知的。例如:对于一米的量块,其检定精度可达 $0.1\sim 0.2$ 微米。但是,在激光出现以前,用来测量的光源有几个弱点。第一,它们的干涉程短,例如,镉灯光的干涉程只能达500毫米,而氪灯光的干涉程也小于800毫米。这样就使得用干涉法来直接测量一米以上的长度成为不可能。第二,这些光源的强度弱。由于这个原因使得过去的干涉测长中难于实现记录走过的干涉条纹的数目,而不得不采用熟知的“小数重合法”,采用“小数重合法”时,必须对三个以上的波长分别测量其干涉条纹的小数部分,然后进行计算。不但费时很多,而且还需要对被测的长度有一定的已知程度才能完成一次测量。由于光源的能量弱,对测量工作者要求有一定熟练程度才能观察到干涉条纹,劳动强度大。上述的缺点,使得干涉法的应用,特别是在工业中的应用,受到了很大的局限。

激光的出现,正好克服了上述缺点。激光的单色性是过去的光源无法比拟的。我们知道,单色性越好,干涉程越长。从理论上,激光的干涉程可达100公里以上;实际上,在200米以上的干涉程内,在空气中已经观察到了激光的干涉条纹。激光的能量集中,亮度高,由它产生的干涉光讯号很容易用光电接收器接收而变为电的讯号,也就是说,可以用光电接收器把走过的

干涉条纹数目一个不漏地数出来,而实现数字化,大大提高了测量速度。干涉仪也可做得比较小巧,便于装在各种机床和仪器上进行精密测量;同时,由于把确定长度的光讯号转变成为了电讯号,这样就有利于工作过程的自动化。例如我国制造的用 He-Ne 激光为光源的光电光波比长仪,在 20 分钟内就能将一米线纹尺的 1001 条刻线依次自动鉴定完毕,在一米内精度可达 ± 0.2 微米。

本文介绍我厂在北京大学物理系协助下,正在试制的一米激光测长机中的干涉仪。它也可以用于线纹尺检验、精密尺度刻划中的微定位、丝杆检查等方面。

一、干涉仪结构及其工作原理

干涉仪的光路如图 1 所示。

由 He-Ne 激光器输出的 6328 埃光束射到分光镜 1 的前表面时,分成两个光束。一束被反射到锥体棱镜 3,一束透过分光镜到达反射镜 2,然后反射到锥体棱镜 4。由锥体棱镜反射回来的光线与入射光线平行,但位置有一个平移量 d , d 的大小由棱镜顶点至入射光线的垂直距离所确定。分别由锥体棱镜 3 和 4 反射回来的两束光线又在分光镜的前表面汇合,但在前表面的位置与它们分开时的位置不同。而且这两束光线在它们汇合处又分别分成两束光。来自锥体棱镜 3 并透过分光棱镜的光束与来自锥体棱镜 4 并在分光镜前表面反射后的光束,互相重迭,彼此干涉,形成的干涉讯号 I_2 为光电接收器 6 接收。另外,来自锥体棱镜 3 在分光镜前表面反射后的光束与来自锥体棱镜 4 并透过分光镜的光束重迭产生的干涉讯号 I_1 被光电接收器 5 接收。上述干涉仪与迈克尔逊干涉仪是很相似的。锥体棱镜 3 沿光线方向移动的距离 S 可按式算出:

$$S = m \cdot \frac{\lambda}{2}$$

m 为接收器上光强明暗交替的次数。锥体棱镜的使用不仅降低了镜子沿光线方向移动时对机械导轨的精度要求,而且使得入射光线与反射光线之间产生了一个平移量 d , 这样对激光的稳定和棱镜移动方向的判别都是有利的。

I_1 和 I_2 虽随着棱镜的移动作正弦变化,但有一个固定不变的直流成分,形成直流背景。当分光镜的反射率和透过率相等时,交流成分与直流成分的比值达到最大。通过控制分光镜的性质,使得 I_1 与 I_2 之间产生一个位相差 $\delta = \frac{\pi}{2}$, 这时把两个接收器的输出信号分别加到示波器的 x 向偏转和 y 向偏转上,如果两个方向的增益合适,并且引入的相移相同,则示波器上的光点位置保持在一个圆上,当棱镜相对移动时,光点在圆上移动(图 2)。

图中 θ 即光点在圆上的极坐标。由光点在圆上移动的方向,即可判别棱镜相对移动的方向,棱镜相对移动 $\frac{\lambda}{2}$ 时,光点就在圆周上走一圈。这时,棱镜相对移动的距离 S 可表示为:

