双光栅检测微弱振动位移量

一、实验任务

1．掌握双光栅衍射测量微振动的原理，测量音叉微振动的振幅；

2．测量外力驱动音叉的谐振曲线。

二、操作要点

1．仪器连接：参考补充讲义中实验内容 **1** 正确连接实验仪器：音叉驱动器与振动力学信号源主输出相连，双踪示波器，一个通道接光电池输出，另一通道接信号源同步输出。

2．双光栅衍射光路调整：动、静光栅两光栅面相互平行并在竖直面内，光栅间距 **1mm** 左右。激光束水平方向垂直入射光栅平面。用塞尺设置音叉驱动器与音叉间距 **0.3mm**。具体要求与调节要求请见补充讲义实验内容 **2**。

3．微振动振幅测量：信号源取正弦波输出，频率在 **500Hz** 附近，寻找音叉共振点。适当调节驱动信号幅值的大小，当半个周期内光拍波数为 **15** 个左右时，记录音叉谐振频率 $\mathbf{f_0}$。准确测量半个周期内光拍的波数（首数＋完整波的个数＋尾数），计算音叉谐振振幅。

4. 谐振曲线的测量：在音叉谐振点附近，调节驱动信号频率，频率间隔 $\mathbf{f_n=(f_0\pm0.1n)H_Z}$, f_0 是谐振频率，n=0，±1，±2 选 **5** 个点, 分别测出对应拍频波的波数, 计算出相应的振幅 $\mathbf{A_n}$。

5. 选作内容：改变音叉的有效质量，可以将塑料软管依次放入音叉不同位置的小孔里，或将橡皮泥粘在音叉的不同位置，研究音叉谐振曲线的变化规律。

三、报告要求

1．计算共振时拍频数，计算音叉微振动的振幅；

2．计算偏离共振频率下音叉的振幅，用坐标纸画出频率与振幅 f_n-A_n 的关系曲线；

四、讨论题

1．拍频波的幅值、波的疏密以及波形质量与那些因素有关？

2．测量音叉谐振曲线时，为什么要固定驱动信号功率？

3．静光栅和动光栅的前后位置是否可以互换，为什么？

附录　双光栅检测微弱振动位移量 讲义

实验目的

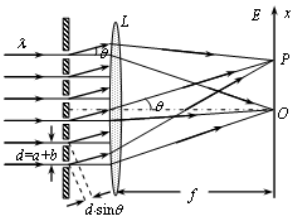
1. 掌握双光栅衍射测量微振动的原理，测量音叉微振动的振幅。
2. 研究外力驱动下音叉的谐振特性。

实验原理

垂直入射到光栅的平面波，由于光栅上每缝自身的衍射作用和各缝之间的干涉，通过光栅后光的强度出现周期性的变化。如图 1 所示。

光栅衍射方程　　$d\sin\theta = m\lambda$　（$m = 0, \pm1, \pm2 \ldots$）　　(1)

式中 m 为衍射级数，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 u 做简谐振动，则从光栅出射的光的波阵面也以同样速度做简谐振动，因此在不同时刻，对应于同一级次的衍射光线，从光栅出射时，在 y 方向将会产生位移量 ut，

图 1 光栅衍射原理图

如图 2 所示。

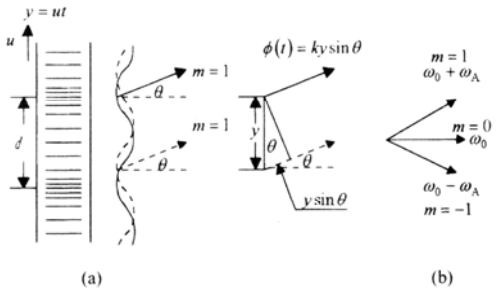


图 2　用移动的皱褶波面来解释多普勒效应

(a)褶皱波面的相位超前 (b)不同衍射级次的频移

下面以入射的平面光波透过移动的相位光栅，得到随时间 t 移动的一列皱褶的波阵面来分析光栅的多普勒频移的原理。

由于波阵面以速度 **u** 沿垂直于光传播方向的 ***y*** 方向移动，空间某固定点，在 ***t*** 时间内，在 ***y*** 方向的波阵面的位移量表示为 ***y*=ut**，因此 ***m*** 级衍射光的位相有一个提前量$\varphi(t)$，由下式给出

