

自操作

演示实验

双光栅测量微弱振动位移 量

0.5 学时

小心激光！

一、前言

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着较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，测量海水各层深度的海流速度和方向、卫星导航定位系统、音乐中乐器的调音等。

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

二、实验目的

1. 了解利用光的多普勒频移形成光拍的原理并用于测量光拍拍频
2. 学会使用精确测量微弱振动位移的一种方法
3. 应用双光栅微弱振动实验仪测量音叉振动的微振幅

三、实验仪器

实验仪器：DHGS-1 型双光栅微弱振动测量仪、示波器

激光器： $\lambda=650\text{nm}$ ， $0\sim 5\text{mw}$

DDS 信号发生器： $20\text{Hz}\sim 100000\text{Hz}$ ， 0.001Hz 微调， $0\sim 1\text{w}$ 输出

音叉谐振频率： 500Hz 左右

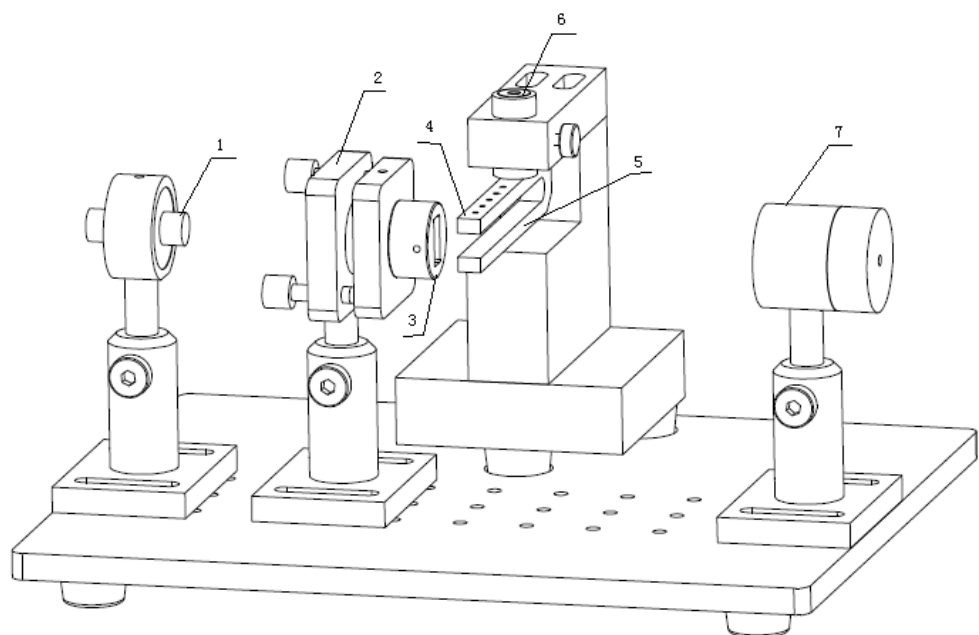


图 1 DHGS-1 实验平台

1-半导体激光器 2-静光栅调节架 3-静光栅 4-动光栅 5-音叉 6-音叉驱动器 7-光电传感器

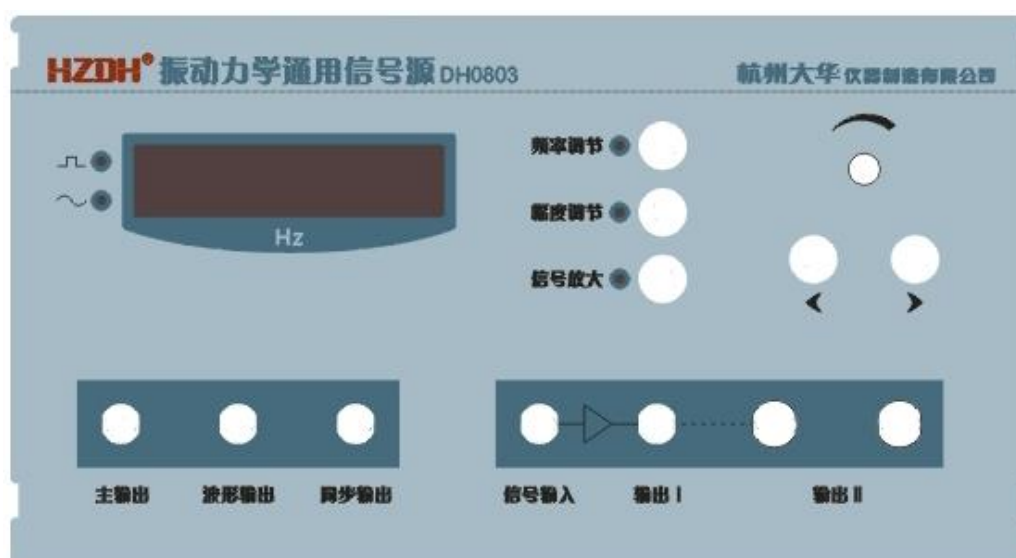


图 2 DHGS-1 测试仪面板

“频率调节”指示灯亮，表示可以用编码开关调节输出频率，编码开关下面的按键用于切换频率调节位。编码开关上的按键可用来切换正弦波和方波输出。正弦波输出频率范围是 $20 \sim 100000\text{Hz}$ ，方波的输出频率是 $20 \sim 1000\text{Hz}$ 。

“幅度调节”指示灯亮，表示可以用编码开关调节输出信号幅度，可在 $0 \sim 100$ 档间调节，输出幅度不超过 $V_{pp}=20\text{V}$ 。

“信号放大”指示灯亮，表示可以用编码开关调节信号放大倍数，可在 $0 \sim 100$ 档间调节，放大倍数不超过 55 倍。

