

# 声波共振管教学实验中的问题探讨

弓文平, 王引书, 白在桥, 陈学智

(北京师范大学 物理学系, 北京 100875)

摘要: 声波共振管教学实验是理解声波的传播、叠加和共振物理问题的基础,也是了解驻波法测量材料吸声系数和声阻抗的基础.通过对非理想条件下的实验现象的观察,可以促进学生进一步思考,理解声波的增强和减弱及其在工业领域的应用.本文就声波共振管教学实验中最小共振频率测量、管中驻波声压分布及其管口修正等问题进行了探讨.

关键词: 声波共振管;最小共振频率;声场分布;管口修正

中图分类号: O 442.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-0712(2018)11-0021-03

【DOI】10.16854/j.cnki.1000-0712.180195

声波共振管教学实验可以通过研究声波在管中传播的规律,了解声波在管口反射形成驻波的特性,并测量声波的速度、共振频率及管口声反射系数等参量,促进学生理解声波的传播、叠加和共振特性<sup>[1-2]</sup>.声波共振在管乐器的发音、共振式吸声器、热声制冷机和热声驱动器等领域具有广泛的应有背景<sup>[3-4]</sup>.此外,可以通过测量管中的驻波比和传递函数法来测量声学材料的吸声系数和声阻抗<sup>[5]</sup>.在大学物理实验教学中,对于声波谐振管的物理教学实验,主要关注驻波的形成、管中共振频率及其与管长的关系,进而通过测量声波的波速、频率和波长等相关参量,理解声波在共振管中的传播特征.为了简化分析,教学中一般忽略声波在端口反射的能量损失和相位移动.但由此带来的实验结果与理论预言的不一致经常会让感到困惑.

本工作主要介绍利用 PASCO 声光学共振管实验仪研究声波共振特性过程中,由于实验条件偏离理想条件而出现的实验现象.把对非理想情况的研究引入教学内容,可以让学生摆正实验和理论之间的关系,养成从实际出发,不断拓展物理知识、关注应用物理知识的意识.

## 1 实验原理

设共振管的管长为  $L$ ,直径为  $D$ ,两个端口位于  $x=0$  和  $x=-L$  的位置(如图 1 所示),声源在管外距离左端口 1.5 cm.设声波的波长  $\lambda$ .当  $D \ll \lambda$  时,管内只存在沿管长方向传播的平面波.如果声源从  $x=-L$

进入共振管,沿  $x$  轴的负方向传播.入射声波在管中声压的分布可以表示为<sup>[6]</sup>

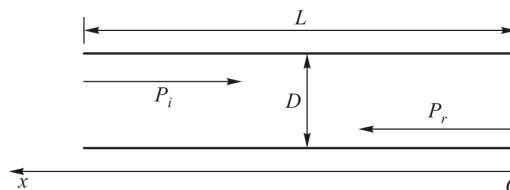


图 1 声波在共振管传播的示意图

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

反射波的声压分布可以表示为

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

无论是一端封闭的闭管,还是两端开放的开管,声波在端点位置均发生多次反射,只是对于不同类型的管,反射波的振幅和相位不同.定义声压的反射系数  $r_p$  为<sup>[6]</sup>

$$r_p = \frac{p_{ar}}{p_{ai}} = |r_p| e^{i\sigma\pi} \quad (3)$$

其中  $\sigma\pi$  是界面处反射波和入射波的相位差.共振管中总声压为入射和反射波声压的叠加:

$$P = P_r + P_i = |p_a| e^{i(\omega t + \varphi)} \quad (4)$$

其中  $\varphi$  为固定的相位因子,不影响场的分布<sup>[6]</sup>,而

$$|p_a| = p_{ai} \sqrt{1 + |r_p|^2 + 2|r_p| \cos 2k \left( x + \sigma \frac{\lambda}{4} \right)} \quad (5)$$

当  $2k \left( x + \sigma \frac{\lambda}{4} \right) = \pm(2n-1)\pi$  时,声压有极小值  $p_{aMin} = p_{ai}(1 - |r_p|)$ ; 当  $2k \left( x + \sigma \frac{\lambda}{4} \right) = \pm 2n\pi$  时,声压有极大

收稿日期: 2018-03-30; 修回日期: 2018-05-02

基金项目: 北京市教改项目(2015-ms060)资助

作者简介: 弓文平(1976—),女,山西太原人,北京师范大学物理学系高工,博士,主要从事大学物理实验教学工作.

