实验十二：测空气与水中的声速

朱寅杰 1600017721

2018 年 3 月 9 日

12.1 今天的声速是多少

今日风和日丽，天朗气清，实验室的温度计干泡读数为 $\theta = 18.7\,°\mathrm{C}$，湿泡读数为$12.5\,°\mathrm{C}$，得知相对湿度为36%。实验室有一个水银气压计，读出今日气压为$762.15\,\mathrm{mmHg}$。由此查表计算出，在此温度下，水的饱和蒸汽压为$2.16\,\mathrm{kPa}$。根据书上提供的声速公式（12.8），有

$$v = 331.45\,\mathrm{m/s} \times \sqrt{(1+\theta/T_0)(1+0.3192p_w/p)} = 343.0244\,\mathrm{m/s}$$

公式中第一项为温度的修正，第二项为湿度的修正。由于后者仅为前者的三十分之一，而温度和湿度的测量精度相近，因此估算不确定度时只需考虑温度修正的不确定度。所用干湿泡温度计的最小分度为$0.5\,°\mathrm{C}$，故允差取为$0.5\,°\mathrm{C}$，故 θ 的不确定度按照均匀分布 $1/\sqrt{3}$ 计，为$0.29\,°\mathrm{C}$，折合入声速的相对不确定度为0.0005，相当于$0.18\,\mathrm{m/s}$。故声速的计算值可写作 $v = (343.0 \pm 0.2)\,\mathrm{m/s}$

12.2 驻波共振法测空气中声速

将超声波发生器的输入频率设置为接近谐振的 $f = 38.7\,\mathrm{kHz}$。保持发生器与接收端基本平行，则可以认为发生器与接收端之间形成一个共振腔；由于声音的波长给定，因此如果腔的长度 l 合适则会形成驻波的振动模式；使用示波器显示接收端声音信号转化出的波形，相邻的观察到极大值出现的位置之间的距离即是声波波长的一半 $\lambda/2$，于是测出出现极大值的位置即可得到波长。由于发生器与接收端之间的距离从手轮调节，存在螺纹空程的问题，因此分别记录了 l 增大和减小两个拧手轮方向的数据。见下表（左边是 l 减小组，右边是 l 增大组）：

#	l/mm	U_{pp}/V	#	l/mm	U_{pp}/V	$l_{n+5}-l_n$	#	l/mm	U_{pp}/V	#	l/mm	U_{pp}/V	$l_{n+5}-l_n$
1	58.428	0.800	6	36.215	1.12	22.213	10	58.534	0.820	5	36.170	1.12	22.364
2	53.924	0.820	7	31.770	1.18	22.154	9	54.113	0.860	4	31.680	1.20	22.433
3	49.545	0.900	8	27.418	1.36	22.127	8	49.607	0.900	3	27.078	1.32	22.529
4	45.056	0.980	9	22.770	1.56	22.286	7	45.242	0.960	2	22.746	1.56	22.496
5	40.418	1.04	10	18.542	1.74	21.966	6	40.545	1.02	1	18.542	1.74	22.003

对测得的 l 按照 $l_{n+5} - l_n$ 进行逐差（见表中），并取平均计算出半波长 $\lambda/2$ 的测量值，从两组数据里算出的分别为$4.469\,84\,\mathrm{mm}$与$4.473\,\mathrm{mm}$。根据数据的方差估计出其对这两个半波长计算值的不确定度分别为$0.0455\,\mathrm{mm}$与$0.0190\,\mathrm{mm}$。读数手轮一格是$0.01\,\mathrm{mm}$，按照$0.005\,\mathrm{mm}$取允差，得到仪器不确定度对半波长的不确定度的贡献约为$0.0006\,\mathrm{mm}$。分别合成进去，得到半波长的测量值为$(4.47 \pm 0.05)\,\mathrm{mm}$与$(4.47 \pm 0.02)\,\mathrm{mm}$，乘以上面的发生器频率（不确定度与之相比可以忽略）得到声速测量值为$(346 \pm 4)\,\mathrm{m/s}$与$(346 \pm 2)\,\mathrm{m/s}$。