“主输出”接音叉驱动器；“波形输出”可接示波器观察主输出的波形；“同步输出”输出频率同主输出相同，与主输出相位差固定的正弦波信号，作为观察拍频波的触发信号；“信号输入”接光电传感器；“输出 I”接示波器通道 1，观察拍频波；“输出 II”可接耳机。

四、实验原理

1. 位移光栅的多普勒频移

多普勒效应是指光源、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。

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

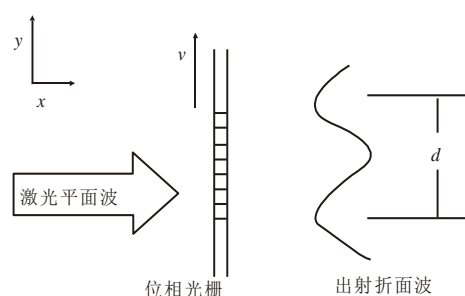


图 3 出射的褶曲波阵面

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 3。

激光平面波垂直入射到光栅，由于光栅上每缝自身的衍射作用和每缝之间的干涉，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射，它从光栅出射时，在 y 方向也有一个 vt 的位移量，见图 4。

这个位移量对应于出射光波位相的变化量为 $\Delta\phi(t)$

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

把(1)代入(2)得：

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

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 $\omega_s = \omega_0 + k\omega_d$ 的多普勒频移，如图 5 所示。

2. 光拍的获得与检测

光频率很高为了在光频 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互相平行迭加，以形成光拍。由于拍频较低，容易测得，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。激光通过双光栅后所形成的衍射光，即为两种以上光束的平行迭加。其形成的第 k 级衍射光波的多普勒频移如图 4 所示。

