

# 大学普通力学实验中驱动频率对声速测量结果的影响\*

朱旭鹏 廖峻 薛书文 李佳楠

(岭南师范学院物理科学与技术学院 广东 湛江 524048)

(收稿日期:2020-12-30)

**摘要:**通过选择不同的驱动频率(包括最强、次强谐振频率,非谐振频率),同时利用驻波法和相位法研究大学普通力学实验中驱动频率对超声波声速测量结果的影响,这一结果在提高实验教师对超声波声速测量过程的理解、把控学生实验数据、解惑学生问题等方面具有一定的意义。

**关键词:**驱动频率 换能器谐振 超声波声速 驻波法 相位法

声波是一种能够传输能量的纵波,不同于横波传播方向与传播介质振荡方向垂直的关系,声波在传播过程中,传播方向与传播介质的振荡方向一致,是一种传播介质的密度疏密波<sup>[1]</sup>。声速是用来表征声波在传播介质中行进快慢的物理量。理想气体在热力学温度 273.15 K 时的声速为 331.45 m/s<sup>[2]</sup>。声速测量是大学普通物理实验力学部分中的重要组成部分,是学生综合理解纵波振荡、驻波形成和振动合成等物理过程的重要实验行为。

根据声波的频率值可以将声波分为次声波( $< 20$  Hz)、可闻声( $20 \sim 20$  kHz)和超声波( $> 20$  kHz)。超声波的传播速度是理解传播介质特性或状态变化的重要物理量<sup>[2]</sup>。超声波常见的测量方法有两种,共振干涉法(驻波法)和相位法(李萨如图形法)。在大学物理声速实验中,通常所采用的声波频率为  $20 \sim 60$  kHz,这一范围内压电陶瓷换能器是超声波产生和接收的最佳元件<sup>[3]</sup>。一般地,在声速测量过程之前需要测定压电陶瓷换能器的最佳工作频率点(最强谐振频率),以便在后续的测量中获得高精度的测量值。每对压电陶瓷换能器都只有一个最强谐振频率,其测定方法是固定换能器之间的距离,通过调节驱动频率,找出极大值点对应的频率即为压电换能器最强谐振频率,也是最佳的工作频率点。但是,我们发现在调节驱动频率的过程中,不仅仅有一

个极大值点,假如每一个极大值点对应一个谐振频率,那么如果不用最强谐振频率,而选择用次强或者次次强谐振频率,甚至用非谐振的驱动频率,对声速测量结果的影响如何,实验教师和实验员需要更进一步的把控。

## 1 仪器 测量原理及频率选择

本次实验探究中所使用的实验仪器为 SV-DH 系列声速测定仪(杭州大华仪器制造有限公司)<sup>[3]</sup>。其主要构成部分包括综合声速测定仪信号源(频率范围  $25 \sim 45$  kHz)、声速测定仪测试架(图 1)和示波器 3 个重要部件。其仪器连接方式如下:

(1) 信号源面板上的发射端换能器接口直接与测试架上的发射压电陶瓷换能器相接;

(2) 接收换能器与信号源面板上的接收换能器接口相连;

(3) 信号源发射换能器接口和接收换能器接口旁边的波形接口分别与示波器的信道 1 和信道 2 相接。

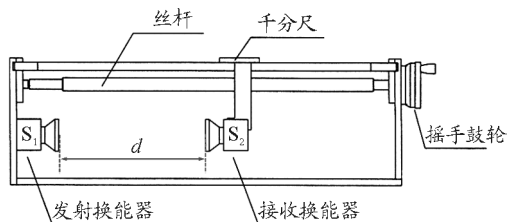
这样驱动频率驱动发射端换能器将电信号转换成声波,声波在接收端接收后被接收端换能器转换成电信号,再通过示波器呈现出来。信道 1 接收的发射端换能器的驱动电信号作为参考信号,在相位法测量中扮演重要角色。

\* 大学物理教学团队,批准号:114961700249

作者简介:朱旭鹏(1992-),男,讲师,从事大学普通物理实验教学。

通讯作者:李佳楠(1992-),女,实验师,从事大学普通物理实验教学。

如图1所示,  $S_1$  作为超声波发生源, 在驱动频率的作用下发射出水平传播的平面声波,  $S_2$  作为超声波接收探测器, 将部分声波信号转换成电信号在示波器中显示, 同时将另一部分反射回  $S_1$ , 所以可以用不同的方式测量  $S_2$  输出的信号, 从而得到超声波的声速<sup>[4]</sup>.