值  $p_{a\max} = p_{ai}(1 + |r_p|)$  其中  $n=0, 1, 2, \dots$ . 声压的极大值与极小值的比定义为驻波比  $G$ , 它和声波反射系数  $|r_p|$  的关系是<sup>[6]</sup>

$$G = \frac{p_{a\max}}{p_{a\min}} = \frac{1 + |r_p|}{1 - |r_p|} \quad (6)$$

$$|r_p| = \frac{G-1}{G+1} \quad (7)$$

从式(3)和(6)可以看出, 通过测量驻波波节的位置可以测量入射波和反射波的相位差, 通过测量驻波比可以测量端口材料的反射系数. 如果闭管端口材料为刚性材料, 则反射波和入射波相位差为零, 即  $\sigma=0$ ,  $r_p=1$ , 声场的分布就变为

$$|P_a| = 2P_{ai} |\cos kx| \quad (8)$$

此时声波为完全的驻波.

对于管长为  $L$  的共振管, 则形成驻波的条件为开口端是声波的波腹, 闭口端声波的波节, 则声压在闭口端为极大值, 在开口端为极小值, 则对于一端封闭的管, 波长必须满足下列条件:

$$L = (2n-1)\lambda/4 \quad (9)$$

对于两端开口的管, 则波长必须满足

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

其中  $n$  为正整数. 由于开口一端存在不完全反射, 波会溢出端口, 则需要对端口波腹位置进行修正, 修正值依赖于管的直径、声波的波长及开管端口周围可能存在的反射介质等. 常用的经验公式是: 对于闭管(实为一端开一端闭)的修正为

$$L+0.4D = (2n-1)\lambda/4 \quad (11)$$

对于开管(实为两端开)的修正

$$L+0.8D = n\lambda/2 \quad (12)$$

则声波的频率为:

$$f = \frac{(2n-1)v}{4(L+0.4D)} \quad (\text{闭管}) \quad (13)$$

$$f = \frac{nv}{2(L+0.8D)} \quad (\text{开管}) \quad (14)$$

其中  $v$  为声速, 声波在空气中传播速度与温度有关, 经验公式表示为

$$v(\text{m/s}) = 331.5 + 0.607T(^{\circ}\text{C}) \quad (15)$$

在固定管长时,  $f$  是  $n$  的一次函数, 而且  $n$  只能取整数. 实测不同模式的共振频率, 可以推算共振管的基频及谐振频率; 通过测量特定频率下的管中的声压分布, 可以推算管口修正值, 与文献比较, 分析误差的来源.

## 2 实验

实验用 PASCO WA-9612 型谐振管系统完成,

装置如图 2 所示. 原件主要包括: 开放式扬声器、带有放大器的小型麦克风、带信号源的示波器、带标尺的管, 管内径  $D=3.20$  cm, 最大长度  $L=90.00$  cm, 闭管的有效长度通过移动管中活塞的位置来改变. 麦克风的直径 0.80 cm, 固定在直径 0.30 cm 的铜杆上, 通过移动铜杆来移动麦克风的位置. 共振频率的测量是在固定管长的条件下, 缓慢调整扬声器的频率, 并移动麦克风的位置, 找到信号最大对应的频率, 即共振频率. 声压的大小用示波器来测量. 所有测试在  $25^{\circ}\text{C}$  下进行.

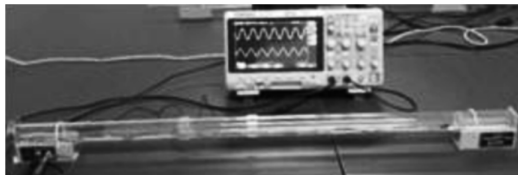


图 2 实验装置图

## 3 实验结果与分析

图 3 为调整扬声器频率, 通过测量声压值确定的开管( $L=90$  cm)的共振频率及其随半波长数目的变化关系图.  $f$  和  $n$  之间存在很好的线性关系, 对实验数据进行线性拟合, 得到共振管的基频为 187.7 Hz, 拟合直线的截距只有 4.0 Hz. 这表明对于开管, 当扬声器距离管口外 1.50 cm 处时, 两端开口的管声波的反射对称. 取  $25^{\circ}\text{C}$  下声速为 346.7 m/s, 根据式(14)的修正模式, 计算的共振管的基频为 187.3 Hz. 实验测量值和理论计算值相符, 误差为 0.2%.