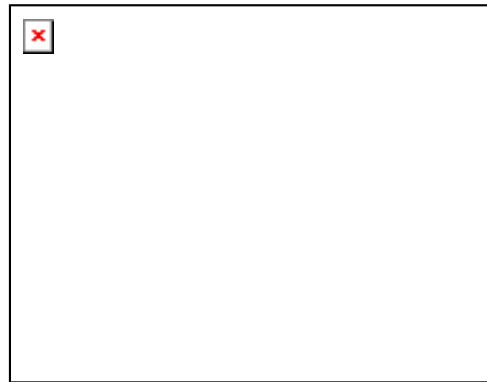


图 4 衍射光线在 y 方向上的位移量

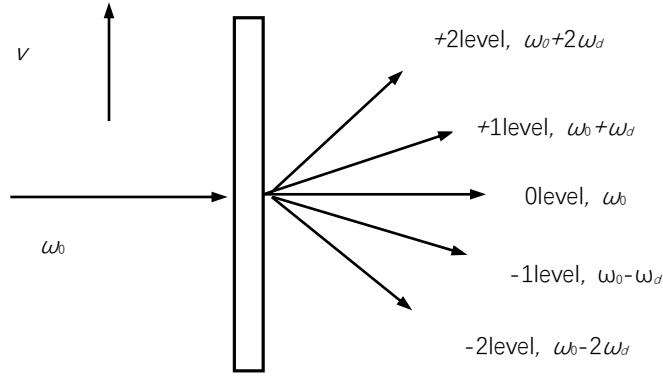


图 5 移动光栅的多普勒频率

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 6 所示。

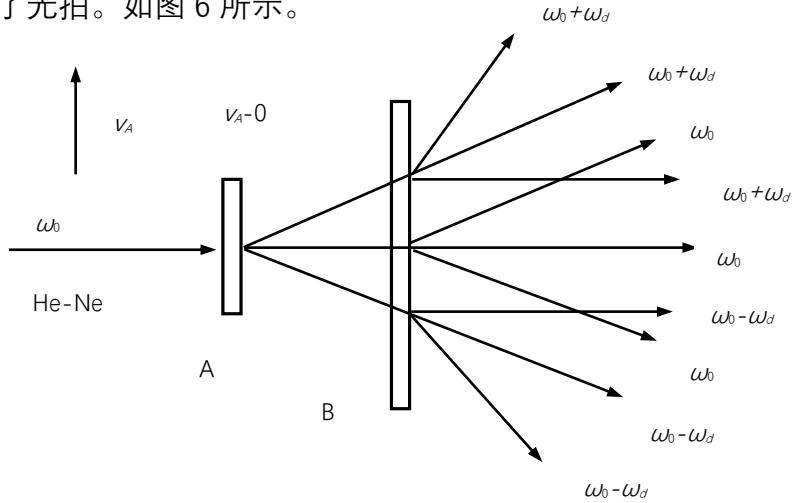


图 6 K 级衍射光波的多普勒频移

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，其输出电流可由下述关系求得：

光束 1： $E_1 = E_{10} \cos(\omega_0 t + \varphi_1)$

光束 2： $E_2 = E_{20} \cos[(\omega_0 + \omega_d)t + \varphi_2]$ (取 $k=i$)

光电流：

$$\begin{aligned}
 I &= \xi(E_1 + E_2)^2 \\
 &= \xi \{ E_{10}^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_1) + E_{20}^2 \cos^2[(\omega_0 + \omega_d)t + \varphi_2] \\
 &\quad + E_{10} E_{20} \cos[(\omega_0 + \omega_d - \omega_0)t + (\varphi_2 - \varphi_1)] \\
 &\quad + E_{10} E_{20} \cos[(\omega_0 + \omega_d + \omega_0)t + (\varphi_2 + \varphi_1)] \}
 \end{aligned} \tag{6}$$

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，光电检测器无法响应，式(6)第三项即为拍频信号，因为频率较低，光电检测器能做出相应的响应。其光电流为

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

拍频 $F_{\text{拍}}$ 即为：

$$F_{\text{拍}} = \frac{\omega_d}{2\pi} = \frac{v_A}{d} = v_A n_\theta \quad (7)$$

