

实验 17 多普勒效应的应用与声速的测量

对于机械波、声波、光波和电磁波而言,当波源和观察者(或接收器)之间发生相对运动,观察者接收到的波的频率和发出的波的频率不相同的现象,称为多普勒效应.

多普勒效应在核物理,天文学、工程技术,交通管理,医疗诊断等方面有十分广泛的应用.如用于卫星测速、光谱仪、多普勒雷达,多普勒彩色超声诊断仪等.

电磁波与机械波(包括声波)的多普勒效应在定量计算上有所不同,本实验只研究超声波的多普勒效应.

【实验目的】

1. 加深对多普勒效应的了解
2. 测量空气中声音的传播速度及物体的运动速度

【实验仪器】

DH-DPL 多普勒效应及声速综合测试仪, 示波器.

【实验原理】

1. 声波的多普勒效应

设声源在 origin, 声源振动频率为 f , 接收点在 x , 运动和传播都在 x 轴方向, 声速为 u_0 . 对于三维情况, 处理稍复杂一点, 其结果相似. 声源、接收器和传播介质不动时, 在 x 方向传播的声波的数学表达式为:

$$p = p_0 \cos 2\pi f \left(t - \frac{x}{u_0} \right) \quad (17-1)$$

(1) 声源运动速度为 v_s , 介质和接收点不动.

在声源和接收器之间的波长为 λ' , T 是声源的振动周期, 接收器接收到的频率为:

$$f' = \frac{u_0}{\lambda'} = \frac{u_0}{u_0 T - v_s T} = \frac{f}{1 - M_s} \quad (17-2)$$

即接收器接收到的频率变为原来的 $\frac{1}{1 - M_s}$, 其中 $M_s = \frac{v_s}{u_0}$ 为声源运动的马赫数, 声源

向接收点运动时 v_s (或 M_s) 为正, 反之为负.

(2) 声源、介质不动. 接收器运动速度为 v_r , 接收器接收到的波的传播速度为

$$u' = u_0 + v_r, \text{ 接收器接收到的频率为}$$

$$f' = \frac{u'}{\lambda} = \frac{u_0 + v_r}{u_0 T} = (1 + M_r) f \quad (17-3)$$

其中 $M_r = \frac{v_r}{u_0}$ 为接收器运动的马赫数，接收点向着声源运动时 v_r （或 M_r ）为正，反

之为负，即接收器接收到的频率变为原来的 $(1 + M_r)$ 倍。

(3) 介质不动，声源运动速度为 v_s ，接收器运动速度为 v_r ，可得接收器接收到的信号的频率为：

$$f' = \frac{1 + M_r}{1 - M_s} f \quad (17-4)$$

为了简单起见，本实验只研究第二种情况：声源、介质不动，接收器运动速度为 v_r 。根据 (17-3) 式可知，改变 v_r 就可得到不同的 f' ，从而验证了多普勒效应。另外，若已知 v_r 、 f ，并测出 f' ，则可算出声速 u_0 ，可将用多普勒频移测得的声速值与用时差法测得的声速作比较。若将仪器的超声换能器用作速度传感器，就可用多普勒效应来研究物体的运动状态。

2. 声速的几种测量原理

(1) 超声波与压电陶瓷换能器

频率 20Hz-20kHz 的机械振动在弹性介质中传播形成声波，高于 20kHz 称为超声波，超声波的传播速度就是声波的传播速度，而超声波具有波长短，易于定向发射等优点。声速实验所采用的声波频率一般都在 20~60kHz 之间，在此频率范围内，采用压电陶瓷换能器作为声波的发射器、接收器效果最佳。

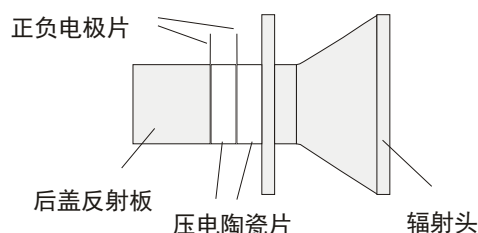


图17-1 纵向换能器的结构简图

压电陶瓷换能器利用压电效应和磁致伸缩效应从而实现了在机械振动与交流电压之间双向换能。根据它的工作方式，分为纵向（振动）换能器、径向（振动）换能器及弯曲振动换能器。声速教学实验中所用的大多数采用纵向换能器。图17-1为纵向换能器的结构简图。其中辐射头用轻金属做成喇叭形，后盖反射板用重金属做成柱形，中部为压电陶瓷圆环，其极化方向与正负电极片一致，螺钉穿过圆环中心。这种结构增大了辐射面积。振子纵向长度的伸缩直接影响头部轻金属，发射的波有较好的方向性和平面性。

