

光学综合应用实验

物理测量，根据测量对象的不同，采用简单、实用的测量方法，关键问题是测量方法要能满足测量精度要求，本实验将常用的光学加电子技术测量实验装置有机的组合在一起，以利于学生较全面了解的诸多实验方法，通过对多种不同实验方法的使用比较，从中得出最适合于测量对象的实验方法，启发学生在遇到新实验、新课题时，学会多动脑筋、从不同的角度考虑分析问题，从而总结出解决问题的最佳方法。

在下面一系列实验中，我们要研究。实验的主要内容是：

实验 1：用多种方法测量微小的长度变化量

实验 2：用光杠杆测量微小的长度变化。

实验 3：双光栅测量微弱振动位移量实验。

实验 4：光的等厚干涉测量

实验中采用 FB2018 型光学特性综合应用实验装置(见附录 I)，示波器相关技术指标见前文实验设备介绍部分。

实验 1：用多种方法测量微小的长度变化量

【实验内容】

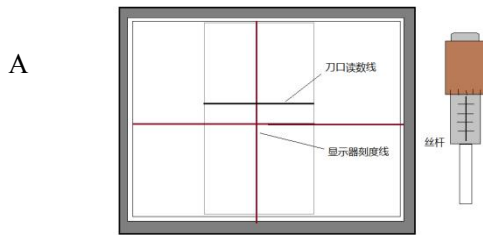
1. 先将实验系统安装调整到位，把各传感器连接线接到实验仪的相应插座，接通电源开关。
2. 利用千分尺，把弹簧调节到适当位置后，把千分尺的读数调节到零位（或接近零的极小数值，记下初读数）；注意要通过保护螺栓调节。这时候，其它几个传感器与弹簧下面的平台联动，同样要预先调节到零位（或处于初值位置）。
3. 调电子显微系统的千分尺使显示屏的刻度线与图形(线)重合；
4. 把弹簧秤（压阻力敏传感器）指示仪表微伏表读数调到零；
5. 把霍尔传感器指示仪表微伏表读数调到零；
6. 利用千分尺，把弹簧调节到一个新的位置，记下千分尺的读数变化量，即是弹簧的伸长量；显示屏的刻度线与图形(线)不重合了；
7. 调电子显微系统的千分尺使显示屏的刻度线与图形(线)重新重合，记录千分尺的读数变化量；
8. 观察弹簧秤、霍尔传感器的读数变化值，与弹簧的伸长量比较，于是可以得到弹簧秤和霍尔传感器的灵敏度，于是完成了这两款传感器的定标；
9. 这样，这几种传感器就可以用于微小长度测量实验了。

测量数据记录表

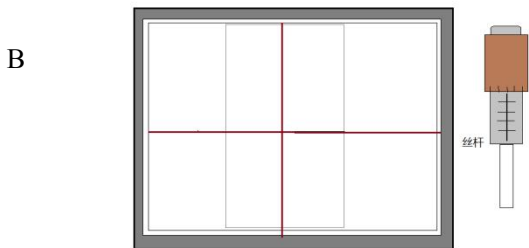
	初读数	1	2	3	4	5
千分尺(mm)						
弹簧秤(μV)						
霍尔传感器(μV)						
CCD 电子显微系统的千分尺(mm)						

CCD 电子显微镜的测量说明：

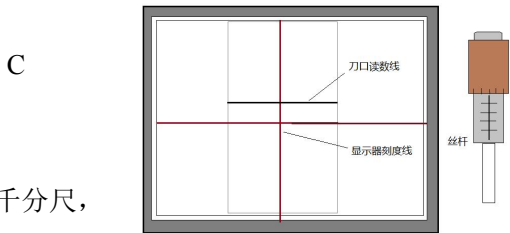
1:调节好电子显微镜的聚焦，使读数线清楚，一般情况下，读数线与显示器的刻度线是不重合的，如图 A..



2: 调节千分尺，使读数线与显示器的刻度线重合，记录下丝杆的读数 XX.XXX,作为开始数据。见图 B.



3: 加上压力，弹簧产生形变，读数线与显示器的刻度线再次产生了分离，见图 C



4: 重新调节千分尺，使读数线与显示器的刻度线再次重合，读数 YY.YYY.

