

《物理实验（下）》：声速光速的测量

注：选择本项目之前，建议完成示波器实验项目。

声波是一种机械波，可在气态、液态、固态物质中传播，它会引起物质的光学、电磁、力学、化学性质以及人类生理、心理等性质的变化。人耳能听到的声波称为可闻声波，频率在 $20\text{Hz} \sim 20\text{kHz}$ 之间，频率低于 20Hz 的声波称为次声波，频率高于 20kHz 则称为超声波。超声波在媒质中传播时，声速、声衰减和声阻抗都和媒质的特性及状态有关，通过测量这些声学量可以探知媒质的特性和状态变化。测量声速的原理可以是 $v=l/t$ (l 表示声音传播的距离， t 表示通过这段距离的时间)，也可以是 $v=f\lambda$ (f 为声波频率， λ 为声波波长)。本实验采用的共振干涉法和相位比较法均属于后者。

光波是一种电磁波，光速是一个重要而基本的物理常数，无论在经典物理还是现代物理中，许多物理量都与它有着直接或间接的关系：例如光谱学中的里德堡常数，电磁学中的真空电导率与真空磁导率的关系等等都与光速相关。它的精确测定可以说在光学甚至于对整个物理学发展史都具有非比寻常的意义。由于光波的传播速度太快，频率高达 10^{14}Hz ，本实验采用差频检相法测量光速。通过实验可加深对光的传播速度的感性认识，同时了解调制和差频技术。

【实验目的】

1. 了解超声波发射和接收的工作原理。
2. 掌握共振干涉法和相位比较法测量超声声速的方法。
3. 了解光的调制和差频的一般原理及基本技术。
4. 测定光在空气中的传播速度。

【实验 1：超声声速测量】

一. 实验原理

超声波的发射和接收需要用到换能器，换能器的作用是将其它形式的能量转换成超声波的能量（发射换能器），或将超声波的能量转换为其它可以检测的能量（接收换能器）。最常使用的是压电换能器。压电晶体（如石英）或压电陶瓷（如钛酸钡、锆钛酸铅）这类压电材料受到应力 \mathbf{T} 的作用会在材料内产生电场 \mathbf{E} ，且满足 $\mathbf{E}=\sigma\mathbf{T}$ (σ 为压电常数)，这就是压电效应。这种效应是法国人居里兄弟 1880 年在研究热电现象和晶体对称性的时候发现的。压电换能器接收超声波信号使之转换为电信号，将机械能转换为电能，利用的是正压电效应。压电材料还具有逆压电效应，压电材料在电场 E 的作用下产生伸缩形变 S ，且满足 $S=dE$ (d 为伸缩常数)，在交变电场的作用下会产生周期性的收缩和伸长。发射换能器利用逆压电效应可将电能转换成超声振动能，在周围媒质中激发超声波。

声波在媒质中传播的速度决定于媒质密度、弹性模量等性质。声波在液体和固体中的传播速度一般大于在气体中的传播速度。声速也和媒质的压强、温度等状态有关。若频率已知，测出波长即可根据波长、频率和声速三者的关系 $v=f\lambda$ 求出波速。

1. 共振干涉法测声速

如图 1-1， S_1 、 S_2 都是压电换能器，两者相互平行。由信号发生器输出的频率 f 的正弦电信号激励超声波发射器 S_1 发射出沿 x 方向传播的近似平面超声波，经接收器 S_2 反射后在两端面间来回传播并叠加而形成驻波（严格地说还有行波的成份）。驻波场中， x 处空气质点的位移 y 可表示为：

