

三 驻波实验

第一部分：弦上驻波实验

【实验简介】

驻波是一种重要的物理现象。传播方向相反、振动方向相同、振幅相同、频率相同的两列波合成会形成驻波。驻波有一维驻波、二维驻波等。例如，按某些频率激发弦乐器的弦线振动，弦线上会形成一维驻波。对于话筒的膜片、锣鼓鼓面，它们形成的驻波分布在平面或曲面上，这是二维驻波。驻波在声学、光学、无线电工程等方面都有广泛的应用。

弦上驻波实验把抽象的波动理论中关于驻波的物理内容形象直观地展现出来，现象丰富、生动、有趣，旨在通过对弦线上驻波现象的观察和测量，加深对驻波的认识和理解。

【实验目的】

- 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、张力及弦密度之间的关系；
- 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作线性拟合，处理数据，并给出结论。

【实验原理】

1 驻波的理论基础

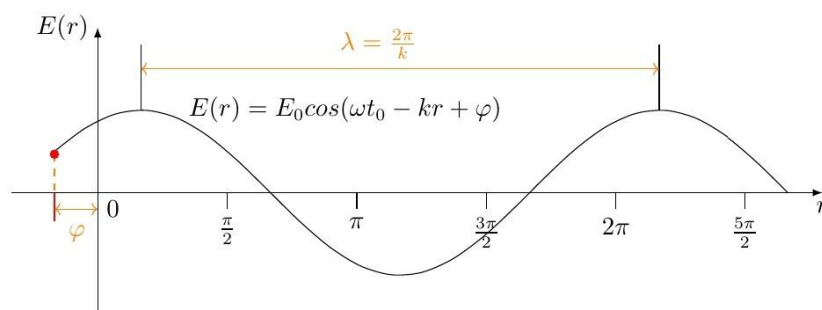


图 1 某时刻的入射波

驻波由频率和振幅均相同、振动方向一致、传播方向相反的两列波叠加而来。一般地，设两列方向相反的波的方程分别为：

$$y_1 = A \cos(\omega t - kx + \varphi_1) \quad (1)$$

$$y_2 = A \cos(\omega t + kx + \varphi_2) \quad (2)$$

其中, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 是角波数, λ 是波长。当两列波合成时有:

$$y_1 + y_2 = 2A \cos(kx + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}) \cos(\omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}) \quad (3)$$

由式 (3) 可见, 两列波合成后形成了一个新的波, 波的频率为 ω , 振幅为

$$A(x) = \left| 2A \cos(kx + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}) \right| \quad (4)$$

其中, 那些 $\left| 2A \cos(kx + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}) \right| = 1$ 的点, 振幅为 $A(x) = 2A$, 振幅最大, 被称为驻波的

波腹: 那些 $\left| 2A \cos(kx + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}) \right| = 0$ 的点, 振幅为 $A(x) = 0$, 没有振动, 被称为驻波的**波节**。

此时, 波腹的位置为:

$$kx + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} = \pm n\pi, \text{ 即 } x = \pm \frac{n}{2} \lambda \mp \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2k} \quad (5)$$

波节的位置为:

$$kx + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} = (n + \frac{1}{2})\pi, \text{ 即 } x = \pm (n + \frac{1}{2}) \lambda \mp \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2k} \quad (6)$$

可以看到, 相邻的两个波腹之间或相邻两个波节之间的距离为:

$$D = \frac{\lambda}{2} \quad (7)$$

称为半波长。

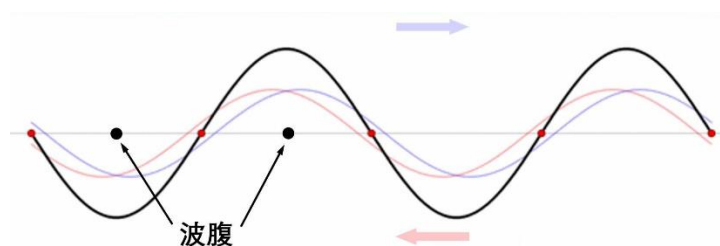


图 2 驻波示意图

2 弦上驻波及其特性

要观察稳定的驻波, 须具备两个条件: 1) 波长易于观察且频率较稳定, 传播介质要稳定不易受到干扰; 2) 传播方向相反的两列波相干, 即频率和振幅均相同, 并具有固定的相位差。本实验选用两端固定且紧绷的琴弦作为传播介质, 利用在弦上传播的机械波及其反射波产生驻波。

