

声波谐振管综合实验

201711140236 物理系基地班 李励玮

实验仪器

PASCO WA-9612 型谐振管, 示波器, 信号发生器。

实验原理

1. 空气中的声波

当扬声器的膜片振动时, 便会产生声波, 附近空气的振动与波的传播方向一致, 是纵波。空气中的声速

$v = \sqrt{\frac{\gamma RT_0}{\mu}}$ 其中 $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ 为空气定压热容与定容比热之比, μ 为空气的摩尔质量, T_0 为气体的热力学温度, R 为热力学普适常数。

对于干燥空气, $\gamma = \frac{7}{5}$ $\mu = 28.96 \text{ g/mol}$, 0°C 声速 $v_0 = \sqrt{\frac{1.4 \times 8.31 \times 273.15}{0.02896}} = 331 \text{ (m/s)}$

展开到 1 阶, $t^\circ\text{C}$ 声速约为

$$v_t \approx C_0 \left(1 + \frac{t}{2 \times 273.15} \right) = (331 + 0.606t) \text{ m/s}$$

2. 管中的声场

假设在长度为 l 的管道中, 声压为 p_i 的声波沿管的轴线方向右传播, 行进波在界面 0 的位置受到反射, 反射波的声压为 p_r , 行进波在界面 0 的位置受到反射, 反射波声压为 p_r , 行进波与反射波的声压方程为:

$$p_i = p_{ai} e^{j(\omega t - kx)} \quad (1)$$

$$p_r = p_{ar} e^{j(\omega t + kx)} \quad (2)$$

其中 p_{ai} 和 p_{ar} 为行进波和反射波的振幅, ω 声波的圆频率, k 为波矢。

管中合成波的声压

$$p = p_i + p_r = |p_a| e^{j(\omega t + \varphi)} \quad (3)$$

其中 p_a 为合成波的振幅, φ 固定为相位因子。

定义声波界面反射系数为 r_p

$$r_p = \frac{p_{ar}}{p_{ai}} = |r_p| e^{j\sigma\pi} \quad (4)$$

$|r_p|$ 表示反射系数的绝对值, $\sigma\pi$ 为界面处反射波和入射波的相位差。

将 (4) 带入 (3), 考虑 φ 为固定相位, 对分析不受影响, 略去。总声压

$$p = p_{ai} [e^{-jkx} + |r_p| e^{j(kx + \sigma\pi)}] e^{j\omega t} \quad (5)$$

总声压的振幅可以表示为

$$|p_a| = p_{ai} \left| \sqrt{1 + |r_p|^2 + 2|r_p| \cos 2k(x + \frac{\sigma\lambda}{4})} \right| \quad (6)$$

当 $2k(x + \frac{\sigma\lambda}{4}) = \pm(2n - 1)\pi$ 时, $|p_a|$ 具有极小值: $p_{amin} = p_{ai}(1 - |r_p|)$

当 $2k(x + \frac{\sigma\lambda}{4}) = \pm 2n\pi$ 时, $|p_a|$ 具有极大值: $p_{amax} = p_{ai}(1 + |r_p|)$

定义驻波比 G 为 $G = \frac{p_{amin}}{p_{amax}} = \frac{1 + |r_p|}{1 - |r_p|}$ (7)

则界面反射系数 $|r_p| = \frac{G-1}{G+1}$ (8)

显然,可以通过测量管道中的声压分布可以求出管道界面的反射系数。根据这个原理制作的驻波管常用于测量材料的吸声系数。

若端口介质为理想的吸声负载,则 $r_p = 0$, $G=1$ 。

若端口的材料为刚性的全反射材料,则 $r_p = 1$, $\sigma = 0$, $G = \infty$ 。此时,管道中声波的总声压振幅大小

$$|p_a| = p_{ai} \left| \sqrt{1 + |r_p|^2 + 2|r_p| \cos 2k(x + \frac{\sigma\lambda}{4})} \right| = 2p_{ai} |\cos kx| \quad (9)$$

管中形成了完全的驻波。

声波反射可以发生在闭合管或打开管的尾部。如果管尾闭合,称之为闭管,此时空气被阻挡,则空气位移的波节(或声压的波腹)出现在管尾;如果管尾开放,为开管,此时管内外压强相当,则声压的波节(或空气位移的波腹)出现在管尾。

3. 管中声波的谐振

声波在管中会发生多次多次反射,在某些特定频率这些反射波的相位一致,产生一个振幅非常大的驻波,这些频率称为谐振频率。要形成谐振,声波在管内来回一次积累的相位必须是 2π 的整数倍。谐振的条件与管口的开闭情况有关。

