

用 phyphox 测量液体中的声速

摘要：本实验用 phyphox 的声呐功能测量了空气与液体（水、牛奶）中的声速，并对液体中声速测量结果的不确定度来源进行了简单的分析。其中，水中声速的测量结果与标准值的误差不到 5%。

一、引言：

在 phyphox 官网上，有很多实验示例，其中也包括测量空气中声速的实验。我们知道，空气中的声速大约为 340m/s，这个速度并不算快，表现为在比较大的房间中即可听到回声。且由于空气无处不在，对实验条件几乎也没有什么要求。用 phyphox 测量空气中的声速是不是有些大材小用了？抱着这样的疑问，我设计了此实验，尝试用 phyphox 的声呐功能测量液体（水，牛奶）中的声速，最终得到了比较精确的实验结果。

二、实验原理：

1. Phyphox 的声呐功能：

Phyphox 的声呐功能有两个主要的功能：一是以一定的频率通过手机的扬声器发射声波，二是接受反射回波并自行绘制反射回波的回声强度-时延图像。值得一提的是，phyphox 对时间的测量精度可以达到 $10\ \mu\text{s}$ 的量级，从而保证了液体中声速的测量结果的准确性。

2. 声速的测量方法：

本实验利用的是 phyphox 的声呐功能，那么自然是通过测量反射回波所对应的时延来计算声速。基本公式就是简单的 $v=2d/t$ 。但进行液体中声速的计算时，为了得到相对精确的实验结果，采用了不同的数据处理方法。这点将在“四. 实验结果及分析”中详细阐述。

三、实验装置及过程：

1. 空气中声速的测量：

将手机放置在距泡沫塑料挡板一定距离 d 处，通过手机的声呐功能可得到回声强度-时延图像，如图 1 所示（对应 $d=100\text{cm}$ ）。分析图像，找到反射回波所对应的波峰及时刻 t ，利用 $v=2d/t$ 即可得到空气中的声速。实验中先通过预实验大致确定 d 的取值范围，

再通过改变 d 测得 5 组数据，通过线性拟合得到 $d-t$ 关系进而求得声速。



图 1. 回声强度-时延图像（空气）

2. 水中声速的测量：

实验器材的布置如图 2 所示，实验装置包括泡沫塑料板、盛水容器、米尺、瑜伽垫、手机（phyphox 传感器）、牛奶等。在手机与挡板间添加盛水容器，容器中装有自来水（体积过半）。挡板是为了尽可能增大反射回波的回声强度，但为了避免经容器后表面反射回波与经挡板反射回波之间存在时间差，容器后表面应紧贴挡板。将手机发声器固定在距挡板



图 2. 实验器材布置图

100cm 处，打开声呐，图像中会立刻出现容器前表面反射回波（对应图 3 中最高的波峰），但并不会立即出现经容器后表面（挡板）反射回波。静待半分钟以上，容器后表面反射回波会紧跟着前表面反射回波显示在图像上（对应图 3 中最高波峰之后的波峰）。由此便可求出水中声速，牛奶中声速也可以通过同样的实验过程得到。