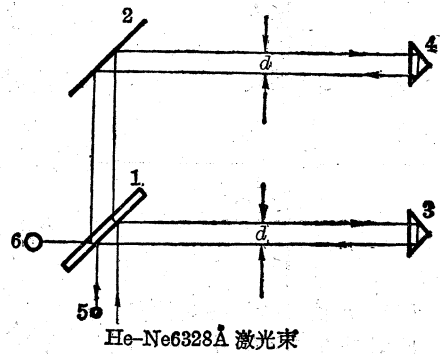


图 1 干涉仪光路示意图

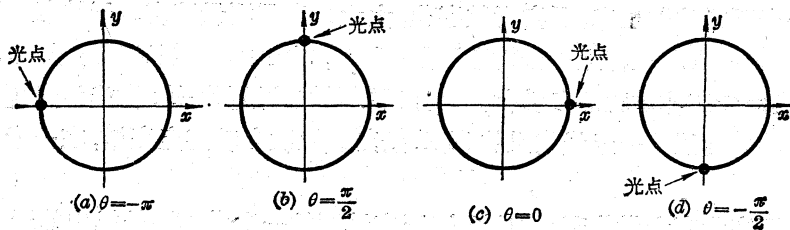


图2 示波器上光点的轨迹

$$S = m \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{2} (\theta - \theta_0) \frac{1}{2\pi}$$

m 为光点走过的圈数的整数, θ_0 为起始位置时光点的极坐标。

令 $\varepsilon = \frac{\theta - \theta_0}{2\pi}$, 则 ε 实际上是熟知的干涉条纹的小数部分。整数 m 可以用计数器准确地

数出来。假设光点轨迹圆的直径为 50 毫米, 光点本身直径为 1 毫米, 如果条件很稳定的话, 令 ε_{\min} 为测量 ε 所能达到的精度, 于是:

$$\varepsilon_{\min} \leq \frac{1}{50 \cdot \pi} \approx 0.0064$$

当 $\lambda = 0.6328$ 微米时, 测量棱镜相对移动的精度可达 0.002 微米。

如果两束相干光 (E_1 和 E_2) 的传播方向有一夹角 α ,

则在视场中会出现干涉条纹, 条纹的宽度为 $D = \frac{\lambda}{\sin \alpha}$

(图3)。

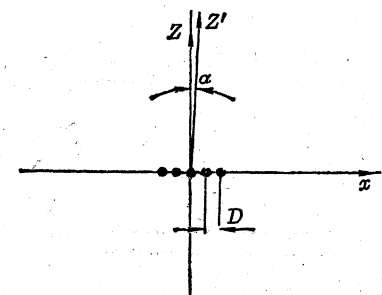


图3 z 轴方向为 E_2 传播方向, z' 轴方向为 E_1 传播方向, 干涉条纹垂直 xz 平面

D 可通过实际光路中设置的光楔来调整, 这时, 调整接收器的相对位置, 使 I_1 与 I_2 之间产生 $\frac{\pi}{2}$ 的位相差。

二、干涉仪中高斯光束参数的确定

为了使仪器体积尽量减小, 同时充分利用光强, 干涉仪中采用了高斯光束。对于 TEM₀₀ 模

$$E = \frac{E_0 e^{i\omega t}}{z + i \frac{\pi w_0^2}{\lambda}} \exp \left\{ -i \frac{2\pi}{\lambda} \left[z + \frac{z^2 + y^2}{2 \left(z + i \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \right)} \right] \right\}$$

E 为电场强度, E_0 为常数。 z 轴的方向为光波传播的方向, w_0 即高斯光束的腰的大小, $z=0$ 对应腰的位置, 它的传播如图4所示。

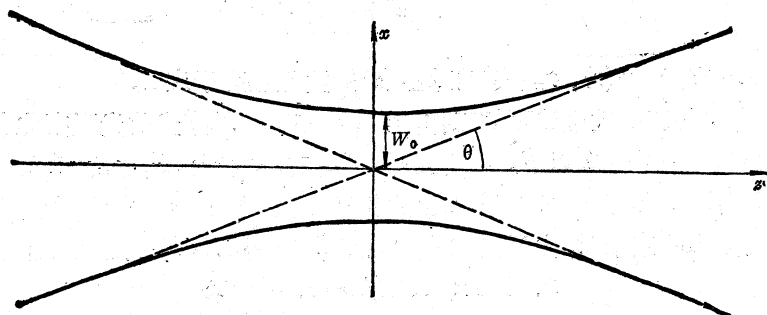
在高斯光束的传播过程中, 随着 z 的增大, 光斑将加大, 中心强度将降低。高斯光束的波前并不是一个平面, 在 z 轴附近是一个球面, 轴上点的位相有一个附加的位相差 φ ,

$$\text{tg } \varphi = \frac{\lambda z}{\pi w_0^2}$$

假设 $w_0 = 0.3$ 毫米, $\lambda = 6.328 \times 10^{-4}$ 毫米, 则

$$\operatorname{tg} \varphi = 2.238 \times 10^{-3} z$$

图 5 作出了 $\varphi/2\pi$ 与 z 的关系, 具体数字列入表 1。



$$\tan \theta = \frac{\lambda}{\pi w_0}$$

图 4 高斯光束 TEM_{00} 模的轮廓

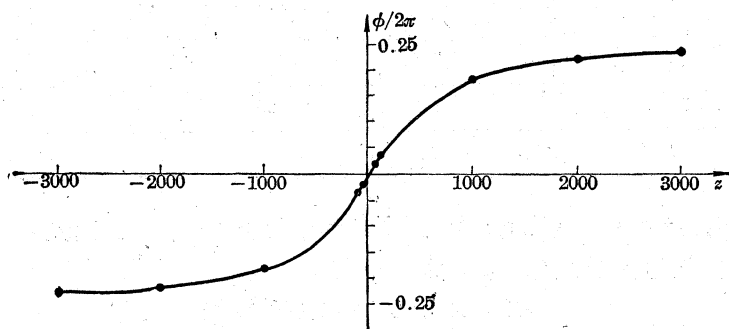


图 5

表 1 $w_0=0.3$ 毫米、 $\lambda=6.328 \times 10^{-4}$ 毫米、 $\theta=6.714 \times 10^{-4}$