将 YY.YYY—XX,XXX,取绝对值，数据即加压力引起变形长度。

实验 2:用光杠杆测量微小的长度变化

本实验介绍了一种测量微小长度变化的实验方法。通过本实验可以看到，以对称测量法消除系统误差的思路在其他类似的测量中极具普遍意义。在实验装置上的光杠杆镜放大法，由于它的性能稳定、高精度，而且是线性放大，所以在设计各类测试仪器中得到广泛的应用。

【实验原理】

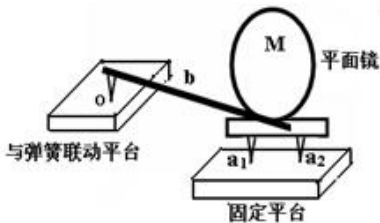


图1 光杠杆镜的示意图

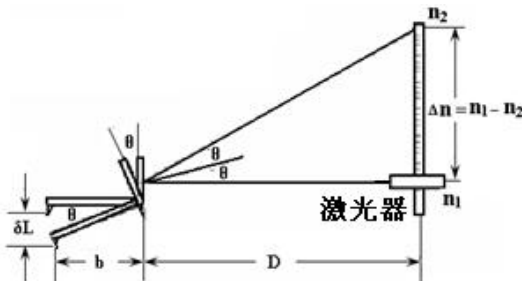


图2 光杠杆激光投影系统的工作原理图

本实验在此用来测定弹簧的微小伸长量，与实验一相同，利用千分尺控制调节弹簧的伸长，当变化量非常微小时，为了精确测量这一微小变化量 ΔL ，用常规的测量方法很难精确测量，需要采用一种合适的测量方法。本实验将采用“光杠杆”放大法来测定这一微小的长度改变量 ΔL 。

光杠杆镜如图 1 所示，其平面镜下面的两个脚 a_1, a_2 作为支点放在实验系统的固定小平台上，光杠杆镜的横杆 b （长度可调节）的末端 O 作为支点放在实验系统与弹簧联动的移动小平台上，弹簧长度的改变，小平台跟随上下同步移动，即小平台的上下位移量即是弹簧的伸长量。图 2 是光杠杆镜测微小长度变化量的原理图。当 O 支点随平台向下移动，将改变 M 平面镜的法线的方向，使得调节好的位于图右侧的激光器射出水平横线投射至标尺上位置的读数为 n_1 (以激光水平横线边缘对标尺刻度)；光杠杆镜的位置变为虚线所示，此时水平横线在标尺的读数变为 n_2 。这样，弹簧的微小伸长量 ΔL ，对应光杠杆镜的角度变化量 θ ，而对应的标尺读数变化则为 $\Delta n = n_1 - n_2$ 。由光路可逆可以知道， Δn 对光杠杆镜的张角应为 2θ 。从图 2 中用几何方法可以得出：

$$\tan\theta \approx \theta = \frac{\Delta L}{b} \quad (1)$$

$$\tan 2\theta \approx 2\theta = \frac{|n_2 - n_1|}{D} = \frac{\Delta n}{D} \quad (2)$$

将 (1) 式和 (2) 式联立后得：

$$\Delta L = \frac{b}{2D} \times \Delta n \quad (3)$$

式中 $\Delta n = |n_2 - n_1|$ ，相当于光杠杆镜的长臂端 D 的位移。

其中的 $\frac{2D}{b}$ 叫做光杠杆镜的放大倍数，由于 $D \gg b$ ，所以 $\Delta n \gg \Delta L$ ，从而获得对微小量的线性放大，提高了 ΔL 的测量精度。

这种测量方法被称为放大法。由于该方法具有性能稳定、精度高，而且是线性放大等优点，所以在设计各类测试仪器中有着广泛的应用。

【实验内容】

1. 如图 1 所示，把光杠杆镜 M 放在 FB2018 实验平台上，把光杠杆镜面法线调到水平。在平面镜正对面约 1m 的地方安放标尺(连激光器)，调激光器合适的高度，与光杠杆镜基本等高。
2. 缓缓旋转激光器调焦帽，使投影直线光在标尺上投影线最细，然后转动激光器使横线水平，仔细调节，横线边缘对准刻度尺的某刻度，读取该读数 n_1 ，记录到表格中。此时必须保持激光器的位置不变，直至测量过程结束。
3. 然后通过千分尺，使弹簧长度逐渐伸长，每调节 0.200mm，读取一次数据，这样依次可以得到 $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7, n_8$ ，这是弹簧拉伸过程的读数变化。
4. 测量光杠杆镜前后脚距离 b 。把光杠杆镜的三只脚在白纸上压出凹痕，用尺画出二前脚的连线，再用游标卡尺量出后脚到该连线的垂直距离；
5. 测量光杠杆镜镜面到激光器附标尺的距离 D 。用钢卷尺量出光杠杆镜面到激光器附标尺的距离，作单次测量，并估计误差。