$d$ 为发射换能器和接收换能器之间的距离

图1 测试架示意图

(1)  $S_1$  发射的和  $S_2$  反射的两列声波在压电陶瓷换能器之间发生相互干涉, 当距离  $d$  正好是超声波半波长的整数倍时, 超声波在换能器之间形成驻波, 此时  $S_2$  接收到的振荡幅度最大, 测出示波器信号极大值对应的位置  $L_i$ , 则相邻两个极大值之间的距离  $d$  正好为超声波的半个波长, 这一方法记作共振干涉法(驻波法), 也称为振幅极值法。

(2) 将  $S_1$  和  $S_2$  对应的波形信号分别输入示波器的1信道和2信道, 并使用X-Y模式比较其相位时, 不同的相位差在示波器上呈现不同的形状。当改变距离  $d$  来改变相位差时, 示波器上的图形将经历椭圆—斜线—椭圆—斜线—椭圆的过程, 进一步增大距离时, 重复图形之前的行为。相邻出现两次同斜率直线对应的距离差正好是超声波的一个波长, 这一方法记作相位比较法(相位法), 也作李萨如图形法。

测出超声波波长  $\lambda$ , 再结合信号频率  $f$ , 即可通过公式  $v = f\lambda$  获得超声波声速<sup>[5]</sup>。

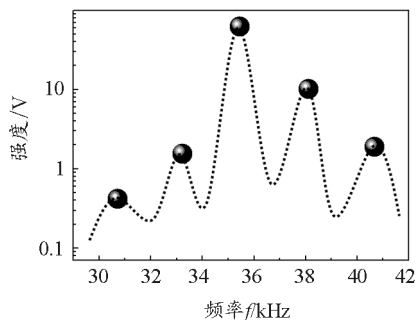
为了更具代表性地选择驱动频率点, 我们固定压电陶瓷换能器的距离  $d = 80$  mm, 对  $S_2$  对应的示波器信号进行驱动频率扫描寻找, 扫描范围为 29.5 kHz 到 42 kHz。在扫描过程中, 一共发现5个谐振位置, 分别位于 31.2, 33.5, 35.5, 38.5 和 40.5 kHz 附近, 如图2(a) 黑色球体所示。图2(a) 同时定性地给出了  $S_2$  信号强度随着频率的变化趋势, 如黑色虚线所示, 整个频率范围内存在5个极大值点和4个极

小值点。需要注意的是, 图中的强度并不是归一化的强度趋势图, 由于谐振强度量级的不同, 我们对不同的谐振位置选择了不同的示波器标度, 具体值如表1所示。

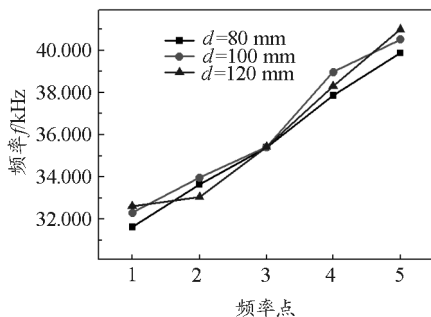
根据超声波在空气中的理论速度计算公式

$$v_s = v_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}}$$

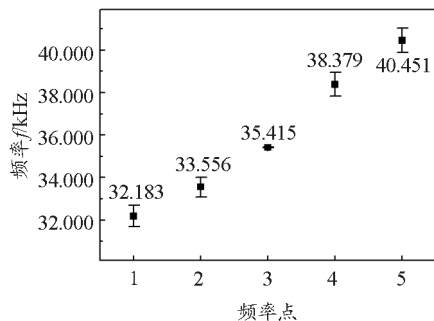
可以算得在室温 25 °C 的条件下, 超声波的理论速度  $v_s = 346.256$  m/s。基于此可算得用驻波法和相位法测试过程中, 间距的变化范围在 50 mm 左右。所以为了能够在整个距离变化过程中获得较为精确的测量值, 我们以 80 mm 作为测试起点, 分别测试了  $d = 80, 100$  和 120 mm 时5个谐振峰对应的共振频率值, 如图2(b) 所示, 具体数据如表2所示。5个谐振位置分别对应于频率点1~5, 其中3是谐振最强频率点。如图2(c) 给出了不同频率点对应的共振率平均值和标准差, 这一结果表明只有谐振极强的频率值对应的标准差最小, 而其他谐振频率点, 谐振频率都会由于距离的变化而发生较大的偏移, 这主要是因为接收换能器接收到的声波强度变弱导致的。需要说明的是, 本研究中所有在示波器中读取的数据都是通过示波器标度和位置旋钮将图形优化至最佳读取的。



