



声速和声压同步测量实验的设计与实现

李 冬^{1,2}, 魏 波^{1,2}, 许 岩^{1,2}, 于砚廷^{1,2}, 何传林^{1,2*}

(1. 齐鲁工业大学(山东省科学院)海洋仪器仪表研究所, 青岛 266000; 2. 齐鲁工业大学(山东省科学院)海洋技术科学学院, 青岛 266000)

摘要: 针对声速测量实验中多关注时间(相位)而忽略信号幅值的不足, 依托常用的水声探测设备在水箱中搭建信号测量装置。利用示波器得到直达声的时间差和电压峰峰值, 基于时差法的测量原理计算水中声速并进行电声转换, 实现声速和声压的同步测量。结果表明声速和纯水中理论声速的相对误差为 2.0%, 声压级差和球面波声传播理论声压级差的相对误差约为 6.0%。该实验设计加深了对声压、灵敏度等抽象概念的理解, 训练了学生利用 Excel 进行数据处理的能力。

关键词: 声速; 声压; 灵敏度; 脉冲串

中图分类号: O422.1

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20220374](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20220374)

Design and Realization of Simultaneous Measurement for Sound Velocity and Sound Pressure

LI Dong^{1,2}, WEI Bo^{1,2}, XU Yan^{1,2}, YU Yanting^{1,2}, HE Chuanlin^{1,2*}

(1. Institute of Oceanographic Instrumentation, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Qingdao 266000, China;

2. School of Ocean Technology Sciences, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Qingdao 266000, China)

Abstract: In view of the deficiency of paying more attention to time (phase) and ignoring signal amplitude in the sound velocity measurement experiment, a signal measurement device was built in the water tank relying on the commonly used underwater acoustic detection equipment. The time difference and the peak value of voltage were obtained by oscilloscope, the sound velocity in water was calculated based on the measurement principle of time difference method, and the electroacoustic conversion was carried out to realize the synchronous measurement of sound velocity and sound pressure. The relative error between sound velocity calculation and theoretical sound velocity in pure water was 2.0%, and the relative error between sound pressure level calculation and theoretical sound propagation of spherical wave was about 6.0%. The experimental design deepens the understanding of abstract concepts such as sound pressure and sensitivity, and trains the students' ability to use Excel for data processing.

Key words: sound speed; sound pressure; sensitivity; burst

声速和声压是描述声波在弹性介质中传播的两个基本物理量^[1], 其变化过程反映介质所处的状态和特性^[2]。在大学物理实验中多采用驻波法和相位比较法进行声速的测量实验, 受限于声波在发射和接收换能器端面之间传播时多次反射叠加^[3]以及换能器的非线性行为^[4], 当两个换能器距离较近时, 驻波法在使用过程中示波器接收到的信号振幅极大值产生强弱交替分布的现象^[5], 相位比较法中李萨如图形在示波器上显示的直线段在一个象限内会连续多次出现^[6], 这些现象都对声速的测量产生较大影响。同时, 驻波法和相位比较法无

法直观地展示声波在弹性介质中的传播过程, 不利于学生对声压等抽象概念的学习。

声速和声压的测量多是通过发射换能器(声源)和接收换能器(标准水听器)构成的测试系统实现, 测试信号包括开阔空间的单频连续信号^[7]和非开阔空间的正弦脉冲信号^[8]。整个测试过程涉及较多的声学概念及对基本了解、操作声学测试设备等, 如球面波的声传播特性, 标准水听器声-电转换即灵敏度、传播时间等。因此, 设计声速和声压两个参数的同步测量实验, 有助于加深学生对水声信号传播的理解^[9]。

收稿日期: 2022-06-16; 修回日期: 2022-12-22

基金项目: 国家自然科学基金(62171245); 齐鲁工业大学校级教研项目科教融合专项(2020kjzx03, 2020kjzx06)。

作者简介: 李冬(1990-), 男, 博士, 讲师, 主要从事海洋声学实验教学工作。

*通信作者: 何传林(1989-), 男, 博士, 讲师, 主要从事水声探测方面的研究。E-mail: hechuanlin@qlu.edu.cn

本文依托常用的水声探测设备,对传统的声速测量实验内容进行拓展,同步分析直达声信号的传播时间差和信号峰峰值,通过标准水听器的灵敏度将示波器采集到的电压值转换为不同距离下的声压级,并利用球面波的声传播规律验证实验数据的准确性,实现声波在不同传播距离下声速和声压的同步测量。