【注意事项】

1. 在测量弹簧伸长变化的整个过程中，不能碰动激光器及其安放的桌子，否则需重新开始测量读数。
2. 在测量过程中不能碰到光杠杆镜。
3. 激光器有一定的调焦范围，不能过分用力拧动调焦帽。
4. 由 $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7, n_8$ 得到 $\overline{\Delta n}$ 应注意方法

实验 3: 光的等厚干涉测量

光的干涉实验，在光学发展史上，证实了光的波动性。当劈尖的上下表面有一很小的倾

角时，由同一光源发出的光，经玻璃上下表面反射后在上表面附近相遇时产生干涉，并且厚度相同的地方形成同一干涉条纹，这种干涉就叫等厚干涉。其中牛顿环和劈尖是等厚干涉两个最典型的例子。光的等厚干涉原理在生产实践中具有广泛的应用，它可用于检测透镜的曲率，测量光波波长，精确测量微小长度、厚度和角度；检验物体表面的光洁度、平整度等。

【实验原理】

1. 空气劈尖：

两块平板玻璃，使其一端平行相接，另一端夹入一薄纸（或待测样品），这样两块平板玻璃之间形成了一个具有一微小倾角的劈形空气薄膜，这一装置就称为劈尖。如图 1（a）所示。

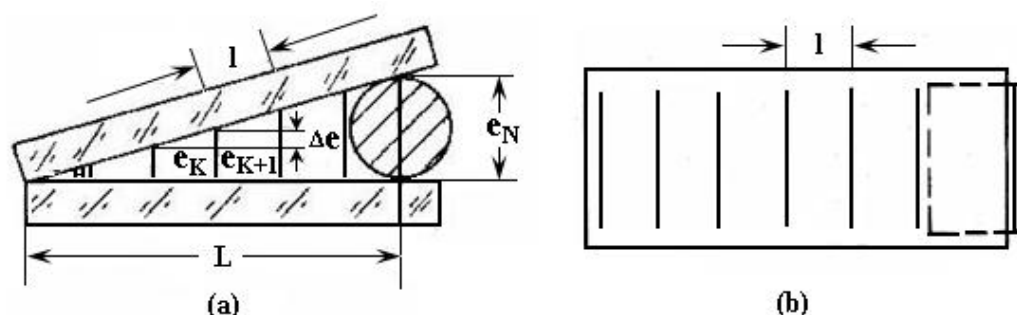


图1 空气劈尖干涉示意图

当波长 $\lambda = 635\text{nm}$ 激光束经过滤波装置（完全消除了杂散波的干扰，使观察到的干涉条纹十分清晰，便于观察测量与计数）、扩束，再经 45° 半反镜反射垂直照射到劈尖装置上，空气薄膜上下表面反射光产生干涉，从而形成明暗交替、等间隔的等厚干涉条纹，如图 1(b) 所示。其中第 K 级暗纹的光程差满足：

$$\delta = 2e_k + \frac{\lambda}{2} = (2K+1)\frac{\lambda}{2} \quad (K = 0, 1, 2, \dots)$$

当 $K = 0$ 时， $e_k = 0$ 即为两玻璃接触端，即劈棱。

设薄纸处干涉级次为 N ，由于两相邻暗纹间的厚度差为： $\Delta e = \lambda/2$

则薄纸厚度为： $e_N = N \cdot \lambda/2$

所以只要测出干涉图样中总的条纹数 N ，即可计算出薄纸的厚度。但实际上 N 数值往往很大，不易数出，通常只要测出 10 条条纹间隔 L_{10} 和玻璃片交线(劈棱)到薄纸边缘的距离