$$y = \frac{a \sin[k(l-x)]}{\sin kl} \cos \omega t \quad (1-1)$$

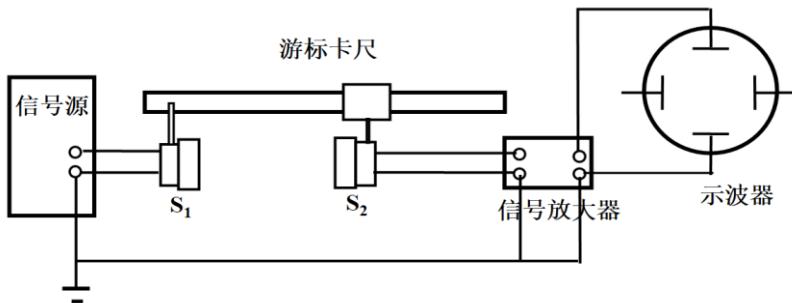


图1-1 共振干涉法测声速

式中 a 为声波振幅, $\omega(=2\pi f)$ 为声波的角频率, $k(=2\pi/\lambda=\omega/v)$ 为波数, λ 为声波的波长, l 为 S_1 与 S_2 间的距离。对于某一确定的 l , 在驻波场中满足 $|\sin[k(l-x)]|=1$ 的那些地方, 位移达到最大而形成波腹; 而在满足 $|\sin[k(l-x)]|=0$ 的那些地方, 位移为零而成为波节。两相邻波腹或波节之间的距离均为半波长。

驻波场中, 空气质点位移 y 的图像不能被直接观测, 而声压 p (空气中由于声扰动而引起的超出静态大气压强的那部分压强) 却可以通过仪器观测。根据声学理论, 声压 p 的驻波可表示为:

$$p = -\rho_0 v^2 \frac{\partial y}{\partial x} = \rho_0 \omega v a \frac{\sin[k(l-x)+\pi/2]}{\sin kl} \cos \omega t \quad (1-2)$$

其中 ρ_0 为空气的静密度。同样声压两相邻波腹或波节之间的距离也为半波长, 所不同的是: 空气质点位移总是最大的地方却是声压的波节, 而空气质点总是静止的地方却是声压的波腹。

若将接收到的超声波声压信号转换成电信号再输入示波器, 当发射频率固定时, 移动 S_2 改变两者的相对距离就能在一系列特定的距离 (声波半波长的整数倍) 上建立驻波共振态, 从示波器上可以观察到信号振幅周期性地呈现最大值, 相邻最大值之间换能器 S_2 移动的距离 Δl 为半波长, 则:

$$v = f\lambda = 2f\Delta l \quad (1-3)$$

实际测量中为了提高测量精度, 可以连续多次测量并用逐差法处理数据。

2. 相位比较法测声速

声波是振动状态的传播, 在声波传播方向上任何一点和波源之间都存在位相差。将 S_1 和 S_2 的正弦电压信号分别输入示波器的 X 通道和 Y 通道, 可观察到两个相互垂直的同频率简谐振动合成的李萨如图形。改变 $S_1 S_2$ 间的距离时位相差发生变化, 图形特性随之变化。每当位相差变化满足:

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = (2\pi d_2 - 2\pi d_1)/\lambda = 2\pi, \text{ 即 } \Delta l = l_2 - l_1 = \lambda \quad (1-4)$$

相同的李萨如图形就会重复出现 (如图 1-2 所示)。由此可以测定 λ , 算出声速。

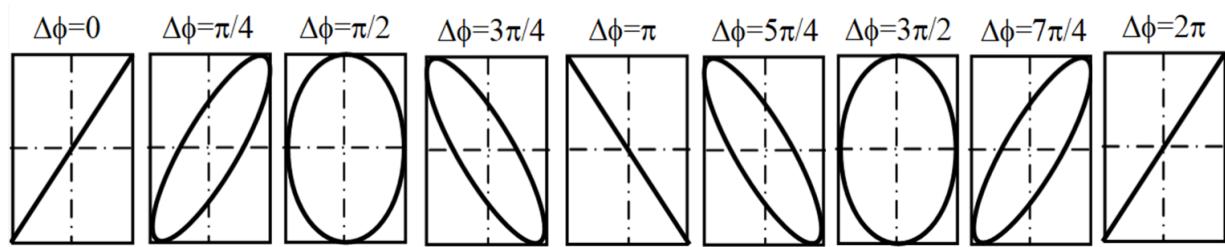


图 1-2 李萨如图

3. 时差法测声速

以上方法测声速, 都是用示波器观察波谷和波峰, 或观察二个波之间的相位差, 测量中存在读数误差, 较精确测量声速是用时差法 (图 1-3)。它是将经脉冲调制的电信号加到发射换能器上, 声波在介质中传播, 经过 T 时间后到达 L 距离处的接收换能器, 得到声速 $v=L/T$ 。