1 实验设计

1.1 实验设备

完整的水声探测系统主要包括波形发生器、高压放大器、声源、标准水听器和数据采集系统,在本次实验设计中用示波器代替数据采集系统。实验设备、型号及主要性能参数如表 1 所示。

表 1 水声探测系统主要设备及实验参数设置

设备名称	设备型号	主要性能参数	参数设置
波形发生器	普源 DG4202	通道数: 2 采样率: 500 MSa/s	发射频率 $f=45.1$ kHz, 幅度 $5.0 V_{pp}$ 脉冲串循环数 $N=5$, 触发周期 $T=1$ ms
高压放大器	西安安泰电子 ATA-2021H	电压增益: 0~60倍	放大倍数: $\times 50$
声源	杭州应用声学研究所 WBT45	中心频率: 45.1 kHz 工作频率范围: 30 ~60 kHz	/
水箱	定制	长 \times 宽 \times 高: 200 cm \times 140 cm \times 130 cm	水深 $H=100$ cm 声源和标听入水深度 $h=60$ cm
标准水听器	丹麦B&K 8104	灵敏度级: -206.1 dB	/
示波器	普源 MSO5204	模拟带宽: 200 MHz 模拟通道数: 4	放大倍数: $\times 1$

1.2 测量装置

水中声速实验测量装置如图 1 所示。水箱的长 \times 宽 \times 高为 200 cm \times 140 cm \times 130 cm,在实验测量过程中水深为 100 cm。在水箱长度方向的两个侧壁上均布置有标尺,原点位于水箱的中心位置。声源和标准水听器之间的距离通过滑动长度方向上的导轨实现。用轧带将标准水听器固定在杆上,每个杆的长度为 50 cm,杆上做打孔处理,用螺丝将 2 个或 3 个杆进行连接,实现标准水听器在水下不同深度的布放。

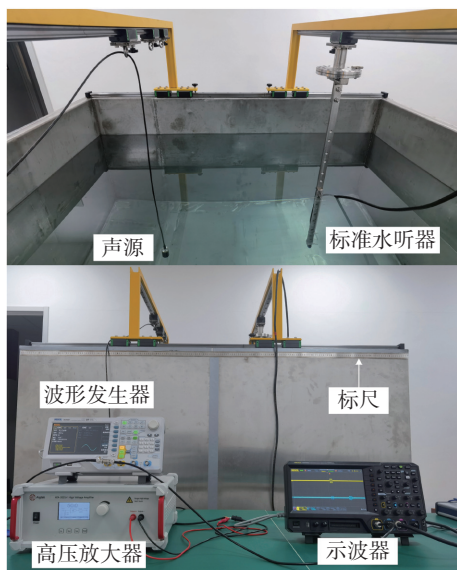


图 1 测量装置

在实验中,通过波形发生器调节发射脉冲的频率 f 和一个脉冲串中包含正弦波的个数 N ,并将波形发生器的触发源改为手动触发。在波形发生器 CH_1 上连接 BNC 三通接头,一个接口连接高压放大器激励声源产生脉冲信号;另外一个接口连接示波器的 CH_1 ,作为示波器的外触发信号。标准水听器连接到示波器的 CH_2 端上,示波器被触发后 CH_1 端的正弦脉冲串和 CH_2 端的直达声信号分别如图 2 中黄线和蓝线所示。

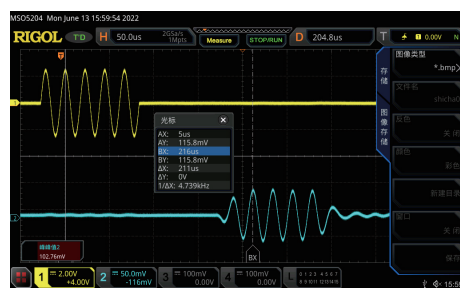


图 2 传播时间和电压峰峰值

1.3 测量原理

声源和标准水听器之间的距离 L 通过布置在水箱长度方向上的标尺读出,直达声信号的传播时间 t 则通过示波器 CH_1 端和 CH_2 端上的波形图利用光标手动测量得出,则水中声速 $c=L/t$ ^[10]。以发射和接收信号第 2 个波峰作为声信号传播的开始和到达时间,则可获取传播时间。