	50 毫米	100 毫米	1000 毫米	2000 毫米	3000 毫米
$I_{\text{中心}}$	0.9812	0.9523	0.1664	0.04755	0.02171
w	0.3018	0.3074	0.7354	1.375	2.036
$r_{\pi/2}$	1.131	0.8143	0.6161	0.8145	0.9847
$\phi/2\pi$	0.018	0.034	0.18	0.22	0.23

以 $w(z)$ 表示在不同的位置的光斑大小, 则

$$w(z) = \sqrt{\frac{\lambda^2 z^2}{\pi^2 w_0^2} + w_0^2}$$

在 z 轴垂直的平面内, E 的相位随着离中心点的距离 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 的变化而变化, 设相位变化为 $\pi/2$ 时, $r = r_{\pi/2}$, 则

$$r_{\pi/2} = \sqrt{\frac{\pi^2 w_0^2}{2\lambda z}} w(z)$$

令腰处的中心强度为 1, 不同位置的中心强度为

$$I_{\text{中心}} = \frac{\left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda}\right)^2}{z^2 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda}\right)^2}$$

对于 $w_0=0.3$ 毫米, $w(z)$, $r_{\pi/2}(z)$ 和 $I_{\text{中心}}(z)$ 的数值也列于表 1。

实验表明,为了保证计数电路可靠工作,当棱镜移动时单束光的光强变化(即 E_2 或 E_4 的强度变化)应该控制在 4~5% 以下。当棱镜移动 S 时, z 增大 $2S$, 由表 1 可以看出,如果 $w_0=0.3$ 毫米,则不可能实现 1000 毫米以上的长度测量,只可能实现 100 毫米以内的长度测量。当测量长度为 100 毫米时,由于附加的相位差 $\phi/2\pi=0.068$,引起的误差为:

$$0.6328 \times 0.068/2 = 0.02 \text{ 微米}$$

对于 $w_0=2$ 毫米,相应 $I_{\text{中心}}$ 、 w 、 $r_{\pi/2}$ 、 $\phi/2\pi$ 的数值列于表 2。

表 2 $w_0=2$ 毫米、 $\theta_0=5.036 \times 10^{-5}$

z	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000
$I_{\text{中心}}$	0.9975	0.9900	0.9777	0.9610	0.9404	0.9164	0.8895
w	2.002	2.010	2.022	2.040	2.063	2.089	2.121
$r_{\pi/2}$	11.19	7.989	6.523	5.700	5.155	4.765	4.479
$\phi/2\pi$	0.0083	0.016	0.024	0.032	0.039	0.047	0.054

由表 2 可看出,当 $w_0=2$ 毫米时,测量 1000 毫米的长度以内,高斯光束可以认为是平行光,测量 1 米时由附加相位差引起的误差为:

$$0.6328 \times 0.0083 = 0.005 \text{ 微米}$$

这项误差不是很大的。当测量长度大于 3 米时, w_0 还应该加大。

在 1 米测长机中,考虑到光学零件表面加工的误差,采用的 w_0 比 2 毫米略大一些。

三、激光器谐振腔的设计与 TEM₀₀ 模的选择

本干涉仪中的激光器谐振腔如图 6 所示。

图中 1 是平面镜, 2 是球面镜, 半径 $R=450$ 毫米, 3 是 He-Ne 放电管, 直径 $d=1.1$ 毫米, 放电长度 $l=140$ 毫米, 平面镜 1 与球面镜 2 相距 220 毫米高斯光束的腰正好处于平面镜上。

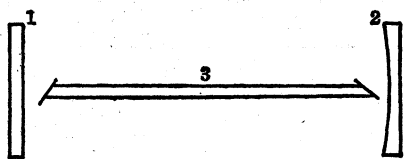


图 6 激光器谐振腔

- 1—平面镜; 2—球面镜($R=450$ 毫米);
3—He-Ne 放电管(直径 $d=1.1$ 毫米, 放电长度 $l=140$ 毫米)

$$w_0^2 = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{l(R-l)}$$

$$w_0 = 0.2128 \text{ 毫米}$$

w_0 的这一数值对于 1 米测长机是不合适的, 后面我们将计算 w_0 的变换, 这里先考虑 TEM₀₀ 模的选择。

对于同样直径的放电管, 高阶横模的衍射损失比低阶的大, 具体数字可通过数值积分获得。适当选择放电管直径, 就能抑止 TEM₁₀ 模的出现, 同时也就抑止了更高阶的横模的出现, 而能挑选出我们所需要的 TEM₀₀ 模。放电管直径的大小我们是这样来估计的:

如图 6, 在放电管靠近球面镜的一端, 对 TEM_{00} 模,

$$w = \sqrt{\frac{\lambda^2 z^2}{\pi^2 w_0^2} + w_0^2} = 0.2726 \text{ 毫米}$$

TEM_{10} 模在 x 向的光斑线度比 TEM_{00} 模大 1.5 倍左右, 如果放电管直径小于 0.82 毫米, 则 TEM_{10} 模就不能自由地通过放电管, 因而受到抑制。实验表明, 如果管径小到基模 (TEM_{00} 模) 的通过受到明显障碍, 则在光斑的周围出现明暗交替的同心圆。实际上, 我们选择放电管直径为 1.0~1.1 毫米。这时, 通过控制增益或调整谐振腔而获得用眼睛判断的 TEM_{00} 模。在标准具中, 观察不到主拍频 w 外的波长; 用光电二极管接收, 观察不到 TEM_{00} 模与 TEM_{10} 模之间的拍频现象, 这时, 我们认为 TEM_{10} 模实际上已经不存在了。

谐振腔反射镜对 6328 埃的反射率和透过率控制到如下数值:

一端, 反射率 > 99.5%

另一端; 反射率 > 99%, 透过率 > 0.8%, 从这端输出的光束进入干涉仪。功率: 0.5 毫瓦左右。

四、单一纵模的选择与稳频

实验表明, 由上述 He-Ne 6328 埃激光器中输出的激光能同时出现两个不同的波长 λ_1 和 λ_2 , 即两个纵模。由于它们都能满足谐振条件, 可以推知:

$$\nu_1 - \nu_2 = 6.817 \times 10^8 \text{ 赫}$$

实验结果与上述结论是一致的, 在出现两个纵模的情况下, 当棱镜的相对位移量为半腔长 (110 毫米) 的奇数倍时, 干涉条纹的衬度降低; 甚至完全消失。

对于 $T = 300^\circ\text{K}$, Ne^{20} 原子谱线 6328 埃的多普勒宽度为 $\Delta\nu_0 = 1.31 \times 10^9$ 赫。这一多普勒宽度近似为谐振腔频率间隔的 2 倍。实验中没有观察到同时出现两个以上的波长。

通过一个间距近似为腔长一半的法布里—珀罗标准具, 可以观察到下述现象:

当谐振腔腔长逐渐增加时, 两个纵模的波长向长波方向移动, 然后长波方面的纵模消失, 只剩下一个单一纵模。当腔长继续增加时, 激光器保持输出一个单一纵模, 但这个单一纵模的波长也继续向长波方向移动。移动到一定程度时, 在它的短波方面又出现一个纵模。当腔长再继续增加时, 两个纵模的波长再继续向长波方向移动, 周期地重复上述过程, 当谐振腔腔长缩短时, 上述过程即向反方向进行。显然, 重复一个周期时, 腔长变化了 $\lambda/2$ 。在一个周期内, 保持出现一个单一的纵模时, 腔长许可变化的范围, 对不同的激光器是不同的。但都有一个相应的范围, 只要保持腔长的变化在这个范围内, 就能选出一个单一的纵模来。这个纵模的波长虽仍有一个变化范围, 但原子谱线的中心波长就落在这个范围内。

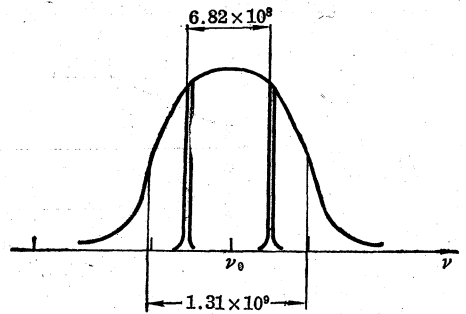


图 7 Ne^{20} 6328 埃的多普勒宽度

显然, 重复一个周期时, 腔长变化了 $\lambda/2$ 。在一个周期内, 保持出现一个单一的纵模时, 腔长许可变化的范围, 对不同的激光器是不同的。但都有一个相应的范围, 只要保持腔长的变化在这个范围内, 就能选出一个单一的纵模来。这个纵模的波长虽仍有一个变化范围, 但原子谱线的中心波长就落在这个范围内。

另一方面, 随着腔长的增加, 输出的激光功率也周期地变化, 当激光频率正好与原子谱线的中心频率吻合时, 输出功率最大, 当粒子数的激发程度较高时, 在中心频率处输出功率是一个局部极小值, 即处于一个下陷。根据上述特征, 就可以将腔长控制到使激光频率处于原子谱

线的中心频率。我们就是利用这一方法来稳频的，这就是通常所说的拉姆凹陷法。激光频率的再现性据报道可控制在 $\pm 1 \times 10^{-7}$ 以内。

我们只是对激光频率的相对稳定性进行了测量。测量方法如下：

将激光干涉仪的可动镜调到离固定镜约 800 毫米处。将激光频率稳定在凹陷附近。干涉讯号由可逆计数器显示，同时由示波器监视。调节激光管上的压电陶瓷上的直流电压，使稳频指示电表上的指针由负方满偏转增至正方满偏转刻度。这时相应激光频率由凹陷的一边连续过渡到另一边，但仍保持在凹陷内。指针指零时，对应凹陷的中心。实验指出：当电表由负方满偏转增至正方满偏时，计数器上数字增加一个数，(即 $1/8\lambda$)，当指针复原时，计数器也复原，由此可以标出满偏转时的波长变化：

$$\frac{800}{\lambda} = \frac{800}{(\lambda + \Delta\lambda)} + \frac{1}{4}$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 1 \times 10^{-7}$$