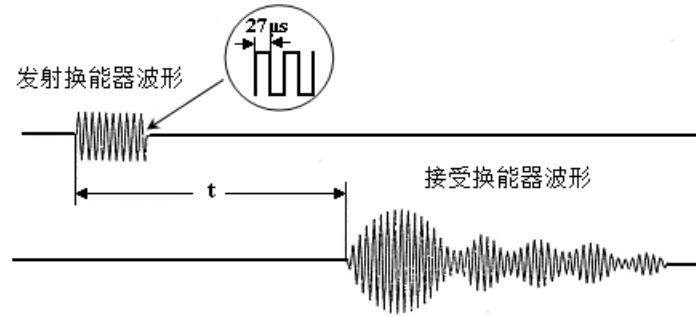


图 1-3 时差法测量声速

声波在理想气体中的传播可以认为是绝热的，声速可表示为：

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT_0}{\mu}}(1 + \frac{t}{T_0}) = \sqrt{\frac{\gamma RT_0}{\mu}} \sqrt{(1 + \frac{t}{T_0})} = v_0 \sqrt{(1 + \frac{t}{T_0})} \quad (1-5)$$

式中 $\gamma = c_p / c_v$ 是气体的比热； $R=8.314 \text{ J/(mol K)}$ 是摩尔气体常数； μ 是气体的摩尔质量； t 是气体的摄氏温度， $T_0 = 273.15 \text{ K}$ 。若把干燥空气看作是理想气体，在 0°C 时 $v_0 = 331.45 \text{ m/s}$ 。

二、仪器设备

如图 1-4, SV4 型声速测定仪及声速测定专用信号源用于测量空气和液体介质的声速。声速测定仪主要由储液槽、传动机构、压电换能器等组成。发射超声波的换能器 S_1 固定在左边，接收超声波的换能器 S_2 在可移动滑块上，通过传动机构进行位移。 S_1 发射换能器超声波的正弦电压信号由专用信号源提供，换能器 S_2 把接收到的超声波声压转换成电压信号，通过示波器观察。



图 1-4 声速测定仪及专用信号源

三、实验内容及步骤

1、超声波谐振频率的调节

目的：使得超声波频率与换能器固有频率一致，此时电声、声电转换效率最高，测试仪器处于最佳工作状态。调节方法如下：

- (1) 信号源设置【连续波】方式，信号源【发射波形】接示波器 CH1，信号源【发射 S_1 】接声速测试仪【发射】，声速测试仪【接收】接示波器 CH2。
- (2) 示波器通道切换为 CH1：调节示波器（水平轴、垂直轴）清楚观察到正弦波信号；调节信号源【发射强度】，使示波器波形电压峰峰值 V_{pp} 大于 1V （此为换能器的工作电压范围）。
- (3) 示波器通道切换为 CH2：调节示波器（水平轴、垂直轴）清楚观察到正弦波信号；调节信号源频率（结合粗调细调，调节范围 $34\text{ KHz} - 40\text{ KHz}$ ），观察电压幅度变化（若幅度过大波形超过屏幕，逆时针调大垂直轴分度值），在某频率点处（因不同换能器或介质而异）电压幅度最大，此频率即是压电换能器最佳工作频率 $f_{\text{空气}}$ ，测量中保持该频率不变。

2. 共振干涉法测量空气中的声速

接线不变。调节鼓轮移动换能器 S_2 观察信号幅值随距离周期变化的现象。保持换能器 S_1 和 S_2 初始间距 3-5cm。选择某个振幅最大值作为测量起点，游标卡尺读出位置，保持同方向缓慢移动 S_2 ，逐一记下各振幅最大的位置，连续 12 组数据（表 1-1）。记录环境室温 t ($^{\circ}$ C)。

3. 相位比较法测量水中的声速

接线不变。向储液槽注入水至“液面线”处，但不要超过液面线，测试仪小心放入储液槽中。按前面实验内容 1 的方法，确定水中换能器的最佳工作频率 $f_{\text{水}}$ 。