本实验中发射换能器为有限尺寸的圆柱形声源,其发出的声波在远处以球面波的形式传播。以声源和标准水听器的几何中心作为等效声中心,球面波的声压和传播距离成反比^[11],即:

$$p = \frac{A}{r} \quad (1)$$

式中: p 为声压,单位 Pa; r 为传播距离,单位 m; A 为常数。对于球面波传播路径上的点 1 和点 2 有:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{r_2}{r_1} \rightarrow 20\lg \frac{p_1}{p_2} = 20\lg \frac{r_2}{r_1} \quad (2)$$

当 $r_2=2r_1$ 时,两点的声压级差约为 $20\lg 2=6.02$ dB,进而判断所测得的声压级是否准确。

标准水听器的灵敏度 M 为其输出的开路电压和作用在其上的声压之比^[12],从而可得到声压级 SPL、电压 U 和灵敏度级 M 之间的转换关系:

$$\begin{aligned} M &= U/p \\ \text{SPL} &= 20\lg U - M \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $p_{\text{ref}}=10^{-6}$ Pa, $M_{\text{ref}}=1$ V/ μ Pa。

电压 U 和示波器上读取的电压峰峰值之间的关系为:

$$U = \frac{V_{\text{pp}}}{2\sqrt{2}} \quad (4)$$

2 实验结果

2.1 声速的测量

通过光标手动测量不同传播距离上的时间差如表 2 所示。采用逐差法处理实验数据^[13],则可分别求得时间差的平均值 t_{ave} 和水中声速 c 为:

$$\begin{aligned} t_{\text{ave}} &= \sum_{i=1}^4 (t_{i+4} - t_i) = \frac{275 + 278 + 279 + 277}{4} = 277.25 \text{ (}\mu\text{s)} \\ c &= \frac{L}{t} = \frac{40}{277.25} \times 10\,000 = 1\,442.7 \text{ (m/s)} \end{aligned}$$

表 2 声速测量结果

参数	序号 <i>i</i>							
	1	2	3	4	5	6	7	8
L/m	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$t/\mu\text{s}$	211	276	342	418	486	554	621	695
$(t_{i+4}-t_i)/\mu\text{s}$					275	278	279	277

实验进行时的水温为 16.8 °C,通过数据插值得到此温度下纯水中的理论声速 $c_0=1472$ m/s^[14],则本实验测得声速的相对误差为 2.0%。分析该误差产生的原因,在大学物理实验中发射换能器和接收换能器的端面相互平行,其声程较容易得到。但是对声源和标准水听器来说,其结构特征为圆柱形,以声源和标准水听器的几何中心作为起始点得到的声程和实际的声程存在一定的偏差。

2.2 电压峰峰值测量结果

从示波器上读取不同频率、传播距离下直达声信号的峰峰值 V_{pp} 分别如表 3 和表 4 所示。随着传播距离的增大,信号幅值在不断减小。用 excel 记录数据并作图,通过添加趋势线(R)进行幂函数拟合,如图 3 所示。两个频率下的幂指数分别为 -0.943 和 -0.948,比较接近式(1)中的理论幂指数 -1。同时两个拟合函数的相关系数 R^2 接近 1,吻合程度较高。

表 3 声压级测量结果($f=45.1$ kHz)

参数	序号 <i>i</i>							
	1	2	3	4	5	6	7	8
r/m	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
V_{pp}/mV	102.76	77.851	63.533	53.69	46.531	41.162	35.793	33.109
U/mV	36.331	27.524	22.462	18.982	16.451	14.553	12.655	11.706
SPL/dB	177.306	174.894	173.129	171.667	170.424	169.359	168.145	167.468
$\Delta\text{SPL}/\text{dB}$			$\text{SPL}_4-\text{SPL}_1$	-5.639	$\text{SPL}_6-\text{SPL}_2$	-5.535	$\text{SPL}_8-\text{SPL}_3$	-5.661
			$\delta_1=6.0\%$			$\delta_2=7.8\%$		$\delta_3=5.7\%$

表 4 声压级测量结果($f=50.0$ kHz)