$$\varphi(t) = ky\sin\theta = kut\sin\theta \tag{2}$$

因$\sin\theta = \frac{m\lambda}{d}$，代入上式，则

$$\varphi(t) = ky\sin\theta = kut\sin\theta = \frac{2\pi utm\lambda}{\lambda d} = m\frac{2\pi u}{d}t \tag{3}$$

令$\omega = \frac{2\pi u}{d}$，则 ***m*** 级衍射光波可写成如下形式

$$\exp\{-i[\omega_0 t + \varphi(t)]\} = \exp[-i(\omega_0 + m\omega)t] \tag{4}$$

则以速度 **u(t)**运动的光栅，其 ***m*** 级衍射光波相对于静止光栅的衍射光波有一个多普勒频移量，可表示为：$\Delta\omega = m\omega = m\frac{2\pi u}{d}$ **(5)**

$\Delta\omega$的符号与 ***m*** 级的正负号有关。

双光栅的多普勒频移、光拍的获得与检测：

光波频率很高，为了要从光频中检测出多普勒频移量，可以采用“拍”的方法。即把已频移的光束和未频移的光束平行迭加，形成光拍。由于拍频频率较低，很容易测得，故通过测量拍频即可检测出多普勒频移量。

两个参数完全相同的光栅相互平行并靠近，一个光栅静止不动，称为静光栅，另一光栅相对静光栅做速度为 u(t)的运动，称为动光栅。一束激光垂直入射双光栅，静光栅起衍射作用，而动光栅起频移作用，故通过双光栅后出射的衍射光包含了两种以上不同频率而又平行的光束，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。光拍信号进入光电池，

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 ***m* = 1**),

光电池检测到的光电流可表示为：　　$I=\xi(E_1+E_2)^2$

将 E_1，E_2 代入得：　$I=\xi\{E_{10}{}^2\cos^2(\omega_0 t+\varphi_1)+E_{20}{}^2\cos^2[(\omega_0+\omega_d)t+\varphi_2]$

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

$$+E_{10}E_{20}\cos[(\omega_0+\omega_d+\omega_d)t+(\varphi_2+\varphi_1)]\}\qquad(6)$$

其中 ξ 为光电转换常数。

因光波频率很高，(6)式中第一项、第二项、第四项，光电池无法分辨，第三项为拍频信号，因为频率较低，光电池能做出相应的响应，其光电流为可表示为

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

拍频 $F_{拍}$ 即为：　　$F_{拍}=\dfrac{\omega_d}{2\pi}=\dfrac{u}{d}=un_\theta$　　(7)

其中　$n_\theta=\dfrac{1}{d}$　为光栅密度，

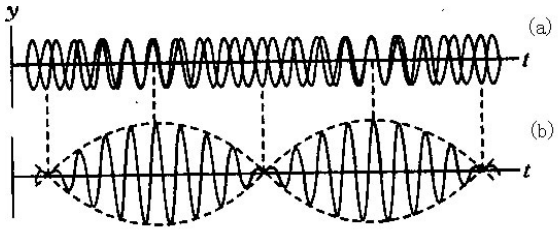


图 3 频差较小的二列光波叠加形成“拍”

微振动振幅的检测

由(7)式可知，$F_{拍}$ 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 u，如果把光栅粘在音叉上，则 u 是周期性变化的。所以光拍信号频率 $F_{拍}$ 也是随时间而变化的，微弱振动的位移振幅为：

$$A=\frac{1}{2}\int_0^{T/2}udt=\frac{1}{2}\int_0^{T/2}\frac{F_{拍}(t)}{n_\theta}dt=\frac{1}{2n_\theta}\int_0^{T/2}F_{拍}(t)dt=\frac{1}{2n_\theta}N\qquad(8)$$