L ，就可算出总的条纹数：
$$N = \frac{10}{L_{10}} \times L$$

所以：
$$e_N = 5\lambda \times \frac{L}{L_{10}} \quad (1)$$

已知 λ ，即可求出 e_N 。

采用现代化的视频技术，应用 CCD 图象显示，既可以演示又可以测量，进行测量基本精度 0.01mm 。类似传统的测微目镜。

【实验内容】

首次使用仪器，应进行 CCD 聚焦的调节，调节后固定 CCD 聚焦螺丝，后次使用一般不

提倡松动聚焦螺丝。

使用仪器应进行对焦螺丝的调节，使图像清晰。

半反射镜的调节，理论上应使镜面斜 45° 正对光源，但实际调节中可以大致符合，以效果最佳为拟。

首次使用仪器，应进行 CCD 成象方向的调整：使预定顶标尺的方向与图形运动方向垂直

以显示器定标线为准，旋转移动轮，读下显示窗的数据，进行相关实验。

1. 调整并观测劈尖的干涉图样：

(1) 把两块玻璃片一端平行相接，并使下玻璃片略微向前伸出，两玻璃片的交线与端线平行，在另一端夹入平直薄纸（或细丝），使薄纸（或细丝）的边线尽量与端线平行，并让玻璃片边线与显示屏标尺平行，放于物镜正下方。

(2) 打开激光器，调节好光路，使滤波、扩束后的激光束照亮 45° 角半反射镜；

(3) 转动显微镜前的 45° 角半反射片，使得显示屏中看到的视场均匀明亮，自下而上调节电子显微镜直至观察到清晰的干涉图样（明暗相间的平行线），移动劈尖使条纹与叉丝的竖线平行，并消除视差。

(4) 多次测量 10 条条纹的间距 l_{10} ：以某一条纹为 l_x ，记下显示屏的读数，数过 10 条条纹测出 l_{x+10} ，则 $l = |l_x - l_{10+x}|$ ，重复测量四次，求出平均值 $\bar{l}$ 。

(5) 测量单位长度的条纹数，公式为 $\frac{\Delta n}{\Delta l} = \frac{10}{\bar{l}} = k$

(6) 用米尺或其它工具测出劈尖干涉区的总长度 L ，则总条纹数：

$$N = kL = L \cdot \frac{\Delta n}{\Delta l} = L \cdot \frac{10}{\bar{l}}$$

(7) 所测微小厚度：
$$e = N \cdot \frac{\lambda}{2}$$

【数据处理】

1. 测量薄片的厚度

$L =$ mm $\lambda = 635\text{nm}$ ，仪器误差： $\Delta = 0.5\text{mm}$

2. 得出结果表达式

实验 4: 双光栅测量微弱振动位移量实验

精密测量在自动化控制的领域里一直扮演着重要的角色，其中光电测量因为有很好的精密性与准确性，加上轻巧、无噪音等优点，在测量的应用上常被采用。作为一种把机械位移信号转化为光电信号的手段，光栅式位移测量技术在长度与角度的数字化测量、运动比较测量、数控机床、应力分析等领域得到了广泛的应用。

多普勒频移物理特性的应用也非常广泛，如医学上的超声诊断仪，测量海水各深度层的海流速度和方向、卫星导航定位系统、乐器的调音装置等。

双光栅微弱振动测量仪在力学实验项目中用作音叉振动分析、微弱振幅（位移）测量和光拍研究等。

【实验原理】

1. 位移光栅的多普勒频移：

多普勒频移是指光源、接收器、传播介质或中间反射器之间的相对运动所引起的接收器接收到的光波频率与光源频率发生的变化，由此产生的频率变化称为多普勒频移。

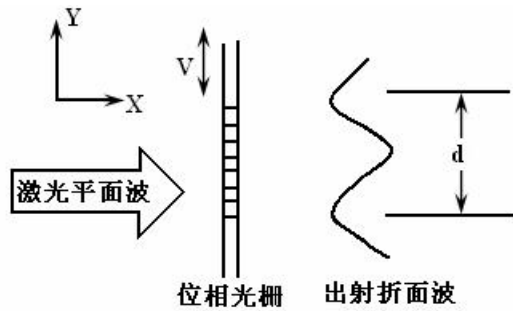


图1 出射的褶曲波阵面

由于介质对光传播时有不同的相位延迟作用，对于两束相同的单色光，若初始时刻相位相同，经过相同的几何路径，但在不同折射率的介质中传播，出射时两束光的位相则不相同，对于位相光栅，当激光平面波垂直入射时，由于位相光栅上不同的光密和光疏媒质部分对光波的位相延迟作用，使入射的平面波变成出射时的褶曲波阵面，见图1。