在正负电极片输入交流电信号，电极片间的压电陶瓷将产生逆压电效应，在极化方向发生形变，随交流电信号震荡发出一近似平面超声波（发射换能器）。将另一纵向换能器与该发出超声波的换能器正对，作为接收换能器。当发射超声波频率与发射及接收换能

器系统中压电陶瓷的谐振频率相等，接收换能器的正负电极片发出电信号最强。

(2) 时差法测量原理

连续波经脉冲调制后由发射换能器发射至被测介质中，声波在介质中传播，经过 t 时间后，到达 L 距离处的接收换能器。波形变化如图17-2所示

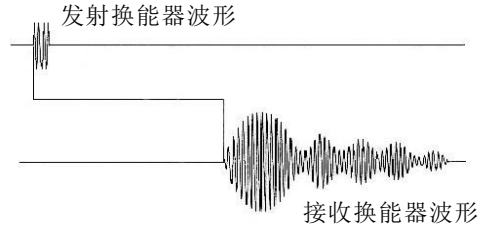


图17-2 发射波与接收波

通过测量二换能器发射接收平面之间距离和时间，就可以计算出当前介质下的声波传播速度。

(3) 共振干涉法（驻波法）测量原理

将接收换能器与发射换能器正对，由于换能器的核心器件压电陶瓷在极化方向所产生电荷与其在该方向所受外力成正比，所以在声波信号频率锁定为发射和接收换能器系统的最佳谐振频率时，接收换能器产生电信号的大小正比于声压的大小。而声压

$$p^* = -\rho u^2 \frac{\partial \xi}{\partial x} \quad (17-5)$$

其中 ρ 为无声波时介质密度， u 为声波波速， ξ 为介质质点位移。由于存在：

$$\text{发射换能器发射声波造成介质质点位移 } \xi_1 = A_1 \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) = A_1 \cos \omega \left(t - \frac{x}{u} \right)$$

$$\text{接收换能器反射声波造成介质质点位移 } \xi_2 = A_2 \cos \left[2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right) + \pi \right]$$

接收换能器反射的声波再次从发射换能器反射回来后造成介质质点位移

$$\xi_3 = A_3 \cos \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} + \frac{2L}{\lambda} \right) + 2\pi \right]$$

考虑声波的散射：

a) 在换能器端面直径 $d \ll L$ (换能器间距) 的区域， ξ_3 可近似忽略，即：

$$\begin{aligned} \xi &\approx \xi_1 + \xi_2 = A_1 \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) + A_2 \cos \left[2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right) + \pi \right] \\ p^* &\approx -\rho u \omega A_1 \sin \omega \left(t - \frac{x}{u} \right) + \rho u \omega A_2 \sin \left[\omega \left(t + \frac{x}{u} \right) + \pi \right] \end{aligned} \quad (17-6)$$

由于接收换能器可视为一近似垂直于波线的刚性平面，传播到接收换能器的声波几乎完全被反射 (可视为 $A_1 = A_2 = A$)，为将公式简单化，将坐标轴原点平移至接收端，即令接收换能器端面处 $x = 0$ ，则发射端处 $x = -L$ ，则：

$$\begin{aligned} \xi_{x=0} &\approx \xi_{1(x=0)} + \xi_{2(x=0)} = 0 \\ p_{x=0}^* &\approx 2\rho u \omega A \sin(\omega t + \pi) \end{aligned} \quad (17-7)$$

由公式(17-7)可以看出，虽然在接收换能器端面处合成驻波的幅值为 0 (波节)，但该处声压并不为 0，当接收换能器远离发射换能器时，其端面处的声压接近一幅值为 $2\rho u \omega A$ 的正弦波。

b) 在发射和接收换能器相距较近，且与端面直径 d 相差不大时，声波在二换能器端面间多次反射，不但需要考虑 ξ_3 还需要考虑 ξ_4 、 ξ_5 、 $\xi_6 \dots$ 。

比较 ξ_1 和 ξ_3 可以看出当 $L = (k \pm \frac{1}{4})\lambda$ 时, ξ_1 和 ξ_3 干涉相消, 同理 ξ_2 和 ξ_4 也干涉相消, 而造成声压 $p_{x=0}^*$ 虽然相位没有变化, 但幅值相应减少. 当 $L = \frac{k\lambda}{2}$ 时, 不但 ξ_1 和 ξ_3 干涉相长, 而且多次反射, 多次叠加 ξ_2 、 ξ_4 、 ξ_5 、 ξ_6 ……均干涉相长, 使幅值 A 急剧增大, 也造成声压 $p_{x=0}^*$ 的幅值急剧增大.

改变接收换能器的位置, 可以从示波器上看到接收换能器感应到信号的幅值随着位置的变化而变化. 当换能器间距为 $\frac{1}{4}$ 波长的奇数倍时, 感应到信号的幅值较小, 当间距为 $\frac{1}{4}$ 波长的偶数倍(即半波长的整数倍)时, 感应到信号的幅值较大, 且距离越近, 幅值越大.