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

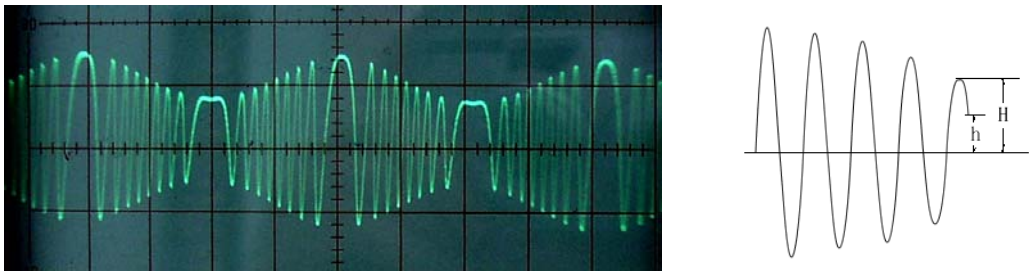


图 4 示波器显示拍频波形

波数由完整波形数、分数波形数两部分组成。可根据示波器上显示的波形来算。其中分数波形数由不足一个完整波形的首数及尾数两部分组成，分数波形在波群的两端，可按反正弦函数折算为波数的分数部份，波的首数和尾数中满$1/2$或$1/4$或$3/4$个波形分数部份直接以 0.5 或 0.25 或 0.75 直接计入，不满 1/4 波形的分数部分以可按反正弦函数折算为波形的分数部份，

图 6 拍频波数的计算

即$\frac{\sin^{-1}a}{360^\circ}+\frac{\sin^{-1}b}{360^\circ}$计入总的波形数。式中，$a$，$b$为波群的首、尾幅度和该处完整波形的振幅之比。

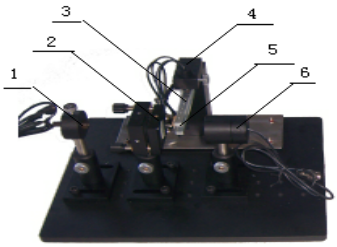
如图 6 所示，在$T/2$内，整数波形数为 4，分数波形数部分，首数分数部分为零 ，尾数分数部分已满$1/4$波形，计入 0.25，剩余部分$b=h/H$ =0.6/1=0.6，则总的波形数为：

$$N=4+0.25+\frac{\sin^{-1}0.6}{360^\circ}=4.25+\frac{36.8^\circ}{360^\circ}=4.25+0.10=4.35$$

