

声波谐振管实验

陈依皓

(北京师范大学 物理学系, 北京 100875)

摘要: 本次实验的目的是利用PASCOWA-9612型谐振管装置和示波器研究一维波的反射、干涉与谐振现象以及掌握多种测量声速的方法。

关键词: 一维波, 谐振管, 声速测量

中图分类号: Oxx

文献标识码: A

文章编号: 1000-0000(0000)00-0000-00

1 引言

机械振动在介质中传播形成声波, 本实验研究空气中声波。

2 实验原理

2.1 空气中的声波

声波在空气中只有纵波, 其波速为

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT_0}{\mu}}$$

式中, $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ 为空气的比热容比, 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, 温度为 $t^\circ\text{C}$ 时, $\gamma = 7/5$, $\mu = 28.96\text{g/mol}$, 此时声速为

$$v_t \approx v_0 \left(1 + \frac{t}{2 \times 273.15} \right) \\ = (331 + 0.606t) \text{ m/s}$$

声压是空气压强相对大气压起伏的部分, 它是声传感器能够直接测量的物理量, 下面我们

2.2 管中的声场

对于管内的声波, 当声波波长 λ 远大于管的直径 d 时, 管内声波可以简化为一维平面波

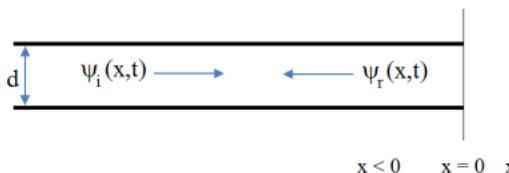


图1 管内声波示意图

考虑在半无限长管内传播的声波, 设 $\psi_i(x, t)$ 为向右传播的声波, 行进到界面

($x = 0$) 反射, 反射波的声压分布为 $\psi_r(x, t)$, 有

$$\begin{cases} \psi_i(x, t) = A_i e^{j(kx - \omega t)} \\ \psi_r(x, t) = A_r e^{j(-kx - \omega t)} \end{cases}$$

由波的叠加原理可知 A_r 和 A_i 成正比, 即

$$A_r = r A_i$$

r 被称为界面的反射系数, $r = |r| e^{j2\sigma\pi}$, $|r|$ 称为反射率, σ 为相移因子。对于管口直接与自由空间相通的情况, 一般取 $\sigma = 1/2$, 在管口处形成声压振幅的极小值; 对于密封管口的情况, 一般取 $\sigma = 0$, 在管口处形成声压振幅的极大值。

管中总的声压为

$$\begin{aligned} \psi(x, t) &= \psi_i(x, t) + \psi_r(x, t) \\ &= A_i (e^{jkx} + r e^{-jkx}) e^{-j\omega t} \end{aligned}$$

总振幅为

$$\begin{aligned} P(x) &= |\psi(x, t)| \\ &= |A_i| \sqrt{1 + |r|^2 + 2|r| \cos(2kx - 2\sigma\pi)} \end{aligned}$$

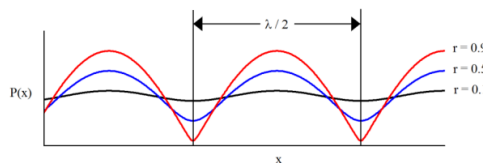


图2a 不同反射率的声压分布比较

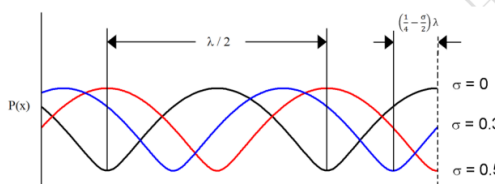


图2b 不同反射相移因子对声压分布的影响

当 $|r| = 0$ 时, 为行波

$$P(x) = |A_i| = \text{const}$$

当 $|r| = 1$ 时, 为驻波

$$P(x) = |A_i| \sqrt{2 + 2 \cos(2kx - 2\sigma\pi)} \\ = 2|A_i| \cos(kx - \sigma\pi)$$