2.1 入射波、反射波与半波损失

在琴弦上产生一系列向右前进的机械波，称为**入射波**。如果琴弦右端不固定，在没有能量损失时，弦右端按入射波的频率进行周期性往复运动。当琴弦右端固定时，由于该点的振幅永远保持为 0（因为固定，所以不会振动），因此当机械波传播到该点时，那么必须有一个振幅与之相反的波与其抵消，这个波就是**反射波**。该反射波与入射波的振幅相等、振动方向相反，此时入射波与反射波的运动方向相差了 π 。根据波长的定义，一个周期（ 2π ）对应的长度为 1 个波的长度，因此半个周期对应的长度为半个波的长度，因此称为“**半波损失**”。

2.2 弦上驻波

2.2.1 前进波与反射波

将一根弦线的两端 A，B 固定，弦线以一定的张力绷紧。这时，如果在 A，B 端点之间有策动源使弦线在 A 端附近作振幅恒定的连续的简谐振动，就会有连续的横波波列沿弦线从 A 端向 B 端传播。这个没有经过反射的波被为**前进波**。

当一系列前进波行进到固定端 B 时，便发生反射，沿着前进波的反方向传播；这列反射后的波传播到 A 端时，发生第二次反射；继而又沿着前进波的方向传播再次到达固定端 B，发生第三次反射……这些经过一次或多次反射的波被称为**反射波**。由于半波损失的存在，反射波与反射前的一系列波的频率和振幅相同，方向相反，而相位总是相差 π 。

2.2.2 弦上驻波与共振

由以上描述可知，对于两端固定的弦，固定端的入射波和反射波相位差为 π 。那么这两列波的叠加将会形成驻波。驻波的频率为：

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{kv}{2\pi} \quad (8)$$

其中， v 是入射波的波速当弦长为 L ，且恰好是半波长 D 的整数倍时，式（8）可以变为：

$$f = n \frac{v}{2L} \quad (9)$$

由于弦的两端固定，因此弦的两端必为驻波的波节。此时弦上将形成稳定的驻波，振幅最大，即：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：

$$f_n = nf_1 = n \frac{v}{2L} \quad (10)$$

其中， f_1 是基频， f_n 是 n 次谐波。

2.2.3 弦的共振频率

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下述运动方程：

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{T}{\mu} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (12)$$

式中 x 为波在传播方向（与弦线平行）的位置坐标， y 为振动位移。比较两式，并将式（9）代入式（12），即可得到波的传播速度

$$v = \sqrt{T / \mu} \quad (13)$$

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 $v = \lambda f$ ，故共振频率与张力及线密度之间的关系为：

$$f = \frac{1}{\lambda} \sqrt{T / \mu} \quad (14)$$

将该式两边取对数，得：

$$\log f = \frac{1}{2} \log T - \frac{1}{2} \log \mu - \log \lambda \quad (15)$$

【实验内容】

1、主要内容

对照实验目的，实验的主要内容包括：

- （1）在琴弦上生成一个驻波，并根据驻波的频率 f 计算该驻波的波速 v ；
- （2）验证弦线的共振频率 f 与半波长个数 n 、弦线有效长度 L 、张力 T 及弦密度 μ 之间的关系式（15）。

2、实验仪器

本实验装置由弦音计、信号发生器和双踪示波器三部分组成。

- （1）弦音计装置由吉他弦、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等组成，示意图见图 3。弦线所受张力的示意图见图 4。

驱动线圈和探测线圈是本装置的重要部分，其中驱动线圈通过信号发生器提供的一定频率的功率信号产生交变磁力，使金属弦线振动；探测线圈将弦线的振动转换成电信号，由示波器进行观察。