稳频器指示电表上的总刻度为 25 格，在稳频器正常工作情况下，指针的漂移为一个格值，连续观察了 14 小时，仍保持在一个格值以内。由此我们估计到频率的相对稳定性已达 1×10^{-8} 这一稳定度，我们认为已满足了一米激光测长机的要求。

五、准直管与高斯光束变换

如第三节所述，在谐振腔内， $w_0 = 0.2128$ 毫米。我们需要把这样的光束，通过一个光学系统，即准直管，使得进入干涉仪的高斯光束的腰大于 2 毫米。计算是根据 *ABCD* 定律进行的。其中正负号的规定与通常几何光学中的规定一致。

包括谐振腔在内的准直管系统图如图 8 所示：

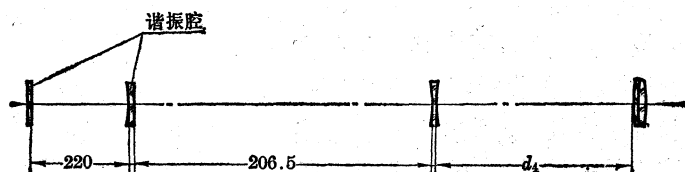


图 8 准直管系统图，谐振腔包括在内

准直管的具体数据如下：

表 3

面 序	R	d	n'
1	-450	2	1.5147
2	∞	206.5	1
3	-19.577	1.4	1.57049
4	44.098	90-100	1
5	181.488	1.46	1.64397
6	50.097	2.91	1.5147
7	-70.619	0	1

$$d_0 = -220 \quad n = 1 \quad w_0 = 0.2128$$

$$A = 1.4154421 + 0.054382711 \times d_4$$

$$B = -552.07812 - 21.520764 \times d_4$$

$$C = -4.2217748 \times 20^{-2} + 4.4148267 \times 10^{-4} \times d_4$$

$$D = 17.173076 - 0.17797780 \times d_4$$

变换后的具体数据见表 4 和图 9。

表 4

d_4	96.284492	96.488905	95.9	96.0	96.1	96.2	96.4	96.35	95.627192
w_0'	2.849	2.488	1.966	2.25	2.545	2.776	2.718	2.805	1.388
z'	-120.99	-1.726×10^4	2.000×10^4	1.940×10^4	1.606×10^4	8.698	-1.167×10^4	-7.099×10^3	1.702×10^4

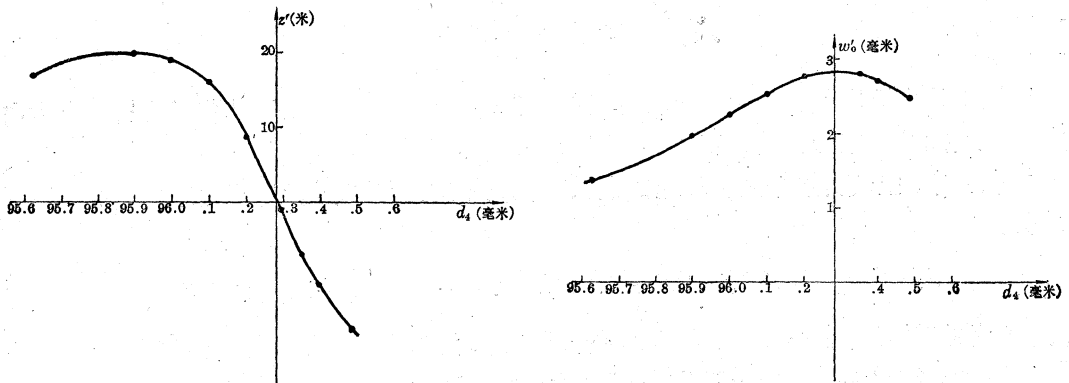


图 9 通过准直管后,最后一面上高斯光束的参数为准直管前后组之间距

六、锥体棱镜中偏振面的旋转与椭圆化,椭圆化的消除

如前面所述,本干涉仪中采用了两个锥体棱镜,代替了原来迈克尔逊干涉仪中的两个平面反射镜。如果锥体棱镜的三个互相垂直的面的夹角严格为 90° , 则反射光线与入射光线严格保持平行。棱镜在转动过程中由于导轨的弯曲,棱镜会相应的转动;但是锥体棱镜不但保证了反射光线的方向不变,同时光程的变化也是很小的。由于锥体棱镜的角度有误差,反射光线与入射光线就不再平行,这方面的定量计算已经有了。在我们的实验中,由于入射光束与反射光束不发生重迭,光束在棱镜内不被棱线分开,反射光束本身不因棱镜的角度误差而被分裂开来,而是整体有一个偏转,这个偏转可以通过一个光楔来校正。所以对棱镜的角度公差放宽了。实验指出:误差在三秒以内仍能照常工作。