其中 $n_\theta = \frac{1}{d}$ 为光栅密度，本实验

$$n_\theta = 1/d = 100 \text{ 条/mm}$$

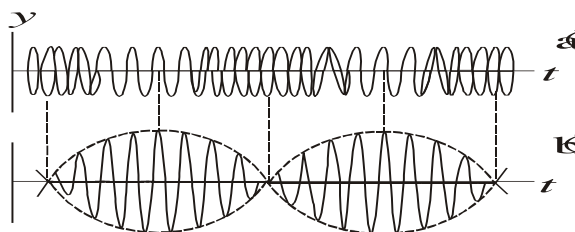


图 7 频差较小的二列光波叠加形成

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_θ 为常数时，只正比于光栅移动速度 v_A ，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：

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

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，就可得到较弱振动的位移振幅。

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部份，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 为波群的首、尾幅度和该处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 $1/4$ 波形， $b = h/H = 0.6/1 = 0.6$ 。

所以

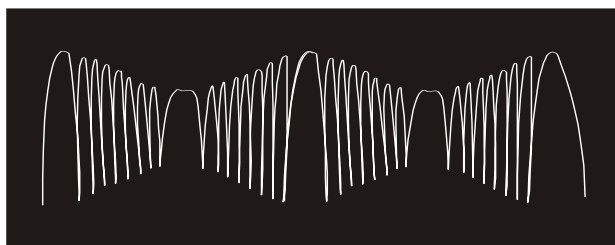


图 8 示波器显示拍频波形

$$\begin{aligned}\text{波形数} &= 4 + 0.25 + \frac{\sin^{-1} 0.6}{360^\circ} = 4.25 + \frac{36.8^\circ}{360^\circ} \\ &= 4.25 + 0.10 = 4.35\end{aligned}$$

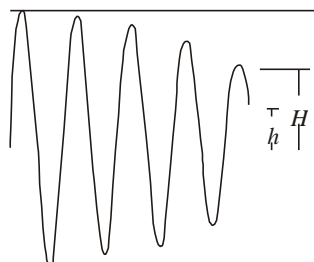


图9 计算波形数

五、实验内容

2. 将示波器的 CH1 通道接至测试仪面板上的“输出 I”；示波器的 CH2 通道接“同步输出”，选择此通道为触发源；音叉驱动器接“主输出”；光电传感器接“信号输入”，注意不要将光电传感器接错以免损坏传感器。

3. 几何光路调整。

实验平台上的“激光器”接“半导体激光电源”，将激光器、静光栅、动光栅摆在一条直线上。打开半导体激光电源，让激光穿越静、动光栅后形成一竖排衍射光斑，使中间最亮光斑进入光电传感器里面，调节静光栅和动光栅的相对位置，使两光栅尽可能平行。

4. 音叉谐振调节。

先调整好实验平台上音叉和激振换能器的间距，一般 0.3mm 为宜，可使用塞尺辅助调节。打开测试仪电源，调节正弦波输出频率至 500Hz 附近，幅度调节至最大，使音叉谐振，调节时可用手轻轻地按音叉顶部感受振动强弱，或听振动声音，找出调节方向。若音叉谐振太强烈，可调小驱动信号幅度，使振动减弱，在示波器上看到的 T/2 内光拍的波数为 15 个左右（拍频波的幅度和质量与激光光斑、静动光栅平行度、光电传感器位置都有关系需耐心调节）。记录此时音叉振动频率、屏上完整波的个数、不足一个完整波形的首数和尾数值以及对应该处完整波形的振幅值。

5. 测出外力驱动音叉时的谐振曲线。

在音叉谐振点附近，调节驱动信号频率，测出音叉的振动频率与对应的音叉振幅大小，频率间隔可以取 0.1Hz，选 8 个点，分别测出对应的波的个数，由式(8)，计算出各自的振幅 A。

6. 实验仪面板上的“输出 II”是为了用耳机听拍频信号。

六、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. （选做）在坐标纸上画出音叉的频率—振幅曲线；