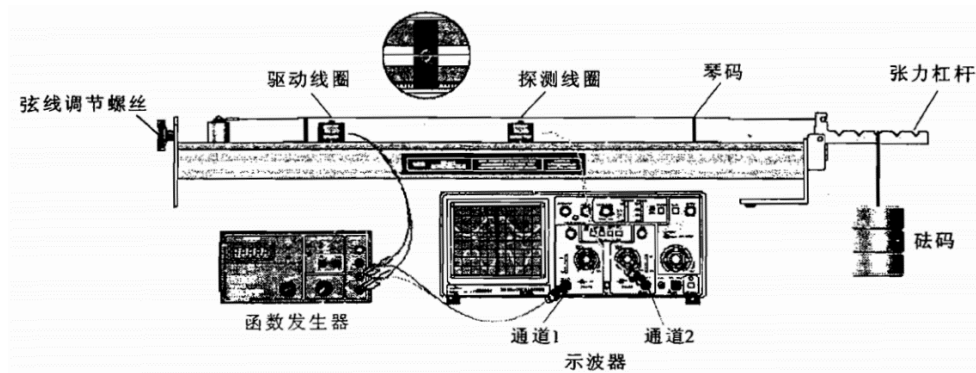


图 3 弦音计实验总装置图

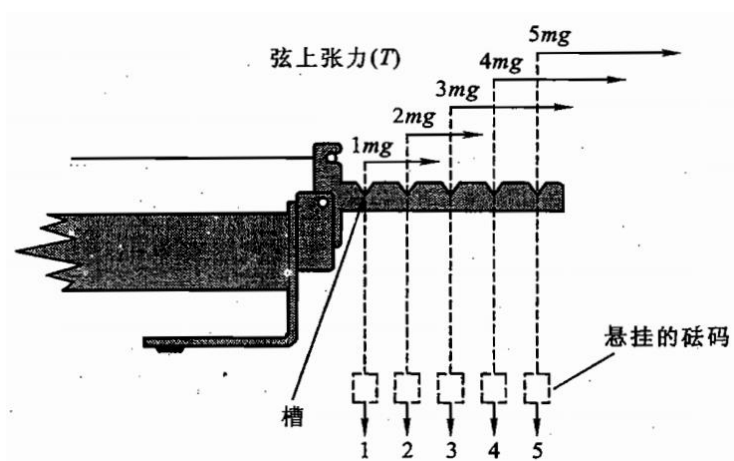


图 4 弦线所受张力的示意图

(2) 实验室使用的仪器为低功率信号发生器，其输出信号的频率从 10Hz 到 1KHz。本仪器用来为驱动线圈提供上述频率范围中具有一定功率的正弦信号。

(3) 本实验用双踪示波器观察信号源的波形并显示由探测线圈接收到的弦线振动的波形，以便可以及时观察弦线的振动现象。

3、参考实验流程

实验的参考流程图如图 5 所示

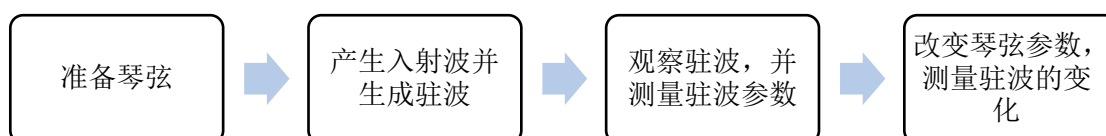


图 5 实验的参考流程

(1) 准备琴弦和仪器

了解弦音计装置中各部分的功能和作用，并进行实验前的调节，熟悉信号发生器和双踪示波器等仪器，并学会使用；

用琴码、张力杠杆、砝码互相配合，使琴弦绷紧，固定长度。保持张力杆水平并测算砝码产生的张力。

（2）产生入射波并生成驻波

使用信号发生器，并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。

改变频率，确定弦线作受迫振动时的共振频率与半波长个数 n 之间的关系。

（4）改变琴弦的参数并测量驻波的变化

改变琴弦的参数，长度 L 、张力 T 、线密度 μ 等，观测驻波产生的变化，并记录数据，分析并验证式（15）。

【数据处理】

- 1、按照实验需要，自制表格记录实验数据。
- 2、通过作图法以及最小二乘法拟合，确定上述关系。

【注意事项】

1、为满足弦线上所受张力是所期望的数值(即图 2 中的 $nMg, n=1,2,..5$),要保证张力杠杆的水平。请在每次测量前，用水准泡校验水平（如无水准泡，可用目测校验水平），并同时用弦线调节螺丝（参见图 1）调节。

2、实验时探测线圈和驱动线圈相离至少 10cm，以避免互相干扰。

3、由于实验中不可避免的非线性现象，请同学们注意找到和识别实验条件下基频信号的频率值。

4、不要将弦音计装置上的弦线卸下测量(注意看就知道,这些弦线不能直接用来测量密度)。实验室应备有与所用弦线直径相同、只取吉他弦中段约 70-80cm 的专用样品测量线密度。

用电子天平（或物理天平）测定弦线的质量 m 。及与之相应的弦线长 L ，则得到

$$\mu = \frac{m}{L} \quad (16)$$

- 5、有两种方法用来测定传播速度 v : 1) 将张力 T 及所测线密度 μ 代入式 (13) 即可得到 v 。
2) 先测出共振频率 f , 再测 L , 并用式 (10) 求得。请比较两种方法获得的结果, 并分析差异的原因。

【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?
- 2、如何来确定弦线上的波节点位置?
- 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?
- 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?
- 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?
- 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?

