

实验 18 超声光栅测声速实验

引言

1932 年，德拜 (Debye) 和席尔斯 (Sears) 在美国以及陆卡 (Lucas) 和毕瓜 (Biguand) 在法国，分别独立地首次观察光在液体中的超声波衍射的现象，从而提出了直接确定液体中声速的方法。

实验目的

- 1、了解超声致光衍射的原理
- 2、学会一种利用超声光栅测量超声波在液体中传播速度的方法。

实验原理

单色光沿垂直于超声波传播方向通过这疏密相同的液体时，就会被衍射，这一作用，类似光栅，所以称为超声光栅。

超声波传播时，如前进波被一个平面反射，会反向传播。在一定条件下前进波与反射波叠加而形成超声频率的纵向振动驻波。由于驻波的振幅可以达到单行波的两倍，加剧了波源和反射面之间液体的疏密变化程度。某时刻，纵驻波的任一波节两边的质点都涌向这个节点，使该节点附近成为质点密集区，而相邻的波节处为质点稀疏处；半个周期后，这个节点附近的质点有向两边散开变为稀疏区，相邻波节处变为密集区。在这些驻波中，稀疏作用使液体折射率减小，而压缩作用使液体折射率增大。在距离等于波长 λ 的两点，液体的密度相同，折射率也相等，如图1所示。

单色平行光 λ 沿着垂直于超声波传播方向通过上述液体时，因折射率的周期变化使光波的波阵面产生了相应的位相差，经透镜聚焦出现衍射条纹。这种现象与平行光通过透射光栅的情形相似。因为超声波的波长很短，只要盛装液体的液体槽的宽度能够维持平面波（宽度为 ι ），槽中的液体就相当于一个衍射光栅。图中行波的波长 λ 相当于光栅常数。由超声波在液体中产生的光栅作用称作超声光栅。

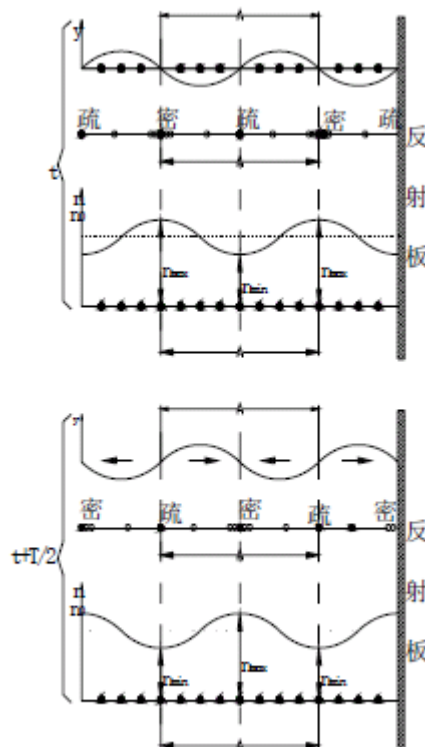


图 1 在 t 和 $t+T/2$ (T 为超声振动周期) 两时刻振幅 y 、液体疏密分布

当满足声光喇曼—奈斯衍射条件： $2\pi\lambda_0 / \Lambda^2 \ll L$ 时，式中 L 为声束宽度， Λ 为声波在介质中的波长， λ_0 为真空中的光波波长，这种衍射与平面光栅衍射类似，可得如下光栅方程（式中 k 为衍射级次， ϕ_k 为零级与 k 级间夹角）：