另外一个问题是,当线偏振光经过锥体棱镜反射后,出来的光将变成椭圆偏振光,实验也证明了这一点。如果分光镜产生的附加位相差与偏振状态有关的话,则不同偏振状态的干涉条纹将彼此错开,这样就降低了干涉讯号的幅度。用激光平面干涉仪来检查锥体棱镜时,就会发现由于椭圆化的影响而使干涉条纹不十分清晰。为了消除椭圆化的影响,在棱镜的三个屋脊面上镀上银层。镀有金属层的棱镜,在激光平面干涉仪中观察时,条纹要清晰得多。

七、分光镜的设计

分光镜在此仪器中还负有产生一个合适的位相差的责任。对于介质膜，这一点是不能实现的，必需镀上有光吸收的材料。对于通常用的银和铝，单层的金属膜仍然不能实现这一点，如果镀上金属和介质交替的膜，能满足这一要求。本仪器使用的是 MgF_2 和 Al 、 ZnS 交替的多层膜。前面提到， 90° 位相差也可用整调接收器的位置来实现。这时，分光镜使用的是 ZnS MgF_2 多层介质膜。为了直流工作点稳定，要求分光镜的反射率与透射率尽量相等。不等时，最好让反射率小于透射率，因为射到可动棱镜上的光束是被分光棱镜反射回来的，当反射光束比透射光束强时，在棱镜移动的情况下不利于直流工作点的稳定。

八、误差分析及其自动校正

下面谈谈由温度气压变化、导轨弯曲与形变引起的误差分析及干涉仪对导轨垂直方向弯曲与形变引起的误差的自动校正。

本仪器中，空气折射率变化引起的波长变化是靠测量气温、气压、湿度来确定的。其修正公式为：

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = [0.93(t-20) - 0.36(P-760) + 0.06(l-10)] \times 10^{-6}$$

式中， t 为摄氏温度， P 为毫米汞柱表示的大气压， l 为毫米汞柱表示的水蒸汽压。

下面针对本仪器的结构概略分析一下，由于温度变化，机床变形引起的误差。

图 10 是用以分析温度变化机床变形引起误差的示意图。3 是可动棱镜，4 是固定棱镜，其中细节可参看图 1。

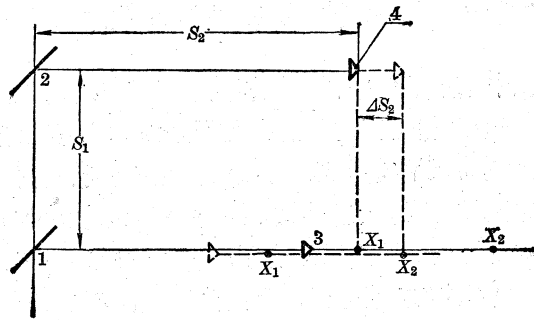


图 10 温度变化, 机床形变误差分析示意图

实线表示 t_1 时刻的位置 虚线表示 t_2 时刻的位置

假设在起始时刻 t_1 ，固定棱镜 4 的顶点在光轴上的投影与被测工件上 X_1 点重合，末了时刻 t_2 与 X_2 点重合。

计数器计数：

$$\begin{aligned} N &= X_2 + \Delta X_2 - (X_1 + \Delta S_2) + \Delta S_1 + \Delta S_2 \\ &= (X_2 - X_1) + \Delta S_1 + \Delta X_2 \\ &= (X_2 + \Delta X_2) - (X_1 + \Delta X_1) + \Delta X_1 + \Delta S_1 \end{aligned}$$

式中, ΔX_1 、 ΔX_2 、 ΔS_1 、 ΔS_2 分别为 t_1 至 t_2 时间间隔内 X_1 、 X_2 、 S_1 、 S_2 的变化量, 这些变化量是由温度、形变等因素引起的。这里坐标原点取在可动棱镜顶点上。

上述过程可分解为下面几个过程。在 t_1 至 t_2 这一测量过程中:

1. S_1 伸长 ΔS_1 , S_2 伸长 ΔS_2 , 记数为 $\Delta S_1 + \Delta S_2$ 。
2. X_2 至可动棱镜顶点的距离伸长 ΔX_2 , 但 X_2 保持不动, 记数为 ΔX_2 。
3. 可动棱镜与工件作为一个刚体, 沿光线方向移动, 使 X_2 与固定棱镜顶点重合, 这时记数为:

$$X_2 - (X_1 + \Delta S_2)$$

于是总计数为上述三个记数之和, 也就是上面关于 N 的表达式。

$$N = (X_2 + \Delta X_2) - (X_1 + \Delta X_1) + (\Delta S_1 + \Delta S_2)$$

式中, $(X_2 + \Delta X_2) - (X_1 + \Delta X_1)$ 为 t_2 时刻 X_1 与 X_2 两点之间的距离, $(\Delta S_1 + \Delta S_2)$ 则为测量误差。这一误差主要是由于测量过程中温度不稳定引起的, 所以要求一个恒温的工作环境。