对于更一般的情况,

$$x = \frac{(n + \sigma)\lambda}{2 \text{ 时}}$$

$$P_{\max} = |A_i| (1 + |r|)$$

$$x = \frac{(n + \sigma + \frac{1}{2})\lambda}{2 \text{ 时}}$$

$$P_{\min} = |A_i| (1 - |r|)$$

定义驻波比

$$G = \frac{P_{\max}}{P_{\min}} = \frac{1 + |r|}{1 - |r|}$$

测量出 G 即可得到反射系数, 这就是用驻波管测量材料吸声系数的工作原理。

2.3 管中声波的谐振

当声波在一根有限长度的管子内传播时, 波在管内会多次反射, 在谐振频率时, 这些反射波的位相一致, 会叠加产生一个振幅非常大的驻波, 此时称管内发生了谐振。

谐振频率为

$$f = (n - \sigma_L - \sigma_R) \frac{v}{2L}$$

其中 L 代表管长, 不同的整数 n 代表不同的本征模式。

两端都是开口的情况, 由于 $\sigma_L = \sigma_R = \frac{1}{2}$

$$f = \frac{(n - 1)v}{2L} \equiv \frac{mv}{2L}$$

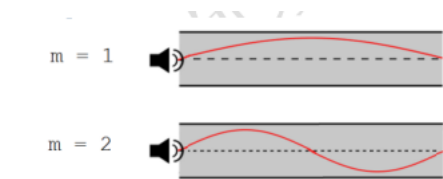


图3 开管内的谐振模式

一端开口, 另一端闭口的情况, $\sigma_L = \frac{1}{2}$,

$\sigma_R = 0$

$$f = (m - \frac{1}{2}) \frac{v}{2L}$$

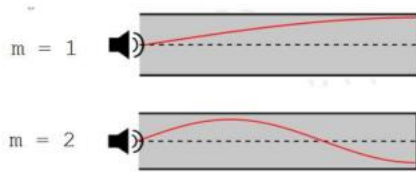


图4 闭管内的谐振模式

3 实验结果及分析

3.1 观察声波在管口的反射, 并用回声法测量声速

我们利用扬声器输入一个 20Hz 的方波, 不断改变活塞位置, 把活塞向管内推进, 由于声波传播的路程减小, 因此反射波出现的时刻会提前。

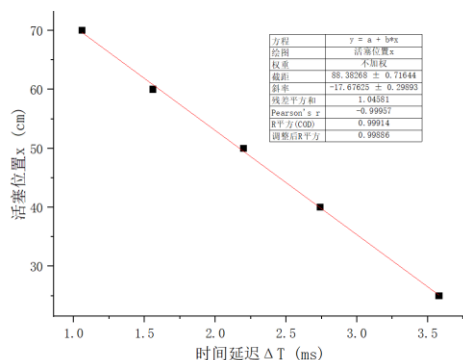
有关系式

$$x = a + \frac{1}{2}v\Delta T$$

式中, x 为活塞位置, v 为声速, ΔT 为反射波相对入射波的时间延迟

活塞位置 x/cm	时间延迟 $\Delta T/\text{ms}$
25	3.58
40	2.74
50	2.20
60	1.56
70	1.06

线性拟合如图



如图所示, $\frac{1}{2}v = 17.676\text{cm/ms}$

容易计算得回声法测量得到的声速为

$$v_{\text{测量}} = 353.52\text{m/s}$$

实验时室温为 $t = 25.5^{\circ}\text{C}$

根据公式

$$v_t \approx v_0 \left(1 + \frac{t}{2 \times 273.15} \right) \\ = (331 + 0.606t) \text{ m/s}$$