激光平面波垂直入射到光栅，由于光栅上每条缝自身的衍射作用和每条缝之间的干涉，通过光栅后光的强度出现周期性的变化。在远场，我们可以用大家熟知的光栅衍射方程即(1)式来表示主极大的位置：

$$d \sin \theta = \pm K \lambda \quad K = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

式中：整数 K 为主极大级数， d 为光栅常数， θ 为衍射角， λ 为光波波长。

如果光栅在 y 方向以速度 v 移动，则从光栅出射的光的波阵面也以速度 v 在 y 方向移动。因此在不同时刻，对应于同一级的衍射光，它从光栅出射时，在 y 方向也有一个 vt 的位移量，见图2。

这个位移量对应于出射光波位相的变化量为 $\Delta\phi(t)$ ：

$$\Delta\phi(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta s = \frac{2\pi}{\lambda} v \cdot t \cdot \sin \theta \quad (2)$$

把(1)代入(2)得：

$$\Delta\phi(t) = \frac{2\pi}{\lambda} v \cdot t \frac{K\lambda}{d} = 2K\pi \frac{v}{d} \cdot t = K\omega_d \cdot t \quad (3)$$

式中：
$$\omega_d = 2\pi \frac{v}{d}$$

若激光从一静止的光栅出射时；光波电矢量方程为：

$$E = E_0 \cos \omega_0 t$$

而激光从相应移动光栅出射时，光波电矢量方程则为：

$$E = E_0 \cos[(\omega_0 t + \Delta\phi(t))] = E_0 \cos[(\omega_0 + k\omega_d)t] \quad (4)$$

显然可见，移动的位相光栅 K 级衍射光波，相对于静止的位相光栅有一个多普勒频移。如图3所示。

$$\omega_n = \omega_0 + k \cdot \omega_d$$

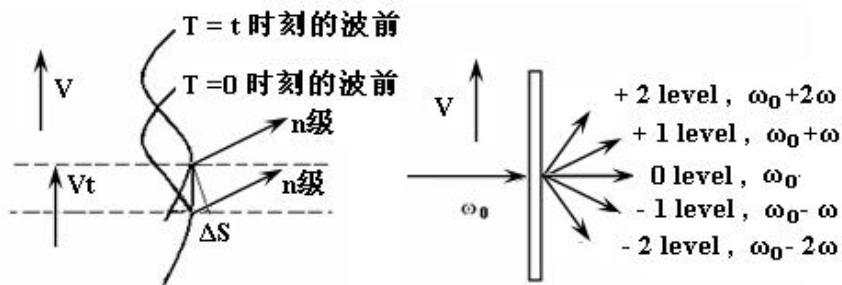


图2 衍射光线在Y方向上的位移量 图3 移动光栅的多普勒频移

2. 光拍的获得与检测:

光的频率高达 10^{14} Hz 为了在光频 ω_0 中检测出多普勒频移量, 必须采用“拍”的方法, 即要把已频移的和未频移的光束平行迭加, 以形成光拍。由于拍频较低, 容易测量, 通过拍频即可检测出多普勒频移量。本实验形成光拍的方法是采用两片完全相同的光栅平行紧贴, 一片B静止, 另一片A相对移动。激光束垂直穿过双光栅后所形成的衍射光, 即为两种光束的平行迭加。其形成的第K级衍射光波的多普勒频移如图4所示。