(a) 压电换能器不同的谐振位置。黑色虚线线性地给出示波器波形振幅与驱动频率之间的依赖关系



(b) 换能器不同间隔下, 谐振峰的频率位置



(c)不同间隔下谐振频率的平均值和测量标准差

图2 频率选择

表1  $d = 80.000 \text{ mm}$  时不同谐振峰对应的谐振强度

频率 $f/\text{kHz}$	30.710	33.217	35.437	38.104	40.656
示波器标度 /V	0.200	0.500	20	5	1
峰值 /V	0.416	1.58	47.2	9.20	1.88
谷值 /V	-0.424	-1.54	-76.8	-11.2	-1.92
振幅 /V	0.420	1.56	62.0	10.2	1.90

表3 不同频率点下用不同方法测得接收换能器位置信息

位置		$L_0/\text{mm}$	$L_1/\text{mm}$	$L_2/\text{mm}$	$L_3/\text{mm}$	$L_4/\text{mm}$	$L_5/\text{mm}$	$(L_{i+1})_{\text{平均}}/\text{mm}$
$f_1 = 32.183 \text{ kHz}$	驻波法	78.615	84.156	89.517	95.039	100.271	105.699	5.413
	相位法	79.565	90.580	101.555	112.439	123.291	134.267	10.922
$f_2 = 33.890 \text{ kHz}$	驻波法	79.525	84.862	89.820	95.146	100.318	105.501	5.195
	相位法	80.370	90.715	101.185	111.589	122.019	132.569	10.434
$f_3 = 35.415 \text{ kHz}$	驻波法	80.812	85.812	90.750	95.680	100.450	105.320	4.897
	相位法	80.671	90.335	100.235	110.089	119.861	129.632	9.816
$f_4 = 38.378 \text{ kHz}$	驻波法	78.882	83.482	88.009	92.410	97.002	101.491	4.503
	相位法	78.890	87.987	97.082	106.152	115.329	124.302	9.092
$f_5 = 40.451 \text{ kHz}$	驻波法	78.750	83.129	87.330	91.689	95.865	100.335	4.298
	相位法	79.418	88.172	96.830	105.422	114.069	122.639	8.634

图3(a)给出了用驻波法测量、用逐差法处理得到的半波长及其相应的不确定度。结果表明,随着驱动频率的增大,所测得半波长的长度近似线性降低,而不确定度呈现起伏变化的趋势。最强共振频率处及离其最远的谐振频率处测得的不确定度基本持平,而谐振频率38.378 kHz和非谐振频率下的测量不确定度相对较低。图3(b)给出了用相位法测量、用逐差法处理得到的波长长度及其相应的不确定

表2 在不同换能器距离下,不同谐振峰对应的驱动频率值

频率 /kHz	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$
间距 /mm					
80	31.626	33.645	35.401	37.861	39.863
100	32.300	33.972	35.422	38.973	40.507
120	32.618	33.052	35.400	38.303	40.982
$f_{\text{平均}}/\text{kHz}$	32.183	33.556	35.415	38.379	40.451

## 2 结果与讨论

依据本文的研究主旨:驱动频率对超声波声速测量的影响,选择谐振频率平均值为驻波法和相位法测量超声波声速的驱动频率,其中35.415 kHz为换能器的最强谐振频率,32.183,33.556,38.378和40.451 kHz为其他次强级谐振频率。为了系统地研究驱动频率对声速测量的影响,我们将33.556 kHz的次强级谐振频率替换成33.890 kHz的非谐振频率。具体测量数据如表3所示。