$$\Lambda \sin \phi_k = k\lambda \quad (1)$$

在调好的分光计上，由单色光源和平行光管中的可调狭缝 S 与会聚透镜 (L_1) 组成平行光系统，如图2所示。

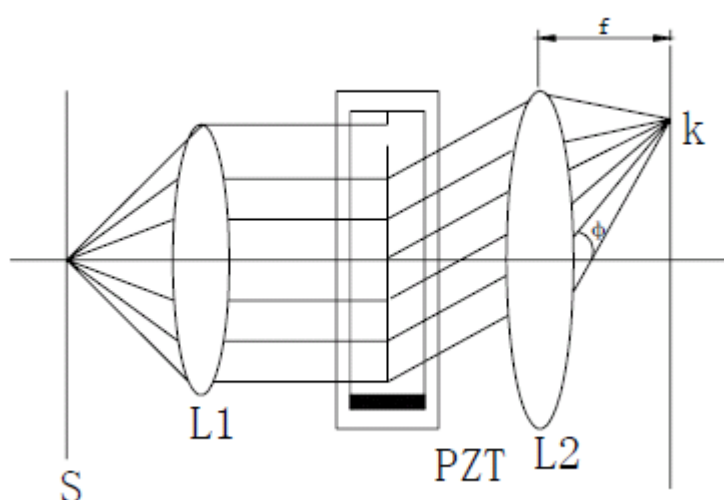


图 2 WSG-I 型超声光栅声速仪衍射光路图

让光束垂直通过装有锆钛酸铅陶瓷片（或称 PZT 晶片）的液槽，在玻璃槽的另一侧，用自准直望远镜中的物镜 (L_2) 和测微目镜组成测微望远系统。若振荡器使 PZT 晶片发生超声振动，形成稳定的驻波，从测微目镜即可观察到衍射光谱。从图2中可以看出，当 ϕ_k 很小时，有：

$$\sin \phi_k = l_k / f \quad (2)$$

其中 l_k 为衍射光谱零级至 k 级的距离， f 为物镜 L_2 的焦距，所以超声波波长：

$$\Lambda = k\lambda / \sin \phi_k = k\lambda f / l_k \quad (3)$$

超声波在液体中的传播速度：

$$v = \Lambda \nu = \lambda f \nu / \Delta l_k \quad (4)$$

式中的 ν 是振荡器和锆钛酸铅陶瓷片的共振频率， Δl_k 为同一色光衍射条纹间距。

实验仪器

WSG-I 型超声光栅声速仪，单色光源（汞或钠），JJY 型分光计

实验仪器介绍

WSG-I 型超声光栅声速仪由超声信号源、超声池、高频信号连接线、测微目镜等组成，并配置了具有 11MHz 共振频率的锆钛酸铅陶瓷片。

仪器的性能指标为：

输入电压 220 V 50 Hz

输出信号频率：8 ~ 12 MHz 工作频率：9.5 ~ 11.5 MHz

测微目镜测量范围：8 mm 测量精度：0.01 mm

WSG-I 型超声光栅声速仪的实验装置如图 3 所示。液体槽（可称其为超声池）是一个长方形玻璃槽，它的两个通过侧面（窗口为）平行平面。液槽内盛有待测液体（水或酒精）。液体槽通过液体槽座被放置在分光计的载物平台上，其通光侧面与平行光管光轴垂直。换能器为压电陶瓷晶片，晶片两面的引线与液体槽上盖的接线柱相连。由超声信号源输出的高频振荡信号驱动锆钛酸铅陶瓷片，产生的超声波会在液体中形成稳定的驻波，形成超声光栅。超声信号的共振频率一般在 11MHz 左右。光源发出来的单色光经过平行光管入射到液体槽上，被液体槽窗口出射的光经望远物镜（JJY 型分光计的物镜焦距 $f = 170\text{mm}$ ）会聚在物镜的后焦面上。用测微目镜观测由超声光栅产生的衍射条纹。

