

《基础物理实验》实验报告

实验名称 弦上驻波及介质中声速的测量 指导教师 王智茂
姓 名 学号 分班分组及座号 号 (例: 1-04-5 号)
实验日期 2023 年 12 月 14 日 实验地点 721 调课/补课 ☐ 是 成绩评定

【实验目的】

第一部分：弦上驻波实验

1. 观察在两端固定的弦线上形成的驻波现象，了解弦线达到共振和形成稳定驻波的条件；
2. 测定弦线上横波的传播速度；
3. 用实验的方法确定弦线作受迫振动时共振频率与半波长个数 n 、弦线有效长度、张力及线密度之间的关系；
4. 用对数作图和最小乘法对共振频率与张力关系的实验结果做线性拟合，处理数据，并给出结论。

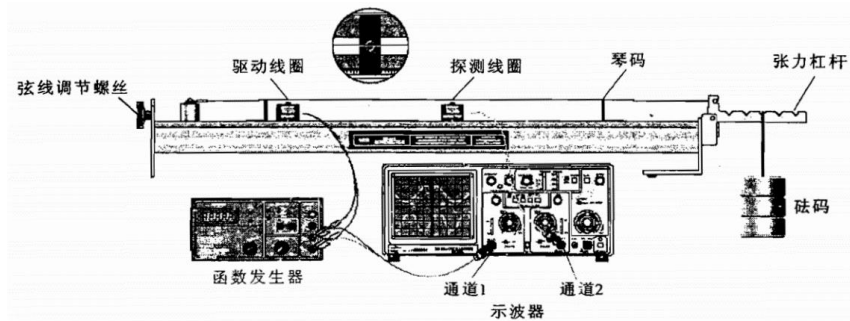
第二部分：测定介质中的声速

1. 利用驻波法测定波长；
2. 利用相位法测定波长；
3. 计算超声波在空气中和水中的传播速率。

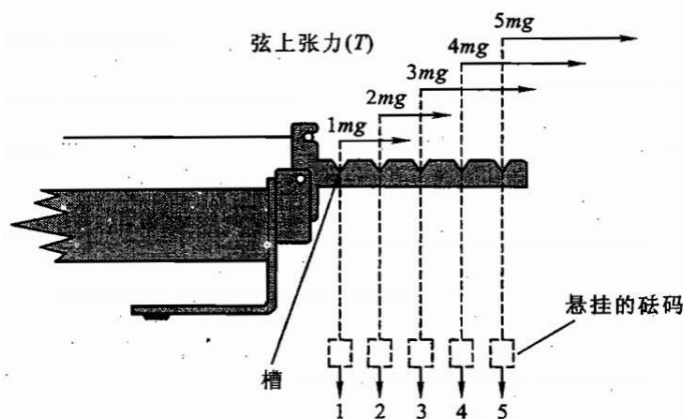
【实验仪器与用具】

第一部分：弦上驻波实验

弦音计、信号发生器和双踪示波器。弦音计由吉他弦、固定吉他弦的支架和基座、琴码、砝码支架、驱动线圈和探测线圈以及砝码组成，如图所示。

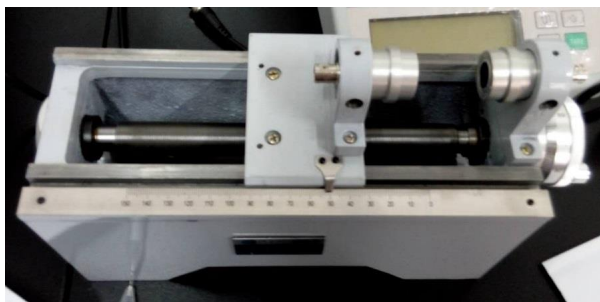


弦线所受张力的示意图如下：



第二部分：测定介质中的声速

SW-2 型声速测量仪，信号发生器，示波器。SW-2 型声速测量仪如图所示。



右侧为固定端，安装超声信号发射端，左侧为可移动端，为超声信号接收端，左侧可以通过鼓轮移动，移动的位置可以通过标尺读取。

【实验原理】

第一部分：弦上驻波实验

对于两端固定的弦，固定端的入射波和反射波相位差为 π 。那么两列波的叠加将形成驻波。驻波的频率为

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{kv}{2\pi} \quad \#(1)$$

其中， v 为入射波的波速，当弦长 L 恰好为半波长的整数倍时，(1) 式变为

$$f = n \frac{v}{2L} \quad \#(2)$$

当驻波频率与弦的固有频率相同时，弦发生共振现象。因此，弦的共振频率为：

$$f_n = nf_1 = n \frac{v}{2L} \quad \#(3)$$

其中， f_1 为基频， f_n 为 n 次谐波。

对于一段拉紧弦的张力为 T ，线密度为 μ 的琴弦，根据波动理论，沿弦线传播的横波应满足

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} &= \frac{T}{\mu} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} &= v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \end{aligned}$$

