

## 第三届“卿云杯”全国通识课程论文大赛

学校	南京信息工程大学	院系	长望学院/物理与光电工程学院
专业	大气科学/光电子信息科学与工程	姓名	艾真珍 刘通 黄恒笑
年级	2019	任课教师	张雅男 钱黎明 崔芬萍 咸冯林
课程名称	物理实验玩儿中学		
论文题目	从“玻璃杯振动”到“溶液浓度测量”——受迫振动的研究与应用		

# 从“玻璃杯的振动”到“溶液浓度的测量”

## ——受迫振动的研究与应用

艾真珍 刘通 黄恒笑

2020-2021（2）学期中，我选修了一门通识课，“物理实验玩儿中学”。我是大气科学专业的学生，对物理并不反感。但在我的物理课上，大多数都是理论推导和公式讲解。物理实验课中几乎全部都是验证性实验，有具体的实验步骤。做物理实验也就是把通过仪器测量的数据填写到表格上，通过公式计算出结果，感觉没有什么意思。“物理实验玩儿中学”，这门通识课的名字就吸引了我，索性我就选报，想看看究竟如何玩。

这门通识课是由四名老师来授课，课堂上几乎不讲原理，只是提出一个问题，让同学们通过课堂实验以及课后自己设计实验来找到答案。我印象最深的是“振动”章节的内容。实际上，在该章节授课时，老师提出问题的理论解释在《大学物理》课堂上我都学习过，但我好像只会根据公式做题，却无法回答通识课老师提出的和现实有关的问题。比如，老师提出问题“如何用自己的语言描述什么是振动”，我想了半天也不能给出一个令我自己满意的答案。老师还提出其他问题，“你说话，别的同学可以听到，其中包括了哪些物理现象？”、“机械振动究竟是什么在变化”。这些问题都与实际生活有关，但理论课上根本没有讲解过。老师要求我们利用各种实验来思考，分析问题并且给出答案。课堂上，老师指导我们做了“水波倒流”实验，“克拉尼图”实验（如图1）等，还把所有同学分成若干个小组，让我们讨论通过这些实验如何理解振动。老师还要求每个小组课后自己设计实验，分析振动的特点，看看是否可以应用振动的特点，做出创新设计。



图1 课堂上自己实现“克拉尼图”



图 2 同学们自己尝试“鱼洗盆”

在“振动”章节中，老师讲解振动的本质，还让我们课堂上操作“鱼洗盆”（如图 2），体会什么是受迫振动。课后，我们小组成员对受迫振动产生了浓厚的兴趣，在网上找到了很多受迫振动的视频。在哔哩哔哩网站上的视频中，一个普通人可以通过对着玻璃杯发出声音，把玻璃杯“震碎”。我们自己也购买了各种不同形状的玻璃杯，小组成员依次按照视频演示的方法，对着它发出声音，但并没有把玻璃杯震碎。我们向老师请教，为什么我们不能震碎玻璃杯。老师没有直接给出答案，而是希望我们自己动手通过实验来找到答案。因此，我们小组便开始了探究之旅。

### 1、观察玻璃杯的受迫振动

查阅《大学物理》教材，我们知道，声音是由物体振动产生的，产生声音的物体称为声源，而声音是通过声波的形式，经介质向外传播<sup>[1]</sup>。声源的振动，推动邻近的空气分子，从而轻微增加了空气压力，此时处于平衡态的空气分子因受到压力，随即会推动周围的空气分子，后者又会推动下一组空气分子，以此类推，声源的振动就引起了空气介质的振动。声源的振动能量，通过空气介质，以声波的形式向前传播，直到声波遇到物体，声波所产生的压力使物体也发生振动，即将声波所携带的能量转化为物体振动的能量。此时声源与空气介质的振动频率相同。实际上，这里声波起到周期性驱动力作用。

同时，每一个物体因其形状、大小、材质等的不同，会有其自己的固有频率。当声波的振动频率与物体的固有频率接近时，物体就会发生共振，其振动幅度达到最大<sup>[2]</sup>。