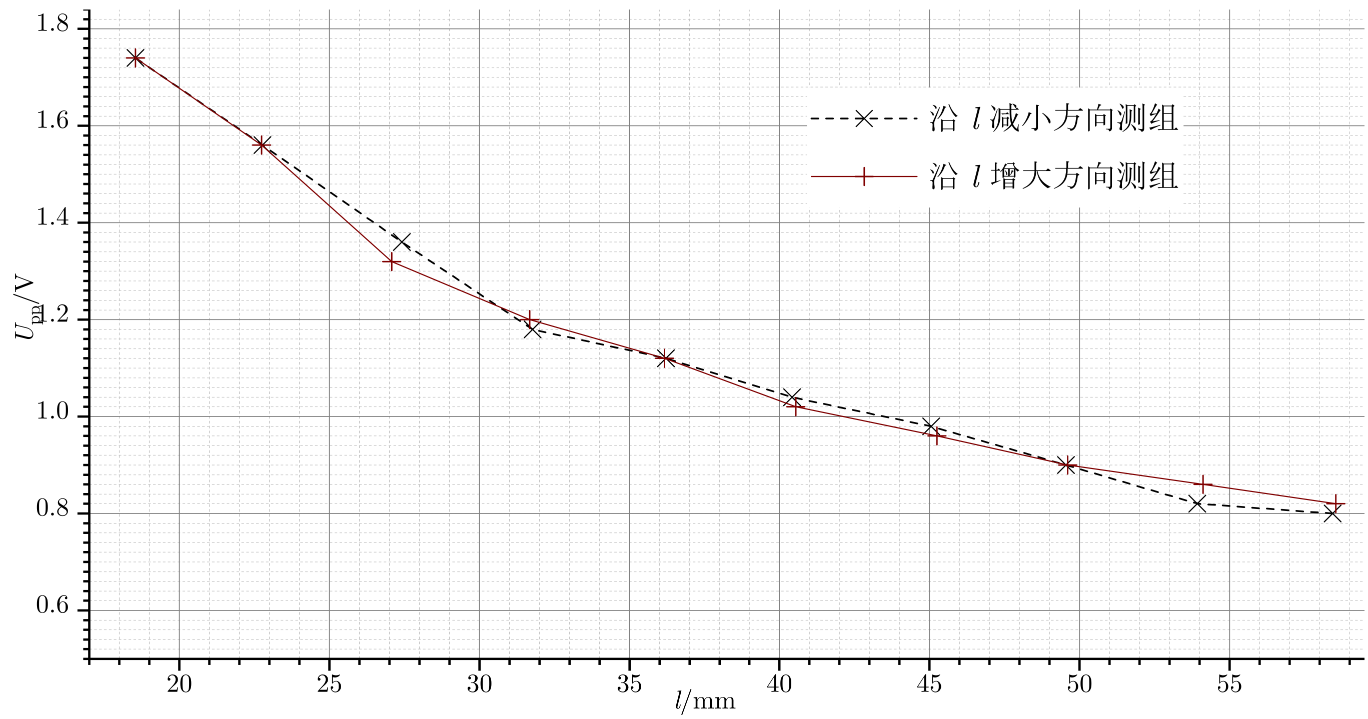

图 1: 图示两组测量得到的各个极大位置处接收器电平振幅，可从中观察声波随距离衰减的特征。

12.3 行波相位法测空气中声速

同样将超声波发生器的频率设置为 $f = 38.7\,\mathrm{kHz}$，将发生端与接收器两路信号同时接入示波器以 $X - Y$ 模式显示。两路信号应该频率相同，相差一个相位（即是声波传播造成的相位差），因此能观察到利萨如图形。发生端与接收器的距离每改变一个波长，两路信号的相位差变化 2π，因此记录下每处利萨如图形拉成正直线的位置，即可得到波长。仍然和上面一样，测量一去一回。

l/mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
移近	104.301	95.382	86.411	77.449	68.585	59.648	50.972	41.869	33.118	23.985
移远	104.202	95.343	86.382	77.420	68.570	59.654	50.988	41.900	33.174	24.052