参数	序号 <i>i</i>							
	1	2	3	4	5	6	7	8
r/m	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
V_{pp}/mV	98.432	74.271	59.954	51.005	42.952	38.478	34.898	31.319
U/mV	34.801	26.259	21.197	18.033	15.186	13.604	12.338	11.073
SPL/dB	176.232	173.786	171.925	170.521	169.029	168.073	167.225	166.285
$\Delta SPL/dB$			SPL_4-SPL_1	-5.711	SPL_6-SPL_2	-5.713	SPL_8-SPL_3	-5.64
			$\delta_1=4.8\%$			$\delta_2=4.8\%$		$\delta_3=6.0\%$

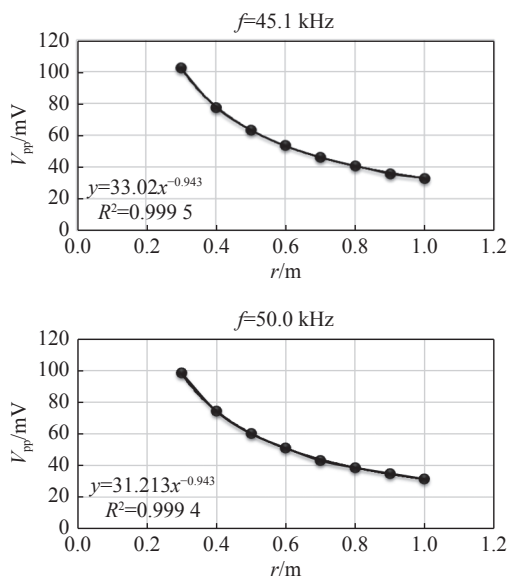


图 3 电压峰峰值拟合曲线

2.3 声压级测量结果

在 Excel 中记录实验数据，通过输入式(3)将测得的电压信号转化为声压级。从表 3 和表 4 中可以看出，随着传播距离的增大，标准水听器测得的信号强度不断减小，对应的声压级也不断减小。8 次实验中，第 4 次和第 1 次、第 6 次和第 2 次、第 8 次和第 3 次的传播距离分别增加 1 倍，相应的声压级差值分别为 5.639、5.535 和 5.661，这和球面波传播理论的声压级差值的相对误差分别为 6.0%、7.8% 和 5.7%。整个声压级测量的相对误差在 6.0% 左右。声压级的测量误差大于声速的计算误差，分析误差产生的原因，除了受传播距离测量偏差的影响，声源和标准水听器声中心的水深度存在偏差，导致标准水听器部分偏离了声源的声轴方向。

将声源的发射频率改为 50.0 kHz，重新进行实验和数据处理如表 4 所示。和 45.1 kHz 下的计算结果进行对比如图 4 所示。从图中可以看出，45.1 kHz 下标准水听器换算后的声压级大于

50.0 kHz，两者在数值上相差 1 dB 左右。当考虑介质的粘滞和热传导效应后，声波吸收系数与频率的平方成正比，即频率越高，吸收越大^[1]。

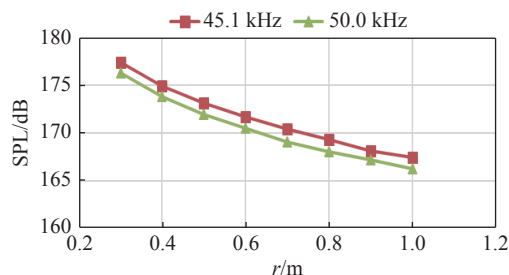


图 4 不同频率下的声压级对比

3 结束语

作为一种在弹性介质中传播的机械波、声波的声速和声压测量是声学应用技术的重要研究内容。利用常用的水声探测设备对大学物理实验中经典的声速测量实验进行拓展，捕获直达声信号的传播时间差和电压峰峰值，实现声速和声压的同步测量。通过该实验的学习熟悉常用水声设备的使用方法和线路连接方式，特别是示波器的触发功能。掌握非开阔水域内利用正弦脉冲信号获得短暂自由声场的方法，有效区分直达声和反射声。结合标准水听器的灵敏度，增强学生对声压级计算、换能器压电转换特性、球面波传播规律、声波吸收与频率的关系等声学概念的理解。基于 Excel 对不同传播距离上的声压进行数据处理、画图和曲线拟合，并与球面波声压和传播距离呈反比的理论规律进行对比，提升学生理论和实践相结合的能力。同时该实验可以拓展到声学技术的重要应用即超声测距，引导学生通过时差法测量原理或者实验获得的声压拟合曲线完成，启发学生对于基础实验的进一步思考。

(下转第 43 页)