若从感应到信号的第 n 个幅值较大点变化到第 $n+1$ 个幅值较大点时, 接收换能器移动距离 ΔL , 则 $\Delta L = \frac{\lambda}{2}$, 连续多次测量相隔半波长的接收换能器位置变化, 可得超声波波长, 再记录下此时超声波频率 f 后, 即可算出声速.

(4) 相位比较法(行波法)测量原理

由于声波源点的振动和接收点的振动是同频率的振动, 二者相位差

$$\varphi = \frac{2\pi L}{\lambda} = \frac{2\pi f L}{u} \quad (17-8)$$

将两个信号分别输入示波器的X、Y端, 在示波器显示屏显示出相互垂直的两个同频率振动合成的轨迹——1:1 李萨如图形.

根据式(17-8)可得

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi f}{u} \Delta L \quad (17-9)$$

当 f 、 u 确定, φ 随着 L 的变化而变化, 显示屏上的图形也依次变化(如图17-3所示), 当 $\Delta\varphi = 2\pi$, 图像恢复到开始时的形状, 记录此过程中的 ΔL 值即波长 λ , 则

$$u = f\Delta L \quad (17-10)$$

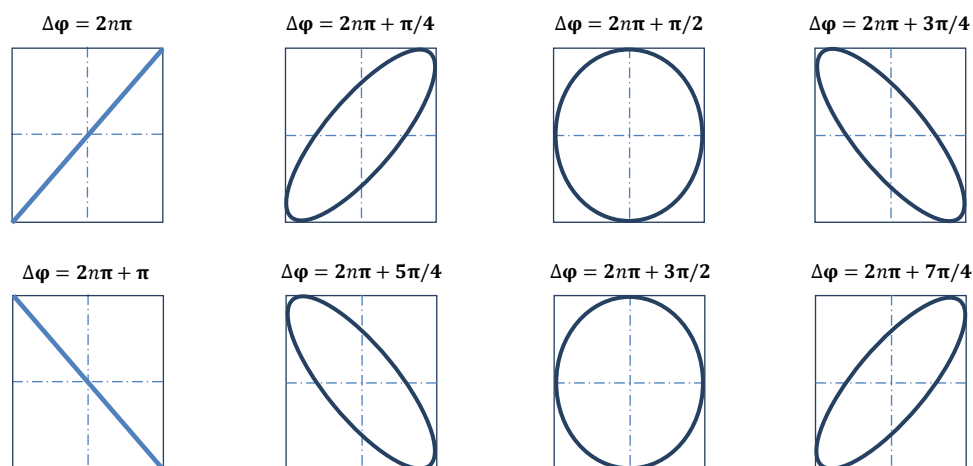


图 17-3 频率为 1:1 的李萨如图形

【实验内容与步骤】

1. 实验内容

- (1) 熟悉测量声速的多种方法，进一步加深对多普勒效应的了解。
- (2) 利用已知的声速进一步观测空气中物体的移动速度。

2. 实验步骤

(1) 时差法测声速

① 将多普勒综合测试仪的发射功率和接收灵敏度均调至最大(旋钮顺时针到头)。

② 调节测试台滚花帽(图 17-4)将接收换能器调到 12cm 处，记录接收换能器接收到的脉冲信号与原信号时间差。

③ 将接收换能器分别调至 12cm、13cm……19cm 处，分别记录各位置时间差。(如在调节过程中出现时间显示不稳定，则选择稳定区域进行测量)

(2) 多普勒法测声速

瞬时法测声速

- ① 从主菜单进入多普勒效应实验
- ② 将接收换能器调到约 75cm 处，设置源频率使接收端的感应信号幅值最大(谐振状态)。
- ③ 返回多普勒效应菜单，点击瞬时测量。
- ④ 按下智能运动控制系统的“Set”键，进入速度调节状态→按“Up”直至速度调节到 0.450 m/s。
- ⑤ 按“Set”键确认→再按“Run/Stop”键使接收换能器运动。
- ⑥ 记录“测量频率”的值，按“Dir”改变运动方向，再次测量。