式中， x 为波在传播方向（平行于弦线）的位置坐标， y 为振动位移。比较两式，并将其与式 (2) 联立，可得到波的传播速度 $v = \sqrt{T/\mu}$ ，若弦线上产生共振驻波的振动频率为 f ，横波波长为 λ ，由于 $v = \lambda f$ ，因此共振频率与张力及线密度之间的关系为

$$f = \frac{1}{\lambda} \sqrt{T/\mu}$$

将该式两边取对数，得到

$$\log f = \frac{1}{2} \log T - \frac{1}{2} \log \mu - \log \lambda$$

第二部分：测定介质中的声速

1. 利用驻波法测声速

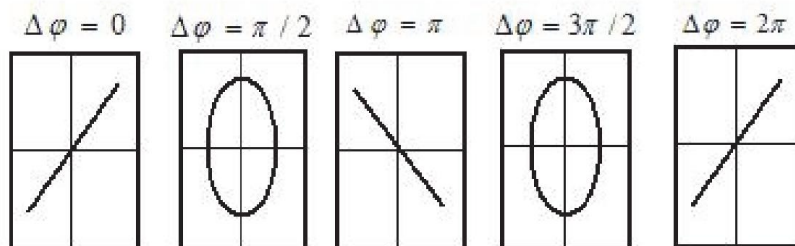
由声波传输理论可知，从发射换能器发出一定频率的平面声波，经过介质传播到达接收换能器。如果接收面和发生面严格平行，即入射波在接收面上垂直反射，入射波和反射波相互干涉形成驻波。此时，两换能器之间的距离恰好为其声波半波长的整数倍，在声驻波中，波腹处声压最小，波节处声压最大。接收换能器的反射界面处为波节，声压效果最大。因此，可以从接收换能器端面声压判断超声波是否形成驻波。

转动鼓轮，改变换能器间距，记录下出现稳定驻波时最大电压数值对应的标尺刻度。相邻两次最大值对应的刻度值为半波长。

2. 利用相位法测声速

将发射波和接收波同时输入示波器，并以 X-Y 模式显示，两波的频率相同但相位不同。当接收点和发射点的距离变化等于一个波长时，相位差为 2π 。

相位变化时，李萨如图形如图所示。



3. 声速的理论值

利用声速在空气中的理论公式可以计算空气中声速的理论值。

$$v = v_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}} = v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}}$$

其中， $T = (t + 273.15)K$, $v_0 = 331.45m/s$ ，为 $0^\circ C$ 时的声速， t 为摄氏温度。

【实验内容】

第一部分：弦上驻波实验

1. 准备琴弦，进行实验前的调节，测量砝码质量以及琴弦相关参数；
2. 产生入射波并生成驻波，使用信号发生器并里利用激振器使琴弦振动。缓慢调节信号发生器的频率，使琴弦上产生稳定的驻波；
3. 观察并测量驻波的参数，用示波器和探测器配合，测量驻波的频率，并计算波速。
4. 改变琴弦的参数并测量驻波的变化。

第二部分：测定介质中的声速

1. 利用驻波法测超声波在空气中的波速。
2. 利用相位法测超声波在空气中的波速。
3. 利用相位法测超声波在水中的波速。
4. 利用逐差法处理实验数据。

【实验数据处理】

1. 线密度测试

Table 1

弦号	质量 (g)	长度 (mm)	直径 (mm)	线密度 (kg/m^2)
2	0.302	85.0	0.827	0.0036

通过对弦的质量和长度进行测量，用质量除以长度得到弦的线密度 $0.0036 kg/m^2$ 。

2. 波速的测量

将琴码放在 150mm 和 650mm 的地方，将砝码放在第 2-4 格，测基频 f_1 ，倍频 f_2 ， f_3 。

根据 $L = n\frac{\lambda}{2}$ ， $v = \lambda f$ 计算波速的实验值；根据 $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$ ， $T = \frac{1}{2}nmg$ 计算波速的理论值。

波节照片如下：



砝码质量：509.18g

Table 2

砝码位置	f1(Hz)	f2(Hz)	f3(Hz)	波速实验值	张力 (T)	波速计算值
2	38.25	76.77	114.74	38.29	4.99	37.23
3	47.80	95.79	143.81	47.88	7.48	45.60
4	55.16	110.52	165.71	55.22	9.98	52.65