我们自己设计的实验装置，如图 3 所示。利用该装置，我们可以观察到玻璃杯的受迫振动。

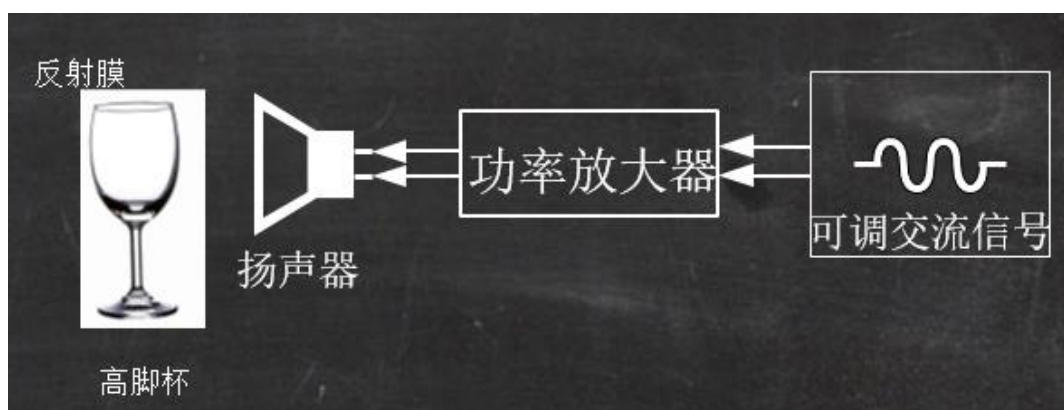


图3 声波使玻璃杯发生受迫振动的实验装置示意图

但上述装置只能观察到玻璃杯受迫振动，即玻璃杯在声波的作用下产生微小的振动，可并没有“破碎”。我们把实验视频发给老师，老师与我们一同讨论。为什么玻璃杯没有破碎，玻璃杯在什么情况下能够破碎呢？

再次查阅资料，我们了解到，对于受迫振动的研究，主要应该测量其振幅和频率。因此，我们又设计了测量装置，来测量玻璃杯受迫振动的振幅和频率。

## 2、测量玻璃杯的受迫振动频率及其振幅

### 2.1. 玻璃杯受迫振动振幅的测量

当物体在声波的驱动下发生振动时，因物体的振动幅度远小于物体本身的尺寸，这种微小振动难以测量。而测量振动频率也是我们没有接触到的。理论课上几乎全部都是给出已知条件，求解振幅或频率，从没有涉及如何测量振幅和频率。在讨论过程中，老师让我们尝试在已做过的大学物理实验中寻找解决问题的方法。小组所有成员都做过大学物理实验，我们一个一个实验去复习，思考，终于找到了解决方法。在《用静态拉伸法测量金属丝的杨氏弹性模量》实验中<sup>[3]</sup>，细金属丝长度的微小变化是通过光学放大法进行测量的，可以利用此种方法测量玻璃杯微小振动的振幅。

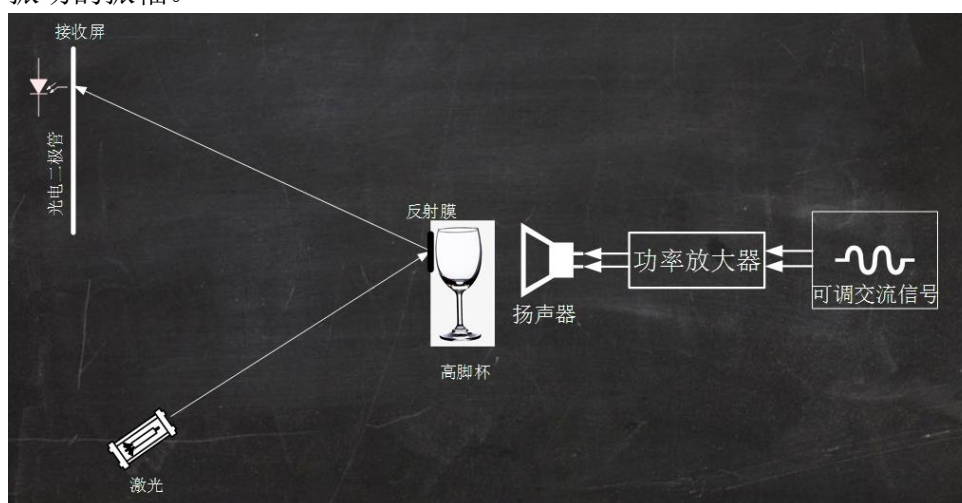


图4 玻璃杯受迫振动振幅及频率测量示意图

如图4所示，将一束激光照射到玻璃杯上，玻璃杯上贴有反射膜，可以将激

光反射到光屏上。激光源与光屏距离为  $2R$ ，在同一直线上，相对于振动玻璃杯对称，与玻璃杯的垂直距离为  $L$ 。激光以  $\theta$  入射角照射到玻璃杯上。当玻璃杯静止时，光屏上激光的反射为一个静止的光斑。若玻璃杯在声波的作用下发生受迫振动时，光屏上的光斑也随之发生振动，激光入射角最小为  $\theta'$ 。玻璃杯的振动振幅较小，但通过光学放大，光斑的位置变化就是一个可观察可测量的物理量。