可得 $v_{\text{理论}} = 346.45 \text{ m/s}$

测量值与理论值的相对误差为 $\Delta v =$

$$\frac{|v_{\text{测量}} - v_{\text{理论}}|}{v_{\text{理论}}} = 2.04\%$$

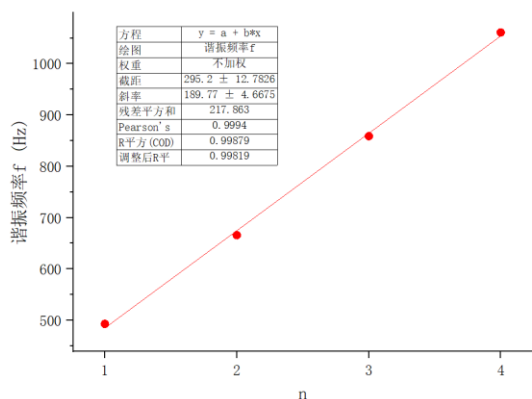
考虑管内温度可能略高于室温，且直线拟合效果良好，该误差在可接受的范围内。

3.2.1 按经验公式进行管口修正，并计算声速

管口修正后得到的管长

$$L' = L + 0.4d = 0.9128 \text{ m}$$

根据 $\Delta f = v/2L'$ ，做如图所示线性拟合闭口情况下



其斜率为 $v/2L' = 189.77$ ，计算得

$$v_{\text{闭口}} = 346.44 \text{ m/s}$$

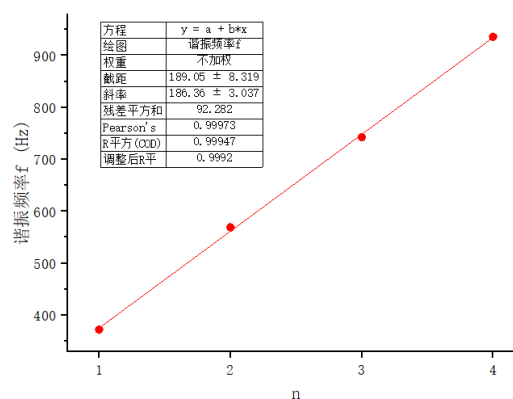
开口情况下

3.2 测量谐振频率，计算声速或等效管长

我们利用扬声器输入一个正弦波，连续改变信号，观察示波器波形，当声压达到极大值时，扬声器输入正弦波的频率就是谐振频率。

闭口时的谐振频率 f/Hz			
492.8	665.8	858.9	1061.0
开口时的谐振频率 f/Hz			
372.4	569.0	742.7	935.7

管长 L/m	管口直径 d/m
0.9	0.032



其斜率为 $v/2L' = 186.36$ ，计算得

$$v_{\text{开口}} = 340.21 \text{ m/s}$$

线性拟合的效果较好

$$\Delta v_{\text{闭口}} = 0.02\% \quad \Delta v_{\text{开口}} = 1.80\%$$

3.2.2 假定声速已知，计算等效管长与管口修正

带入声速的理论值 $v = 346.45 \text{ m/s}$ 根据 $\Delta f = v/2L'$ 可计算得

	等效管长 L'/m	管口修正 Δ
闭口情况	0.9128	$0.40d$
开口情况	0.9296	$0.92d$

开口测量的误差略大于闭口测量的误差，考

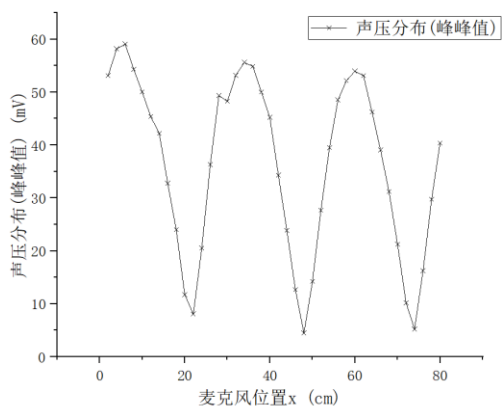
虑可能是由于开口的情况边界条件比模型更复杂。

3.3 测量管内的声压分布，计算声速和反射系数

从 $x = 2\text{cm}$ 到 $x = 80\text{cm}$ 改变麦克风的位置，步长为 2cm ，利用示波器测量声波的峰峰值 (V_{pp}) 表示声压

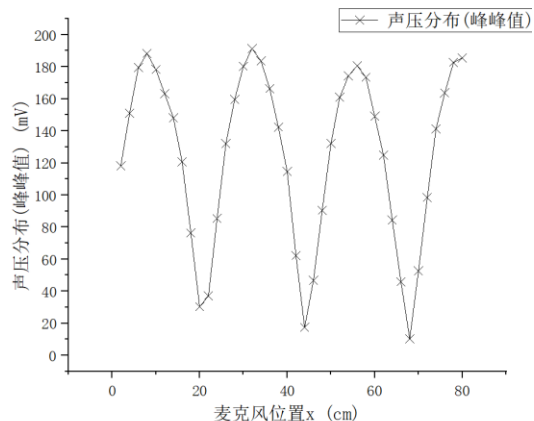
在闭口情况下，输入 665.8Hz 的谐振频率，声压分布如下表（单位为 mV ）

53.12	58.17	59.08	54.34	50.01
45.37	42.19	32.76	23.96	11.68
8.04	20.49	36.31	49.37	48.27
53.17	55.63	54.85	50.01	45.21
34.28	23.85	12.66	4.47	14.20
27.69	39.47	48.54	52.16	53.97
53.09	46.23	39.07	31.19	21.23
10.16	5.19	16.23	29.75	40.35