通过计算，波速的实验值与计算值之间相对误差不超过 5%，较为接近。

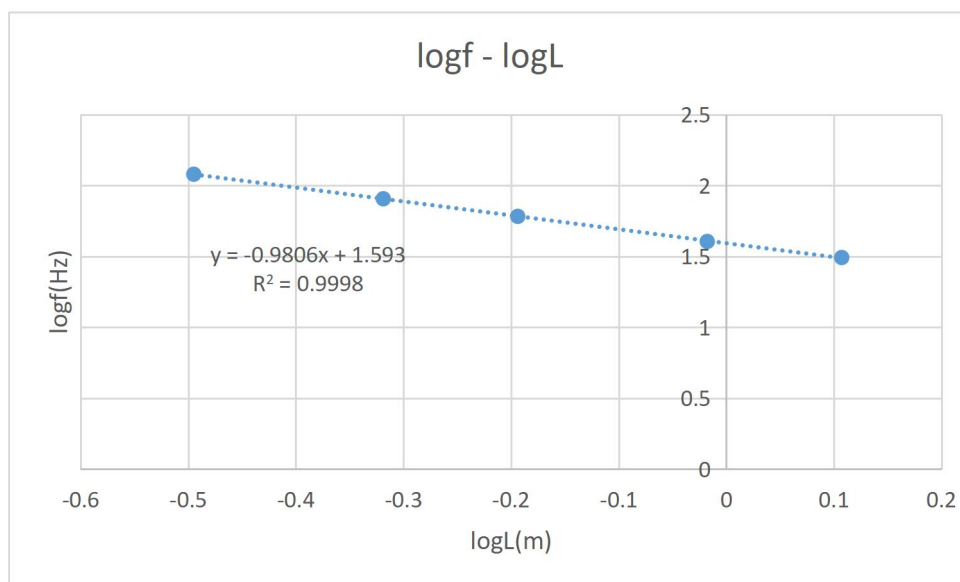
3. 频率和有效长度的关系

将砝码放在第 2 格，改变有效长度，测试频率 f1 的变化。

Table 3

L(mm)	640	480	320	240	160
f1(Hz)	31.05	40.30	60.56	80.59	119.99

做出 $\log f_1 - \log L$ 的图像，并进行线性拟合。得到图像如下：



线性拟合结果 $y = -0.9806x + 1.593$ 。下面计算理论值：

由于砝码放在第 2 格，可以求出 $T = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 0.50918 \cdot 9.8 = 4.99N$ 。根据公式 $\log f = -\log \lambda + \frac{1}{2} \log T -$

$\frac{1}{2} \log \mu$ ，计算可知斜率为-1，截距约为 1.574。斜率的相对误差为 1.94%，截距的相对误差为 1.21%，

可见二者非常接近，公式可以被证明。

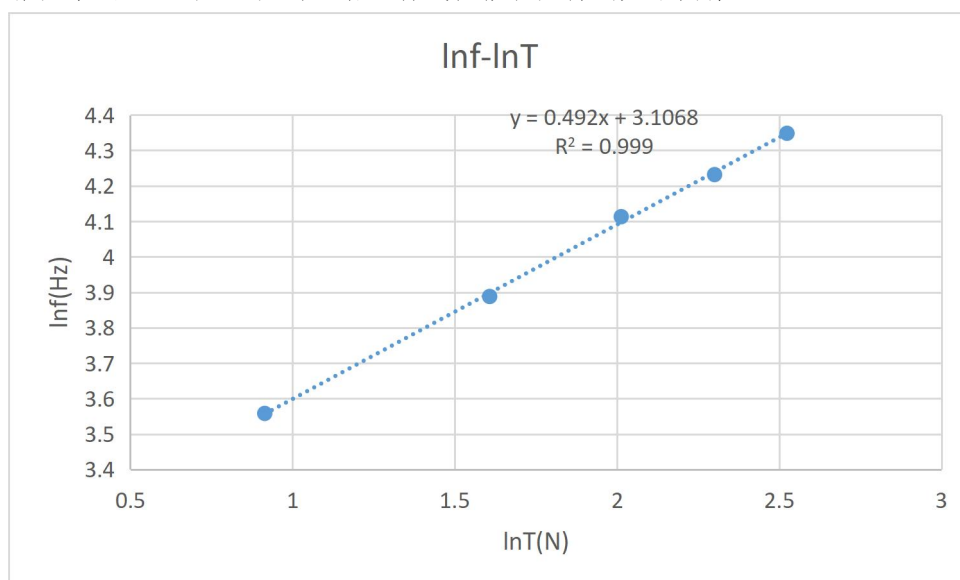
4. 频率和张力的关系

固定有效长度 $L=400mm$ ，将砝码放在 1-5 格时，测频率 f_1 。

Table 4

位置	1	2	3	4	5
T(N)	2.494982	4.989964	7.484946	9.979928	12.47491
f1	35.10	48.81	61.13	68.83	77.33