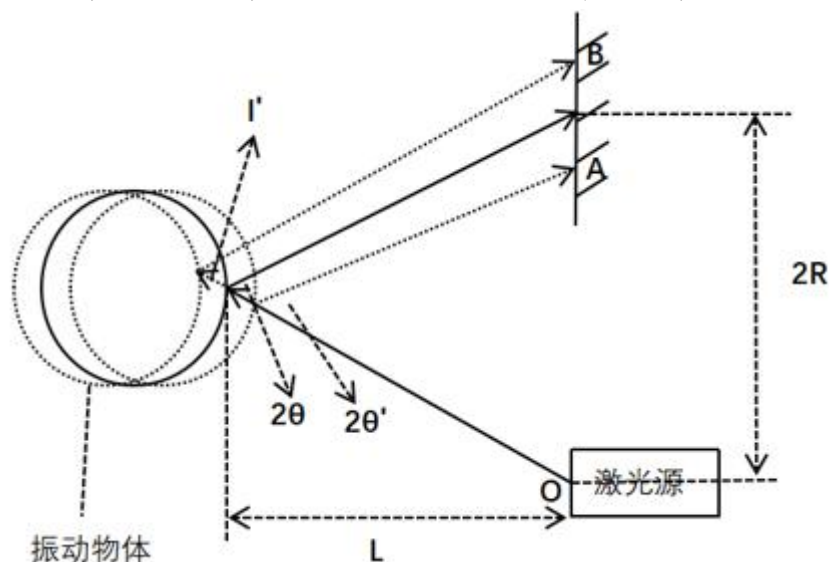


图 5 光斑宽度反映玻璃杯振幅原理图

如图 5 所示，玻璃杯振动时，令物体振动幅度最大的位置与静止时位置的距离为  $l'$ ，激光光束入射角改变量远小于原入射角，故  $2\theta' \approx 2\theta$ ，则

$$\begin{aligned} OA &= 2(L - l') \tan \theta' = 2(L - l') \tan \theta \\ OB &= 2(L + l') \tan \theta' = 2(L + l') \tan \theta \end{aligned} \quad (1)$$

通过以上推导，可以得到光斑宽度

$$OAB = OB - OA = 4l' \tan \theta' \quad (2)$$

利用上式，可以测量出在不同频率下光屏上光斑的宽度，反映玻璃杯受迫振动的振幅。

## 2.2 玻璃杯受迫振动频率的测量

玻璃杯受迫振动的振幅利用光学放大法可以测量。接下来要解决玻璃杯振动频率测量的问题。我们仔细观察光斑的振动，发现了光斑振动的特点。玻璃杯静止时，光斑也是静止的。当玻璃杯受迫振动时，光斑位置也在发生周期变化。光斑位置变化的频率与玻璃杯振动的频率一致。光斑变宽是由于光斑高频移动产生的视觉上的效果，实际上光斑是以肉眼难辨的周期发生位置变化。根据以上分析，我们将光屏换成在《模拟电路分析与设计》课程中学习到的光电转换装置<sup>[4]</sup>，即 OP07 运算放大器搭配 PIN-13DSB 的光电二极管以及示波器，这样就可以测量出光斑移动的频率。其原理图如图 6 所示。当玻璃杯振动到达正向幅值时，此时对应光斑到达最右端最大处 A，则 A 处光强最强。玻璃杯振动达到负向幅值时，A 处光强最弱。若再次到达 A 处光强最强时，这个时间间隔便是玻璃杯受迫振动的