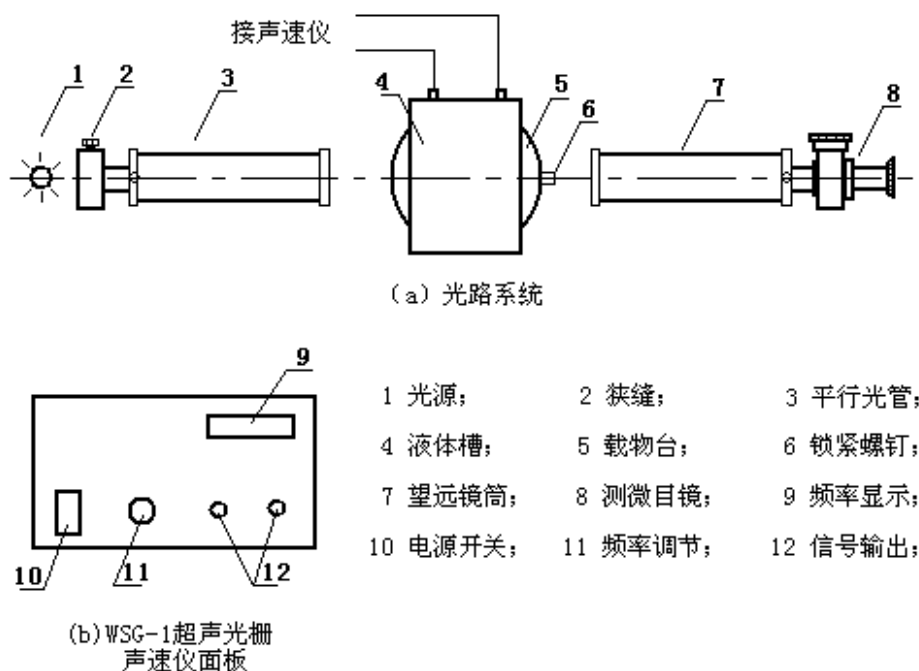


图 3 WSG-I 超声光栅声速仪及实验装置图

超声信号源面板如图 3(b)所示。为保证仪器正常使用，仪器实验时间不宜太长，以免振荡线路过热，所以在超声信号源电源上设置了定时选择开关，可见仪器的后面板。开启超声信号源电源前，先选择定时时间。定时时间可选四档，分别为 60 分钟、90 分钟、120 分钟和不选定时。建议信号源定时功能设定为 60 分钟为宜。

实验内容

1、分别测量几种透明液体中的声速。测量时注意：提供的液体包括蒸馏水、乙醇、甘油等，对每一种液体，至少要测量三级衍射条纹。更换液体时，一定要将液体槽擦拭干净，以免影响测量准确度。根据表 1 中提供的数据，由(5)式计算当前温度 t 下不同液体中的声速 v_t ，与测量值比较，求取相对不确定度，并分析误差产生的原因。

$$v_t = v_0 + \alpha(t - t_0) \quad (5)$$

其中， v_0 是温度为 t_0 时液体中的声速； α 是温度系数。

2、配置几种不同浓度的蔗糖溶液，分别测量其中的声速，绘制声速与溶液浓度的关系曲线。配置溶液时，应保证溶液的洁净度，悬浮颗粒的存在，会很大程度上影响测量效果。

表 1 几种不同透明液体中的声速

液体名称	温度 t_0 /°C	声速 v_0 /ms ⁻¹	温度系数 α /ms ⁻¹ K ⁻¹
苯胺	20	1656	-4.6
丙酮	20	1192	-5.5
苯	20	1326	-5.2
蒸馏水	25	1497	2.5
甘油	20	1923	-1.8
煤油	34	1295	/
甲醇	20	1123	-3.3
乙醇	20	1180	-3.6

实验步骤

1. 调整分光计到使用状态。

- (1) 调节望远镜使之适合于观察平行光。
- (2) 调节望远镜的主光轴与分光计的转轴中心垂直

- (3) 调节平行光管使之出射平行光,
 - (4) 调节平行光管与望远镜同轴。
 - (5) 调节载物台与分光计的转轴垂直。
 - (6) 采用钠光灯作光源。调节平行光管的狭缝至合适的宽度。
2. 将液体槽放置到分光计的载物平台上, 并且利用自准直法, 调节平台的倾角螺钉, 使液体槽的通光表面垂直于望远镜和平行光管的光轴, 即, 使光路与液槽内的超声波传播方向垂直。
 3. 把待测液体(如蒸馏水、乙醇或其他液体)注入液体槽内, 液面高度以液体槽侧面的液体高度刻线为准, 将液体槽盖板盖在液体槽上。
 4. 先选择定时时间为60分钟, 然后开启超声信号源电源。
 5. 从阿贝目镜观察衍射条纹。仔细调节频率微调钮, 使电振荡频率与锆钛酸铅陶瓷片固有频率共振, 此时, 衍射光谱的级次会显著增多且更为明亮, 记录此时的信号源的频率。
 6. 观察液体中超声光栅的衍射现象。为使单色平行光垂直于超声波的传播方向, 可微调载物平台, 使观察到的衍射光谱左右对称, 各级谱线亮度一致。经过上述仔细调节, 一般应观察到 ± 3 级以上的衍射谱线。
 7. 取下阿贝目镜, 换上测微目镜, 调焦目镜, 看清分划线。然后以平行光管出射的平行光为准, 对望远镜的物镜进行调焦, 使平行光管的狭缝像清晰。
 8. 记录液体的温度(室温)。用测微目镜沿一个方向移动, 逐级测量钠黄光各级衍射谱线的相对位置, 并用逐差法求出条纹间距的平均值。
 9. 计算液体中的声速。