示波器通道切换为【X-Y】模式：调节示波器，出现李萨如图形。移动换能器 S_2 观察图形变化。保持换能器 S_1 和 S_2 初始间距 3-5cm。选择图形为斜直线时的位置作为测量起点，保持同方向缓慢移动 S_2 ，记下斜率负、正变化的直线出现的位置，连续 12 组数据。

表 1-1 共振干涉法、相位比较法数据记录

测量次数	1	2	3	4	5	6
空气中共振法(mm)						
水中相位法(mm)						
测量次数	7	8	9	10	11	12
空气中共振法(mm)						
水中相位法(mm)						

$f_{\text{空气}} = \underline{\hspace{2cm}}$ Hz; $f_{\text{水}} = \underline{\hspace{2cm}}$ Hz; 环境室温 $t = \underline{\hspace{2cm}}$ $^{\circ}$ C

4. 时差法测量水中的声速（选做）

(1) 信号源上测试方法设置【脉冲波】方式，信号源【发射 S_1 】接声速测试仪【发射】，信号源【接收 S_2 】接声速测试仪【接收】，信号源【接收波形】接示波器 CH1 (或 CH2)。示波器水平时间轴分度值逆时针调大，观察到信号源发出的脉冲波信号。

(2) 调节信号源【接收放大】，使得脉冲波电压峰峰值 V_{pp} 在 0.3-0.4V 左右。

(3) 保持换能器 S_1 和 S_2 初始间距 3-5cm。缓慢远移接收换能器 S_2 (每次移动等间距 20mm)，记录相应的时间 T_i ，连续 12 组数据。

注：由于声波的衰减，移动换能器使测量距离变大（这时接收时间也变大）时，如果测量时间值出现跳变，顺时针方向微调“接收放大”旋钮，以补偿信号的衰减；反之测量距离变小时，如果测量时间值出现跳变，则应逆时针方向微调“接收放大”旋钮，以使计时器能正确计时。

【实验 2：光速测量】

一. 实验原理

1. 相位法测定调制波波长：

一单色光受频率 f_i 的正弦波调制，其在传播方向的强度表达式为：

$$I = I_0 \left[1 + m \cos 2\pi f_i (t - \frac{x}{c}) \right] \quad (2-1)$$

式中 m 为调制度， $\cos 2\pi f_i (t - x/c)$ 表示光在传播的过程中，其强度的变化犹如一个频率 f_i 的正弦波以光速 c 沿 x 方向传播，这个波为调制波。

设沿传播方向上两点 A 和 B 的位置坐标分别为 x_1 和 x_2 ，则两点间调制波位相差满足：

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda_i} (x_2 - x_1) \quad (2-2)$$

只要测量 A 和 B 两点之间的距离及相应的位相差，就可求得调制波的波长 λ_t ，从而在已知调制波频率 f_t 的前提下，可得光速：

$$c = f_t \lambda_t \quad (2-3)$$

本实验采用的调制波频率为 150MHz，远小于可见光频率（约 10^{14} Hz），调制波波长 f_t (10^9 m 数量级) 比可见光波长大得多，实验中更容易测量，且具有较高的精度。

2. 差频法测位相差

以上可知，只要测量调制波位相差，即可测得光速。但是实验的调制波频率 150MHz，对于目前大多数测相仪器来说，这个频率还是太高。例如，通常的数字式位相计中的检相电路开关时间约 40ns，而 150MHz 被测信号周期 ($1/f$) 只有约 7ns，仪器无法响应。此外实际位相测量中，被测信号频率较高时，测相系统的稳定性、工作速度以及高频寄生效应造成的附加相移等因素都会影响测相精度。因此为了测量高频被测信号的相位差，需进一步降低其频率。差频法是一种将高频信号降为中、低频信号的有效方法，且差频后得到的低频信号和原高频信号具有相同的位相差（附录）。