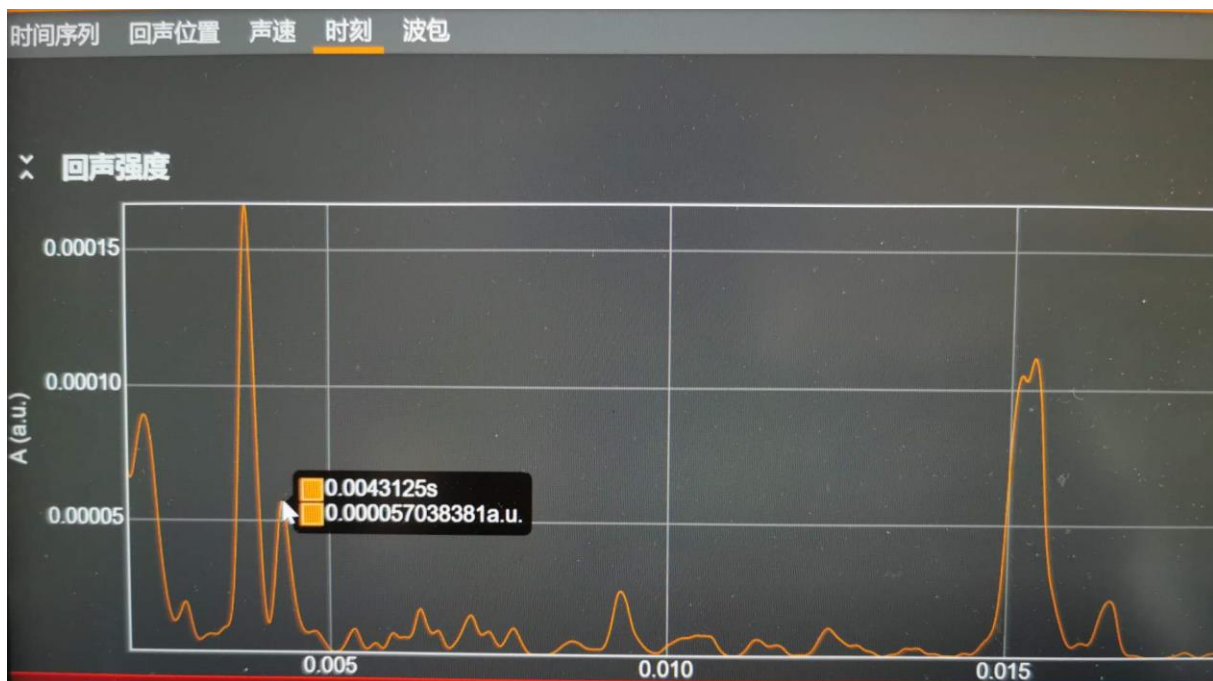


图 3. 回声强度-时延图像（水）

四、实验结果及分析：

1. 声速（空气）

通过预实验发现当 $d=50-100\text{cm}$ 时，反射回波较为清晰。这是由于实验是在室内进行的，干扰物比较多， d 过大或过小都会引入噪声信号。从 60cm 开始，每隔 10cm 进行一次声速的测量。实验数据的拟合结果如图 4 所示，纵坐标为时延 Δt ，横坐标为距离 d 。测得的空气中的声速为：