第二部分：测定介质中的声速

【实验简介】

声波是一种在弹性介质中传播的纵波, 声速是描述声波在介质中传播特性的一个基本物理量。测量声速最简单的就是利用波传播的特性, 对于一个频率已知的声波, 只要测出其波长, 就可以算出其传播速率。本实验要测定的就是超声波 (频率为 20kHz-200MHz) 在空气中和水中的传播速率。

【实验目的】

- 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】

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 4 所示。

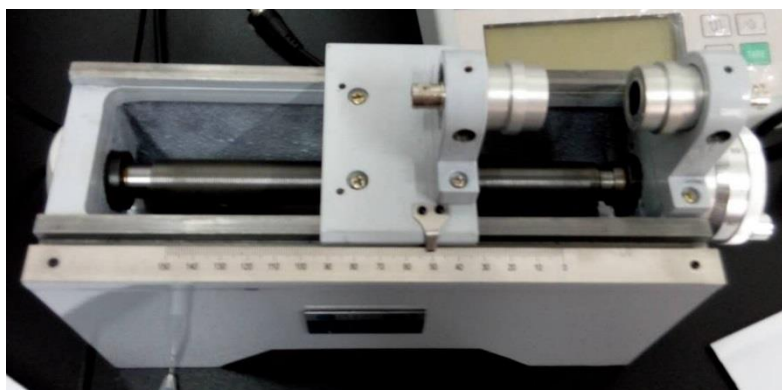


图 4 SW-2 声速测量仪

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】

1. 利用驻波法测声速

将信号发生器输出的正弦电压信号接到超声发射换能器上，超声发射换能器通过电声转换，将电压信号变为超声波，以超声波形式发射出去。接收换能器通过声电转换，将声波信号变为电压信号，送入示波器。

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。如果接收面和发射面严格平行，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等于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。所以，可以从接收换能器端面声压的变化来判断超声波是否形成驻波。

转动鼓轮，改变两只换能器间的距离，在一系列特定的距离上，将会出现稳定的驻波，记录下出现最大电压数值时标尺上的刻度，相邻两次最大值对应的刻度值之差即为半波长。

根据公式 $v = \lambda f$ ，频率 f 已知，根据上述方法可以求出波长 λ ，就可以算出超声波的传播速度 v 。

2. 利用相位法测声速

将发射波和接收波同时输入示波器，并且以 X-Y 模式显示，两波的频率相同，相位不同。

当接收点和发射点的距离变化等于一个波长时，相位差正好是 2π 。

实验时，通过改变发射器和接收器之间的距离，观察相位的变化，当相位改变 π ，相应距离的改变量即为半波长。根据公式 $v = \lambda f$ ，求出波速。

相位变化时，李萨如图形如图 5 所示。

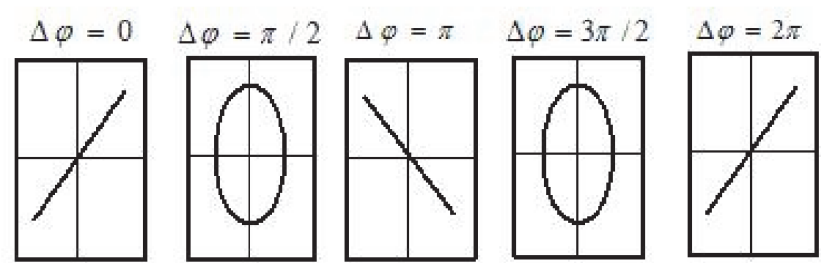


图 5 频率相同、相位不同时的李萨如图形

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。

$$v = v_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}} = v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}} \quad (9)$$

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】

- 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、利用驻波法测超声波在水中的波速。
- 4、利用相位法测超声波在水中的波速。
- 5、利用逐差法处理实验数据。

【数据记录】

- 1、测量数据记录参考格式如下表所示。

表 1 声速测试记录

介质：_____，方法：_____， $f =$ _____Hz，室温 $t =$ _____ $^\circ C$ ， $=$ _____m/s		
i	Li (mm)	$\lambda_i = \frac{1}{3} L_{i+6} - L_i $
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		

8		
9		
10		
11		
12		
测量结果：v（实验值）= _____ m/s		

【注意事项】

- 1、信号发生器的输出端严防短路。
- 2、若图像有重影，可将信号发生器和示波器共地。
- 3、在空气中频率 $f=40\text{ kHz}$ 左右，在水中 $f=1.7\text{ MHz}$ 左右。频率太低时无法产生超声波，太高时移动的位置太小。

【参考文献】

- [1] 吕斯骅，段家祗。新编基础物理实验，北京：高等教育出版社，2006。
- [2] 赵凯华，罗蔚茵。新概念物理教程. 力学. 北京：高等教育出版社，1995。