注意事项

1、锆钛酸铅陶瓷片未放入有媒质的液体槽前, 禁止开启信号源。锆钛酸铅陶瓷片表面与对应面的玻璃槽壁表面必须平行, 此时才会形成较好的表面驻波, 因此实验时应将超声池的上盖盖平, 而上盖与玻璃槽留有较小的空隙, 实验时微微扭动一下上盖, 有时也会使衍射效果有所改善。

2、实验过程中应避免震动, 以使超声在液槽内形成稳定的驻波, 也不要碰触连接超声池和信号源的两条导线, 导线分布电容的变化会对输出电频率有微小影响。

3、一般共振频率在11.3MHz左右, WSG-I超声光栅仪给出10—12MHz可调范围。在稳定共振时, 数字频率计显示的频率值应是稳定的, 最多只有最末尾有1—2个单位数的变动;

4、实验时间不宜过长, 其一, 声波在液体中的传播与液体温度有关, 时间过长, 温度

可能在小范围内有变动，从而回影响测量精度，一般测量可以待测液体温度同于室温，精密测量可在超声池内插入温度计测量；其二，频率计长时间处于工作状态，会对其性能有一定影响，尤其在高频条件下有可能会使电路过热而损坏，实验时，特别注意不要使频率长时间调在12MHz以上，以免振荡线路过热；

5、提取液槽应拿两端面，不要触摸两侧表面通光部位，以免污染，如已有污染，可用酒精乙醚清洗干净，或用镜头纸擦净；

6、实验中液槽中会有一些的热量产生，并导致媒质挥发，槽壁会见挥发气体凝露，一般不影响实验结果，但须注意液面下降太多致锆钛酸铅陶瓷片外露时，应及时补充液体至正常液面线处；

7、实验完毕应将超声池内被测液体倒出，不要将锆钛酸铅陶瓷片长时间浸泡在液槽内；

数据表格和数据处理

1、测量纯净水的声速

实验温度： 光波长 $\lambda = 589.3nm$ 物镜焦距 $f = 170mm$ 共振频率 $\nu =$

衍射条纹级次	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
衍射条纹位置									

衍射条纹的间距 $\Delta l_k =$

纯净水中的声速 $\nu = \Lambda \nu = \lambda f \nu / \Delta l_k =$

2、测量酒精的声速

实验温度： 光波长 $\lambda = 589.3nm$ 物镜焦距 $f = 170mm$ 共振频率 $\nu =$

衍射条纹级次	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
衍射条纹位置									

衍射条纹的间距 $\Delta l_k =$

纯净水中的声速 $\nu = \Lambda \nu = \lambda f \nu / \Delta l_k =$

思考题

- 1、本实验如何保证平行光束垂直于声波的方向？
- 2、由驻波理论知道，相邻波腹间的距离和相邻波节间的距离都等于半波长，为什么超

声光栅的光栅常数等于声波的波长？

3、光学平面衍射光栅和超声光栅有何异同？

4、实验中能否用逐差法处理数据？如果能，从测量角度看，应该怎样做？

5、实验时可以发现，当超声频率升高时，衍射条纹间距加大，反之则减小，这是为什么？

研究性实验内容

1、利用超声光栅仪测定液体浓度和温度

2、利用超声光栅仪实现水质净化与检测