用学校买的 Origin 对数据进行最小二乘拟合。不计允差，移近一组的数据软件计算得到斜率（亦即波长的估计值）为$(8.9077 \pm 0.0103)\,\mathrm{mm}$，移远一组的数据软件计算得波长的估计值为$(8.891\,85 \pm 0.010\,34)\,\mathrm{mm}$，两个相关系数均在五个九以上。[1]再合成入各位置测量值的允差：如同上面一样，允差造成的位置测量不确定度大概是$0.0029\,\mathrm{mm}$，按照书上公式 (7.17)，除以自变量（也就是 1 到 10 的指标）的标准差的十倍（约是9.083），得到对波长不确定度的贡献约为$0.0003\,\mathrm{mm}$。将这一值按方和根合成入上面两个不确定度（实际上由于大小相差悬殊合成进去并无影响），得到波长分别为$(8.91 \pm 0.01)\,\mathrm{mm}$与$(8.89 \pm 0.01)\,\mathrm{mm}$，乘上频率得到声速测量值分别为$(344.7 \pm 0.4)\,\mathrm{m/s}$与$(344.1 \pm 0.4)\,\mathrm{m/s}$。

12.4 利用超声光栅衍射测水中声速

使用频率已知的发生器在水中产生一个超声波信号，纵波产生周期性的疏密结构，形成一个不事雕琢的天然光栅，光栅的周期即是声波的波长。因而利用衍射确定光栅周期即可测出水中声速。实验时发生器的频率为$9.650\,\mathrm{MHz}$，使用波长为 $\lambda = 632.8\,\mathrm{nm}$ 的氦氖红光进行衍射，在距离衍射面 $L = 752\,\mathrm{cm}$（使用卷尺测出）

[1] Origin 对斜率的不确定度的计算方法参阅`https://www.originlab.com/doc/Origin-Help/LR-Algorithm#Fit_Parameters`，算法是与书上公式一致的。

的墙面上观察衍射花样。使用刻度尺量出相邻两级条纹之间距离 d 分别为3.02 cm、3.05 cm、3.08 cm、3.04 cm、3.15 cm、3.05 cm、3.07 cm、3.12 cm，平均为3.073 cm。根据公式得到光栅周期为 $L\lambda/d = 154.9\,\mu\mathrm{m}$，从而有水中声速为1494.6 m/s。考虑卷尺和钢刻度尺的不确定度，结果的不确定度大概在百分之一左右。

12.5　讨论

测量多个极大位置做逐差或是最小二乘拟合，得到结果的不确定度当然比只测两个极大位置好得多啦。李萨如法还好些，那个共振法看振幅极大，不管是凭肉眼观察还是凭示波器指示，都难以确定一个准确的位置，因此实际上上面计算允差只考虑手轮读数的误差实在是大大低估了；好在这一读数的困难在随机误差里部分地得到了体现。如果不逐差只是简单取平均的话，相当于浪费了中间测量的数据点，并不可取。正弦波振幅极大总是比极小容易判断一些（虽然也并不好判断），李萨如图线也是，直线位置比其他位置在定位的精确度上高得多。

声波信号随距离衰减，应该是服从类似平方反比的规律的，大致就是长上面画的那幅图那个样。

这个实验也是从小做到大了，驻波法、行波法和多普勒法在高中做过好多遍，也是观感最亲切的实验之一。然而还是常做常新的，一方面以前没做过超声光栅法（只是听人说起过），另一方面这次实验用的示波器是实验经历里用过最智能最高级的，甚至能够自动调节，并且把信号存储到 U 盘里，体验挺不错。