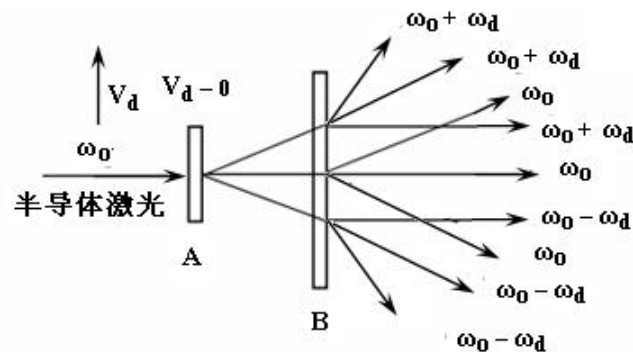


图4 K级衍射光波的多普勒频移

光栅A按速度 v_A 移动, 起频移作用, 而光栅B静止不动, 只起衍射作用, 故通过双光栅后射出的衍射光包含了两种以上不同频率成分而又平行的光束。由于双光栅紧贴, 激光束具有一定宽度, 故该光束能平行迭加, 这样直接而又简单地形成了光拍。如图5所示。

当激光经过双光栅所形成的衍射光叠加成光拍信号。光拍信号进入光电检测器后, 其输

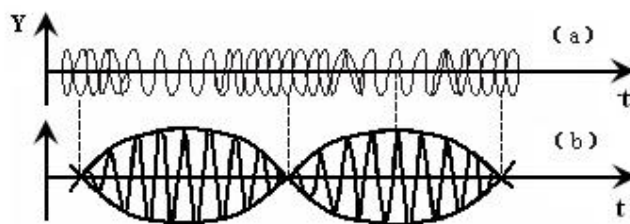


图5 频差较小的二列光波叠加形成“拍”

出电流可由下述关系求得:

光束1:

$$E_1 = E_{10} \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_1)$$

光束2:

$$E_2 = E_{20} \cdot \cos[(\omega_0 + \omega_d)t + \varphi_2] \quad (\text{取 } K = i) \quad (5)$$

$$I = \xi(E_1 + E_2)^2$$

$$\begin{aligned} \text{光电流: } &= \xi \{ E_{10}^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_1) + E_{20}^2 \cos^2[(\omega_0 + \omega_d)t + \varphi_2] \\ &+ E_{10} \cdot E_{20} \cos[(\omega_0 + \omega_d - \omega_0)t + (\varphi_2 - \varphi_1)] \\ &+ E_{10} \cdot E_{20} \cos[(\omega_0 + \omega_d + \omega_0)t + (\varphi_2 + \varphi_1)] \} \end{aligned} \quad (6)$$

其中 ξ 为光电转换常数。

因光波频率 ω_0 甚高，在式(6)第一、二、四项中，光电检测器无法反应，式(6)第三项即为拍频信号，因为频率较低，光电检测器能够作出有效的响应。其产生的光电流为：

$$\begin{aligned} i_s &= \xi \{ E_{10} \bullet E_{20} \cos[(\omega_0 + \omega_d - \omega_0) \bullet t + (\varphi_2 - \varphi_1)] \} \\ &= \xi \{ E_{10} \bullet E_{20} \cos[\omega_d \bullet t + (\varphi_2 - \varphi_1)] \} \end{aligned}$$

拍频 $F_{\text{拍}}$ 即为：
$$F_{\text{拍}} = \frac{\omega_d}{2\pi} = \frac{v_A}{d} = v_A \bullet n_0 \quad (7)$$

其中 $n_0 = \frac{1}{d}$ 为光栅密度，在本实验仪器中： $n_0 = 1/d = 100 \text{条}/1\text{mm}$

3. 微弱振动位移量的检测：

从式(7)可知， $F_{\text{拍}}$ 与光频率 ω_0 无关，且当光栅密度 n_0 为常数时，只与光栅移动速度 v_A 成正比，如果把光栅粘在音叉上，则 v_A 是周期性变化的。所以光拍信号频率 $F_{\text{拍}}$ 也是随时间而变化的，微弱振动的位移振幅为：

$$A = \frac{1}{2} \int_0^{T/2} v(t) dt = \frac{1}{2} \int_0^{T/2} \frac{F_{\text{拍}}(t)}{n_0} dt = \frac{1}{2n_0} \int_0^{T/2} F_{\text{拍}}(t) dt \quad (8)$$

式中 T 为音叉振动周期， $\int_0^{T/2} F_{\text{拍}}(t) dt$ 表示 $T/2$ 时间内的拍频波的个数。所以只要测得拍频波的波数，就可得到微弱振动的位移振幅。