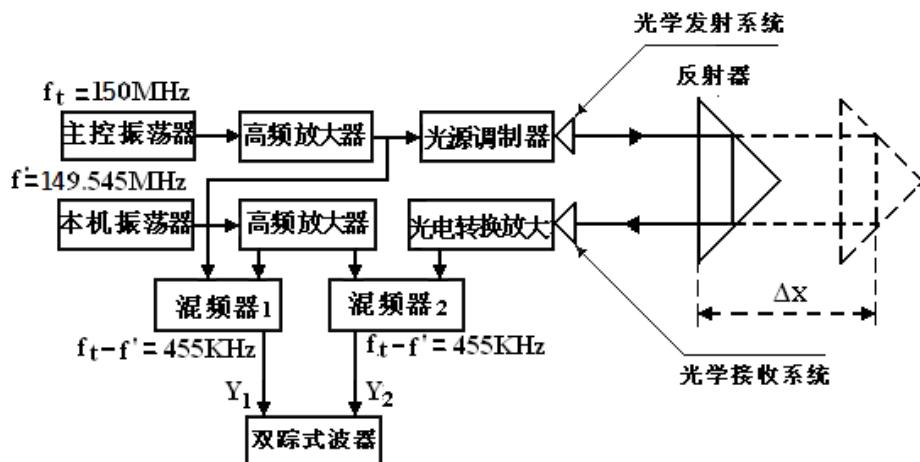


图 2-1 光速测量仪工作原理图

如图 2-1，主控振荡器产生的 150MHz 调制信号经高频放大器放大，一路驱动光源调制器，发射经调制的光波信号。另一路与本机振荡器的 149.545MHz 信号经混频器 1 混频，得到频率 455kHz 的差频基准信号 Y_1 。调制光波信号在传播方向上经反射器（该反射器可在导轨上移动）反射，被光学接收系统接收，经光电转换和放大后，与本振信号经混频器 2 混频，得到同样频率 455kHz 的差频被测信号 Y_2 。将基准信号和被测信号输入相位差仪。当反射器移动 Δx ，则被测信号的光程改变 $2\Delta x$ ，由公式 (2-2) 可得：基准信号和被测信号的位相差改变：

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda_t} \cdot 2\Delta x \quad (2-4)$$

当反射器移动 Δx 时，示波器上可观察到被测信号波形移动。通过示波器读出被测信号在水平时间轴移动距离 Δt ，就可求得反射器移动 Δx 引起的基准信号和被测信号的位相改变：

$$\Delta \varphi = \frac{\Delta t}{T} 2\pi \quad (2-5)$$

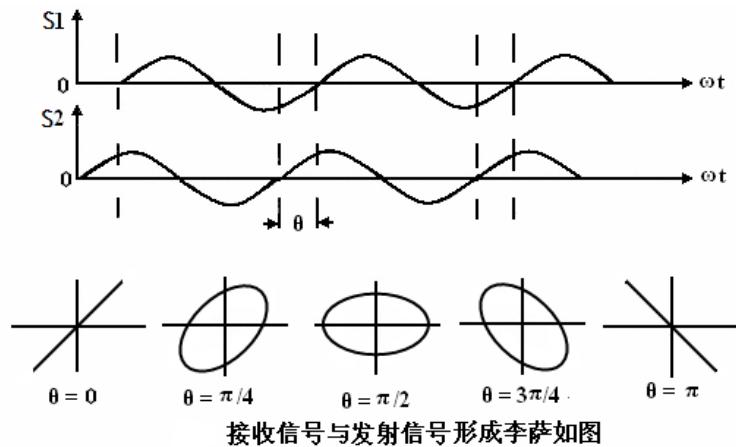
其中 T 为被测信号周期 ($T = 1/455\text{kHz}$)，也可在示波器上测得。由此可得调制波波长为：

$$\lambda_t = \frac{T}{\Delta t} 2\Delta x \quad (2-6)$$

得到调制波波长 λ_t ，又知调制波频率 (150MHz)，即可得到光速。若调制波为除了正弦波的其他波形（例如方波），也可以通过改变反射镜的位置，用方波测量相位差，计算出调制波的波长。

3. 李萨如图形测量原理

一单色光受频率为 f_t 的正弦波调制，从光源 S_1 发出后，在介质中任一点的振动相位是随时间而变化的。但它和光源的振动相位差 $\Delta\theta$ 不随时间变化。