另外, N 的表达式中不包括 ΔS_2 。 ΔS_2 除了温度变化引起外, 在本仪器中主要是由于工件移动过程中机床变形引起的。如果把固定棱镜与测长机的固定测头或比长仪的光电显微镜固定如一体, 然后再安置在床身上, 则干涉仪对机床变形引起的误差就可以自动校正。实际上, 不可能使固定棱镜与固定测头完全重合, 只能使它们保持在同一水平面内, 使固定棱镜顶点在光轴上的投影与固定测头重合。因此, 干涉仪只能校正床身垂直方向变形引起的误差。工件在移动过程中, 机床变形主要是重力变形, 所以变形主要是在垂直方向。因此, 对垂直方向形变误差的自动校正仍能校正形变误差的主要部分。我们在一台车床上作了一个测量 200 毫米刻尺的实验, 未采取自动校正时, 发现形变误差可达 5 微米。采取自动校正后, 测量误差为 ± 0.5 微米。实验是在温度波动 $1 \sim 2^\circ$ 条件下进行的, 而且干涉仪两臂相对振动振幅保持在 0.2 微米左右。在上述情况下, 形变误差就不是主要的了。后来, 又在一米长刻机上直接测量了剩余的形变误差, 在工作台移动 800 毫米的行程内, 计数器跳动在一个数 (即 $1/8\lambda$) 以内。

九、回光的影响及其消除

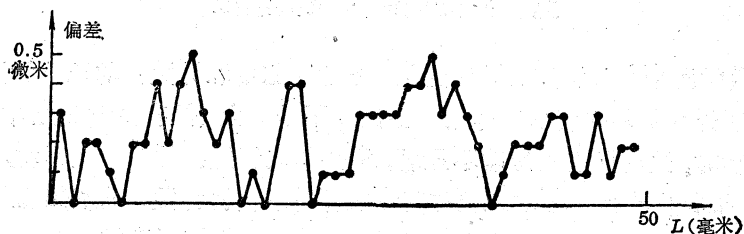
实验表明, 散射回来进入激光器的回光, 对激光的稳定和计数器的正确计数有严重影响。回光的影响往往通过仪器的振动而起作用。当回光不是太大 (但有少量回光), 仪器振动较小或者工作台不移动时, 这时回光的影响不显著, 稳频器电表的指针能静止不动, 计数器也能正确显示。这时, 如果将仪器稍加振动, 电表指针就会频频抖动, 计数器也将混乱计数, 工作台移动时也出现类似的现象。这时, 将少量的回光消除后, 一切就恢复正常。这一少量的回光, 眼睛观察不出来, 而且当仪器静止不动时, 又不产生影响, 所以不易发觉。可是当工作台移动或振动时, 它就产生错误计数。

为了消除回光的影响, 在干涉仪中, 光束不通过棱镜顶点, 使得入射光束和反射光束在空间有一平移量 d , 在我们的实验中 $d = 20$ 毫米, 光斑直径 $5 \sim 6$ 毫米, 这时干涉仪如果调整不当或使光斑有一部分射在棱线上, 产生较大的散射光, 或是由于多次反射的结果, 有少量回光进入激光器, 干涉仪就不能正常工作。为了避免多次反射产生的回光, 我们使通过棱镜的入射光束和反射光束处在垂直平面内, 而分光镜的法线处在水平方向。

在上述情况下,将棱镜的相对位置移到激光半腔长(110毫米)的奇数倍的地方,对环境进行冲击,使干涉仪两臂产生一个振幅为1~2微米左右的振动。这个振动由可逆计数器显示。当振动停止后,计数器显示的数目复原,有时能差一个脉冲,但反复冲击后,并不出现累计。

将此干涉仪安装在昆明机床厂出产的一米长刻机上,当工作台每移动1毫米后,根据计数器的显数,人工操作工作台反复进行微动,至校正丝杆的误差后再停止,这时启动电机,带动刀架对工作台上的玻璃尺进行刻划,在起刀、落刀、刻划、再起刀,然后关闭电机的整个过程中,可以通过计数器观察到干涉仪的两臂在发生振动。当电机关闭后,振动立即就停止了。这时计数器显数复原,毫米位以下的数值全显示为零或差0.1微米。对一根49毫米的玻璃尺,刻划结果如下:

名义尺寸 (毫米)	偏 差 (微 米)	名义尺寸 (毫 米)	偏 差 (微 米)	名义尺寸 (毫 米)	偏 差 (微 米)	名义尺寸 (毫 米)	偏 差 (微 米)
0	0	13	+0.3	26	+0.3	39	+0.2
1	+0.3	14	+0.2	27	+0.3	40	+0.2
2	0	15	+0.3	28	+0.3	41	+0.2
3	+0.2	16	0	29	+0.3	42	+0.3
4	+0.2	17	+0.1	30	+0.4	43	-0.3
5	+0.1	18	0	31	+0.4	44	+0.1
6	0	19	+0.2	32	+0.5	45	+0.1
7	+0.2	20	+0.4	33	+0.3	46	+0.3
8	+0.2	21	+0.4	34	+0.4	47	+0.1
9	+0.4	22	0	35	+0.3	48	+0.2
10	+0.2	23	+0.1	36	+0.2	49	+0.2
11	+0.4	24	+0.1	37	0		
12	+0.5	25	+0.1	38	+0.1		



在上述几率误差中,应该还包含有刀架运动的重覆性误差。没有发现显明的累计误差。实验中采用的可逆计数器是我厂一米激光测长机中的长度显示器,它可以分别以 $\lambda/8$ 和0.1微米为单位进行显示,但不负责对波长进行温度、气压修正。上述刻划后的测量结果是304所给出的。