度。数据显示,随着驱动频率的增大,所测得波长也近似线性减小,不确定度先降低,再增大。在谐振最强频率35.415 kHz和次强级频率38.378 kHz处的测量不确定度相对较低。综合来看,除去38.378 kHz处的测量不确定度,相位法测得的波长不确定比相对驻波法更小,也就是相位法具有更高的精度,非谐振频率处的测量并未展现出更差的精度。

根据波速计算公式  $v = f\lambda$  和误差传递公式,我

们分别在图 3(c) 和图 3(d) 中计算了驻波法和相位法测得的声速和声速不确定度。

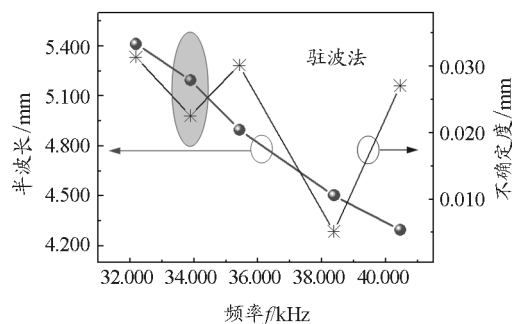
从图中可以明显看到,相位法具有更小的不确定度,也就是更高的测量精度.此外在非谐振频率下测得的声速相对其他频率来说稍微偏大,如灰色椭圆位置所示.根据超声波在空气中的理论速度 346.256 m/s,我们在图 3(c) 和图 3(d) 中分别添加了不同驱动频率下测得的声速百分误差.

由图可知在非谐振频率处测得的声速百分误差最大,驻波法和相位法分别可高达 1.68% 和 2.12%.在所有的测试序列中,驻波法和相位法在谐振最强频率点测得的声速百分误差最小.对于驻波法所有谐振频率下测得的声速百分误差都小于 0.65%.相位法在所有谐振频率下测得的声速百分误差都小于 1.51%,而且当谐振频率大于等于 35.415 kHz,声速百分误差都小于 0.88%.所以相对而言,驻波法具有更高的准确度.

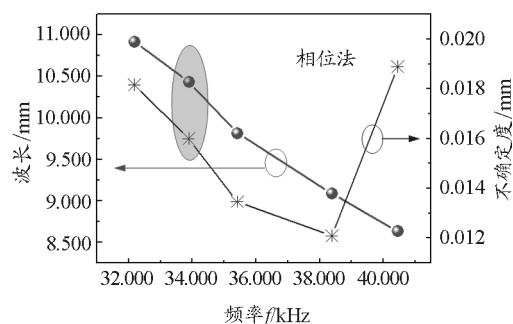
综上,压电换能器在最大谐振频率下测得的声速准确度最高,在非谐振频率下测得的声速准确度最差,其他次强级谐振频率离最强谐振频率越远,对应的准确度越低.纵览我们选取的驱动频率,最大的声速测量值百分误差来自于非谐振区,误差值也仅有 2.12%,所有谐振频率下测得的声速百分误差不超过 1.51%.而且根据我们的测量数据,相位法具有更高的精度,而驻波法具有更高的准确度.

### 3 结论

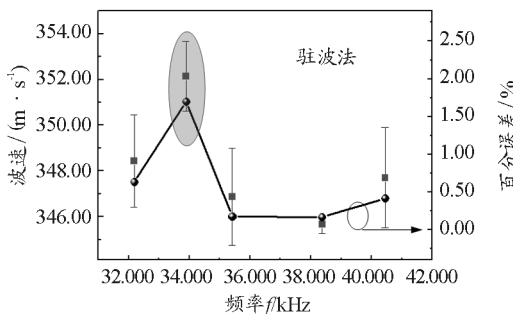
本文对比了在谐振最强频率、次强级频率及非谐振频率下,使用驻波法和相位法对超声波声速测量结果的影响.在最大谐振频率下,声速的测量结果最为准确;在非谐振频率下,测量结果准确度最差;离最强谐振频率越远,其他次强级谐振频率下测得的结果准确度越低.相位法的精度更高,驻波法的准确度更高.研究结果表明最大的声速测量百分误差来自于非谐振频率,但误差值也仅有 2.12%,因此在本实验中,示波器的调节与使用是本实验的主要误差来源之一.对于没有接触过示波器的学生来说,