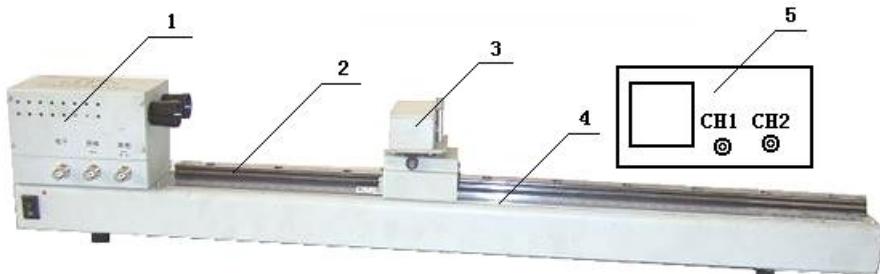
设在光源 S_1 处振动方程为: $F_1 = F_{01} \cos \omega t$

距光源 x 处 S_2 接收到的振动为: $F_2 = F_{02} \cos(\omega t + \Delta\theta)$

当 S_1 和 S_2 的信号分别输入到示波器 X 轴和 Y 轴，随着位置 x 的改变， S_1 和 S_2 的相位差随之改变，两者的李萨如图形发生变化。通过对李萨如图形的观测，也可以间接测量出光波波长。

二、实验仪器

FB801型光速测量仪一台，同轴电缆线 2 根，双踪示波器一台，如图 2-2 所示。光速测量仪属于精密仪器，操作时不可用力过大，不可用手触摸光学镜面。



1. 光学电路箱；2. 导轨；3. 反射镜滑车；4. 刻度尺 5. 双踪示波器

图 2-2 光速测量仪工作实物图

三、实验内容及步骤

1. 相位法测量光速（正弦波）

(1) 光速测量仪的【基准】接示波器 CH1，调节示波器，观察到 CH1 显示的差频后的正弦波信号。

【测相】接示波器 CH2，反射镜滑块固定在导轨上某一位置，观察到 CH2 显示的差频后的正弦波信号。调节反射镜滑块上的微调旋钮，使得波形清楚且前后移动反射镜滑块时波形幅度保持不变。

(2) 测量 CH1 (或 CH2) 正弦波周期 T (水平偏转因子设为 $0.5\mu\text{s}/\text{DIV}$ ，示波器水平微调旋钮顺时针旋到底，即处于校准状态)，通过周期测量可得到差频后的频率，其值与 455kHz 应该大约一致。

(3) 移动反射镜滑块，观察 CH2 (测相信号) 的相位变化。通过下面方法进行测量 CH2 波形水平移动距离 Δt 随反射镜移动 Δx 的变化：选择波形中某参考点，移动反射镜滑块，使得这参考点在水平时间轴移动 2-5 个整数方格 (水平偏转因子设为 $0.2\mu\text{s}/\text{DIV}$)。即： $\Delta t = \text{移动方格数} \times 0.2\mu\text{s}/\text{DIV}$ 。反射镜滑块移动的距离 Δx 可从导轨上标尺读出。

表 2-1 差频后波形的周期测量（水平偏转因子 $0.5\mu\text{s}/\text{DIV}$, 选择不同参考点）

测量次数	1	2	3
相邻参考点间距（格子数）			
周期 T (μs)			

表 2-2 参考点在水平时间轴移动距离 Δt 以及滑块移动距离 Δx （水平偏转因子 $0.2\mu\text{s}/\text{DIV}$ ）

测量次数	1	2	3
参考点移动（方格数）			
参考点水平移动距离 Δt (μs)			
反射镜滑块初始位置 x_1 (mm)			
反射镜滑块结束位置 x_2 (mm)			
反射镜滑块距离 Δx (mm)			
$\Delta x/\Delta t$ (mm/ μs)			

3. 李萨如图形测光速（正弦波）

接线与内容 1 一样。示波器选择 X-Y 工作模式。移动反射镜滑块，观察李萨如图形的变化。当合成图像为直线时，记录反射镜滑块在导轨中的位置 x_1 ；继续移动反射镜滑块，当合成图像同样为直线但斜率相反时，记录反射镜滑块在导轨中的位置 x_2 。即：两束光距离改变 $2\Delta x$ ($\Delta x = x_2 - x_1$) 时，相位差改变了 π ，此时 $2\Delta x$ 即为半个波长。若由于行程不够，观察不到 2 条直线斜率的交替变化，请思考该怎样测量？