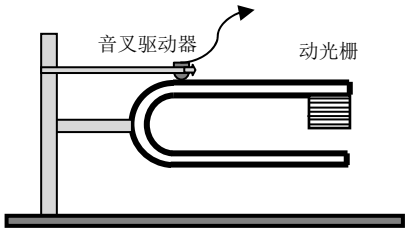
实验内容

1．实验装置：

实验仪器：振动力学通用信号源，光源，静光栅及其调节架，动光栅，音叉，音叉驱动器，光电池，双踪示波器，塞尺等。



1 激光器
2 静光栅
3 音叉
4 音叉驱动器
5 动光栅
6 光电池



动光栅、音叉驱动器、音叉及其支架

图 7 实验装置图

仪器连接：

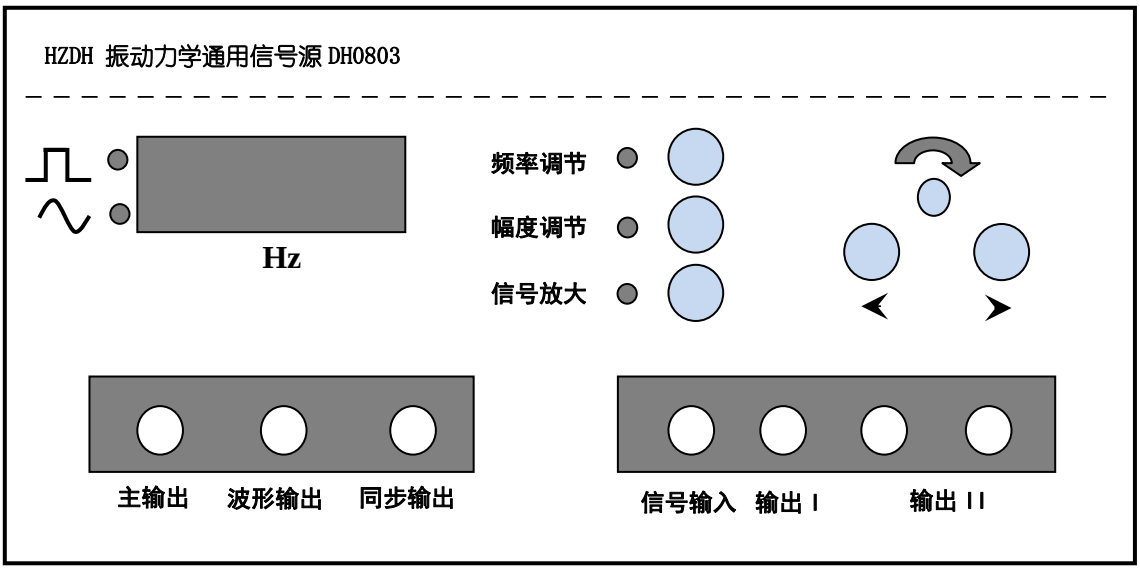


图 8 DH0803 振动力学通用测试仪面板图

振动力学通用信号源面板如图示：

“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；注意不要将光电传感器接错以免损坏传感器。“输出 I”接示波器通道 1，观察拍频波；“输出 II”可接耳机听拍频信号。

“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 20~100000Hz，方波的输出频率是 20~1000Hz。

“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 0~100 档间调节，输出幅度不超过 $V_{p\text{-}p}$=20V。

“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 0~100 档间调节，放大倍数不超过 55 倍。

2．操作要点：

1）几何光路调整。

粗调光路，使激光器、静光栅、动光栅等高共轴，调节静光栅和动光栅的相对位置，使两光栅面相互靠近(注意不要触碰)，一般间距在 1mm 左右，打开激光器电源，让激光垂直入射双光栅，用白纸作为观察屏观察衍射光斑的图样，小心转动静光栅调节其取向，调节静光栅架上控制光栅面俯仰角以及左右倾斜度的螺丝，使得经两个光栅衍射后的光斑图样和单光栅衍射的图样基本一致。此时，动、静两光栅面平行且光栅刻痕走向一致。去掉观察屏，使中间比较亮的光斑进入光电传感器的入光孔，适当调节示波器的水平方向，垂直方向灵敏度，轻轻敲击音叉，此时可以看到拍频波，将各个元件用螺丝固定在平台上。

2）音叉谐振调节。

借助塞尺，将实验平台上音叉和激振换能器的间距设置在 0.3mm 左右，打开通用测试仪电源，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。适当调节信号幅度，使得半个周期内，在示波器上可以观察到光拍波数为 15 个左右，记录此时音叉振动频率、测量半个周期内屏上光拍的波数（首数＋完整波的个数＋尾数）。

3）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 $0.1H_Z$, 选 8 个点, 分别测出对应的波的个数, 代入公式，计算出各自的振幅 A。

4）选作内容：保持驱动信号输出幅度不变，将软管放入音叉上的小孔，或将橡皮泥粘在音叉的不同位置从而改变音叉的有效质量，调节驱动信号频率，研究谐振曲线的变化趋势。

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．用坐标纸作图，做出音叉的频率～振幅曲线；

4．选作内容：做出音叉不同有效质量时的谐振曲线，定性讨论其变化趋势。

讨论题

1．如何判断动光栅与静光栅的刻痕已平行?

2．作外力驱动音叉谐振曲线时，为什么要固定信号功率?

3．本实验测量方法有何优点？测量微振动位移的灵敏度是多少？