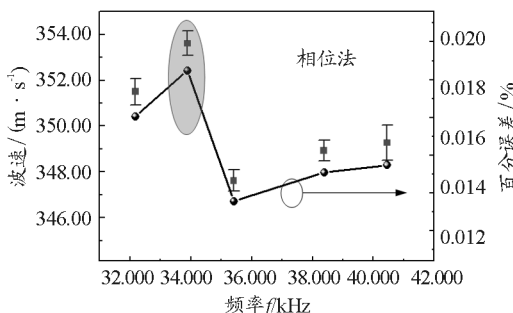
(a) 不同驱动频率下用驻波法测量的超声波半波长及其测量不确定度



(b) 不同驱动频率下用相位法测量的超声波波长及其测量不确定度



(c) 不同驱动频率下用驻波法测量的超声波波速及测量不确定度及百分误差



(d) 不同驱动频率下用相位法测量的超声波波速及测量不确定度及百分误差

图 3 声速测量结果

(下转第 114 页)

完全对称的原因,通过探究小活动培养学生科学探究的能力和质疑创新的精神.

### 3 总结

《中国教育现代化 2035》中强调了要大力推进教育信息化,促进信息技术与教育教学的深度融合<sup>[6]</sup>.而在教学中适当使用DISLab传感器则有利于培养学生运用现代科技解决问题的能力,开拓学生眼界和思路<sup>[7]</sup>.

将DISLab传感器运用在浮力系列实验中,不仅能利用其数据直观显示的特点改善以往弹簧测力计指针过小不易远距离观察的缺点,而且能提供完整的实验图像供学生交流分析.这样的实验方案可供教师课堂补充或学生课后探究活动进行,借此更好地提高学生课堂参与度和开展实验探究的研讨活

(上接第110页)

实验教师应该有条理地仔细讲解示波器的用法.我们的研究结果在提高实验教师把控学生实验数据、加深测量过程理解和解惑学生问题方面具有一定的指导意义.

### 参考文献

- 1 赵近芳,王登龙.大学物理简明教程(第3版)[M].北京:北京邮电大学出版社,2016

动,加深学生对浮力系列知识点的掌握.

### 参考文献

- 1 陈苍鹏,朗威 DISLab 在物理实验教学中的应用与思考[J].物理教学,2018,40(4):27~30
- 2 聂应才,聂辰熙.巧用力传感器研究滑动摩擦力[J].物理教师,2019,40(9):56~58
- 3 陈艺,杨新宇.关于“实验探究浮力的大小”实验的改进和创新[J].物理通报,2019(9):82~84
- 4 陈士元.初中物理实验:探究影响浮力大小因素的教学反思[J].物理教学,2015,37(3):48~49
- 5 吴爱琴.对“探究影响浮力大小的因素”实验的改进与拓展[J].物理教学,2019,41(11):41~43
- 6 田学军.加强新时代教育科学研究 加快推进教育现代化[J].教育研究,2019,40(5):4~9
- 7 倪亚清.数字化物理实验平台的使用对转变教与学方式的影响[J].物理教学,2018,40(12):29~30

- 2 胡林,余克俭.大学物理实验[M].北京:机械工业出版社,2010.206~210
- 3 杭州大华仪器制造有限公司.声速的测定.1~12
- 4 杨述武,孙迎春,沈国土,等.普通物理实验(1)力学、热学部分[M].北京:高等教育出版社,2015.107~115
- 5 陈洁.声速测量实验有关问题的研究[J].物理实验,2008(28):31

## The Influence of Driving Frequency on Sound Velocity Measurement in General Mechanics Experiment of University

Zhu Xupeng Liao Jun Xue Shuwen Li Jiaqi

(School of Physics and Technology, Lingnan Normal University, Zhanjiang, Guangdong 524048)

**Abstract:** This paper uses the standing wave method and the phase method to study the influence of the driving frequency on the ultrasonic sound velocity measurement results in the university general mechanics experiment by selecting different driving frequencies, including the strongest and second strongest resonant frequencies and non-resonant frequencies, etc. The results in this paper have a certain meaning to improve the teacher's understanding of the ultrasonic sound velocity measurement process, correct the students' experimental data and solve student's problems.

**Key words:** driving frequency; transducer resonance; ultrasonic sound velocity; standing-wave method; phase method