表 2-3 反射镜滑块移动的距离 Δx

测量次数	1	2	3
反射镜滑块初始位置 x_1 (mm)			
反射镜滑块结束位置 x_2 (mm)			
反射镜滑块距离 Δx (mm)			

2. 选做：相位法测量光速（方波）

方法同内容 1，此时【基准】和【测相】连接的是方波信号。

【数据处理】

1. 声速测量：报告上原始数据规范作表；对于共振干涉法，逐差法计算半波长 Δl ，计算空气中的声速；计算室温 t 时空气中声速的理论值，与实验中测得的空气中声速比较，计算绝对误差和相对误差。对于相位比较法，逐差法计算半波长 Δl ，计算水中的声速；通过逐差法评估半波长 Δl 的 A 类不确定度（置信概率取 95%），要求过程完整。

附 1：共振干涉法（相位比较法）读出换能器 12 个数据 l_i ($i=1, 2, \dots, 12$)，根据逐差法得到：

$$\Delta l_1 = (l_7 - l_1) / 6; \Delta l_2 = (l_8 - l_2) / 6; \dots; \Delta l_6 = (l_{12} - l_6) / 6, \text{ 则 } \overline{\Delta l} = \sum_{i=1}^6 \Delta l_i / 6 = \lambda / 2.$$

附 2：半波长 Δl 由 12 组数据逐差法得出，评估其 A 类不确定度，其测量次数 $n=6$ 。

2. 光速测量：报告上原始数据规范作表；相位差法，计算差频后波形的周期测量结果的平均值；计算 $\Delta x/\Delta t$ 的平均值，根据调制波频率，计算空气中光速测量值，给出相对误差和绝对误差；李萨如图形测光速，计算 Δx 的平均值，根据调制波频率，计算空气中光速测量值，给出相对误差和绝对误差。注：空气中光速理论值可近似用真空中的光速 ($c_0=2.998\times 10^8\text{m/s}$) 代替。

3. 分析实验中的误差来源。

附录:

设有两个相同频率，不同位相（位相差为 φ ）的高频信号，

$$u_1 = U_{10} \cos(2\pi f t + \varphi_0); \quad u_2 = U_{20} \cos(2\pi f t + \varphi_0 + \varphi) \quad (1)$$

引入一个本振高频信号，

$$u' = U'_0 \cos(2\pi f' t + \varphi'_0) \quad (2)$$

使本振高频信号与信号 u_1 叠加后输入非线性元件，忽略高次项（大于等于三次项），展开得到：

$$y(u_1 + u') \approx A_0 + A_1(u_1 + u') + A_2(u_1 + u')^2 = A_0 + A_1u_1 + A_1u' + A_2u_1^2 + A_2u'^2 + 2A_2u_1u' \quad (3)$$

考虑最后一项交叉项，可得：

$$2A_2u_1u' = 2U_{10}U' \{ \cos[2\pi(f + f') + (\varphi_0 + \varphi'_0)] + \cos[2\pi(f - f') + (\varphi_0 - \varphi'_0)] \} \quad (4)$$

同理，可得本振高频信号与信号 u_2 叠加的交叉项：

$$2A_2u_2u' = 2U_{20}U' \{ \cos[2\pi(f + f') + (\varphi_0 + \varphi'_0) + \varphi] + \cos[2\pi(f - f') + (\varphi_0 - \varphi'_0) + \varphi] \} \quad (5)$$

可以看出，当两个不同频率的正弦波信号叠加后作用于非线性元件，输出信号成分中除了原来的两个基波和二次谐波外，还含有“差频信号”及“和频信号”。电子技术很容易将此“差频信号”从非线性元件的输出信号中分离出来（普通模拟示波器即可测量），即：

$$y_1 = 2U_{10}U' \cos[2\pi(f - f') + (\varphi_0 - \varphi'_0)] \quad (6)$$

$$y_2 = 2U_{20}U' \cos[2\pi(f - f') + (\varphi_0 - \varphi'_0) + \varphi] \quad (7)$$

也就是说，混频后的两个差频信号的相位差仍然为 φ 。