先后将一根200毫米的玻璃刻尺和密云机床厂出产的一根一米金属线纹尺(NO6983)安装在此长刻机上进行重覆性实验。由于干涉仪安装在长刻机上,占去了一定位置,实验长度只达655毫米。实验是如下进行的:

先将起始线被光电显微镜瞄准,将计数器复零。然后用丝杆移动工作台(用电机带动,或用手摇动),使要检验的终止线靠近光电显微镜。再用手微动工作台,使终止线被光电显微镜瞄准并且消除计数器的空回后停止。这时记下计数器显示的数字,然后反向移动工作台,使起始线再次被光电显微镜瞄准,观察计数器显示数是否归零。

结果如下:(未进行温度、气压修正)

玻璃刻尺 室温 $T=22.8^{\circ}\text{C}$ $P=751.5$ 毫米汞柱 显示单位: 0.1 微米			
进 程	行 程	0 米刻线处显示值	200 毫米处显示值
正	0→200 毫米	0	200.0052
反	0→200 毫米	0	200.0052

金属刻尺 室温 $T=28.2^{\circ}\text{C}$ $P=757$ 毫米汞柱 显示单位: $\lambda/8$			
过 程	行 程	0 米刻线处显示值	655 毫米处显示值
正	0→655 毫米	0	8281108
反	0→655 毫米	0	8281108

实验结果同样表明:在整个测量过程中,在归零方面没有由于长度增加而累计的误差。通过上述实验,我们认为回光的影响实际上已经消除了。对上述长度显示值加以温度气压修正后,就是二分划线间当时的实际长度。

对 655 毫米的长度完成正反一次测量,在丝杆传动的情况下需要 5~6 分钟左右。我们的实验是在没有恒温的条件下进行的,在室温起伏很大的情况下,当工作台返回使起始线再度被光电显微镜瞄准时,计数器显示值不再为零,通过示波器上光点的极坐标与计数器显示数的对应关系,可以校核出记数是正确的,不能归零的原因是系统在测量时间内已经发生了变化。为了测量出长度的瞬时值,移动速度当然是越快越好。但是,实验指出,当室温基本稳定后,在测量过程中系统来不及变化,例:

1973 年 8 月 3 日,下午 1:20 开机。

时 间	室 温 ($^{\circ}\text{C}$)	气 压 (毫米汞柱)
1:20	28.3	747
2:00	28.3	747
2:35	28.3	747
2:45	28.3	747
4:00	28.4	747.5

刻尺测量时间: 3:50~4:00

$T=28.4^{\circ}\text{C}$ $P=747.5$ 毫米汞柱 显示单位: 0.1 微米

过 程	行 程	0 刻线处显示值	655 毫米处显示值
正	0→655 毫米	0	655.0557
反	0→655 毫米	1	655.0557

1973年8月6日,上午7:30开机。

时 间	7:30	14:15	14:45	14:53	14:58	15:30	15:35	15:45	16:00	16:05	16:15
室温(°C)	27.0	28.1	28.2	28.2	28.2	28.2	28.2	28.2	28.2	28.2	28.2
气 压 (毫米汞柱)		757.5	757	757	757	757	757	757	757	757	757

显示单位: $\lambda/8$

时 间	过 程	行 程 (毫米)	0 刻线处显示值	655 毫米刻线处显示值
14:45~14:58	正	0→655	0	8281104
	反	0→655	0	8281104
15:30~15:45	正	0→655	0	8281109
	反	0→655	1	8281109
16:00~16:15	正	0→655	0	8281108
	反	0→655	0	8281108

测量瞬时值的几率误差小于 0.05 微米

在上述室温条件下, 尺子温度的不确定性和其他原因引起的长度测量值的不确定范围为 ± 0.2 微米。以 0.1 微米为单位显示时, 测量得的瞬时值的温度气压修正以 $T=20^{\circ}\text{C}$, $P=757$ 毫米汞柱为基准。即在此气象条件下的显示值不需修正。由于单位换算过程中的近似计算带来的误差在一米内可达 0.2 微米, 再加上尺子在测量温度下的线胀系数未知, 所以在计算长度测量值的不确定范围时, 以 0.1 微米为单位的显示数未被采用。

一般情况下, 镍钢尺的线胀系数 $\alpha=11.5 \times 10^{-6}$ 。当对以 0.1 微米为单位的显示值进行温度气压修正后, 得出 $T=20^{\circ}\text{C}$ 时, 0 到 655 毫米二分划线间的长度为:

$$L=654.9997 \text{ 毫米}$$

$T=20^{\circ}\text{C}$, $P=760$ 毫米汞柱时, $\frac{\lambda}{8}=0.07910248$ (微米), 对以 $\frac{\lambda}{8}$ 为单位的显示数进行温度、气压修正后,

$$L=(655.0000 \pm 0.0002) \text{ 毫米}$$

整个实验过程中, 对环境温度的要求和防振条件不是十分苛刻的。因此, 此干涉仪还应该能够应用到坐标镗床或者其它比较精密的机床上。目前, 我厂正将此干涉仪应用到激光定位光刻机上试制精密刻尺。