(3) 共振干涉法(驻波法)测声速

① 在示波器“Y-t”模式下调节“垂直偏转因数”，使示波器显示接收换能器输出电压的波形合适。

② 将两换能器的间距 L 从大约 11~12cm 起，连续记录下 10 组正弦波振幅极大值时标尺示数。

(4) 相位比较法(行波法)测声速

- ① 在示波器“X-Y”模式下调节“垂直偏转因数”使示波器显示的发射和接收换能器

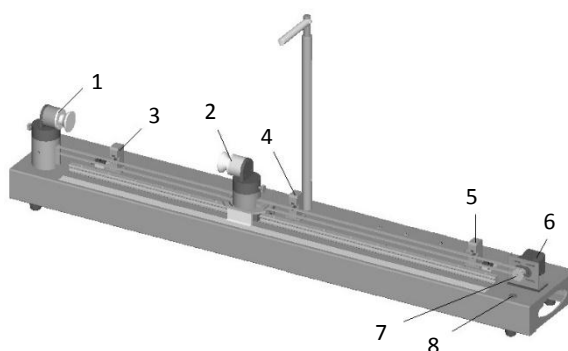


图 17-4 测试台结构示意图

- | | |
|-------------|----------|
| 1. 发射换能器 | 2. 接收换能器 |
| 3. 左限位保护光电门 | 4. 测速光电门 |
| 5. 右限位保护光电门 | 6. 步进电机 |
| 7. 滚花帽 | 8. 复位开关 |

输出电压所合成的李萨如图形大小合适。

② 将两换能器的间距 L 从大约 11~12cm 起，连续记录下 10 组李萨如图形出现相同直线时标尺示数。

(5) 反射法测声速（选做）

反射法测量声速时候，反射屏要远离两换能器，调整两换能器之间的距离、两换能器和反射屏之间的夹角 θ 以及垂直距离 L ，如图 17-5 所示，使数字示波器（双踪，由脉冲波触发）接收到稳定波形；利用数字示波器观察波形，通过调节示波器使接受波形的某一波头 b_n 的波峰处在一个容易辨识的时间轴位置上，然后向前或向后水平调节反射屏的位置，使移动 ΔL ，记下此时示波器中先前那个波头 b_n 在时间轴上移动的时间 Δt ，如图 17-6 所示，从而得出声速值

$$u_0 = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{2\Delta L}{\Delta t \cdot \sin \theta} \quad (17-11)$$

用数字示波器测量时间同样适用于直射式测量，而且可以使测量范围增大。

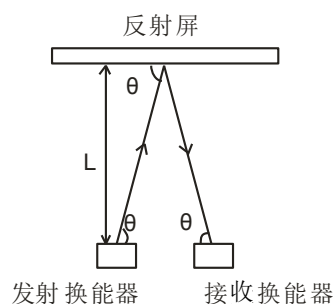


图 17-5 反射法测声速

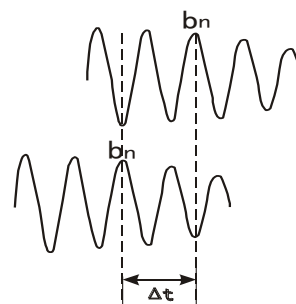


图 17-6 接收波形

(6) 利用已知声速测物体移动速度

① 从主菜单进入变速运动实验，将采样步距改为 50ms。

② 长按智能运动控制系统的“Set”键，使其进入“ACC1”变速运动模式，再按“Run/Stop”键使接收换能器变速运动。

③ 点击“开始测量”由系统记录接收到信号的频率（如半分钟后曲线仍未出现，则需重新调节谐振频率）。再按“Run/Stop”键停止变速运动。

④ 点击“数据”记录实验数据。计算接收换能器的最大运行速度，画出相应 $v-t$ 曲线。

【数据记录与处理】

1. 将接收换能器分别调至 12cm、13cm……19cm 处，分别记录各位置和时间差，用作图法计算声速。

2. 利用 17-4 式，将测得的 f_+ （朝向声源运动）和 f_- （远离声源运动）求差，从而得出声

速值 u_0 的计算式，并且做不确定度的计算，给出 u_0 的结果表达式。

3. 用逐差法处理共振干涉法数据, 给出声波波长、声速的测量结果.
4. 用逐差法处理相位比较法数据, 给出测量结果, 并与理论值 进行比较.

实验中得到声速理论值 $u_0 = 331.45 \sqrt{1 + \frac{t}{273.16}}$, 其中 t 为室温.

5. 做 $t-f-v$ 表格, 画出相应 $v-t$ 曲线, 并且求出最大和最小速度, 给出表达式.

【思考题】

1. 机械波的波速大小是由哪些因素决定的? 波速大小的参照物是什么?
2. 空气中的声波为什么只能是纵波? 水中的声波呢?
3. 产生多普勒现象的条件是什么?
4. 用共振干涉法和相位比较法测声速有何相同和不同?
5. 当接收换能器处于 $d \ll L$ 区域, 计算接收换能器端面处声波的动能和弹性势能.
6. 什么是激波? 现象举例
7. 如果一个观察者围绕一个机械波或电磁波波源作圆周运动, 对于机械波有没有多普勒效应, 对于电磁波有没有多普勒效应?

【参考文献】

1. 马大猷. 现代声学理论基础. 北京: 科学出版社, 2004.
2. 余虹. 大学物理学. 北京: 科学出版社, 2008.

王茂仁 秦颖 滕永杰 姜东光