在开口情况下，输入 742.7Hz 的谐振频率，声压分布如下表（单位为 mV ）

118.1	150.9	179.5	188.2	178.3
163.2	148.1	120.7	76.3	30.3
37.1	85.3	132.1	159.6	180.3
191.3	183.6	166.4	142.3	114.6
62.3	17.3	46.7	90.5	132.1
160.9	174.3	180.7	173.4	149.1
124.9	84.3	45.9	10.3	52.7
98.4	141.3	163.6	182.7	185.4



3.3.1 计算声波波长以及声速

在闭口情况下，出现极小值的位置有

$$x = 22\text{cm} \quad x = 48\text{cm} \quad x = 74\text{cm}$$

计算得

$$\lambda/2 = \Delta x = 26\text{cm}$$

$$v_{\text{闭口}} = \lambda \cdot f = 346.21\text{m/s}$$

在开口情况下，出现极小值的位置有

$$x = 20\text{cm} \quad x = 44\text{cm} \quad x = 68\text{cm}$$

计算得

$$\lambda/2 = \Delta x = 24\text{cm}$$

$$v_{\text{开口}} = \lambda \cdot f = 356.50\text{m/s}$$

$$\Delta v_{\text{闭口}} = 0.69\% \quad \Delta v_{\text{开口}} = 2.90\%$$

开口测量的误差仍然大于闭口测量的误差。

3.3.2 计算驻波比 G ，以及管口反射率 $|r|$

在闭口情况下，我们分别测量到三次极大值与三次极小值，对其求算数平均得

$$P_{\max} = 56.23 \quad P_{\min} = 5.9$$

根据

$$G = \frac{P_{\max}}{P_{\min}} = \frac{1 + |r|}{1 - |r|}$$

得驻波比 $G = 9.53$ ；反射系数 $|r| = 0.81$

在开口情况下，我们分别测量到三次极大值与三次极小值，对其求算数平均得

$$P_{max} = 188.3 \quad P_{min} = 19.3$$

根据

$$G = \frac{P_{max}}{P_{min}} = \frac{1 + |r|}{1 - |r|}$$

得驻波比 $G = 9.76$; 反射系数 $|r| = 0.81$

3.3.3 计算管口的反射相移系数 σ

根据实验原理部分, $x = (n + \sigma)\lambda/2$ 时, $P(x)$ 取到极大值

在闭口情况下, 出现极大值的位置是

$$x_0 = 6\text{cm} \quad x_1 = 34\text{cm} \quad x_2 = 60\text{cm}$$

计算得

$$\sigma = 0.30$$

在闭口情况下, 出现极大值的位置是

$$x_0 = 8\text{cm} \quad x_1 = 42\text{cm} \quad x_2 = 80\text{cm}$$

计算得

$$\sigma = 0.333$$

(感觉结果有误, 希望能在下一版修正)

4 复习思考题

4.1 根据本实验的结论说明管乐器的管长与音调的关系

管乐器的管长越短, 音调越高。

因为 $f = (n - \sigma_L - \sigma_R)v/2L$, 在声速一定的情况下, f 与 L 成反比

4.2 如何更精确地测量谐振管的谐振频率?

1. 应该预先测量空白频率响应曲线, 即在自由空间中, 把麦克风固定在扬声器正前方一定距离的位置, 保持扬声器输入信号幅度不变, 测量麦克风的振幅随扬声器输入信号频率的变化曲线。

2. 进行多次测量并取平均值, 以减小测量误差的影响。

3. 选择高质量的声波谐振管, 以减小管内损耗和非线性效应

4.3 比较谐振管与光学中的法布里-珀罗谐振腔, 二者在原理和测量上有何相似与区别?

相似: 都是使声波或光波在一定空间内发生来回的反射, 使得波发生叠加, 调整相关的参数就可以是体系达到谐振状态, 测量出波的相关参数, 利用相关原理就可以进行所需的计算。

区别: 本实验中的谐振管直接测量的是声波的振幅(用声压来描述), 而法布里珀罗谐振腔直接测量的是光的透射率, 进而反应出光波的特性。

参考文献

[1] 北京师范大学物理实验教学中心. 普通物理实验讲义 II, 2023

Acoustic resonant tube experiment

CHEN Yi-hao

(Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The purpose of this experiment is to use PASCO WA-9612 resonant tube device and oscilloscope to study one-dimensional wave reflection, interference and resonance

phenomena and to master a variety of methods to measure sound velocity.

Key words: one-dimensional wave, resonant tube, sound velocity measurement