$$v_0 = \frac{2}{k \times 10^{-3}} \approx (345 \pm 5) \text{m/s}$$

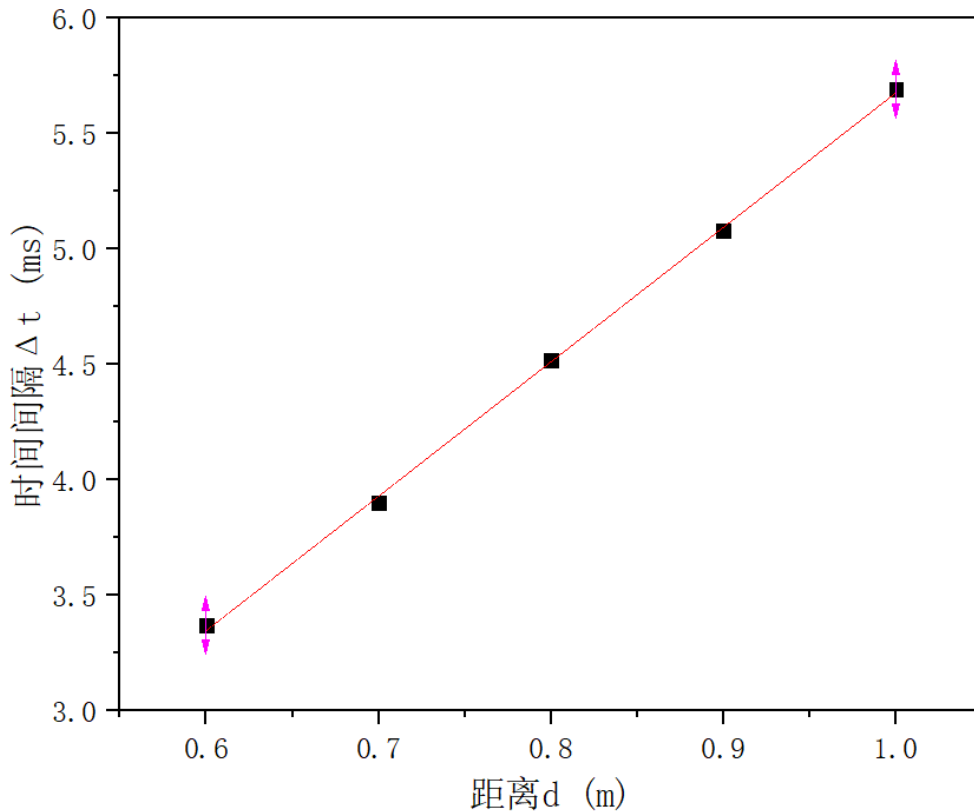


图 4. 空气中声速的（线性）拟合结果

2. 声速（水）

Phyphox 的声呐功能除了可以给出回声强度-时延图像外，还可以根据预设的声速数值，计算出障碍物与手机之间的距离。故在此为了避免额外的测量过程所带来的误差（容器尺寸，距离 d ），这里直接通过导出的 EXCEL 表格中回声位置一栏的数据，利用前面求得的空气中的声速来间接求出水中的声速。

如图 5 所示，第一列数据对应位置坐标，第二列数据为测量误差，第三列数据为回声强度。结合回声强度-时延图像，可以推知各个反射面所对应的“位置”。其中，第三列对应的是发射波不经过容器，直接被挡板反射，然后被 phyphox 接收，也就是对应挡板位置 d 。

前表面 (x_1) :			后表面 (x_2) :			挡板 (x_3) :		
63.39583	0.000393	1.581414	72.60417	3.26E-05	0.17168	100.5833	8.25E-06	0.083462
63.75	0.000398	1.616495	72.95833	3.27E-05	0.174227	100.9375	8.38E-06	0.085352
64.10417	0.000392	1.611724	73.3125	3.16E-05	0.169628	101.2917	7.99E-06	0.082029

图 5. 回声位置与回声强度数据表格（水，节选）

通过公式 $v_1 = \frac{(x_3 - x_1) \times \left(\frac{v_0}{340}\right)}{\frac{x_2 - x_1}{340}}$ ，计算得到水中声速为 $(1.40 \pm 0.06) \times 10^3 \text{ m/s}$ 。

这里之所以出现 340，是因为 phyphox 默认声速为 340m/s，其中 v_0 为第一步测得的空气中的声速。 $0.06 \times 10^3 \text{ m/s}$ 的不确定度，并非来源于位置的测量误差，而是来源于 phyphox 内置的测量频率。可以看到，第一列对应的位置数据相互之间的间隔远远大于第二列对应的测量误差。所以，phyphox 的高测量精度，在某种程度上被浪费了。即便测量频率可以通过自己建立新实验的方法来调节，但由于手机的配置问题，测量频率不可能设置得很高，其所带来的误差一定会远远超过 phyphox 的测量误差。

环境温度为 12°C ，假设水的温度和环境温度一样，查表得标准声速为 1454.9m/s ，相对误差为 4%。

3. 声速（牛奶）

之后，我又用同种方法测量了牛奶中的声速。牛奶的品牌如图 6 所示，回声强度与回声位置数据表格如图 7 所示。通过同样的公式计算得到牛奶中声速为 $(1.62 \pm 0.06) \times 10^3 \text{ m/s}$ ，数值上大于水中的声速，符合实验预期。



图 6. 牛奶品牌

前表面 (x_1) :			后表面 (x_2) :			挡板 (x_3) :		
63.75	0.000312	1.266558	72.25	2.63E-05	0.137345	103.7708	8.83E-06	0.095106
64.10417	0.000317	1.304541	72.60417	2.68E-05	0.141439	104.125	8.93E-06	0.09687
64.45833	0.000313	1.300576	72.95833	2.64E-05	0.140439	104.4792	8.76E-06	0.095624

图 7. 回声位置与回声强度数据表格（牛奶，节选）

五、实验结论：

本次实验用线性拟合的方法测量了空气中的声速，并根据空气中的声速间接测量了水中的声速与牛奶中的声速，水中声速的测量结果为 $(1.40 \pm 0.06) \times 10^3 \text{ m/s}$ ，与标准值的相对误差为 4%；牛奶中声速的测量结果为 $(1.62 \pm 0.06) \times 10^3 \text{ m/s}$ ，略大于水中的声速。根据不确定度分析，实验结果的不确定度不是由 phyphox 的测量精度决定的，而是由 phyphox 的测量频率决定的，phyphox 的测量精度一定程度上被浪费了。

六、参考文献：

- [1] https://www.youtube.com/results?search_query=phyphox (phyphox 官方做的实验示例视频)