

基础物理实验

# 弦线上波的传播规律



物理国家级实验教学示范中心（复旦大学）



## 欢迎大家修读本课程，请注意以下事项：

1. 课程有班级群，请注意加群，以便跟老师联系；
2. 本课程为必修课，若没通过，没有补考，只有重修；
3. 课程评分由平时成绩和期末成绩组成，请出席每一次实验课并提交报告，如特殊原因无法出席，请务必请假并联系老师申请补做；
4. 实验前认真预习并完成预习报告，没有预习报告，不允许做实验；
5. 诚实守信，不允许篡改、伪造或抄袭别人的数据，不允许带着别人的实验报告来实验室做实验，一经发现，该实验为 0 分。

## 弦线上波的传播规律

波动的研究几乎出现在物理学的每一领域中。如果在空间某处发生的扰动，以一定的速度由近及远向四处传播，则称这种传播着的扰动为波。机械扰动在介质内的传播形成机械波，电磁扰动在真空或介质内的传播形成电磁波。不同性质的扰动的传播机制虽不相同，但由此形成的波却具有共同的规律性。本实验要求验证弦线上横波的传播规律：横波的波长与弦线中的张力的平方根成正比，与其线密度（单位长度的质量）的平方根成正比，而与波源的振动频率成反比。实验介绍一种利用驻波原理测量弦线上横波波长的方法。此外，本实验还要求用作图法或最小二乘法进行数据处理。

### 实验目的

理解弦线上横波的传播规律，掌握波长与弦线的张力和波源振动频率的关系。

掌握驻波法测量波长。

掌握通过坐标变换，将非线性转化为线性拟合。

### 实验原理

在一根拉紧的弦线上，若其中张力为  $T$ ，线密度为  $\mu$ ，则沿弦线传播的横波应满足下述运动方程：

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{T}{\mu} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (1)$$

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。将 (1) 式与

典型的波动方程  $\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$  相比较，即可得到波的传播速度

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

若波源的振动频率为  $f$ ，横波波长为  $\lambda$ ，由于  $v = f\lambda$ ，故波长与张力及线密度之间的关系为：

$$\lambda = \frac{1}{f} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (2)$$

为了用实验证明公式 (2) 成立，将该式两边取对数，得：

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

若固定频率  $f$  及线密度  $\mu$ ，而改变张力  $T$ ，并测出各相应波长  $\lambda$ ，作  $\ln \lambda \sim \ln T$  图，如得到一直线，计算其斜率值，如为  $1/2$ ，则证明了  $\lambda \propto T^{1/2}$  的关系成立。同理，固定线密度  $\mu$  及张力  $T$ ，改变振动频率  $f$ ，测出各相应波长  $\lambda$ ，作  $\ln \lambda \sim \ln f$  图，如得一斜率为  $-1$  的直线，就验证了  $\lambda \propto f^{-1}$  的关系；固定振动频率  $f$  及张力  $T$ ，改变线密度  $\mu$ ，测出各相应波长  $\lambda$ ，作  $\ln \lambda \sim \ln \mu$  图，如得一斜率为  $-1/2$  的直线，就

验证了  $\lambda \propto \mu^{-1/2}$  的关系。

弦线上的波长可利用驻波原理测量。当两个振幅和频率相同的相干波在同一直线上相向传播时，其所叠加而形成的波称为驻波，一维驻波是波干涉中的一种特殊情形。这时，在弦线上出现许多静止点，称为驻波的波节。相邻两波节间的距离为半个波长。

### 实验仪器

实验装置如图 1 所示，Z 为由单片机控制的可连续调节振动频率的振动仪，其频率变化范围从 0 至 200Hz 连续可调，频率最小改变量为 0.01Hz，A 为能作水平方向振动的端点，D 是可沿弦线方向左右移动并支撑弦线的动滑轮，B 为动滑轮与弦线相切的点，C 点为定滑轮，其高度与 AB 连线等高，其作用是改变弦线的作用力方向。金属弦线的一端系在 A 点，另一端通过动滑轮 D 和定滑轮 C 连接于砝码盘。两个滑轮均采用滚珠轴承固定在座架上，其所产生的摩擦力很小，可以忽略不计。若弦线下端所悬挂的砝码（包含盘）的质量为  $m$ ，则张力  $T=mg$ 。当波源振动时，在弦线上形成向右传播的横波；当此波传播到 B 点时，由于弦线在该点受滑轮两壁阻挡而不能振动，故波在 B 点被反射，形成了向左传播的反射波。这传播方向相反的两列波叠加而形成驻波。当振动端点 A 至固定点 B 的长度  $L$  等于半波长的整数倍时，即可得到振幅较大而稳定的驻波，A、B 两点均为波节，这时

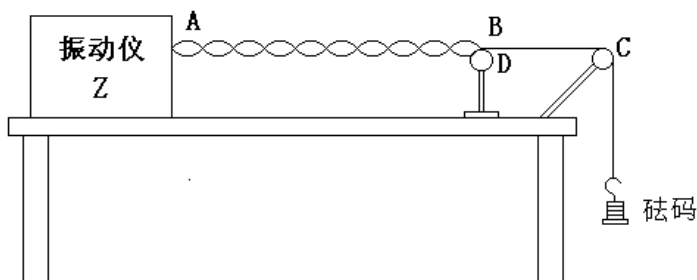


图 1 实验装置图

当波源振动时，在弦线上形成向右传播的横波；当此波传播到 B 点时，由于弦线在该点受滑轮两壁阻挡而不能振动，故波在 B 点被反射，形成了向左传播的反射波。这传播方向相反的两列波叠加而形成驻波。当振动端点 A 至固定点 B 的长度  $L$  等于半波长的整数倍时，即可得到振幅较大而稳定的驻波，A、B 两点均为波节，这时