一个周期。通过以上方法，我们测量出，玻璃杯受迫振动的频率与声波的频率相同，这与受迫振动的理论相符。

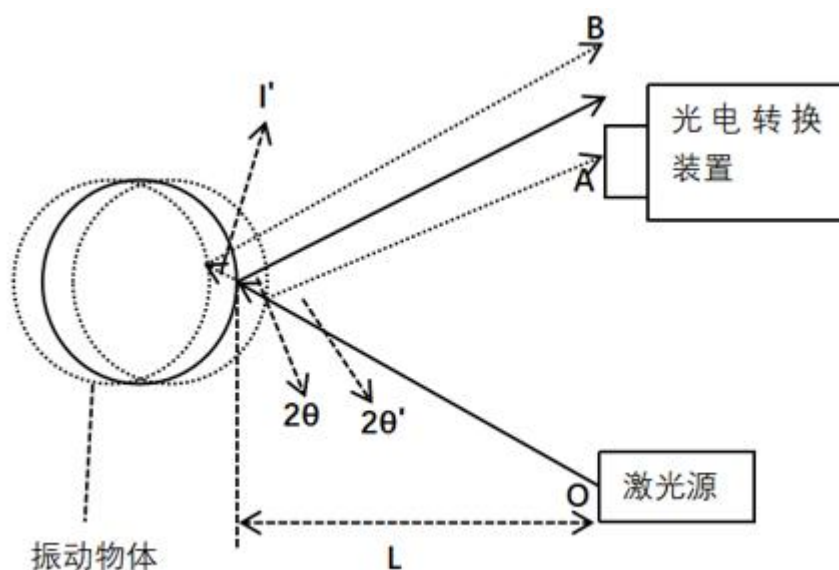


图 6 光电转换法测量玻璃杯受迫振动的频率示意图

### 3、测量不同玻璃杯的共振频率不同

实验过程中，我们始终没有观察到玻璃杯“震碎”的现象。老师请我们通过实验回答，什么时候玻璃杯会被“震碎”，为什么会“震碎”。通过多次实验以及小组讨论，我们得出结论：当声波的频率接近玻璃杯的固有频率时，玻璃杯达到“共振”。如果声波的功率达到一定程度，则“共振”就可以震碎玻璃杯。此时，又一个新的想法萌生出来，所有的玻璃杯共振频率一样吗？我们小组再次通过实验来进行验证和求解。通过上文提到的方法，我们测量出不同玻璃杯受迫振动的幅频特性曲线，找到其振幅最大对应的频率，即为玻璃杯的固有频率。我们选取了3个不同的玻璃杯，测量其幅频特性曲线，结果如图7所示。用该方法测量的玻璃杯的固有频率与其理论值相符。换用高度、厚度、容量不同的玻璃杯时，测量得到的玻璃杯共振频率也不相同。

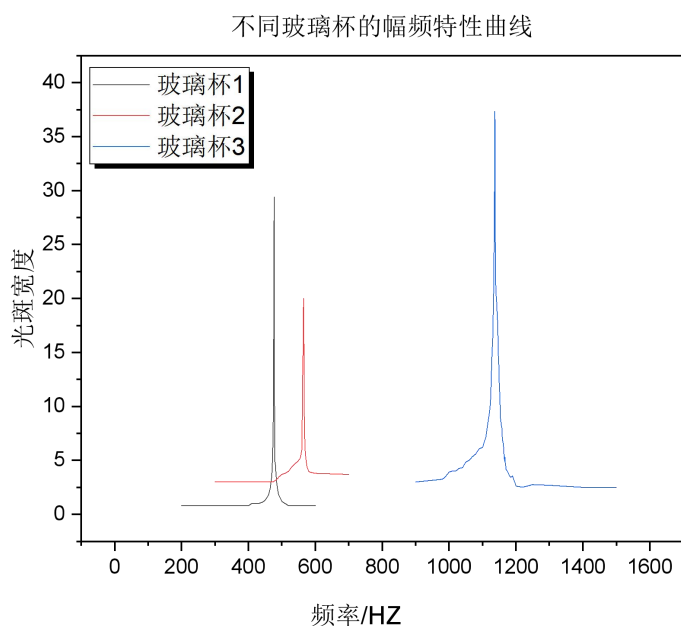


图 7 不同玻璃杯受迫振动幅频特性曲线

测量结果表明，玻璃杯 1、玻璃杯 2、玻璃杯 3 的振动频率分别为 476HZ、567HZ、1125HZ。在测量过程中，玻璃杯受迫振动的幅度随着声波频率的变化而变化。当声波逐渐接近其玻璃杯的固有频率时，玻璃杯的振幅会逐渐变大；当声波的频率超过玻璃杯的固有频率，逐渐远离时，玻璃杯的振幅又会逐渐减小。

#### 4、玻璃杯中加入液体后，共振频率会发生变化

在测量过程中，我们小组无意中把某种液体加入玻璃杯，发现其共振频率发生变化。那在玻璃杯中加入不同的液体，共振频率会发生什么样的变化呢？

我们选择共振频率为 567HZ 的玻璃杯，在其中加入 300ml 水，利用上述相同方法测量盛水玻璃杯的共振频率，测量结果如下：

	空玻璃杯	盛水玻璃杯
共振频率	567HZ	446HZ

由以上测量结果可知，在玻璃杯中加入液体后，玻璃杯的共振频率会发生明显变化。

#### 5、通过共振频率，测量玻璃杯中液体的浓度

在玻璃杯中加入液体会使得玻璃杯的共振频率发生明显变化，那么，在固定液体质量的情况下，改变液体的浓度，测量玻璃杯的共振频率是否会发生有规律的变化呢？在一次小组讨论中，老师提出这样的问题，再一次要求我们通过实验进行测量。