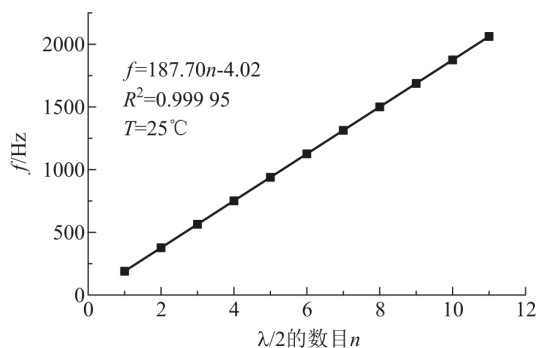


图 3 开管共振频率与半波长数目之间的依赖关系

对于开管端口的波反射, 可以近似按照波传播到端口, 管的直径发生变化引起的效应来理解. 当出口截面积大于管截面积的情形, 反射等价于软介质的反射<sup>[6]</sup>, 反射系数小于 1. 为了进一步证实对开管端口的修正是否与实验一致, 我们对不同频率下共

振管内的声场分布做了测量, 结果如图 4 所示. 对于频率为 372.0 Hz 的共振波, 驻波比为 20.7, 反射系数为 0.9. 由于 372.0 Hz 波的声压极大值附近声压变化缓慢, 管中极小值只出现 1 次, 难于估算管口修正. 对于频率为 742.0 Hz 的波, 用式 (6) 计算的驻波比为 17.5, 反射系数为 0.84. 对于开口管, 管中的波不是完全的驻波, 并且不同共振频率波的驻波比不同, 开口对高频波的反射要低于对低频波的反射. 此外, 从图 4 中相邻声压极大值之间的距离推算的 742 Hz 的声波波长为 46.09 cm, 则声波溢出管口的距离为 1.09 cm, 即声压极小值在管外距管口 1.09 cm 处, 管两端的实测的总管口修正值为 2.18 cm, 比用式 (14) 计算的 2.56 cm 相近但略小.

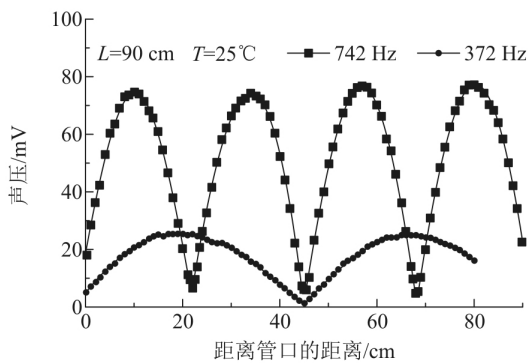


图 4 不同共振频率下开管中的声场分布

对于一端封闭的管, 本实验采用有机玻璃活塞来封闭共振管的一个端口. 在  $L = 80$  cm 时, 根据式 (13) 计算的共振管的基频 106.6 Hz. 实验测量的共振频率及其随  $1/4$  波长数目的变化关系如图 5 所示,  $f$  和  $n$  之间存在很好的线性关系, 对实验数据进行线性拟合, 得到共振管的基频为 105.2 Hz, 与理论计算的接近, 误差为 4.9%. 但是  $f$  与  $n$  直线拟合的截距较大, 为 33.3 Hz, 这与理论预计的不一致. 显然, 对于有机玻璃活塞封闭的管, 反射波不是全反射, 这会导致实验结果与理论的不一致. 为了进一步证实封闭端的反射特征, 在管长 80 cm 时, 采用声压极大确定共振频率, 测量不同频率下管中声压的分布如图 6 所示. 从图中可以看出, 在闭管封闭端 (80 cm) 的位置, 并不是声压的极大值位置, 即封闭端口并不是驻波的波节位置, 声压极大值向管内移动. 这表明声波被封闭端反射, 由于不是全反射, 导致反射波和入射波之间存在相位差, 使得叠加的波的声压极大值发生移动. 根据式 (6) 和式 (7), 由声压的极值计算的频率为 549.4 Hz 的声波的驻波比为 14.7, 封闭端的反射系数为 0.87, 反射波与入射波

的相位差为  $0.2\pi$ ; 频率为 749.5 Hz 的声波的驻波比为 27.3, 封闭端的反射系数为 0.93, 反射波与入射波的相位差为  $0.10\pi$ . 这与理想情况 (反射系数为 1, 相位差为零) 相差较大. 由此可以解释实测结果与理论预计之间较大的不一致.