$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

其中  $n$  为正整数。利用式 (3)，即可测量弦线上横波的波长。

### 实验前应回答的问题

1. 请推导横波波长与波源的振动频率、弦上张力和线密度之间的关系，此传播规律是否适用于橡皮筋？为什么？
2. 为何要将公式两边取对数处理？
3. 测量波长的方法是什么？

### 实验内容

1. 定性半定量观察横波的波长  $\lambda$  与波源振动频率  $f$ 、弦线所受张力  $T$  的关系的关系。  
在托盘上加三个砝码的情况下，在范围为 90-150Hz 内改变波源频率，

每改变一次频率，均要左右移动可动滑轮的位置，使弦线出现振幅较大而稳定的驻波。固定频率为 120Hz，改变托盘上砝码的数量，调出两个半波，观察驻波波长和振幅的变化，记录实验现象。

2. 定量测量横波的波长 $\lambda$ 与波源振动频率  $f$  的关系

在托盘上加二或三个砝码的情况下，改变波源振动的频率  $f$  (90-150Hz) 步长 10Hz，用驻波法测量对应的波长，作  $\ln \lambda - \ln f$  图，求其斜率并根据截距计算弦线的线密度。

3. 定量测量横波的波长 $\lambda$ 与弦线所受张力  $T$  的关系

选择振动频率为 120.00Hz，改变弦线上的张力 (1-5 个砝码)，用驻波法测量对应的波长，作  $\ln \lambda \sim \ln T$  图。

### 注意事项

1. 仪器共振频率在 60Hz 附近，定量测量时，频率设置不能低于 80Hz。
2. 实际测量时，由于 A 点并不是理想的波节点且读数不准，因此将与 A 相邻的波节点作为测量点。

## 数据记录表格

### 一、定性半定量观测横波的波长 $\lambda$ 与波源振动频率 $f$ 、弦线所受张力 $T$ 的关系

- 1、在托盘上加 3 个砝码，改变波源频率，左右移动可动滑轮的位置，调出振幅较大而稳定的驻波。记录实验现象，画出驻波示意图。【波长取 2 位有效数字即可】

表 1 半定量观测驻波波长 $\lambda$ 与波源振动频率 $f$ 的关系

频率	90Hz	120Hz	150Hz
现象及半定量结果	波长约_____cm 振幅_____	波长约_____cm 振幅_____	波长约_____cm 振幅_____
驻波示意图			

- 2、固定频率为 120Hz，改变托盘上砝码的数量，调出两个半波，观察驻波波长和振幅的变化，记录实验现象。

表 2 半定量观测驻波波长 $\lambda$ 与弦线所受张力 $T$ 的关系

砝码数	1	3	5
现象及半定量结果	波长约_____cm 振幅_____	波长约_____cm 振幅_____	波长约_____cm 振幅_____
驻波示意图			

**注意：**驻波稳定的条件是所有波节点都静止不动；起振点（弦线与起振片相连的位置）几乎不振动，但不严格是波节点，测量时不能作为一个波节。

### 二、定量测量横波的波长 $\lambda$ 与波源振动频率 $f$ 的关系

- 1、在托盘上加 2 或 3 个砝码，改变波源振动的频率 $f$ ，用驻波法测量对应的波长 $\lambda$ ，数据表格如表 3 所示。
- 2、对  $\ln\lambda \sim \ln f$  图，并作线性拟合，求其斜率。
- 3、根据截距计算弦线的线密度。

### 三、定量测量横波的波长 $\lambda$ 与弦线所受张力 $T$ 的关系

- 1、选择振动频率为 120.00 Hz，通过增减砝码来改变弦线上的张力 $T$ ，用驻波法测量对应的波长 $\lambda$ ，数据表格如表 4 所示。

2、作  $\ln\lambda \sim \ln T$  图，并作线性拟合，求其斜率。

表 3 振动频率  $f$  与驻波波长  $\lambda$  的关系

实验参数：托盘质量\_\_\_\_\_ g，砝码\_\_\_\_\_个，每个砝码质量\_\_\_\_\_ g

频率 $f$ / Hz	$x_1$ / mm	$x_2$ / mm	半波数 $n$	波长 $\lambda$ / mm	$\ln f$	$\ln \lambda$
90.00					保留到小数点后第四位	保留到小数点后第四位
100.00						
110.00						
120.00						
130.00						
140.00						
150.00						

注意：测量时尽可能测量多个驻波的长度。

表 4 弦线张力  $T$  与驻波波长  $\lambda$  的关系

实验参数：托盘质量\_\_\_\_\_ g，每个砝码质量\_\_\_\_\_ g，振动频率\_\_\_\_\_ Hz

砝码数	张力 $T$ / N	$x_1$ / mm	$x_2$ / mm	半波数 $n$	波长 $\lambda$ / mm	$\ln T$	$\ln \lambda$
1							
2							
3							
4							
5							

注意：计算张力  $T$  时不要忘记加上砝码盘的重量（砝码盘上标有质量）；

上海地区重力加速度取  $9.794 \text{ m/s}^2$ 。

$\ln T$   $\ln \lambda$   $\ln f$  保留到小数点后四位。