根据表中数据，求出 $\ln f$ 与 $\ln T$ ，对二者进行线性拟合，得到如下图像：



线性拟合结果 $y = 0.492x + 3.1068$ 。下面计算理论值：

由于频率为基频，有效长度为 0.4m，因此 $\lambda = 2 * 0.4 = 0.8m$ 。根据公式 $\ln f = \frac{1}{2} \ln T - \ln \lambda - \frac{1}{2} \ln \mu$ ，计算可知斜率为 0.5，截距为 3.0435。斜率的相对误差为 1.6%，截距的相对误差为 2.1%，可见二者较为接近，公式可以被证明。

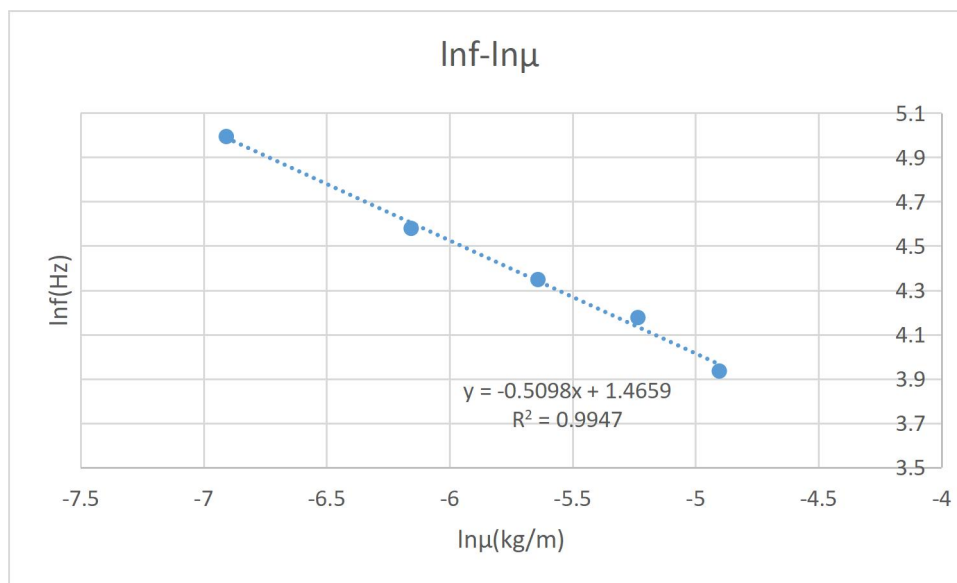
5. 频率和线密度的关系

固定有效长度 $L=0.4m$ ，将砝码放在第 5 格。测不同粗细琴弦的基频 f_1 ，与其他同学共享数据后，得到以下数据：

Table 5

弦号	1	2	3	4	5
直径(mm)	0.4	0.827	0.95	0.672	1.212
$\mu(kg/m)$	0.00100	0.00355	0.00533	0.00212	0.00742

根据表中数据，计算 $\ln f$ 与 $\ln \mu$ 的值，对二者进行线性拟合，得到如下图像：

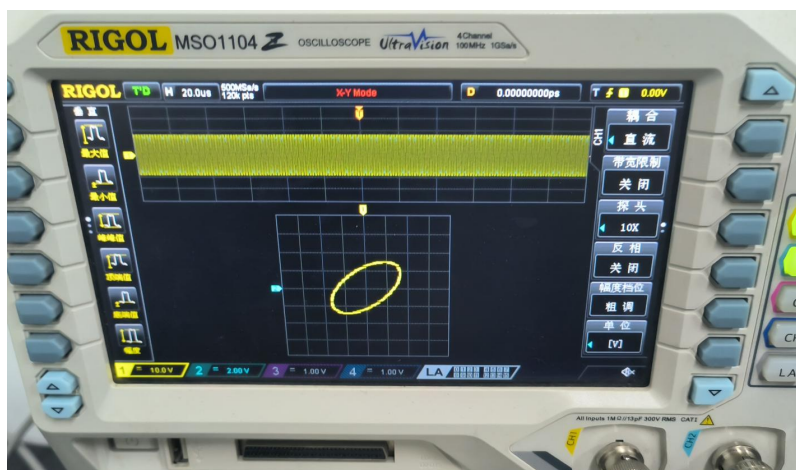


线性拟合结果 $y = -0.5098x + 1.4659$ 。下面计算理论值：

因为有效长度 $L=0.4m$ ，砝码位置为 5，因此 $\lambda = 0.8, \ln T = 2.5237$ 。根据公式 $\ln f = -\frac{1}{2} \ln \mu + \frac{1}{2} \ln T - \ln \lambda$ ，计算可知斜率为 -0.5，截距为 1.485。斜率的相对误差为 2.0%，截距的相对误差为 1.3%，可见二者较为接近，公式得以证明。