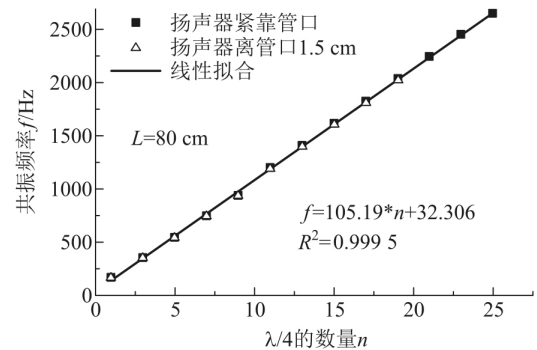


图 5 闭管共振频率与  $1/4$  波长数目之间的依赖关系

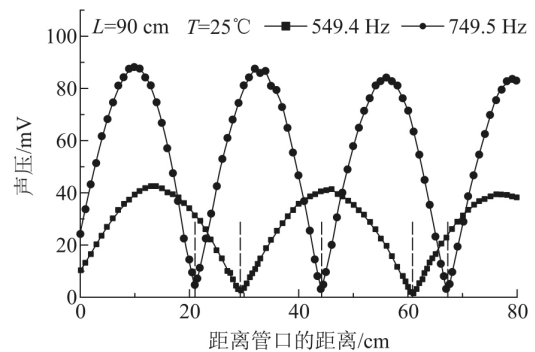


图 6 闭管共振频率与  $1/4$  波长数目之间的依赖关系

## 4 结论

在声波共振管教学实验中, 边界条件的非理想化会导致实验与理论的不一致. 无论是开管还是闭管, 端口的反射会影响管中共振波的声压分布和驻波比. 对于开管, 端口对较高频率波的反射效率低, 共振波溢出管口, 实际的管口修正略低于参考值; 对于闭管, 端口的不完全反射会导致封闭端口的声压极大值向管内移动, 总的有效值与参考值相差较大. 此外, 相同反射介质对不同频率的声波的反射效率不同, 有机玻璃对高频波 (749 Hz) 的反射效率高于低频波的 (549 Hz).

## 参考文献:

- [1] Wilkinson J T, Whitehouse B, Oulton R F, et al. An undergraduate experiment demonstrating the physics of (下转 57 页)

实验设计 [J]. 中国科学技术大学学报, 2010, 40(6): 608-611.

[16] 汪晓莲, 李澄, 邵明, 等. 粒子探测技术 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009: 14-20.

## A Monte-Carlo simulation tool to facilitate cosmic muon detections

LUO Xin<sup>1</sup>, XU Yi-xin<sup>1</sup>, CAO Guang-jie<sup>2</sup>, TANG Jian<sup>1</sup>

(1. School of Physics, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China;

2. School of Data and Computer Science, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China)

**Abstract:** A brief introduction to cosmic muon physics is presented. We focus on the basic principle of coincident counting of cosmic muons in the physics laboratory. We introduce the method of Monte-Carlo (MC) simulation in particle physics, including selection of physics lists, optimization of detector materials and geometries, inputs and outputs of the simulated data. We also discuss the preliminary results muon decay spectra where the fitted muon life-time matches the theoretical prediction. The established MC simulation tool is of pedagogic significance for it helps better students' insight into the cosmic muon physics.

**Key words:** cosmic muon; Monte-Carlo simulation

(上接 23)

metamaterials with acoustic waves and soda cans [J]. Am J Phys, 2016, 84: 14.

- [2] X Dai, X Jing, X Sun. Flow-excited acoustic resonance of a Helmholtz resonator: Discrete vortex model compared to experiments [J]. Physics of Fluids, 27(5): 152-165.
- [3] 范理, 王本仁, 金滔, 等. 谐振管谐振频率计算方法的研究 [J]. 声学学报, 2005(05): 409-414.
- [4] 刘益才, 郭方中. 双驱动热声热机谐振管中声波的传播

特性研究 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2006(01): 24-26.

- [5] 武国启, 姜洪源, 闫辉, 等. 驻波管测试仪测量金属橡胶吸声性能误差分析 [J]. 噪声与振动控制, 2007(02): 109-112.
- [6] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础 [M]. 南京: 南京大学出版社, 2001: 239-241.

## Investigation on experiments of acoustic resonance in tubes

GONG Wen-ping, WANG Yin-shu, BAI Zai-qiao, CHEN Xue-zhi

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

**Abstract:** Teaching experiments of acoustic resonance in tubes are bases not only to understand the physical phenomena of acoustic wave propagate, superposition and resonance, but also to understand the basic physics mechanism of measuring the sound absorption coefficient and acoustic impedance of materials. Some non-ideal conditions in this experiment can promote students to think further, and to understand the enhancement and attenuation of sound wave and its application in the field of industry. Measurement of the minimum resonant frequency, sound pressure distribution of waves and end corrections are investigated.

**Key words:** acoustic resonance tube; minimum resonance frequency; sound field distribution; end corrections