我们选择共振频率为 567HZ 的玻璃杯，在其中加入总质量为 300g，浓度不

同的乙二醇溶液，利用上述相同的方法测量盛有溶液的玻璃杯的共振频率。测量数据及拟合结果如图 8 所示。

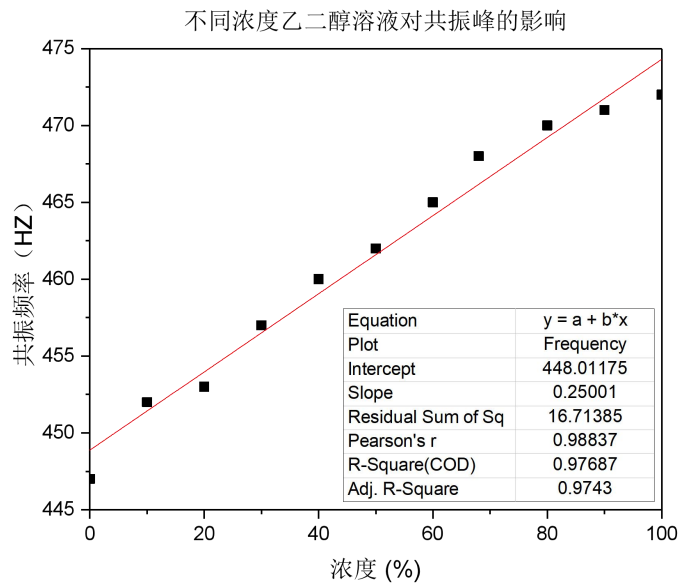


图 8 玻璃杯装载同质量不同浓度溶液后共振频率测量及拟合曲线

根据图 8 的拟合结果，我们得到了玻璃杯装载乙二醇其共振频率和浓度的关系。随后我们有配置溶液浓度为 25% 的乙二醇溶液，测量其共振频率后，带入公式，计算其浓度为 27%，相对误差较小，证明该方法可以测量某种溶液的浓度。

## 6、总结

通过课堂上老师提出的一个问题，我们小组在老师的指导下自行设计实验，完成测量，得到以下结论。

1. 观察到玻璃杯受迫振动的现象；
2. 利用《大学物理实验》课程中光学放大法，测量玻璃杯的受迫振动的振幅。结合《模拟电路分析与设计》课程中光电转换电路，测量出玻璃杯受迫振动的频率；
3. 利用上述测量，测量出不同玻璃杯的固有频率、测量装载不同液体后玻璃杯固有频率的变化；
4. 测量装载同一质量不同浓度溶液时，玻璃杯的共振频率。根据测量数据，拟合出浓度-共振频率曲线。利用该方法可以测量溶液的浓度，测量结果误差小。

在上述实验过程中，我们不断对实验进行反思，将光学、电学、波动学知识融会贯通，对实验结果多次分析和论证，将课本知识成功迁移到实际应用中。

## 7、应用拓展与学科交叉

该实验方案涉及到物体振动频率、共振频率的测量方法，以及溶液浓度测量



方法。其中，测量振动频率的方法在实际生活中的应用范围广泛，可作为高大建筑物、桥梁、车轨等的振动频率的监测，避免高大建筑物等共振引起危害；或可作为电机、金属器材的振动频率质检。

小组成员中大气科学学院学生，在实验结束后，综合了大气科学专业中流体力学方面的知识，利用本实验中测量物体振动频率的方法测量卡曼涡旋脱落频率，进而计算出风速。根据这一综合创新与实验，设计出可以测量风速的实验仪器，提交了《卡曼涡旋振动测风仪》、《光电转换测振式测风仪》两项专利，现已成功申报。

## 8. 参考文献

- [1] 刘博，赵德林，大学物理（上册）[M]，科学出版社，2019, 1: 155-158
- [2] 刘博，赵德林，大学物理（上册）[M]，科学出版社，2019, 1: 188-190
- [3] 陈玉林，陈宣，大学物理实验 [M]，上海交通大学出版社，2017, 8:162-165
- [4] 王骥，宋方，林景东等，模拟电路分析与设计 [M]，清华大学出版社，2020, 9:275-277