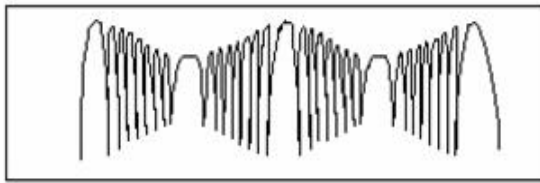


图6 示波器显示的拍频波示意图

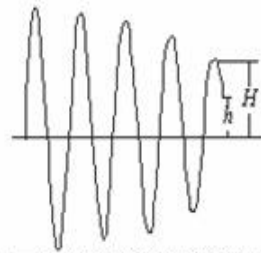


图7 $T/2$ 段内的波形数计算

波形数由完整波形数、波的首数、波的尾数三部分组成，根据示波器上显示计算。波形的分数部份为不是一个完整波形的首数及尾数，需在波群的两端，可按反正弦函数折算为波形的分数份，即波形数=整数波形数+波的首数和尾数中满 $1/2$ 或 $1/4$ 或 $3/4$ 个波形

分数部份 $+\frac{\sin^{-1} a}{360^\circ} + \frac{\sin^{-1} b}{360^\circ}$ 式中 a, b 为波群的头、尾幅度和该处对应完整波形的振幅之比。波群指 $T/2$ 内的波形，分数波形数若满 $1/2$ 个波形为 0.5 ，满 $1/4$ 个波形为 0.25 ，满 $3/4$ 个波形为 0.75 。

例题：如图7在 $T/2$ 内，整数波形数为4，尾数分数部分已满 $1/4$ 但不满 $1/2$ 波形，所以：

$$\begin{aligned} \text{波形个数} &= 4 + 0.50 - \frac{\sin^{-1}(h/H)}{360^\circ} = 4.50 - \frac{\sin^{-1}(0.6)}{360^\circ} \\ &= 4.50 - \frac{36.87^\circ}{360^\circ} = 4.50 - 0.10 = 4.40 \end{aligned} \quad (9)$$

$$A = \frac{1}{2} \int_0^{T/2} v(t) dt = \frac{1}{2} \int_0^{T/2} \frac{F_{\text{拍}}(t)}{n_0} dt = \frac{1}{2n_0} \int_0^{T/2} F_{\text{拍}}(t) dt$$

对应的振动位移为:

$$= \frac{1 \times 10^{-3}}{2 \times 100} \times 4.40 = 2.20 \times 10^{-5} (\text{m})$$
(10)

【实验内容】

1. 预习《示波器的应用》相关内容，熟悉双踪示波器的使用方法。
2. 将示波器的 Y_1 、 Y_2 、X 外触发器插座用专用 Q9 同轴电缆接至双光栅微弱振动测量仪的 Y_1 、 Y_2 、X 的输出插座上，开启双踪示波器和双光栅微弱振动测量仪的电源。
3. 几何光路的调整：

调节激光器固定架的水平、垂直两维调节旋钮，使红色激光束通过静光栅、动光栅并让其中某一级衍射光正好落入硅光电池前面的小孔内。适当调节光电池架位置，然后锁紧光电电池架。调节驱动音叉的“功率调节”旋钮，使驱动电流读数约为 80mA，频率调节到 505Hz。一边细心调节激光器位移水平、垂直调节器，一边观察示波器，直到能在屏幕上看到清晰无重叠的拍频波。

4. 双光栅的调整：

轻轻敲击音叉，调节示波器，配合调节激光器输出功率(一般调节到最大即可)，调节静光栅位移调节器、找到清晰无重叠的拍频波即可。

5. 音叉谐振调节：

先调节“功率调节”旋钮，使驱动电流指示为 80mA 左右。接着先调节“频率粗调”旋钮，使信号源输出频率在 (505Hz) 附近，然后仔细调节“频率细调”旋钮，使音叉谐振。(调节时可以用手轻轻地接触音叉顶部，利用手的感觉，寻找使振动加强的调节方向。) 如果音叉谐振太强烈，可以逆时针调节“功率调节”旋钮，使音叉驱动电流适当减小一些，使示波器上观察到 $T/2$ 内光拍的波形个数为 15 个左右较为合适。记录此时音叉振动频率，屏上 $T/2$ 段内完整波的个数，(对于头、尾不足一个完整波形的部分，由于是正弦波，可以用反正弦把它折算为小数表示的波形个数进行统计。) 从而计算振动幅度的数值。