对于开管,谐振时管端口为声压的波节。波长

$$l = n\lambda/2 \quad (10)$$

其中 n 为正整数, n 不同代表不同的谐振模式。考虑介质中声波波速 v 与其频率 f 和波长 λ 之间的关系 $v = \lambda f$,则谐振频率

$$f = \frac{nv}{2l} = nf_1 \quad (11)$$

其中 f_1 为 $n=1$ 的频率,称基频,谐振频率必须为基频的整数倍。可通过测量谐振频率与其振动模式数 n 之间的线性依赖关系,其斜率为基频 f_1 。

对于闭管,谐振时,开管端口为声压的波节,封闭段为声压的波腹。波长与管长之间需要满足以下条件:

$$l = (n - 1/2) \lambda/2 \quad (12)$$

其中 n 为正整数。管长和波长满足

$$f = \frac{(n-1/2)v}{2l} \quad (13)$$

$n=1$ 时, $f_1 = v/4l$, 则

$$f = 2nf_1 - f_1 \quad (14)$$

与开管不同,闭管中谐振频率随振动模式数 n 变化的斜率为 $2f_1$ 。

上面的公式假设开管时声压的波节正好出现在管口。实际波节大约位于管外 0.4 倍管直径的位置,因此要对管驻波的公式进行管口修正:

$$\text{开管: } l + 0.8d = n\lambda/2 \quad (15)$$

$$\text{闭管: } l + 0.4d = (n - \frac{1}{2})\lambda/2 \quad (16)$$

其中 d 为管直径。

4. 声波的传播速度的测量

管中声速的测量有共振法、回波法。

共振法基于声波在管中传播,入射波与反射波叠加形成驻波,管长和波长及频率满足公式(10)到(16),通过调节声波的频率在管中形成谐振,然后测量声波的基频或振动模式求出声速。

回波法测量探测器与端口之间的距离,初始波和反射波之间的时间间隔来测量声速。

$$vt = 2(l - l_1) \quad (17)$$

为了减小误差,常常通过改变探测器与端口之间的距离,通过线性拟合来求声速。

实验内容

1. 研究开管、闭管中声波谐振频率及其对应的振动模式数之间的关系，求基频。
2. 测量开管、闭管中驻波的声压分布，计算声波的声速。
3. 研究特定频率下，闭管中的长度与谐振模式数之间的关系，计算声速。
4. 观察开管、闭管中回声波的特点，用回声法测量声速（选作）

实验步骤

1. 连接仪器。声波由扬声器产生，通过固定在一根金属杆上的微型麦克风探测，麦克风可以通过金属杆在管中来回移动来检测管中的波形特性，通过其上的开管来打开和关闭。谐振管的长度为 90cm，内有标尺，可以在一个端口插入活塞形成闭管，通过移动活塞位置调节管长。
2. 选用正弦波，条件电压幅度到合适的大小（过大损坏扬声器，过小信噪比低），通过置于距离管口约 2cm 的麦克风测量声波信号，调节信号源的频率，使麦克风信号最强，达到谐振，分别测量管中声波谐振频率及其对应的振动模式数之间的关系。
3. 选定一谐振频率（700~1200Hz），微调频率达到谐振，移动固定麦克风的金属杆，分别测量开管、闭管中波的声压的分布规律，计算波长及声速；
4. 选定一频率（700~1200Hz），将麦克风置于距离管口约 2cm 处，移动活塞位置，测量管中声波谐振振动模式数与管长之间的关系，计算声波波长和声速。
5. 选用 10Hz 的方波，将麦克风从管的一端开始移动，观察初始波和回波信号的特点，测量开管、闭管中波的波速。

注意：实验结束之后关闭麦克风电源，以免消耗电池电量。

思考题

1. 波节。因为麦克风探测的是声压的大小，而声压大小和波节波腹有关。故当声压极大、即示波器接收信号的振幅极大时，正好对应波节的位置。波节和波腹都对应一定的范围，而用示波器观察时，波节的信号更明显些，所以波节的可信度较高。
2. 使谐振管为开管，改变信号源发出声波的频率使产生谐振，记录每次谐振相应频率 f ，拟合曲线，可得斜率为 f_1 ，通过 $f_1 = \frac{v}{2l}$ 计算得谐振管管长 l 。可以探测井深。
3. 无关。声音传播是由于空气振动，与空气温度有关，与管的内径尺寸无关。
4. 通过测量声速确定室内温度，探测井深。