6. 空气中超声波波速的测试

利用位相法测量超声波波速图片如下：



$f=40\text{kHz}$ ，室温 $t=21.3^{\circ}\text{C}$ ，理论值 $v=344.131\text{m/s}$ 。

Table 6

i	驻波法 $L_i(\text{mm})$	λ_i	位相法 $L_i(\text{mm})$	λ_i
1	4.470	8.656	20.658	6.834
2	8.798	7.832	24.075	6.974
3	12.147	9.910	29.578	10.896
4	16.063	11.284	33.065	8.794
5	20.089	8.816	37.350	6.694
6	25.044		42.798	
7	29.112		46.102	
8	34.754		50.499	
9	38.232		55.834	
10	42.640		59.181	

根据 $v = \lambda f$ ，计算得出驻波法得到的测量值为 $v = 371.984\text{m/s}$ ，与理论值相对误差为 8.1%。位相法得到的测量值为 $v = 321.54\text{m/s}$ ，与理论值相对误差为 6.6%。实验中可能由于图像变化较快导致读数不精确从而造成一定的误差，但总体来说，两种方法测得的数据均在误差允许范围内。

7. 水中超声波波速的测试

方法：位相法， $f=1.8\text{MHz}$ ，室温 $t=21.3^{\circ}\text{C}$ 。

Table 7

i	刻度值 $L_i(\text{mm})$	λ_i
1	2.190	0.796
2	2.588	0.792
3	2.991	0.884
4	3.387	0.822
5	4.260	0.768
6	4.702	
7	5.089	
8	5.500	
9	5.921	
10	6.305	

根据 $v = \lambda f$ ，计算得出测量值为 $v = 1462.000\text{m/s}$ 。

【思考题】

1、调节振动源上的振动频率和振幅大小后对弦线振动会产生什么影响？

调节振动源的振动频率大小，当振动源的频率与弦线的固有频率匹配时，会发生共振现象。当频率为基频的整数倍时，则可能会激发不同的谐波。

调节振动源的振幅大小，会导致弦上振动的振幅增大，这可能导致更明显的振动。在振幅较大时，可能会出现非线性效应，比如畸变和谐波的产生。

2、如何来确定弦线上的波节点位置？

当弦线上产生稳定的驻波时，振幅始终为 0 的点即为波节点。当我们移动探测线圈时，振幅最小（几乎为 0）处即为波节位置。

3、在弦线上出现驻波的条件是什么？在实验中为什么要把弦线的振动调到驻波现在最稳定、最显著的状态？

出现弦波的条件：相同频率、相同振幅、传播方向相反、振动方向在同一直线上。

在实验中将弦线的振动调到驻波现在最稳定、最显著的状态的原因：

- (1) 稳定：驻波状态是弦上振动的稳定状态之一。
- (2) 振幅最大：驻波状态下，振动的振幅最大。在弦的节点处，振幅为 0；在波腹处，振幅最大。现象更为明显，更易测量。

4、在弹奏弦线乐器时，发出声音的音调与弦线的长度、粗细、松紧程度有什么关系？为什么？

根据公式 $f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$ 可知，音调与弦线的长度成反比，长度越短，音调越高。弦线越细，音调越高。弦线越紧，音调越高。

5、若样品弦线与装置上的弦线直径略有差别，请判断是否需要修正，如何进行？

需要修正。可以使用螺旋测微器测量装置上的紧绷状态下的弦线的直径，根据比例推算出弦线样本的直径与其相等时的长度。

6、对于某一共振频率，增大或减少频率的调节过程中，振幅最大的频率位置往往不同，如何解释这一现象？

阻尼的影响可能是导致这种现象的原因之一。增大或减小频率时，阻尼的效果可能会导致共振峰位置的变化。较大的阻尼可能导致共振现象更加宽广，振幅最大的频率位置更容易受到影响。同时，共振现象通常不是严格局限于一个确切的频率点，而是在一定的调谐范围（即调谐宽度）。当调节频率时，共振峰可能在调谐宽度内移动，导致振幅最大的频率位置不同。