6. 测出外力驱动音叉时的谐振曲线：

固定“功率调节”旋钮位置，在音叉谐振点附近，仔细调节“频率微调”旋钮。测出音叉的振动频率与对应的信号振幅大小，频率间隔可以取 0.1Hz，选 8 个点，分别测出对应的波的个数，由公式(10)，计算出每个对应的振幅 A 值。

7. 保持信号输出功率、频率不变，逐一将被测微小细棒插入音叉的五个不同位置，(相当于改变配重物体的有效质量)，调节“频率”细调旋钮，研究谐振曲线的变化规律。

8. 保持信号频率不变，把输出功率调节旋钮逆时针旋到零，然后把输出功率调节在 5mA、15mA…… 研究输出功率对谐振曲线的变化趋势。

注：被测棒质量为 $(0.033\text{g} \pm 0.002\text{g}) / \text{个}$ 。

9. 把“功率调节”旋钮逆时针转到底，用手转动静光栅调节手柄，调节静光栅位移调节器

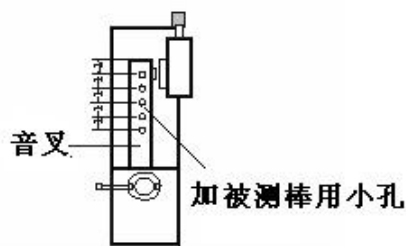


图9 在音叉上加被测棒示意图

上下移动，或用手轻轻敲击音叉，就可以在示波器上看到或在喇叭中听到双光栅的多普勒频移产生的拍频声波。音调随旋转运动速率而变，仔细试验，甚至可以模拟出一些动物的叫声。

（为了避免实验小组间相互干扰，本实验仪采用头戴式耳机进行演示）

【数据处理】

1. 求出音叉谐振时光拍信号的平均频率；
2. 求出音叉在谐振点时作微弱振动的位移振幅；
3. 在坐标纸上画出音叉的频率—振幅关系曲线；
4. 画出音叉叠加不同有效质量时的谐振曲线，并定性讨论其变化趋势。

附录 I FB2018 型光学特性综合应用实验装置使用说明

激光器：、 $\lambda = 635\text{nm}$, $0 \sim 3\text{mW}$

信号发生器： $f = 120 \sim 950\text{Hz}$, step 0.1Hz , 输出功率 $P = 0 \sim 650\text{mW}$ 连续可调，
对应音叉的驱动电流大约为： $0 \sim 150\text{mA}$ ；

音叉谐振频率： $f \approx 500\text{Hz}$

光栅常数： $d = \frac{1}{100}\text{mm}$ 。

可做实验内容：

1. 用千分尺控制和调节并测量弹簧的微小伸长量；
2. 用霍尔传感器测量弹簧的微小伸长量；
3. 用电子显微系统测量弹簧的微小伸长量；
4. 用光杠杆激光投影系统测量弹簧的微小伸长量。
5. 用弹簧秤（压阻力敏传感器）测量弹簧的微小伸长量；
6. 用等厚干涉法测量薄纸的厚度；
7. 用双光栅干涉法测量微米数量级的振幅数值；

技术参数：

1. 千分尺测量范围： $L = 25\text{mm}$ ，精度： $\Delta L = 0.004\text{mm}$ ；
2. 弹簧的劲度系数： $k \approx 0.85\text{N/m}$ $\lambda = 635\text{nm}$ ；
3. 压阻力敏传感器测量范围： $0 \sim 100\text{g}$ ，感量： 0.1g ；
4. 半导体激光器： $\lambda = 635\text{nm}$ ；
5. 用千分尺对弹簧伸长量进行准确调节和测定；
6. 用千分尺对霍尔传感器和压阻力敏传感器进行定标；
7. 光杠杆激光投影系统放大率 $30 \sim 40$ 倍。
8. 测量仪表：
 - (1) 霍尔电压（位移量）测量：四位半数显微伏表；
 - (2) 胡克定律（压阻力敏传感器电压）测量：三位半数显微伏表；
 - (3) 双光栅振动电流指示：三位半数显交流毫安表，可连续调节；
 - (4) 双光栅振动电流频率指示：五位数显表，输出频率可快、慢速调节。
 - (5) CCD 显微镜请参考所附说明书。